

بررسی اثر پارامترهای چاپ سه بعدی به روش لایه نشانی ذوبی بر روی بازیابی شکلی مخروطی در فرآیند چاپ چهار بعدی

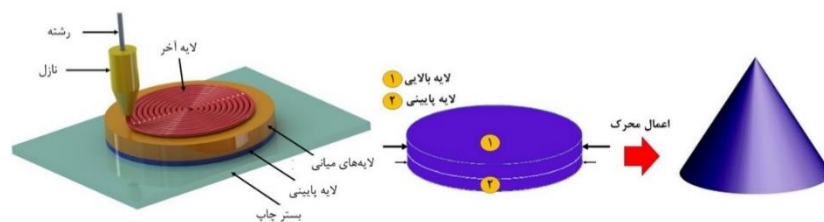
سید محمد دهقان طرزجانی^۱، محمدهادی حسین زاده^{۲*}، میلاد صادق یزدی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران
^۲ پژوهشگر، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران
^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

برجسته‌ها

- کنترل پذیر کردن فرآیند چاپ چهار بعدی اهمیت زیادی دارد.
- کنترل پذیری با تنظیم پارامترهای چاپ میسر می‌شود.
- رابطه‌ای بین پیش‌تنش اعمالی و پارامترهای فرآیند لایه‌نشانی ذوبی ارائه شد.

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
 نوع مقاله: علمی پژوهشی
 دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲
 بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱
 پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱
 ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶
 نویسنده مسئول:
 m.hadi.hosseinzadeh@gmail.com

کلیدواژه‌ها:

چاپ چهار بعدی
 کنترل پذیری
 پیش‌تنش
 بازیابی شکلی
 پارامترهای فرآیند لایه‌نشانی ذوبی

چکیده

چاپ چهار بعدی یک فناوری نوظهور است که از ترکیب چاپ سه بعدی و مواد حافظه‌شکلی حاصل شده و در آن ساختار چاپ شده می‌تواند در اثر اعمال محرک مناسب دچار تغییر شکل شود. هدف از چاپ چهار بعدی کنترل نوع و میزان بازیابی شکلی می‌باشد. در این پژوهش به کمک شبیه‌سازی عددی رابطه‌ای بین پیش‌تنش ذخیره شده در دیسک‌های چاپ شده و میزان بازیابی شکلی به دست آمد. سپس اثر پارامترهای ارتفاع لایه، دمای بستر، دمای نازل و سرعت چاپ بر میزان پیش‌تنش اعمال شده در دیسک‌های چاپ شده بر پایه ماده پلی‌لاکتیک‌اسید در فرآیند چاپ سه بعدی لایه‌نشانی ذوبی بررسی شد. در این تحقیق با استفاده از ۲۷ آزمایش تجربی به کمک طرح مرکب مرکزی مدل‌سازی با صرف کمترین هزینه و زمان و بیشترین اعتبار و دقت انجام شد و رابطه‌ای بین پارامترهای ارتفاع لایه، دمای بستر، دمای نازل و سرعت چاپ و میزان پیش‌تنش اعمال شده در دیسک‌های چاپی به دست آمد. مقادیر R^2 و $Adj R^2$ بیش از ۹۹ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. مدل تجربی نشان داد که ترتیب میزان اثرگذاری پارامترها بر مقدار ارتفاع مخروط بازیابی شده به ترتیب سرعت چاپ، ارتفاع لایه، دمای نازل و دمای بستر می‌باشد و مقدار پیش‌تنش ایجاد شده با سرعت چاپ رابطه مستقیم و با دیگر پارامترها رابطه عکس دارد. برای صحت‌سنجی مدل تجربی، شبیه‌سازی و آزمایش تجربی در شرایط بیشترین میزان بازیابی شکلی انجام شد. نتایج نشان داد خطای مدل تجربی اثر پارامترهای چاپ بر میزان بازیابی شکلی ۵/۹ درصد و خطای بین پیش‌تنش اعمال شده و میزان بازیابی شکلی ۲/۹۵ درصد است.

۱- مقدمه

ترکیب آب و گرما و ترکیب نور و گرما می‌باشند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها حرارت می‌باشد [۱۲]. چاپ چهاربعدی به زمان وابسته است و مستقل از پرینتر می‌باشد. هدف از چاپ چهاربعدی تکامل در شکل، عملکرد یا خصوصیت ساختار است که منجر به خودمونتاژی^{۱۲}، خودترمیمی^{۱۳} و چندعملکردی^{۱۴} می‌شود [۱۰].

پلیمرهای حافظه‌شکلی دسته‌ای از مواد هوشمند هستند که توانایی تثبیت یک شکل موقت^{۱۵} دارند و در معرض محرک‌هایی نظیر حرارت، مغناطیس، الکتریسیته و نور می‌توانند شکل اولیه خود را بازیابی نمایند [۱۳ و ۱۴]. پلیمرهای حافظه‌شکلی در زمینه‌های مختلفی نظیر پزشکی، دندانپزشکی، هوافضا، رباتیک و عملگرها استفاده می‌شوند [۱۵]. این دسته از پلیمرها قادرند تغییرشکل و نیروی اعمال‌شده در شرایط خاص را با اعمال محرک مناسب بازیابی نمایند [۱۶]. اثر حافظه‌شکلی در دهه‌ی ۱۹۳۰ برای اولین بار در آلیاژهای فلزی و در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ در پلیمر پلی‌نوربورن مشاهده شد [۱۷].

