



Investigation of the Effect of 3D Printing Parameters on the Bending Shape Recovery in 4D Printing Process

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hosseinzadeh M. H.^{1*},
Ghoreishi M.¹,
Narooei K.²

How to cite this article

Hosseinzadeh M. H*, Ghoreishi M, Narooei K. Investigation of the Effect of 3D Printing Parameters on the Bending Shape Recovery in 4D Printing Process. Modares Mechanical Engineering, 2022; 22(09):567-577.

¹ Mechanical Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

² Materials Science and Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
m.hadi.hosseinzadeh@gmail.com

Article History

Received: January 21, 2022
Accepted: April 24, 2022
ePublished: August 21, 2022

ABSTRACT

4D printing is an emerging phenomenon of additive manufacturing that is achieved by the 3D printing of shape memory materials. The printed parts can change their shapes when exposed to an external stimulus by controlling the 4D printing process. In this study, a relationship between applied pre-stress in the printing process and the amount of bending shape recovery was obtained using numerical simulations. Then, the effect of printing parameters of fused deposition modeling, including layer thickness, printing speed, and nozzle diameter on the applied pre-stress in the printed polylactic acid parts was investigated. To reduce the cost and time as well as to increase the validity and accuracy, the central composite design method was used. Seventeen experimental tests were performed, and a model was obtained between the mentioned parameters and applied pre-stress. In the following, R^2 and Adj R^2 of the model was obtained above 0.99 and 0.98, respectively, which indicates the high accuracy of the model. The model showed that the layer height, nozzle diameter, and printing speed have a significant effect on the applied pre-stress. Also, the applied pre-stress is inversely related to the layer height and nozzle diameter and is directly related to the printing speed. Simulations were performed under the conditions of maximum bending shape recovery and compared with the experimental model. The results showed that the error of the relationship between applied pre-stress and amount of shape recovery is 1.5%, and the experimental model of printing parameter's effect on the shape recovery is completely matched.

Keywords 4D Printing, Shape Memory Polymer, FDM, Response Surface Method, Numerical Simulation.

CITATION LINKS

[1] A review of selective laser melted NiTi shape ... [2] An overview on 3D printing technology: Technological ... [3] 4D printing self-morphing structures. [4] The Study of Scan Speed and Laser Power ... [5] Active printed materials for complex self-evolving ... [6] Materials and technical innovations in 3D printing ... [7] 3-D printing in the spare parts supply chain ... [8] 3D printing for soft robotics ... [9] 3D printing in aerospace and its long-term ... [10] 4D printing. [11] 4D printing: future insight in additive manufacturing. [12] A review of 4D printing. [13] Tunable polymer multi-shape memory effect. [14] Reduced time as a unified parameter determining ... [15] 3D printing of highly stretchable and tough hydrogels ... [16] An integrated design and fabrication strategy ... [17] From 3D to 4D printing: approaches and typical applications. [18] Influence of infill density and printing pattern on flexural properties of 3D printed ... [19] Effect of processing parameters on tensile properties of FDM 3D printed ... [20] Optimization of FDM process parameters for tensile properties ... [21] Four-dimensional printing using fused-deposition modeling ... [22] A review on the various processing parameters in FDM. [23] An investigation into the effect of thermal variables on the 3D printed ... [24] Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing. [25] Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist ... [26] Additive manufacturing-enabled shape transformations ... [27] Investigation of the Effect of 3D printing parameters on shape-shifting ... [28] An Experimental Study of Nozzle Temperature and Heat Treatment ... [29] An experimental investigation on structural design ... [30] Experimental characterization and thermoviscoelastic modeling ... [31] Investigation of hyperelastic models for nonlinear elastic behavior ... [32] Force and multiple-shape-recovery in shape-memory-polymers ... [33] The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms ... [34] Response surface methodology: process and product optimization ...

بررسی تأثیر پارامترهای چاپ سه‌بعدی بر روی بازایی شکلی خمشی در فرآیند چاپ چهاربعدی

محمد‌هادی حسین‌زاده^{۱*}، مجید قریشی^۱، کیوان نارویی^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
^۲ دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

چاپ چهاربعدی پدیده‌ای نوپه‌ور و توسعه‌یافته از ساخت افزایشی است که با چاپ سه‌بعدی قطعات حافظه‌دارشکلی به دست می‌آید. با کنترل‌پذیر نمودن فرآیند چاپ چهاربعدی، قطعات چاپ‌شده می‌توانند بعد از اعمال محرک خارجی تغییر شکل مشخصی داشته باشند. در این پژوهش به کمک شبیه‌سازی عددی، رابطه بین پیش تنش اعمالی در فرآیند چاپ بر میزان بازایی شکلی خمشی به دست آمد. سپس اثر پارامترهای ضخامت لایه، سرعت چاپ و قطر نازل در فرآیند لایه‌نشانی ذوبی بر میزان پیش تنش اعمالی در قطعات چاپ‌شده از جنس پلی‌لاکتیک اسید، بررسی شد. برای کاهش هزینه و زمان و همچنین بالا بردن اعتبار و دقت مدل تجربی، از طرح مرکب مرکزی که یکی از روش‌های سطح پاسخ در طراحی آزمایش است، استفاده شد. به کمک انجام ۱۷ آزمایش تجربی، مدلی بین پارامترهای بیان‌شده و میزان پیش تنش اعمالی در فرآیند چاپ سه‌بعدی به دست آمد. در ادامه کفایت مدل تجربی بررسی‌شده و همچنین R^2 و $Adj R^2$ مدل به ترتیب بالاتر از ۰/۹۹ و ۰/۹۸ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای آن است. مدل تجربی ارائه‌شده نشان داد که پارامترهای اندازه لایه، قطر نازل و سرعت چاپ، به ترتیب بیشترین اثر بر پیش تنش اعمالی را دارند. همچنین پیش تنش اعمالی در فرآیند چاپ چهاربعدی رابطه معکوس با ضخامت لایه‌ها و قطر نازل و رابطه مستقیم با سرعت چاپ دارد. به‌منظور صحت‌سنجی مدل تجربی، در شرایط بیشترین میزان بازایی شکلی خمشی، شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی انجام شد. نتایج نشان داد خطای رابطه بین پیش تنش اعمالی و میزان بازایی شکلی، ۱/۵ درصد و مدل تجربی اثر پارامترهای چاپ بر روی میزان بازایی شکلی کاملاً منطبق شده است.

کلیدواژه‌ها: چاپ چهاربعدی، پلیمرهای حافظه‌شکلی، لایه‌نشانی ذوبی، روش سطح پاسخ، شبیه‌سازی عددی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴

* نویسنده مسئول: m.hadi.hosseinzadeh@gmail.com

۱- مقدمه

ساخت افزایشی (Additive manufacturing) یکی از روش‌های ساخت پیشرفته است که به دلیل قابلیت ساخت قطعات پیچیده، سرعت بالا و هزینه پایین در تولید نمونه‌های اولیه، جایگزین بسیاری از روش‌های تولیدشده است [1-4]. چاپ سه‌بعدی برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ توسط چالز هال ابداع شد [5]. در ابتدا این فناوری به‌عنوان نمونه‌سازی سریع در قالب ساخت نمونه‌های اولیه طراحی برای کمک به طراحان استفاده می‌شد اما پس از چند

سال به سمت ساخت قطعات کاربردی توسعه یافت که به‌سرعت جایگاه خود را در صنایع مختلفی چون پزشکی [6]، خودروسازی [7]، رباتیک [8] و هوافضا [9] پیدا کرد. پس از سال‌ها سرانجام نوع جدیدی از چاپ تحت عنوان چاپ چهاربعدی در سال ۲۰۱۳ توسط تیبیتس، از محققین دانشگاه MIT معرفی شد [10]. باین‌حال که ساخت افزایشی خود فرآیند نوپه‌وری در عرصه ساخت پیشرفته است محققان چاپ چهاربعدی را آینده ساخت افزایشی می‌دانند [11]. این نوع از چاپ به‌صورت تک‌ماده یا چند ماده امکان‌پذیر است و با استفاده از مواد هوشمند و یا ترکیبی از مواد هوشمند و مواد عادی انجام می‌شود. تفاوت چاپ چهاربعدی با چاپ‌های سه‌بعدی مرسوم امکان تغییر حالت (مانند تغییر شکل) قطعات پرینت شده به روش چاپ چهاربعدی بعد از پرینت با تحریک محرک‌های خارجی در طول زمان است [12]. در فرآیند چاپ چهاربعدی اغلب، محرک خارجی باعث تغییر شکل در مواد هوشمند می‌شوند که نمونه‌ای از این مواد، شامل پلیمرهای حافظه‌شکلی (Shape memory polymer) [13,14] و هیدروژل‌ها [15,16] است. در پلیمرهای حافظه‌شکلی می‌توان با عملیات برنامه‌ریزی، شکل موقتی را ایجاد نمود که پس از تحریک خارجی به شکل اولیه خود بازگردد. فرآیند چاپ چهاربعدی عملیات برنامه‌ریزی نمودن پلیمرهای حافظه‌شکلی را در حین چاپ به آن‌ها اعمال می‌کند و قطعه چاپ‌شده پس از اعمال تحریک خارجی، تغییر شکل می‌دهد [17].

روش لایه‌نشانی ذوبی (Fused Deposition Modeling) به علت ارزان و در دسترس بودن بیشترین کاربرد را در فرآیندهای ساخت افزایشی دارد. تحقیقات متعددی بر روی بررسی پارامترهای تأثیرگذار این فرآیند بر خواص مکانیکی قطعات ساخته شده انجام شده است [18]. برای مثال رارانی و همکاران [19] در پژوهش خود نشان دادند که پارامترهای چگالی شبکه، ضخامت لایه‌ها و سرعت چاپ می‌تواند در خواص قطعات PLA چاپ شده تأثیرگذار باشد. همچنین آن‌ها [20] در تحقیق بعدی خود نشان دادند می‌توان با بررسی پارامترهای فرآیند FDM و بهینه‌سازی آن، به خواص مکانیکی بهتری دست‌یافت. چاپ چهاربعدی به کمک این روش نیز موردتوجه محققان قرار گرفته است [21,22]. از این‌رو تحقیقات زیادی بر روی اثر پارامترهای فرآیند چاپ سه‌بعدی لایه‌نشانی ذوبی بر نوع تغییر شکل نهایی در این پلیمرها انجام شده است [21-23]. تغییر شکل نهایی پس از فرآیند چاپ چهاربعدی وابسته به پیش‌کنش ذخیره‌شده در رشته چاپ‌شده است [24]. مانن و همکاران [25] اثر ارتفاع لایه و دمای نازل بر مقدار پیش‌کنش ذخیره‌شده در رشته‌ی چاپ‌شده را در فرآیند چاپ چهاربعدی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد میزان پیش‌کنش ذخیره‌شده در رشته با دمای نازل و ارتفاع لایه رابطه عکس دارد. بدقی و همکاران [24] اثر پارامترهای دمای نازل و سرعت چاپ را بر روی رفتار خودتاشوندگی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نیز نشان داد که میزان

مرحله ۳: اعمال تنش خارجی برای ایجاد تغییر شکل مورد نظر؛
مرحله ۴: سرد شدن قطعه تا پایین دمای انتقال شیشه‌ای بدون برداشته شدن تنش خارجی؛

مرحله ۵: برداشته شدن تنش خارجی (قطعه در این حالت تغییر شکل ثانویه ایجاد شده در خود را، حفظ می‌نماید)؛

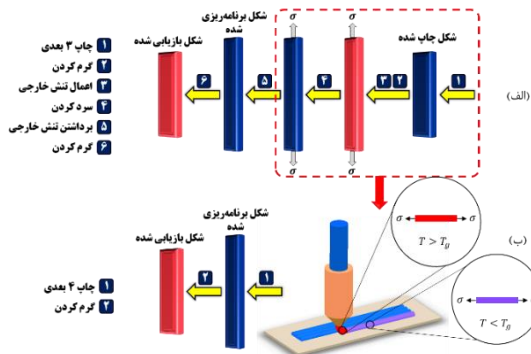
مرحله ۶: گرمایش مجدد تا دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) یا بالاتر، و بازگشت قطعه به شکل اولیه خود (بازیابی شکلی).

در فرآیند چاپ چهاربعدی، فرآیند برنامه‌ریزی کردن (Programming process) پلیمرهای حافظه شکلی (خط‌چین قرمز در شکل ۱ الف) در هنگام چاپ سه‌بعدی به قطعه اعمال می‌شود. یعنی با تغییر پارامترهای روش لایه‌نشانی ذوبی، عملیات برنامه‌ریزی کردن به‌گونه‌ای در پلیمرهای حافظه شکلی اعمال می‌شود که قطعه ساخته شده اگر در دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) یا بالاتر از آن قرار گیرد به شکل مدنظر و کنترل شده باز می‌گردد.

شکل ۱ ب فرآیند چاپ چهاربعدی یا همان برنامه‌ریزی پلیمرحافظه‌شکلی به کمک فناوری ساخت افزایشی لایه‌نشانی ذوبی را نشان می‌دهد که در این پژوهش از آن استفاده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، زمانی که ماده (فیلامنت) از نازل عبور می‌کند دمای آن تا بالای دمای Tg افزایش می‌یابد و در این حالت به علت سرعت بالای حرکت نازل، رشته‌های اکستروژده شده بر روی میز دستگاه یا لایه‌های پایین‌تر در جهت چاپ کشیده شده و تنش کششی بر روی آن اعمال می‌شود [3]. در ادامه این رشته‌ها به کمک فن دستگاه یا در تعامل با محیط (دمای محیط کمتر از دمای Tg فیلامنت است)، سرد می‌شوند و دمای آن به پایین دمای Tg می‌رسد. به علت سرعت بالای سرد شدن، ماده مورد نظر فرصت آزاد نمودن تنش کششی اعمال شده به رشته‌ها را ندارد به همین علت این تنش کششی به‌عنوان پیش تنش در آن‌ها ذخیره می‌شود.

در فرآیند چاپ چهاربعدی، ۶ مرحله چرخه بازیابی شکلی پلیمرهای حافظه‌شکلی به ۲ مرحله کاهش می‌یابد که با توجه به شکل ۱ ب به شرح زیر است:

مرحله ۱: چاپ چهاربعدی و اعمال پیش تنش برنامه‌ریزی شده برای کنترل نوع و میزان بازیابی شکلی قطعه چاپ شده؛



شکل ۱ الف) چرخه بازیابی شکلی پلیمر حافظه‌شکلی چاپ شده توسط چاپگر سه‌بعدی، ب) شماتیکی از فرآیند چاپ چهاربعدی.

پیش کرنش ذخیره شده در قطعه چاپی با دمای نازل رابطه عکس و با سرعت چاپ رابطه مستقیم دارد. رابوچاندرا و همکاران [26] اثر جهت چاپ و سرعت چاپ را بر روی بازیابی شکلی چند نوع پلیمر حافظه شکلی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه دست‌یافتند که جهت چاپ هم‌مرکز منجر به بازیابی شکلی مخروطی می‌شود و سرعت چاپ با میزان ارتفاع مخروط رابطه مستقیم دارد. جمشیدی و همکاران [27] به بررسی پارامترهای فرآیند چاپ سه‌بعدی در تغییر شکل ساختارهای مسطح به شکل‌های سه‌بعدی پرداختند. به این منظور 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 مشخص شدند.