چاپ چهاربعدی FDM مبتنی بر پلیمرهای حافظه‌شکلی، فناوری نوظهور است که کاربردهای فراوان و متنوعی دارد و همچنین به دلیل ارزان بودن، سهولت در استفاده و در دسترس بودن روش چاپ FDM، بسیار موردتحقیق و استفاده قرارگرفته است [۱۸ و ۱۹]. با توجه به اهمیت پیش‌کرنش^{۱۶} ذخیره‌شده در رشته چاپ‌شده که عامل بازیابی‌شکلی^{۱۷} پس از اعمال محرک است، در بسیاری از تحقیقات اخیر عوامل مؤثر بر میزان پیش‌کرنش ذخیره‌شده موردبررسی قرارگرفته‌اند [۲۰]. وو و همکاران [۲۱] در تحقیقی اثرات ارتفاع لایه، زاویه چاپ، دمای تغییرشکل و دمای بازیابی شکل بر روی نسبت بازیابی شکل و حداکثر سرعت بازیابی شکل پلی‌لاکتیک‌اسید^{۱۸} چاپی به روش FDM را بررسی کردند. آن‌ها همچنین میزان اثرگذاری این پارامترها را با یکدیگر مقایسه کردند و حالت بهینه نسبت

ساخت افزایشی^۱ که به‌عنوان چاپ سه‌بعدی^۲ نیز شناخته می‌شود، از فناوری‌های نوین ساخت است که می‌تواند تحولی عظیم در صنایع ساخت به وجود آورد [۱-۳]. این فناوری در سال ۱۹۸۴ توسط چارلز هول^۳ ابداع شد [۴]. این روش نوین ساخت نسبت به روش‌های سنتی ساخت دارای مزایایی از جمله سرعت تولید بالا، مقرون‌به‌صرفه بودن و ساخت قطعات پیچیده است [۵]. در این روش ساخت، محصول نهایی به روش چاپ لایه به لایه‌ی ماده‌ی اولیه بر روی یک بستر ایجاد می‌شود [۶]. چاپ سه‌بعدی در زمینه‌های متعددی از جمله پزشکی، عمران و هوافضا کاربرد دارد [۷]. یکی از انواع روش‌های چاپ سه‌بعدی، روش لایه‌نشانی ذوبی^۴ است که یک فناوری نمونه‌سازی سریع^۵ می‌باشد. در این روش ماده‌ی اولیه رشته‌ی پلیمری ترموپلاستیک است که پس از داغ شدن از سر نازل بیرون آمده و نمونه‌ی مدنظر به‌صورت لایه به لایه بر روی بستر چاپ ایجاد می‌شود [۸]. با تکامل چاپ سه‌بعدی، چاپ چهاربعدی توسط تیبیتس یکی از محققین موسسه فناوری ماساچوست^۶ معرفی شد [۹]. چاپ چهاربعدی بر اساس چاپ سه‌بعدی شکل‌گرفته است با این تفاوت که این روش چاپ به مواد هوشمند^۷ و محرک^۸ نیاز دارد [۱۰]. در واقع در چاپ چهاربعدی، شکل ساختار چاپ‌شده‌ی سه‌بعدی با اعمال محرک مناسب و باگذشت زمان تغییر می‌یابد [۱۱]. در این روش چاپ از یک یا چند ماده هوشمند قابل پرینت نظیر پلیمرهای حافظه‌شکلی^۹، آلیاژهای حافظه‌شکلی^{۱۰} و هیدروژل‌ها^{۱۱} یا ترکیبی از چند ماده‌ی هوشمند و غیرهوشمند استفاده می‌شود. معمولاً محرک‌هایی که تاکنون در حوزه چاپ چهاربعدی استفاده‌شده‌اند میدان مغناطیسی، گرما، آب،

1 Additive Manufacturing

2 3D Printing

3 Charles Hull

4 Fused Deposition Modeling (FDM)

5 Prototyping

6 Massachusetts Institute of Technology (MIT)

7 Smart Materials

8 Stimulus

9 Shape Memory Polymers

10 Shape Memory Alloys

11 Hydrogels

12 Self-Assembly

13 Self-Healing

14 Multi Functionality

15 Temporary Shape

16 Pre-Strain

17 Shape Recovery

18 PLA

چاپ به روش FDM نظیر جهت چاپ و سرعت چاپ را روی بازیابی شکلی چند نوع پلیمر حافظه شکلی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که جهت چاپ هم‌مرکز^۱ منجر به بازیابی شکلی مخروطی می‌شود و سرعت چاپ با میزان ارتفاع مخروط رابطه مستقیم دارد. با توجه به پیشینه پژوهش ذکر شده، تحقیقات گوناگونی پیرامون کنترل پذیری نوع تغییر شکل انجام شده است اما علاوه بر آن، مطالعات تجربی و عددی در حوزه کنترل میزان تغییر شکل پس از اعمال پیش‌کنش بسیار حائز اهمیت است زیرا با کنترل پذیری نوع و میزان تغییر شکل می‌توان به کاربردهای جدید چاپ چهاربعدی دست یافت. کنترل پذیری فرآیند چاپ چهاربعدی با تنظیم پارامترهای چاپ میسر می‌شود. در این پژوهش اثر پارامترهای چاپ سه‌بعدی شامل سرعت چاپ، ارتفاع لایه، دمای بستر و دمای نازل و اثر تعاملی بین آن‌ها روی میزان بازیابی شکلی مخروطی قطعات چاپی مدور بررسی می‌شود. ابتدا به کمک شبیه‌سازی عددی رابطه‌ای بین میزان پیش‌تنش اعمالی بر بازیابی شکلی مخروطی محاسبه شد. سپس به کمک روش طراحی آزمایش آزمایش‌های تجربی انجام شدند. سپس به کمک آزمایش تجربی، مدل تجربی به دست آمده صحت‌سنجی شد. در این تحقیق برای اولین بار رابطه‌ای بین پیش‌تنش اعمالی در دیسک‌های چاپی و پارامترهای چاپ سه‌بعدی به دست آمد که می‌توان به کمک این رابطه میزان پیش‌تنش اعمالی که با ارتفاع مخروط بازیابی شده مرتبط است را کنترل نمود.