همان‌طور که بیان شد، امروزه تحقیقات زیادی در چاپ چهاربعدی در رابطه با نوع تغییر شکل پس از اعمال پیش تنش (یا پیش‌کرنش) انجام شد. اما در چاپ چهاربعدی علاوه بر نوع تغییر شکل بازیابی کنترل میزان آن بسیار اهمیت دارد چون فرآیند چاپ چهاربعدی را کنترل‌پذیر می‌نماید. با کنترل‌پذیر نمودن نوع و میزان تغییر شکل پس از فرآیند چاپ چهاربعدی، می‌توان این فرآیند را توسعه داد و به کاربردهای جدید دست‌یافت. از این رو در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهای چاپ سه‌بعدی بر روی بازیابی شکلی خمشی در فرآیند چاپ چهاربعدی پرداخته شد. از آنجایی که حسین‌زاده و همکاران [23] در مطالعات خود با بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند بازیابی شکلی نشان دادند که پلیمر پلی‌لاکتیک اسید می‌تواند بازیابی شکلی بسیار مناسبی داشته باشد، بنابراین در این پژوهش از این ماده استفاده شده است. در این پژوهش ابتدا به کمک شبیه‌سازی عددی رابطه بین میزان پیش تنش اعمالی بر بازیابی شکلی خمشی محاسبه شد. در ادامه به منظور انجام آزمایش‌های تجربی برای بررسی اثر پارامترهای اندازه لایه، سرعت چاپ و قطر نازل در چاپ سه‌بعدی بر میزان پیش تنش اعمالی، از طراحی آزمایش استفاده شد. طراحی آزمایش به کمک طرح مرکب مرکزی از زیرمجموعه‌های روش سطح پاسخ انجام شد. سپس به کمک آزمایش تجربی، مدل تجربی به دست آمده صحت‌سنجی شد.

۲- اصول فرآیند چاپ چهاربعدی

پلیمرهای حافظه شکلی دسته‌ای از مواد هوشمند هستند که می‌توانند با تحریک خارجی مانند دما تغییر شکل دهند. چرخه ترمومکانیکی پلیمرهای حافظه شکلی در شکل ۱ الف نشان داده شده است که شامل مراحل زیر است:

مرحله ۱: چاپ پلیمرحافظه‌شکلی به کمک روش‌های چاپ سه‌بعدی؛

مرحله ۲: گرم شدن قطعه تا دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) یا بالاتر از آن؛

بیشتر می‌شود^[25]. از آنجایی که افزایش دمای میز چاپ می‌تواند موجب آزاد شدن تنش‌های ذخیره‌شده در رشته‌ها شود، دمای میز چاپ در محدوده دمای محیط یعنی ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. جدول ۱ پارامترهای چاپ سه‌بعدی در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱) پارامترهای چاپ سه‌بعدی با روش لایه‌نشانی ذوبی

نوع پارامتر	تنظیمات چاپگر	مقدار
پارامترهای متغیر	ضخامت لایه	۰/۳ - ۰/۱ mm
	سرعت چاپ	۲۰-۱۲۰ mm/s
	قطر نازل	۰/۸، ۰/۶، ۰/۴ mm
پارامترهای ثابت	درصد پرشدگی	۱۰۰٪
	دمای نازل	۱۹۰ C°
	دمای میز چاپ	۲۵ C°
	قطر فیلامنت	۱/۷۵ mm

۴- شبیه‌سازی اجزاء محدود

شبیه‌سازی اجزاء محدود برای بررسی پیش تنش اعمالی، به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام شده و از مدل ماده ترمو-ویسکوهایپیرالاستیک استفاده گردید. در این مدل تنش ایجادشده در جسم علاوه بر وابسته بودن به میزان تغییر شکل، به زمان یا نرخ اعمال بارگذاری (نرخ کرنش) و دما نیز وابسته است. برای اعمال وابستگی به زمان در آباکوس از تحلیل ویسکوالاستیک و با انتخاب سری پرونی استفاده می‌شود. در این حالت ضرایب τ_i (زمان آسایش)، k_i (مدول حجمی نسبی) و g_i (مدول استراحت برشی نسبی) بر پایه ضرایب ارائه‌شده توسط آریتا و همکاران^[30] برای پلیمرهای حافظه‌شکلی، اعمال شد (جدول ۲) که k_i در هر ۲۰ شاخه صفر است. همچنین به علت تغییرشکل‌های زیاد در حالت الاستیک، لازم است از مدل هایپیرالاستیک استفاده شود^[31] که در این تحقیق از مدل نئوهوکین با ضرایب C_{10} برابر با ۱۰۹/۷۳ مگاپاسکال استفاده گردید^[30]. علاوه بر این، برای محاسبه اثر تغییرات دما از اصل برهم‌نهی دما-زمان استفاده شد. به عبارت دیگر، با تغییر در مقیاس زمانی، می‌توان اثرات تغییرات دما را در نظر گرفت^[32]. این امر به کمک رابطه WLF انجام شد (رابطه ۱)^[33].

$$\frac{1}{\log(\alpha_T)} = \frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (1)$$

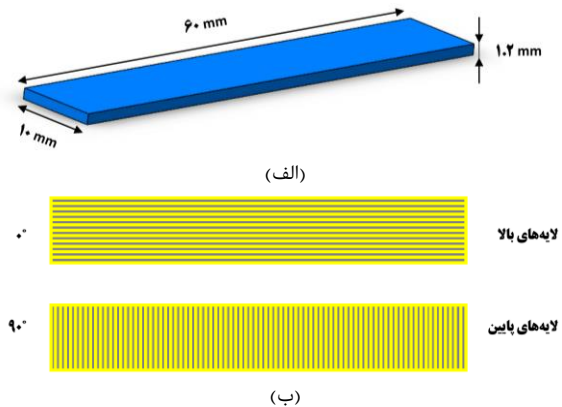
در این رابطه T_{ref} (دمای مرجع) برابر با ۸۰ درجه سانتی‌گراد و همچنین ثابت‌های C_1 و C_2 به ترتیب برابر با ۶/۹ و ۸۷/۹ درجه سانتی‌گراد هستند^[30].

مطابق شکل ۳، برای اعمال شرایط اولیه چاپ در نمونه‌ها، در لایه‌های بالا و پایین نمونه بر اساس جهت‌گیری رشته‌های چاپ‌شده، پیش تنش در نمونه اعمال گردید. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، برای لایه‌های بالا که در جهت ۰ درجه قرار دارند، پیش تنش σ_{11} و برای لایه‌های پایین که در جهت

مرحله ۲: افزایش دما به بالاتر از دمای Tg که موجب بازیابی شکلی قطعه خواهد شد که در این حالت قطعه در جهت رشته‌ها منقبض و در جهت دیگر منبسط خواهند شد^[25].

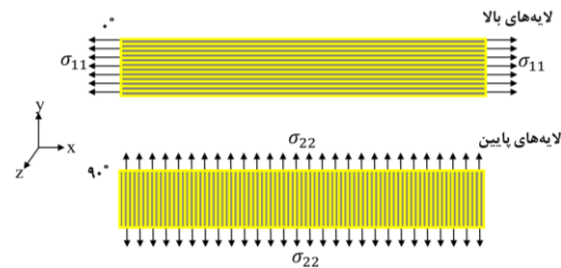
۳- آماده‌سازی نمونه

در این پژوهش قطعات به کمک فرآیند لایه‌نشانی ذوبی، چاپ‌شده و از رشته‌های پلی لاکتیک اسید شرکت Z.F.Filaments Private Limited استفاده شد. تحقیقات نشان داد که این ماده علاوه بر خاصیت چاپ پذیری بالا و ارزان بودن، بازیابی شکلی خوبی از خود نشان می‌دهد^[28,29]. مطابق شکل ۲ الف تمامی نمونه‌ها به صورت مکعب مستطیل در ابعاد ۶۰×۱۰×۱/۲ میلی‌متر ساخته شد.



شکل ۲) الف) شماتیکی از ابعاد نمونه. ب) شماتیکی از زاویه چاپ رشته‌ها در فرآیند چاپ سه‌بعدی که برای لایه‌های بالایی ۰ درجه و لایه‌های پایینی ۹۰ درجه است.

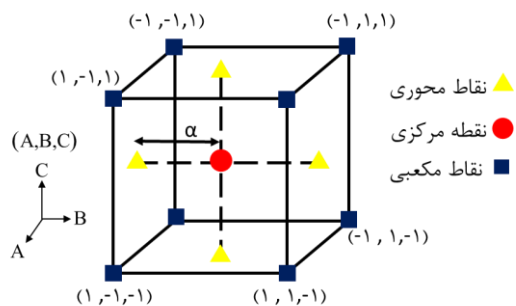
برای برنامه‌ریزی قطعات جهت بازیابی شکلی خمشی، رشته‌ها در راستای ضخامت به دو قسمت تقسیم‌شده که رشته‌های چاپی در لایه‌های بالا در جهت ۹۰ درجه و لایه‌های پایینی در جهت ۰ درجه چاپ شدند (شکل ۲ ب). این شرایط چاپ پیش تنش (یا پیش‌کرنشی) در قطعات برنامه‌ریزی می‌کند که در زمان بازیابی، تغییر شکل خمشی به دست می‌آید. همان‌طور که در بخش مقدمه بررسی شد، پارامترهای چاپ سه‌بعدی بر نوع و میزان بازیابی شکلی قطعات ساخته‌شده در فرآیند چاپ چهاربعدی مؤثر هستند. یعنی با بررسی اثر پارامترهای چاپ و به دست آوردن رابطه آن با مقدار پیش تنش (یا پیش‌کرنش) می‌توان مقدار و جهت بازیابی شکلی ایجادشده در قطعه را پیش‌بینی و کنترل نمود. برای بررسی تأثیر پارامترهای چاپ بر مقدار پیش تنش، در این پژوهش پارامترهای ارتفاع لایه، سرعت چاپ و قطر نازل به‌عنوان پارامترهای متغیر بررسی شدند. همچنین سایر پارامترهای چاپ مانند درصد پرشدگی، دمای نازل و دمای میز چاپ به‌عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته شد. دمای نازل در حین چاپ، ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد زیرا هرچه دمای نازل در زمان چاپ کمتر باشد پیش‌کرنش ایجادشده و در نتیجه تغییر شکل بازیابی



شکل ۳) شماتیک پیش تنش وارده به لایه‌های بالا و پایین قطعه در شبیه‌سازی اجزاء محدود.

دستیابی به بیشترین اطلاعات باشد، ایده‌آل محققان است. زمانی که تعداد عوامل ورودی زیاد شود به‌صورت صعودی هزینه و زمان آزمایش‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین به روشی نیاز است که در آن بتوان با صرف حداقل هزینه و زمان، به بیشترین اطلاعات در مورد فرآیند آزمایش دست پیدا کرد. روشی که به بهترین شکل اهداف ذکرشده را برآورده می‌سازد، طراحی آزمایش نام دارد. درواقع طراحی آزمایش، دانشی است که به کمک آن می‌توان نحوه اثرگذاری هر یک از عوامل مؤثر بر خروجی را به شکل یک معادله بیان کرد^[34]. روش سطح پاسخ یا به‌اختصار RSM از روش‌های ریاضی و تحلیل‌های آماری برای ساخت مدل‌های تجربی استفاده می‌کند. در این روش علاوه بر اثرات اصلی بین فاکتورها، امکان تخمین اثرات تعاملی و برهمکنش بین فاکتورها (اثرات متقابل) نیز فراهم است^[34].

در این پژوهش طراحی آزمایش به کمک طرح مرکب مرکزی با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌اکسپرت (Design Expert) انجام شد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، این طرح مشابه روش طراحی عاملی یا طراحی عاملی کسری است که علاوه بر آن، شامل نقاط مرکزی و نقاط محوری نیز است. پارامتر α فاصله نقاط محوری تا نقطه مرکزی را نشان می‌دهد که مقدار دقیق آن به نوع طراحی آزمایش و تعداد فاکتورها بستگی دارد. در این پژوهش به علت محدودیت در انتخاب اندازه قطر نازل (به‌عنوان یکی از فاکتورهای آزمایش)، مقدار α برابر با یک در نظر گرفته شد. اگر مقدار α برابر با یک باشد به آن طرح مرکب مرکزی چهره محور خاصی از طرح مرکب مرکزی است. در طرح مرکب مرکزی چهره



شکل ۴) شماتیکی از طرح مرکب مرکزی در حالت $\alpha=1$.

جدول ۲) ضرایب سری پرونی برای تحلیل رفتار ویسکوالاستیک پلیمرحافظه‌شکلی^[30]

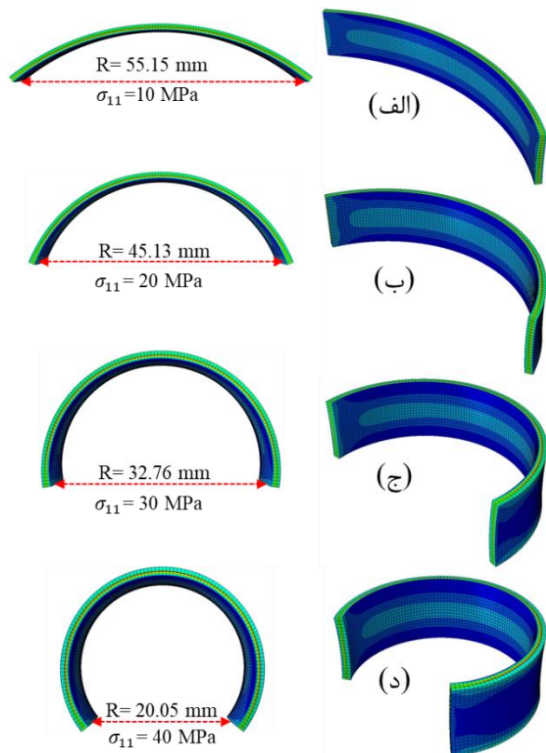
نوع ضریب مقدار (s)	نوع ضریب	مقدار (s)	نوع ضریب	مقدار	نوع ضریب	مقدار
τ_1	τ_{11}	$6.08e-3$	g_1	0.187	g_{11}	0.00583
τ_2	τ_{12}	0.042	g_2	0.156	g_{12}	0.00319
τ_3	τ_{13}	0.0332	g_3	0.138	g_{13}	0.00185
τ_4	τ_{14}	0.0775	g_4	0.124	g_{14}	0.00105
τ_5	τ_{15}	0.181	g_5	0.113	g_{15}	$5.64e-4$
τ_6	τ_{16}	0.423	g_6	0.0987	g_{16}	$2.86e-4$
τ_7	τ_{17}	0.988	g_7	0.0758	g_{17}	$1.44e-4$
τ_8	τ_{18}	2.13	g_8	0.0475	g_{18}	$7.42e-5$
τ_9	τ_{19}	5.39	g_9	0.0245	g_{19}	$3.91e-5$
τ_{10}	τ_{20}	12.6	g_{10}	0.017	g_{20}	$2.07e-5$