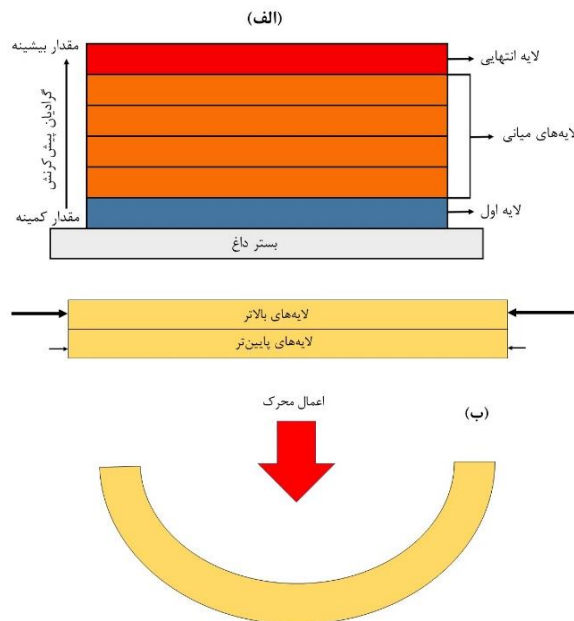
۲- سازوکار فرآیند چاپ چهاربعدی

چاپ چهاربعدی FDM یکی از روش‌های چاپ چهاربعدی است که به دلیل هزینه کم مواد اولیه و تجهیزات، سرعت زیاد و ساخت قطعات پیچیده در کاربردهای مختلف از آن استفاده شده و محبوبیت زیادی پیدا کرده است. پلیمرهای حافظه شکلی دسته‌ای از مواد حافظه شکلی هستند که توانایی تثبیت یک یا چند شکل موقت در ساختار خود را دارند که به هنگام قرارگیری در معرض محرک‌های خارجی از جمله دما می‌توانند شکل اولیه خود را بازیابی کنند. در

بازیابی شکلی را به دست آوردند. زادپور و همکاران [۲۲] در تحقیقی اثر ارتفاع لایه و دمای نازل را بر مقدار پیش‌کنش ذخیره شده در رشته‌ی چاپ شده بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که میزان پیش‌کنش ذخیره شده در رشته با دمای نازل و ارتفاع لایه رابطه عکس دارد. بوداکی و همکاران [۳] ساختارهای خود خم شونده/رول شونده/ تغییر شکل دهنده را با استفاده از چاپ چهاربعدی با روش FDM پلی‌لاکتیک‌اسید معرفی کردند و اثرات سرعت چاپ را بر روی خواص تغییر شکل و میزان پیش‌کنش ذخیره شده در رشته‌ی چاپ شده به‌طور جزئی بررسی کردند و دریافتند که سرعت چاپ باعث افزایش تغییر شکل در فرآیند چاپ چهاربعدی می‌شود. آن‌ها همچنین رفتارهای ترمومکانیکی ساختارهای چاپی چهاربعدی خود را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی کردند. در تحقیق دیگری بوداکی و همکاران [۲۰] اثر پارامترهای ساخت فرآیند FDM نظیر دمای نازل و سرعت چاپ را بر روی مکانیسم خودتاشوندگی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که میزان پیش‌کنش ذخیره شده در قطعه چاپی با دمای نازل رابطه عکس و با سرعت چاپ رابطه مستقیم دارد. نوروزی و همکاران [۲۳] در تحقیقی اثر سرعت چاپ بر مقدار تغییر شکل در فرآیند چاپ چهاربعدی PLA به روش FDM را بررسی کردند. آن‌ها همچنین با استفاده از تعدادی تیرهای چاپ شده متاساختارهای تطبیقی که از عناصر طنین‌انداز خود خم شونده بهره می‌برند را ایجاد کردند و با تغییر در سرعت چاپ تیرها این متاساختارها را مهندسی نمودند تا نویزهای لرزشی و صوتی را صاف کند. هو و همکاران [۲۴] با استفاده از چاپ چهاربعدی به روش FDM ساختاری را ایجاد کردند که در معرض محرک حرارتی تغییر شکل مخروطی الهام گرفته از نوعی معماری را از خود نشان می‌دهد. ساختار مخروطی مذکور می‌تواند به‌صورت مستقیم به روش چاپ سه‌بعدی ایجاد شود اما به دلیل لزوم استفاده از ساپورت و پایین آمدن کیفیت چاپ و خواص استحکام مکانیکی جسم چاپ شده و همچنین افزایش زمان چاپ، از روش چاپ چهاربعدی استفاده می‌شود. آن‌ها همچنین اثرات سرعت چاپ بر مقدار پیش‌کنش ذخیره شده در ساختار چاپی را بررسی نمودند. رویچاندرا و همکاران [۲۵] اثر پارامترهای