۹۰ درجه قرار دارند پیش تنش σ_{22} اعمال شده است. شرایط چاپ در لایه‌های بالا و پایین کاملاً مشابه هم بوده و تنها جهت‌گیری رشته‌ها و در نتیجه طول آن‌ها متفاوت است. به علت اینکه طول قطعه ۶ برابر عرض آن است پس طول رشته‌ها در لایه‌های بالا ۶ برابر طول رشته‌ها در لایه پایین است. در این حالت فرض می‌شود پیش تنش لایه‌های بالا و پایین نیز به همین نسبت اعمال می‌شود یعنی $\sigma_{11} = 6 \times \sigma_{22}$ است. با اعمال این پیش تنش در حالت اولیه شبیه‌سازی، درواقع فرآیند برنامه‌ریزی در پلیمر حافظه‌شکلی انجام شده است. زمانی که نمونه تا دمای انتقال شیشه‌ای یا بالاتر از آن گرم شود این پیش تنش آزاد شده و فرآیند بازیابی شکلی ایجاد می‌شود. بنابراین میزان و نوع این بازیابی شکلی مستقیماً وابسته به مقدار و جهت پیش تنش وارده است. در این پژوهش به کمک نوشتن اسکریپت (Script) با زبان پایتون برای نرم‌افزار آباکوس، مقادیر σ_{11} از ۱۰ تا ۵۰ مگاپاسکال تغییر کرده و میزان بازیابی شکلی متناظر آن محاسبه شد. سپس با توجه به این مقادیر و پاسخ آن توسط نرم‌افزار رابطه بین مقدار پیش تنش (σ_{11}) و میزان بازیابی شکلی به دست آمد. برای شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس از تحلیل کوپل جابجایی و دما و المان خطی استاندارد مختص تحلیل کوپل جابجایی و دما استفاده شد. برای قسمت بارگذاری در شرایط اولیه پیش تنش σ_{11} و σ_{22} مطابق شکل ۳ اعمال شد. بر اساس پژوهش گذشته، دمای انتقال شیشه‌ای برای ماده مورد نظر به کمک آزمون DMTA، $59/23$ درجه سانتی‌گراد محاسبه گردید^[23]. بنابراین در قسمت بارگذاری اولیه، دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد (بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای) اعمال شد که قطعه به‌صورت آزاد و بدون تکیه‌گاه فرآیند بازیابی شکلی را انجام دهد.

۵- طراحی آزمایش

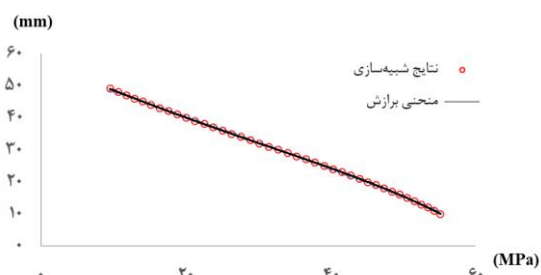
انجام آزمایش‌های تجربی همواره هزینه‌بر و زمان‌بر است، از این رو انجام آزمایش‌های مؤثر که با صرف حداقل هزینه و زمان

به دست آید. بازه پیش تنش‌ها از ۱۰ تا ۵۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد که مقدار R در بازه ۵۵/۱۵ تا ۹/۵۷ میلی‌متر قرار گرفت. نمونه‌ای از این شبیه‌سازی‌های بازیابی شکلی با پیش تنش اعمالی (σ_{11}) ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال را می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد. برای محاسبه مقدار R در هر یک از شبیه‌سازی‌های عددی، فاصله بین دو نقطه میانی لبه‌های تیر بعد از بازیابی شکلی، اندازه‌گیری شد و به کمک برنامه‌نویسی پایتون، مقادیر R برای هر مقدار پیش تنش اعمال شده، در قالب یک جدول بدست آمد.



شکل ۶ شبیه‌سازی عددی بازیابی شکلی با پیش تنش اعمالی (σ_{11}) (الف) ۱۰، (ب) ۲۰، (ج) ۳۰ و (د) ۴۰ مگاپاسکال.

داده‌های شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده در نمودار شکل ۷ نشان داده شد. که با توجه به نتایج شبیه‌سازی، میزان R برای پیش تنش‌های متعددی به دست آمد که رابطه بین آن‌ها به کمک برازش منحنی در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد (رابطه ۲). رابطه به دست آمده چند جمله‌ای مرتبه ۴ است که دقت بالای دارد چون R^2 آن یک محاسبه شد.



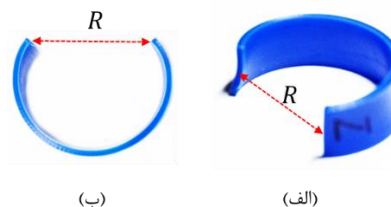
شکل ۷ نمودار میزان خمش (R) برحسب میزان پیش تنش (σ_{11}) اعمال شده.

محور فاکتورهای ضخامت لایه‌ها (A)، سرعت چاپ (B) و قطر نازل (C) در سه سطح +۱، ۰ و -۱ مورد بررسی قرار می‌گیرند. با توجه به شرایط ذکر شده و تعداد ۳ بار تکرار در نقطه مرکزی، مجموعاً ۱۷ آزمایش پیش‌بینی شد.

۶- نتایج و بحث

۶-۱- شبیه‌سازی عددی

نحوه اندازه‌گیری میزان بازیابی شکلی در نتایج شبیه‌سازی عددی یا آزمایش‌های تجربی در شکل ۵ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، مقدار R، میزان بازیابی شکلی خمشی را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری میزان خمش (R) پس از بازیابی شکلی در نمونه‌های تجربی، از کولیس با قابلیت تفکیک ۰/۰۲ میلی‌متر استفاده شد که فاصله بین ۲ سر تیر اندازه‌گیری می‌شود. در حالت اولیه مقدار آن برابر است با طول قطعه یعنی ۶۰ میلی‌متر که در بازیابی شکلی مقدار آن کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشخص است مقدار R با میزان بازیابی شکلی خمشی رابطه عکس دارد.



شکل ۵ نحوه تغییر شکل و اندازه‌گیری بازیابی شکلی خمشی در نمای (الف) روبرو و (ب) جانبی.

چرخه ترمومکانیکی پلیمرهای حافظه‌شکلی با تحریک دمایی شامل فرآیند برنامه‌ریزی کردن و فرآیند بازیابی شکلی است. به مراحل افزایش دما (تا دمای انتقال شیشه‌ای یا بالاتر)، اعمال نیروی خارجی برای ایجاد تغییر شکل، سرد کردن سریع با نگه‌داشتن تغییر شکل (برای ذخیره تغییر شکل اعمال شده) فرآیند برنامه‌ریزی کردن (اعمال پیش‌کنش یا پیش تنش) بر روی قطعه می‌گویند. با توجه به مطالبی که در بخش‌های قبلی گفته شد، در فرآیند چاپ سه‌بعدی لایه نشانی ذوبی، می‌توان این پیش تنش (یا پیش‌کنش) را در زمان ساخت به قطعه اعمال کرد. مقدار این پیش تنش به پارامترهای متعددی از جمله پارامترهای هندسی و دمایی فرآیند چاپ، نوع ماده و پارامترهای محیطی مانند دمای محیط وابسته است. برای محاسبه این پیش تنش اعمال شده در نمونه‌ها در این پژوهش از شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. به دلیل اینکه فرآیند برنامه‌ریزی در زمان چاپ، به قطعه اعمال می‌شود شبیه‌سازی عددی برای مرحله بازیابی شکلی، انجام شد. هدف به دست آوردن پیش تنش اعمالی برای میزان خمش در بازیابی شکلی است. برای تحقق این امر، به کمک برنامه‌نویسی پایتون، ۴۰ شبیه‌سازی عددی پی‌درپی انجام شد تا مقدار R متناظر پیش تنش‌های اعمال شده

توجه یا بدون تأثیر شده است. این نتیجه نشان می‌دهد حذف ترم‌های غیر موثر اثر نامناسبی در مدل ندارد. برای بررسی میزان تشابه داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده از R^2 استفاده می‌شود که در این مدل بالای ۹۹٪ است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. همچنین R^2 Adj برای مدل بالای ۹۸٪ به دست آمد که عدم تأثیر ترم‌هایی که قابل توجه نیستند را نشان می‌دهد.

جدول (۴) تحلیل واریانس مدل میزان خمش

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	۲۷۶۰/۱۴	۱۳	۲۱۲/۳۲	۷۵/۸۴	۰/۰۰۲۲
A-Layer Thickness	۲۳۵/۵۲	۱	۲۳۵/۵۲	۸۴/۱۳	۰/۰۰۲۷
B-Print Speed	۴۹/۵۵	۱	۴۹/۵۵	۱۷/۷۰	۰/۰۲۴۵
C-Nozzle Diameter	۲۲۳	۱	۲۲۳	۷۹/۶۶	۰/۰۰۳۰
AB	۲۹/۴۹	۱	۲۹/۴۹	۱۰/۵۳	۰/۰۴۷۶
AC	۶۳/۶۳	۱	۶۳/۶۳	۲۲/۷۳	۰/۰۱۷۵
BC	۳۶/۷۳	۱	۳۶/۷۳	۱۳/۱۲	۰/۰۳۶۲
A ²	۵۹/۳۱	۱	۵۹/۳۱	۲۱/۱۹	۰/۰۱۹۳
B ²	۱۵/۶۳	۱	۱۵/۶۳	۵/۵۸	۰/۰۹۹۲
C ²	۴۰/۹۳	۱	۴۰/۹۳	۱۴/۶۲	۰/۰۳۱۵
A ² B	۶/۵۵	۱	۶/۵۵	۲/۳۴	۰/۲۲۳۵
A ² C	۱۱۱/۷۸	۱	۱۱۱/۷۸	۳۹/۹۳	۰/۰۰۸۰
AB ²	۲۹/۳۲	۱	۲۹/۳۲	۱۰/۴۷	۰/۰۴۸۰
A ² B ²	۱۰۸/۲۹	۱	۱۰۸/۲۹	۳۸/۶۸	۰/۰۰۸۴
Residual	۸/۴۰	۳	۲/۸۰		
Lack of Fit	۲/۱۹	۱	۲/۱۹	۰/۷۰۳۴	۰/۴۸۹۹
Pure Error	۶/۲۱	۲	۳/۱۱		
Cor Total	۲۷۶۸/۵۴	۱۶			
$R^2 = 0.9970$, $Adj R^2 = 0.9838$					

شکل ۸ نمودار باقیمانده‌ها و درصد احتمال نرمال را نشان می‌دهد که برای بررسی بیشتر صحت مدل به دست آمده از استفاده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شکل ۸ الف باقیمانده‌ها به صورت تصادفی، مقادیر مثبت یا منفی مناسبی دارند و این نشان‌دهنده پراکندگی مناسب و استقلال باقیمانده‌ها است. شکل ۸ ب نمودار احتمال نرمال را نشان می‌دهد که برای بررسی دقیق‌تر پراکندگی داده‌ها می‌توان از استفاده نمود. با توجه به آن، داده‌ها حول خط باقیمانده هستند که نشان‌دهنده صحت مدل به دست آمده است.

برای محاسبه مقدار پیش تنش اعمالی در فرآیند چاپ چهاربعدی، مطابق مدل تجربی به دست آمده، می‌توان از رابطه ۳ در حالت مقادیر واقعی پارامترها استفاده نمود. در واقع به کمک این رابطه می‌توان مقدار خمش (R) را به کمک پارامترهای هندسی چاپ سه‌بعدی، یعنی مقادیر ضخامت لایه‌ها (A)، سرعت چاپ (B) و قطر نازل (C) به دست آورد.

۲-۶- مدل تجربی

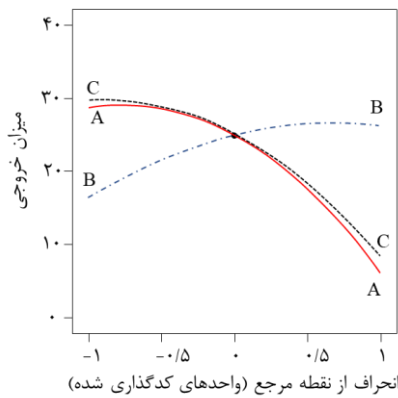
همان‌طور که اشاره شد، برای بررسی اثر پارامترهای ضخامت لایه، سرعت چاپ و قطر نازل بر میزان پیش تنش اعمالی در فرآیند چاپ چهاربعدی از طرح مرکب مرکزی استفاده شد. جدول ۳ مقادیر پارامترها در مجموعه ۱۷ آزمایش پیش‌بینی شده توسط این روش را نشان می‌دهد. آزمایش‌ها به ترتیب شماره انجام شده و پس از اندازه‌گیری میزان خمشی (R)، به کمک رابطه ۲ مقادیر σ_{11} محاسبه شده و در طرح مرکب مرکزی اعمال شد.

جدول (۳) نتایج آزمایش‌های انجام شده به همراه مقادیر پارامترهای مورد بررسی

شماره آزمایش	ضخامت لایه (A) mm	سرعت چاپ (B) mm/s	قطر نازل (C) mm	σ_{11} (MPa)*
۱	۰/۲	۷۰	۰/۶	۲۳/۲۴۱۶
۲	۰/۳	۱۲۰	۰/۸	۱۰/۱۶۷۲
۳	۰/۲	۱۲۰	۰/۶	۲۶/۲۶۰۸
۴	۰/۳	۲۰	۰/۴	۶/۸۶۰۶۶
۵	۰/۲	۷۰	۰/۸	۸/۴۹۲۸۳
۶	۰/۱	۷۰	۰/۶	۲۸/۷۱۳۴
۷	۰/۱	۱۲۰	۰/۴	۵۲/۹۵۸۷
۸	۰/۳	۲۰	۰/۸	۱۳/۴۳
۹	۰/۳	۱۲۰	۰/۴	۱۴/۲۵۹۲
۱۰	۰/۳	۷۰	۰/۶	۷/۰۰۹۸۹
۱۱	۰/۱	۱۲۰	۰/۸	۳۹/۶۷۶۷
۱۲	۰/۲	۷۰	۰/۶	۲۶/۷۴۸۶
۱۳	۰/۲	۷۰	۰/۴	۲۹/۶۱۱۴
۱۴	۰/۱	۲۰	۰/۸	۳۳/۱۶۹۲
۱۵	۰/۲	۷۰	۰/۶	۲۴/۶۸۵۹
۱۶	۰/۲	۲۰	۰/۶	۱۶/۳۰۵۷
۱۷	۰/۱	۲۰	۰/۴	۳۹/۹۷۰۹

جدول ۴ تحلیل واریانس طراحی آزمایش را نشان می‌دهد که برای تحلیل بهتر نتایج از نظر کمی و اثرگذاری پارامترها و تعامل آن‌ها بر خروجی استفاده می‌شود. مقدار P در این جدول برای بررسی اثرگذار بودن یک متغیر (پارامترها یا اثر تعاملی بین آن‌ها) بر خروجی فرآیند است. به گونه‌ای که اگر مقدار آن کمتر از ۰/۰۵ باشد نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه آن متغیر بر پاسخ است و بنابراین آن متغیر در مدل تجربی می‌آید و ضرایب آن محاسبه می‌شود. متغیرهایی که مقدار P در آن‌ها بیشتر از ۰/۰۵ باشد از مدل حذف می‌شوند.