¹ Concentric

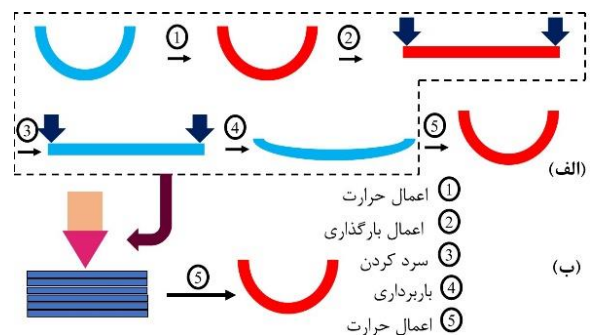
مقدار پیش‌کرنش را دارد و هرچقدر از اولین لایه به سمت آخرین لایه (لایه بالایی) برویم مقدار پیش‌کرنش افزایش می‌یابد. آخرین لایه بیشترین مقدار پیش‌کرنش را دارد. در نتیجه یک گرادیان پیش‌کرنش در جهت ضخامت نمونه به وجود می‌آید که عامل تغییر شکل خمشی نمونه به هنگام قرارگیری در معرض محرک مناسب حرارتی است.



شکل (۲): الف) گرادیان پیش‌کرنش در یک قطعه‌ی چاپی چهاربعدی؛ ب) نحوه بازیابی شکلی یک قطعه‌ی چاپی چهاربعدی پس از اعمال پیش‌کرنش.

همان‌طور که در شکل (۲) ب مشاهده می‌شود، هنگام بازیابی شکلی، لایه‌های بالایی نسبت به لایه‌های پایینی بیشتر جمع می‌شوند و در نتیجه تغییر شکل خمشی ایجاد می‌شود. اختلاف پیش‌کرنش ذخیره‌شده در لایه‌های مختلف به دلیل وجود یک گرادیان دمایی در راستای ضخامت است که ناشی از دو عامل فاصله‌ی لایه از بستر چاپ و اثر دمایی لایه‌های بالاتر بر لایه‌های پایین‌تر است. لایه‌های پایین‌تر که به بستر چاپ نزدیک‌تر هستند، تحت تأثیر گرمای بستر چاپ قرار دارند و مقداری از پیش‌کرنش آن‌ها در اثر گرمای بستر چاپ آزاد می‌شود. همچنین در زمان چاپ لایه‌های بالاتر، دمای بالای آن‌ها بر مقدار پیش‌کرنش لایه‌های پایین‌تر اثر گذاشته و مقداری از پیش‌کرنش آن‌ها را آزاد می‌کند. در نتیجه لایه‌ی اول چون نزدیک‌ترین لایه به بستر

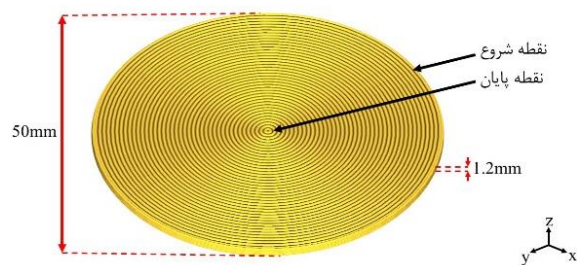
روش چاپ چهاربعدی FDM از پلیمرهای حافظه‌شکلی استفاده می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۱) الف نشان داده شده است، این نوع پلیمرها در حالت معمول یک چرخه‌ی ترمومکانیکی ۵ مرحله‌ای را تجربه کرده و در نهایت نیرو یا تغییر شکل اعمال‌شده را بازیابی می‌کنند. در مرحله اول پلیمر تا دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای حرارت داده می‌شود. در این حالت زنجیره‌های پلیمر به حرکت درمی‌آید و پلیمر در حالتی ارتجاعی قرار می‌گیرد. سپس در مرحله دوم نیروی موردنظر اعمال می‌شود تا تغییر شکل مطلوب ایجاد شود. در مرحله سوم هم‌زمان با اعمال نیروی خارجی، قطعه تا دمایی پایین‌تر از دمای انتقال شیشه‌ای سرد می‌شود تا تغییر شکل ایجادشده در ساختار ماده تثبیت شود. سپس در مرحله بعد نیروی اعمالی برداشته می‌شود و قطعه با مقدار کمی بازیابی شکلی در شکل موقت خود تثبیت می‌شود. در مرحله نهایی با اعمال حرارت تا دمایی بالاتر از T_g شکل اولیه قطعه بازیابی می‌شود (بازیابی شکلی). به چهار مرحله ابتدایی چرخه ترمومکانیکی که در شکل (۱) ب با خط چین مشکی مشخص شده است، فرآیند برنامه‌ریزی گفته می‌شود. در فرآیند چاپ چهاربعدی نیز دقیقاً همین مراحل انجام می‌شود با این تفاوت که مرحله برنامه‌ریزی (اعمال پیش‌تنش یا پیش‌کرنش) در حین فرآیند چاپ به وجود می‌آید و مرحله نهایی که بازیابی شکلی است پس از چاپ قطعه و با اعمال حرارت خارجی ایجاد می‌شود.



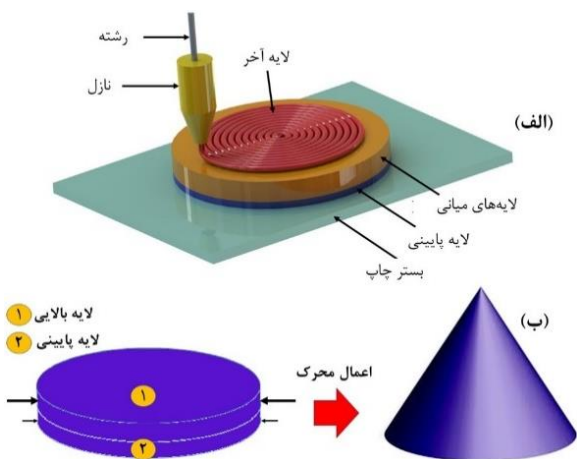
شکل (۱): الف) چرخه‌ی ترمومکانیکی در پلیمرهای حافظه‌شکلی؛ ب) چرخه حافظه‌شکلی در چاپ چهاربعدی.

همان‌گونه که در شکل (۲) الف مشاهده می‌شود، هنگام چاپ یک قطعه‌ی مستطیلی که تمام لایه‌های آن در جهت چاپ صفر درجه چاپ‌شده‌اند، اولین لایه (لایه پایینی) کمترین

مسئله، بازه‌های پارامترهای متغیر مسئله تعیین شدند. بازه دمای نازل برای چاپ فیلامنت PLA با توجه به دمای پیشنهادشده کارخانه سازنده ۲۲۰-۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. همچنین به‌طور معمول بازه ارتفاع لایه ۰/۳-۰/۴ در نظر گرفته می‌شود زیرا پرینتر با نازل ۰/۴ میلی‌متر نمی‌تواند لایه‌هایی با ارتفاع بیش از ۰/۳ را چاپ کند [۲۲]. دستگاه پرینتر FDM موجود توانایی چاپ با سرعت‌هایی بیش از ۱۲۰ میلی‌متر بر ثانیه نداشت؛ بنابراین محدوده سرعت چاپ ۱۰-۱۲۰ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد [۲۳]. با توجه به دمای انتقال شیشه‌ای PLA (۶۲/۴ درجه سانتی‌گراد) [۲۸] بازه دمای بستر ۲۵-۶۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد تا چاپ ماده PLA با کمترین دمای بستر (دمای محیط) و بیشترین دمای بستر با توجه به دمای انتقال شیشه‌ای امکان‌پذیر باشد. مقادیر پارامترهای ثابت و متغیر تحقیق به همراه مقدار یا بازه در نظر گرفته‌شده در جدول (۱) نشان داده‌شده است.



شکل (۳): مدل پردازش‌شده قبل از چاپ.



شکل (۴): (الف) نمایشی از فرآیند چاپ نمونه مدور؛ (ب) نحوه بازیابی شکلی نمونه‌ی مدور چاپ‌شده.

چاپ بوده و لایه‌های بالاتر نیز بر مقدار پیش‌کرنش آن اثر می‌گذارد، کمترین مقدار پیش‌کرنش و لایه آخر چون دورترین لایه از بستر چاپ بوده و تحت تأثیر دمای لایه‌های بالاتر قرار ندارد، بیشترین مقدار پیش‌کرنش را دارد [۳ و ۲۰]. هنگام بازیابی شکلی، لایه‌های بالاتر نسبت به لایه‌های پایین‌تر بیشتر منقبض می‌شوند و در نتیجه نمونه دچار تغییر شکل خمشی می‌شود.

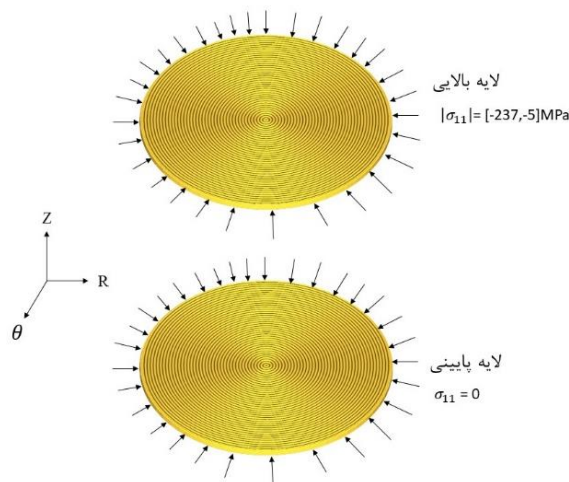
۳- رویه آزمایش تجربی

در این پژوهش از فرآیند چاپ چهاربعدی FDM ماده PLA استفاده شد. PLA یک فیلامنت پلی‌استر ترموپلاستیک است که یک ماده‌ی زیست‌سازگار، زیست‌تخریب‌پذیر، قابل بازیافت و تجدیدپذیر می‌باشد و به‌طور گسترده‌ای مورد تحقیق و استفاده قرار گرفته است [۲۶]. پلی‌استرها نظیر PLA رایج‌ترین پلیمرهای شبه‌کریستال حافظه‌شکلی زیست‌تخریب‌پذیر هستند که به‌صورت فیلامنت قابل پرینت در بازار موجود می‌باشند. PLA از اسیدلاکتیک حاصل از منابع طبیعی مانند ذرت سنتز می‌شود [۲۷].

همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده‌شده است، دیسک‌هایی به قطر ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۱/۲ میلی‌متر طراحی شدند. سپس با الگوی چاپ هم‌مرکز و تراکم صد در صد چاپ شدند به‌نحوی که در هر لایه نازل از قسمت بیرونی شروع به چاپ می‌کند و در قسمت مرکزی چاپ لایه تمام می‌شود. نمایشی از فرآیند چاپ نمونه مدور در شکل (۴ الف) نشان داده‌شده است. این دیسک‌ها مشابه تئوری توضیح داده‌شده در بخش قبل برنامه‌ریزی‌شده‌اند با این تفاوت که پیش‌کرنش‌ها در جهت شعاعی ایجاد شده و بدین ترتیب همان‌گونه که در شکل (۴ ب) مشاهده می‌شود، با اعمال محرک گرمایی مناسب پس از چاپ، شکل دائمی نمونه که شکل مخروطی است، بازیابی می‌شود.

در این پژوهش چهار پارامتر چاپ که بر میزان پیش‌کرنش ایجادشده تأثیر می‌گذارند به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شدند. همچنین پارامترهای درصد تراکم، الگوی چاپ، قطر رشته، قطر نازل، دمای اتاق و فن خنک‌کننده به‌عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته شدند. با توجه به فیزیک

و با گرمایش نمونه تا دمایی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای این پیش‌تنش آزاد شده و فرآیند بازیابی شکلی انجام می‌شود؛ بنابراین برای دستیابی به رابطه‌ی دقیقی بین مقدار پیش‌تنش فشاری وارد شده در لایه‌ی بالایی و میزان بازیابی شکلی (مقدار ارتفاع مخروط)، تعداد ۴۰ شبیه‌سازی انجام شد و مقادیر مختلف پیش‌تنش از ۵- تا ۲۳۷- مگاپاسکال در لایه بالایی اعمال شد. همان‌طور که بیان شد، در قسمت بارگذاری در شرایط اولیه دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد (بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای) اعمال شد تا دیسک به‌صورت آزاد و بدون تکیه‌گاه فرآیند بازیابی شکلی را انجام دهد.



شکل (۵): شماتیک پیش‌تنش وارد شده به لایه‌های بالا و پایین قطعه در شبیه‌سازی اجزای محدود.

۵- طراحی آزمایش

روش سطح پاسخ^۳ یکی از روش‌های طراحی آزمایش^۴ است و مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری مفید برای مدل‌سازی و آنالیز مسائلی است که در آن یک پاسخ مدنظر تحت تأثیر چندین متغیر است و هدف بهینه‌سازی این پاسخ می‌باشد. در این تحقیق از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۵ به‌منظور بهینه‌سازی میزان ارتفاع شکل بازیابی شده و کنترل‌پذیری فرآیند بازیابی شکلی استفاده شد. این نرم‌افزار یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای حوزه طراحی آزمایش است.

جدول (۱): پارامترهای ثابت و متغیر تحقیق و مقادیر آن

پارامترهای متغیر	مقادیر
ارتفاع لایه (mm)	۰/۳-۰/۱
سرعت چاپ (mm/s)	۱۲۰-۱۰
دمای نازل (°C)	۲۲۰-۱۸۰
دمای بستر چاپ (°C)	۶۵-۲۵
پارامترهای ثابت	
درصد تراکم	٪۱۰۰
الگوی پر کردن	هم‌مرکز
قطر فیلامنت (mm)	۱/۷۵
قطر نازل (mm)	۰/۶
دمای محیط (°C)	۲۵
فن	خاموش

۴- شبیه‌سازی اجزای محدود

برای بررسی و تحلیل نوع و میزان بازیابی شکلی از دیدگاه کیفی و پدیدار شناختی از شبیه‌سازی اجزای محدود بر پایه مدل بهبودیافته‌ی دایانی [۲۸] و آریتا [۲۹] استفاده شد. بر این اساس شرایط چاپ اولیه برای نمونه‌ها با ماده‌ای ترمو-ویسکوهایی‌الاستیک بر پایه ضرایب پلیمر حافظه‌شکلی ارائه شده توسط آن‌ها در نظر گرفته شد. برای ماده ویسکوهایی‌الاستیک خواص رسانایی^۱، چگالی، ضرایب انبساط حرارتی در دماهای مختلف، هاپیرالاستیک، گرمای ویژه و ویسکوالاستیک در نظر گرفته شد. هم‌چنین نوع حلگر کوپل دما-جابجایی انتخاب شد. تعداد ۳۸۹۶ المان چهاروجهی از نوع کوپل دما-جابجایی انتخاب شد. بر اساس تئوری توضیح داده شده در بخش‌های قبل، دیسک چاپ شده به دو قسمت بالایی و پایینی تقسیم شد که در شکل (۵) نشان داده شده است. در بخش تماس^۲، لایه بالایی و لایه پایینی با استفاده قید چسبندگی به یکدیگر متصل شدند. در بخش شرایط مرزی هیچ‌گونه شرط مرزی تعریف نشد زیرا قطعه پس از چاپ به‌صورت آزادانه در یک حمام آب داغ ۸۰ درجه سانتی‌گرادی تغییر شکل می‌دهد. در بخش بالایی پیش‌تنش شعاعی فشاری و در بخش پایینی پیش‌تنش مگا پاسکال اعمال شد. با اعمال این پیش‌تنش در واقع فرآیند برنامهریزی در پلیمر حافظه‌شکلی انجام شده است

³ Response Surface Methodology (RSM)