با توجه به جدول ۴ مقادیر P همه متغیرها به غیر از A^2B و B^2 کمتر از ۰/۰۵ به دست آمد که نشان‌دهنده اثرگذاری آن‌ها بر پاسخ است. این دو متغیر به علت اینکه متغیر مرتبه بالاتر از آن‌ها یعنی A^2B^2 موثر است پس لازم است در مدل باقی بمانند. در جدول تحلیل واریانس مقدار P برای مدل نیز محاسبه شد که اولین معیار برای سنجش مدل است. این مقدار کمتر از ۰/۰۵ به دست آمد که نشان‌دهنده قابل توجه بودن مدل محاسبه شده است. معیار دیگر برای بررسی مدل، عدم برازش مدل (Lack of Fit) است که غیر قابل

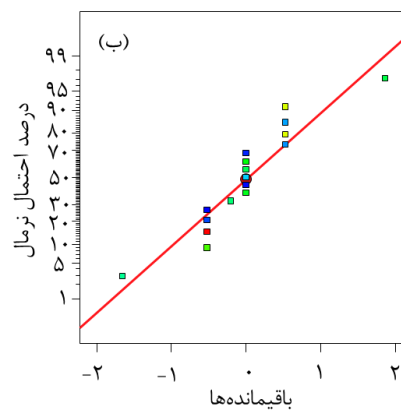
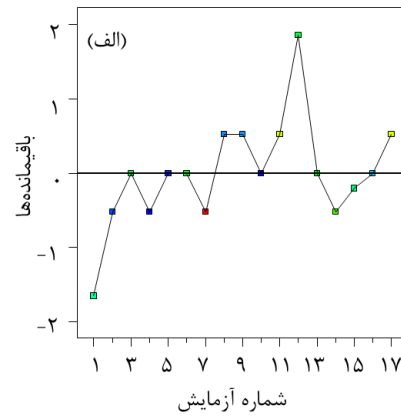


شکل ۹) نمودار تأثیر انحراف هریک از پارامترهای بر میزان خروجی مدل.

در شکل ۹ هرچقدر شیب منحنی پارامتر بیشتر باشد، حساسیت پاسخ مدل به آن پارامتر بیشتر خواهد بود. یعنی به ترتیب پارامتر A، B و C و اثرگذاری بیشتری بر خروجی مدل به دست آمده دارند. پارامتر A بیشترین اثرگذاری را بر خروجی مدل تجربی به دست آمده دارد. برای اینکه این میزان اثرگذاری مشخص شود از نمودار سه‌بعدی شکل ۱۰ استفاده شد. این شکل به ترتیب پارامتر A را در سطح +۱، ۰ و -۱ نشان می‌دهد و با توجه آن می‌توان دریافت که خروجی مدل چقدر تحت تأثیر این پارامتر است. برای مثال میزان پیش تنش ذخیره‌شده در قطعه زمانی بیشترین مقدار را خواهد گرفت که حتما ضخامت لایه در پایین‌ترین سطح یعنی ۰/۱ میلی‌متر قرار گیرد.

۳-۶- صحت‌سنجی

به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌های تجربی به دست آمده، بیشترین مقدار خمش یعنی $R=0\text{mm}$ در نظر گرفته شد. برای این میزان تغییر شکل بازایی خمشی، به کمک رابطه ۲ مقدار σ_{11} برابر با $07/09$ مگاپاسکال محاسبه‌شده و همچنین بر اساس آن مقدار σ_{22} برابر با $9/09$ فرض شد. حال به کمک رابطه ۳ برای پیش تنش $07/09$ مگاپاسکال، مقادیر پارامترهای چاپ سه‌بعدی یعنی ضخامت لایه، سرعت چاپ و قطر نازل محاسبه شدند که در جدول ۵ آمده است. با توجه به این تنظیمات، قطعه ساخته شد و پس از انجام آزمایش تجربی مقدار R برابر با صفر میلی‌متر اندازه‌گیری شد. این نتیجه نشان داد خطای رابطه ۳، بسیار ناچیز است. با توجه به مقادیر پیش تنش‌های محاسبه‌شده، شبیه‌سازی عددی فرایند بازایی شکلی خمشی انجام شد و مقدار R برابر با $0/9$ میلی‌متر محاسبه شد (شکل ۱۱). از آنجایی‌که فاصله بین دو سر تیر قبل از تغییر شکل 60 میلی‌متر بود و پس برای اینکه بعد از تغییر شکل خمشی دو سر تیر به هم برسند باید به اندازه 60 میلی‌متر جابجا می‌شدند که در اینجا $09/1$ میلی‌متر جابجا شدند. این نتیجه نشان داد خطای رابطه ۲ در این آزمایش $1/5$ درصد است که نشان از دقت بالای این مدل دارد.



شکل ۸) نمودار باقیمانده‌ها برای بازایی شکلی خمشی پلیمر پلی‌لاکتیک اسید بر الف) شماره آزمایش ب) درصد احتمال نرمال.

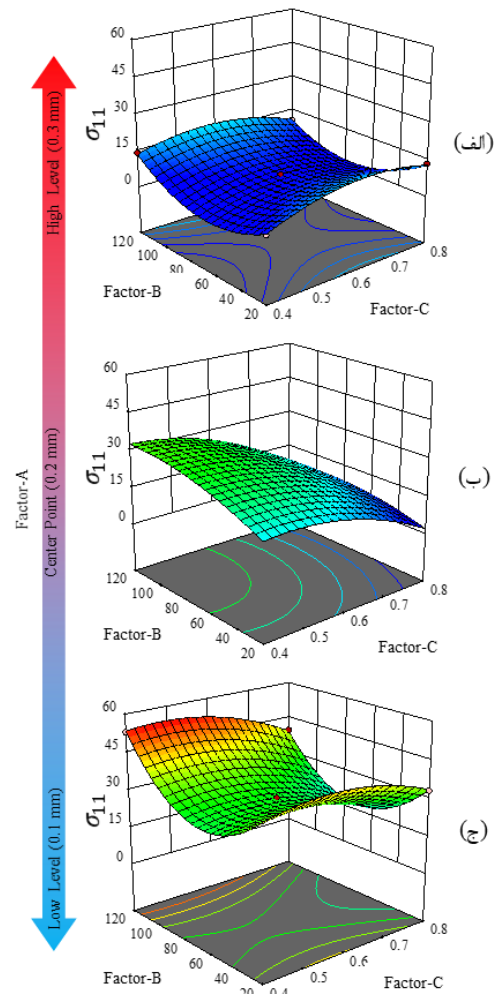
برای بررسی و مقایسه میزان تأثیر پارامترها بر خروجی مدل تجربی از نمودار شکل ۹ استفاده می‌شود. این نمودار حساسیت تغییر پارامترها بر خروجی مدل را نشان می‌دهد. برای مثال با ثابت نگه‌داشتن مقادیر پارامترهای C و B اگر مقدار پارامتر A از سطح -۱ به سطح +۱ حرکت کند میزان خروجی با توجه به شیب منحنی پارامتر A از حدود 30 مگاپاسکال به 10 مگاپاسکال کاهش می‌یابد. یعنی پیش تنش اعمالی در فرآیند چاپ چهاربعدی رابطه معکوس با ضخامت لایه‌ها دارد. با کاهش ضخامت لایه، تعداد لایه‌ها افزایش یافته که موجب افزایش تعداد رشته‌ها در ضخامت قطعه می‌شود. با توجه به اینکه در جهت رشته‌ها پیش تنش ذخیره می‌شود، بنابراین با افزایش تعداد رشته‌ها پیش تنش اعمال‌شده در قطعه نیز افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۹، پارامتر C (قطر نازل) نیز با پیش تنش اعمال‌شده رابطه عکس دارد. کاهش قطر نازل، قطر رشته‌ها را کاهش می‌دهد و این عامل باعث افزایش تعداد رشته‌ها در یک لایه می‌شود. همان‌طور که گفته شد، افزایش تعداد رشته‌ها باعث افزایش پیش تنش اعمالی شده است. با توجه به شکل ۹، افزایش پارامتر B (سرعت چاپ) موجب افزایش پیش تنش شده است. سرعت چاپ اگر افزایش یابد میزان کشیدگی رشته‌ها در فرآیند چاپ سه‌بعدی بیشتر شده که این امر باعث افزایش پیش تنش اعمال‌شده می‌شود.