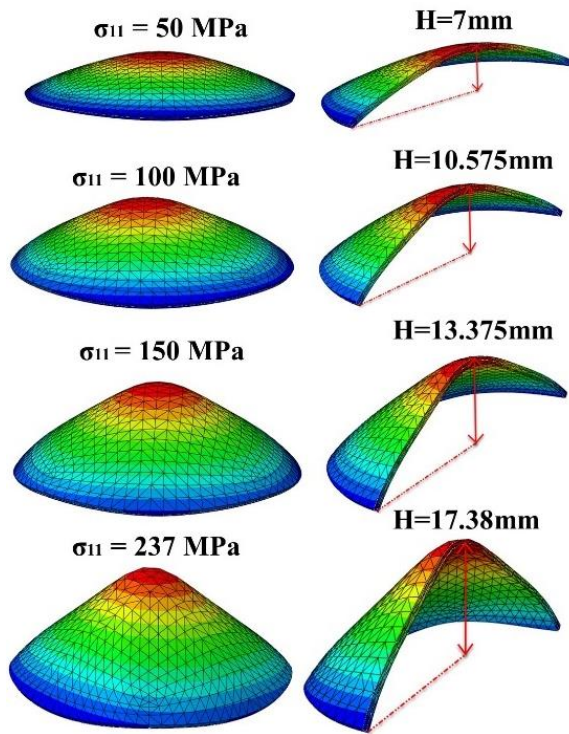
⁴ Design Of Experiment (DOE)

⁵ Design Expert

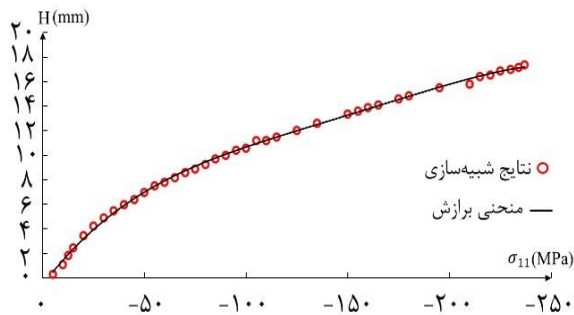
¹ Conductivity

² Interaction

$$\sigma_{11} = -1E - 8H^4 - 7E - 6H^3 - 0.0017H^2 - 0.2173H - 0.5575 \quad (1)$$



شکل (۶): شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند بازیابی شکلی مخروطی با پیش‌تنش‌های فشاری مختلف.



شکل (۷): نمودار میزان ارتفاع (H) به میزان پیش‌تنش (σ_{11}) اعمال شده.

۶-۲- مدل تجربی

همان‌طور که اشاره شد برای بررسی اثر پارامترهای ارتفاع لایه، دمای بستر، دمای نازل و سرعت چاپ بر میزان

سپس با استفاده از روش طرح مرکب مرکزی که از زیرمجموعه‌های RSM است، مدل‌سازی با حداقل تعداد آزمایش تحقق یافت و همچنین بهینه‌سازی انجام شد. چهار فاکتور A, B, C, D که به ترتیب ارتفاع لایه، دمای بستر، دمای نازل و سرعت چاپ هستند، در سه سطح ۰، ۱ و ۰ در نرم‌افزار بررسی شدند. با توجه به این که تعداد تکرار نقطه مرکزی ۳ در نظر گرفته شد، تعداد ۲۷ آزمایش توسط نرم‌افزار پیشنهاد شد.

۶- نتایج و بحث

۶-۱- شبیه‌سازی

همان‌طور که اشاره شد چرخه‌ی ترمومکانیکی در پلیمرهای حافظه‌شکلی شامل مراحل مختلف است که مرحله گرم کردن تا مرحله باربرداری برنامه‌ریزی (اعمال پیش‌کنش یا پیش‌تنش) گفته می‌شود. به عبارتی دیگر به هنگام فرآیند برنامه‌ریزی، پیش‌تنش خاصی در ماده ذخیره می‌شود. در روش چاپ چهاربعدی به کمک فناوری لایه نشانی ماده ذوبی، فرآیند برنامه‌ریزی هنگام چاپ ماده ایجاد می‌شود؛ که مقدار آن به پارامترهای مختلف از جمله پارامترهای محیطی، هندسی و دمایی بستگی دارد. در این پژوهش برای محاسبه مقدار پیش‌تنش اعمال شده در فرآیند برنامه‌ریزی از شبیه‌سازی عددی نرم‌افزار اباکوس استفاده شده است. بدین منظور تعداد ۴۰ شبیه‌سازی انجام شد و مقادیر مختلف پیش‌تنش از ۵- تا ۲۳۷- مگاپاسکال در لایه بالایی اعمال شد. نتایج نشان داد مقدار ارتفاع شکل بازیابی شده در بازه ۰/۳ تا ۱۷/۳۸ قرار گرفت. نمونه‌ای از شبیه‌سازی‌های انجام شده با مقدار پیش‌تنش شعاعی ۵۰-، ۱۰۰-، ۱۵۰- و ۲۳۷- مگاپاسکال را می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد.

با توجه به داده‌های شبیه‌سازی، ارتفاع مخروط بازیابی شده برای پیش‌تنش‌های متعدد به دست آمد. سپس با استفاده از نرم‌افزار اکسل رابطه بین آن‌ها به کمک برازش منحنی به دست آمد که رابطه آن یک چندجمله‌ای مرتبه چهار با R^2 یک است که نشان‌دهنده دقت بالای آن است (معادله (۱)). نمودار مذکور در شکل (۷) نشان داده شده است.