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به توسعه فرآیند چاپ چهاربعدی و اهمیت محققان به مطالعه بر روی آن، بررسی پارامترهای فرآیند برای کنترل نمودن بازیابی شکلی نهایی آن امر مهمی است. از این رو در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامترهای چاپ سه‌بعدی بر روی میزان بازیابی شکلی خمشی در فرآیند چاپ چهاربعدی پرداخته شد. همچنین رابطه بین مقدار این پیش تنش اعمالی نسبت به میزان بازیابی شکلی خمشی به کمک شبیه‌سازی عددی محاسبه شد. در ادامه به منظور انجام آزمایش‌های تجربی برای بررسی اثر پارامترهای اندازه لایه، سرعت چاپ و قطر نازل در چاپ سه‌بعدی بر میزان پیش تنش اعمالی، از طراحی آزمایش استفاده شد. طراحی آزمایش به کمک طرح مرکب مرکزی از زیرمجموعه‌های روش سطح پاسخ انجام شد که با توجه به کاهش تعداد آزمایش‌ها، مدل تجربی با دقت بالایی ارائه می‌شود. در این پژوهش برای تحلیل آزمایش‌ها، مجموعاً ۱۷ قطعه چاپ شده و آزمایش بازیابی شکلی انجام شد. در این تحلیل R2 مدل ارائه شده بالاتر از ۰/۹۹ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل و تشابه داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر مدل پیش‌بینی شده است. همچنین Adj R2 که معیار دقیق‌تری برای بررسی تشابه داده‌ها است نیز بیشتر از ۰/۹۸ به دست آمد. با توجه به مدل به دست آمده نشان داده شد که به ترتیب پارامتر اندازه لایه، قطر نازل و سرعت چاپ اثرگذاری بیشتری بر خروجی مدل به دست آمده دارند. همچنین پیش تنش اعمالی در فرآیند چاپ چهاربعدی رابطه معکوس با ضخامت لایه‌ها و قطر نازل و رابطه مستقیم با سرعت چاپ دارد. در ادامه برای صحت‌سنجی روابط و مدل‌های به دست آمده، میزان تغییر شکل خمشی $R=0$ mm در نظر گرفته شد. به کمک رابطه بین پیش تنش اعمالی و میزان بازیابی شکلی، مقدار پیش تنش مورد نیاز محاسبه شد که در شبیه‌سازی عددی مقدار R برابر با ۰/۹ میلی‌متر به دست آمد. یعنی خطای این رابطه برابر با ۱/۵ درصد محاسبه شد که نشان‌دهنده دقت بالای آن است. برای بررسی مدل تجربی نیز پارامترهای ضخامت لایه، سرعت چاپ و قطر نازل برای این مقدار پیش تنش، به دست آمد و با توجه به آن آزمایش تجربی انجام شد. نتیجه تغییر شکل خمشی در آزمایش تجربی برابر با $R=0$ mm شد که بر اساس آن خطای مدل بسیار ناچیز محاسبه شد. رابطه پیش تنش اعمالی و میزان تغییر شکل خمشی و مدل تجربی تأثیر پارامترهای فرآیند بر میزان این پیش تنش اعمالی به دست آمده در این پژوهش می‌تواند نقشه‌راهی برای ادامه کار محققان برای کنترل نمودن فرآیند چاپ چهاربعدی باشد.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

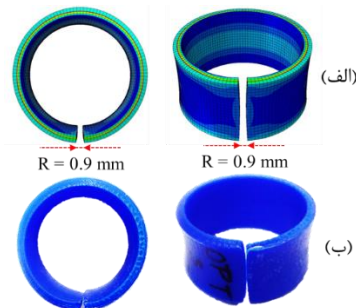
تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.



شکل ۱۰) نمودار مقادیر پیش تنش با تغییر پارامتر A در الف) سطح بالا (+۱)، ب) سطح میانی (۰) و ج) سطح پایین (-۱).

جدول ۵) مقادیر محاسبه شده پارامترهای چاپ سه‌بعدی، نتایج آزمایش تجربی و نتایج شبیه‌سازی عددی برای بازیابی خمشی $R=0$ mm.

قطر نازل (mm)	اندازه لایه (mm)	سرعت چاپ (mm/s)	R در نظر گرفته شده (mm)
۰/۴	۰/۰۵	۱۱۶	۰
پیش تنش محاسبه شده σ_{11} (MPa)	نتیجه شبیه‌سازی عددی (mm)	نتیجه آزمایش (mm)	
۵۷/۵۹	۰/۹	۰	



شکل ۱۱) الف) نتایج شبیه‌سازی عددی و ب) نتایج آزمایش تجربی برای بازیابی خمشی $R=0$ mm.

17- 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.

18- Mousavi Kani SM, Sadegh Yazdi M, Hosseinzadeh MH. Influence of infill density and printing pattern on flexural properties of 3D printed short carbon fiber PLA composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020;7(9):42-51.

19- Heidari-Rarani, M., Sadeghi, P., Ezati, N. Effect of processing parameters on tensile properties of FDM 3D printed of PLA specimens. *Journal of Science and Technology of Composites*, 2020; 7(2): 855-862.

20- Heidari-Rarani M, Ezati N, Sadeghi P, Badrossamay M. Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2020:0892705720964560.

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

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

23- 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.

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

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

26- Rajkumar AR, Shanmugam K. Additive manufacturing-enabled shape transformations via FFF 4D printing. *Journal of Materials Research*. 2018;33(24):4362-76.

27- Jamshidi M, Salimi Nezhad I, Golzar M, Behravesh AH. Investigation of the Effect of 3D printing parameters on shape-shifting of flat structures to Three-Dimensional Shapes. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2021;7(4):1271-8.

28- 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.

29- 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.

30- 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.

31- Hosseinzadeh M, Ghoreishi M, Narooei K. Investigation of hyperelastic models for nonlinear elastic behavior of demineralized and deproteinized

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

منابع

1- ZX, Liu Y, An J, Chua CK, Shen YF, Kuo CN. A review of selective laser melted NiTi shape memory alloy. *Materials*. 2018;11(4):519.

2- Shahrubudin N, Lee TC, Ramlan R. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*. 2019;35:1286-96.

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

4- Ghorashi, S., Sadegh Yazdi, M., Hosseinzadeh, M., Mousavi Kani, S. The Study of Scan Speed and Laser Power Effects on the Molten Pool in Selective Laser Melting of Ti6Al4V Based on the Molten Motion Equations. *AEROSPACE MECHANICS JOURNAL*, 2021; 17(3): 1-15.

5- Raviv D, Zhao W, McKnelly C, Papadopoulou A, Kadambi A, Shi B, Hirsch S, Dikovskiy D, Zyracki M, Olguin C, Raskar R. Active printed materials for complex self-evolving deformations. *Scientific reports*. 2014;4(1):1-8.

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- 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.

8- Gul JZ, Sajid M, Rehman MM, Siddiqui GU, Shah I, Kim KH, Lee JW, Choi KH. 3D printing for soft robotics—a review. *Science and technology of advanced materials*. 2018;19(1):243-62.

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

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

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

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

13- Xie T. Tunable polymer multi-shape memory effect. *Nature*. 2010;464(7286):267-70.

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- Hong S, Sycks D, Chan HF, Lin S, Lopez GP, Guilak F, Leong KW, Zhao X. 3D printing of highly stretchable and tough hydrogels into complex, cellularized structures. *Advanced materials*. 2015;27(27):4035-40.

16- Wehner M, Truby RL, Fitzgerald DJ, Mosadegh B, Whitesides GM, Lewis JA, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots. *Nature*. 2016;536(7617):451.

bovine cortical femur bone. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. 2016;59:393-403.

32- Baniasadi M, Maleki-Bigdeli M-A, Baghani M. Force and multiple-shape-recovery in shape-memory-polymers under finite deformation torsion-extension. Smart Materials and Structures. 2020;29(5):055011.

33- Williams ML, Landel RF, Ferry JD. The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. Journal of the American Chemical Society. 1955;77(14):3701-7.

34- Myers RH, Montgomery DC, Anderson-Cook CM. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments: John Wiley & Sons; 2016.