که به ترتیب BCD و ACD نام دارند، این دو متغیر در پاسخ لحاظ می‌شوند. اولین معیار برای سنجش مدل، مقدار P مدل است که با توجه به جدول الف، این مقدار کمتر از ۰/۰۵ به دست آمده که نشان‌دهنده قابل‌توجه بودن مدل محاسبه شده است.

جدول (۲): نتایج آزمایش‌های انجام شده به همراه مقادیر پارامترهای مورد بررسی

شماره آزمایش	ارتفاع لایه (mm)	دمای بستر (°C)	دمای نازل (°C)	سرعت چاپ (mm/s)	σ_{11} (MPa)
۱	۰/۲	۴۵	۱۸۰	۶۵	-۱۳۴/۶۱
۲	۰/۱	۶۵	۱۸۰	۱۰	-۱۰۰/۵۸
۳	۰/۲	۶۵	۲۰۰	۶۵	-۳۸/۱
۴	۰/۲	۲۵	۲۰۰	۶۵	-۸۶/۶۹
۵	۰/۲	۴۵	۲۰۰	۶۵	-۸۱/۶۹
۶	۰/۳	۲۵	۱۸۰	۱۲۰	-۱۱۲/۰۹
۷	۰/۳	۶۵	۲۲۰	۱۲۰	-۵۲/۰۴
۸	۰/۲	۴۵	۲۰۰	۶۵	-۸۳/۰۹
۹	۰/۱	۶۵	۱۸۰	۱۲۰	-۱۰۷/۱۲
۱۰	۰/۳	۶۵	۱۸۰	۱۲۰	-۷۱/۱۱
۱۱	۰/۳	۴۵	۲۰۰	۶۵	-۸۶/۳۲
۱۲	۰/۳	۶۵	۱۸۰	۱۰	-۱۷/۲۵
۱۳	۰/۲	۴۵	۲۲۰	۶۵	-۷۱/۱۱
۱۴	۰/۳	۲۵	۲۲۰	۱۰	-۲۷/۴۱
۱۵	۰/۲	۴۵	۲۰۰	۱۰	-۳۹/۶۷
۱۶	۰/۱	۶۵	۲۲۰	۱۲۰	-۱۰۷/۱۲
۱۷	۰/۳	۶۵	۲۲۰	۱۰	-۱۲/۸
۱۸	۰/۱	۴۵	۲۰۰	۶۵	-۱۵۰/۲۲
۱۹	۰/۲	۴۵	۲۰۰	۱۲۰	-۱۲۳/۲۸
۲۰	۰/۱	۲۵	۲۲۰	۱۰	-۴۲/۳۹
۲۱	۰/۱	۶۵	۲۲۰	۱۰	-۱۵/۱
۲۲	۰/۱	۲۵	۱۸۰	۱۲۰	-۱۵۳/۳۲
۲۳	۰/۱	۲۵	۲۲۰	۱۲۰	-۹۸/۴۸
۲۴	۰/۲	۴۵	۲۰۰	۶۵	-۷۹/۶۵
۲۵	۰/۱	۲۵	۱۸۰	۱۰	-۴۹/۸۹
۲۶	۰/۳	۲۵	۲۲۰	۱۲۰	-۷۳/۵۳
۲۷	۰/۳	۲۵	۱۸۰	۱۰	-۴۰/۹۲

پیش‌تنش اعمال شده در فرآیند چاپ چهاربعدی از طرح مرکب مرکزی استفاده شد. ابتدا آزمایش‌های تجربی بر اساس آزمایش‌های پیشنهاد شده نرم‌افزار انجام شد. سپس به کمک رابطه (۱) مقادیر σ_{11} محاسبه شد و در نرم‌افزار طراحی آزمایش جایگذاری شد. جدول آزمایش‌های پیش‌بینی شده نرم‌افزار به همراه مقادیر پیش‌تنش‌های متناظر به دست آمده از رابطه (۱) را نشان می‌دهد.

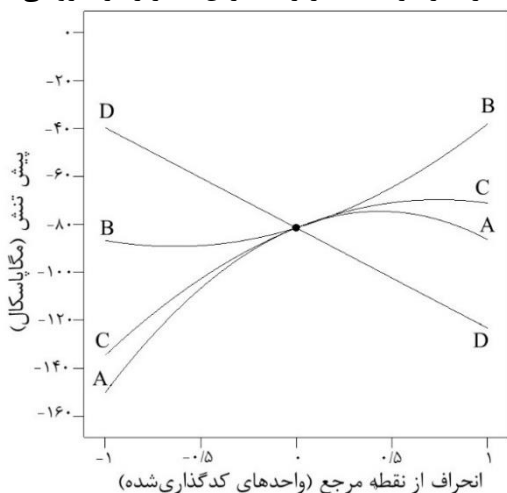
برای تحلیل بهتر نتایج از نظر کمی و اثرگذاری فاکتورهای مختلف به صورت مجزا و نسبت به یکدیگر از تحلیل واریانس استفاده می‌شود که در جدول الف موجود در پیوست نشان داده شده است. مقدار P معنادار بودن متغیر (پارامترها یا اثر تعاملی بین آن‌ها) از نظر آماری را نشان می‌دهد و اگر مقدار آن کمتر از ۰/۰۵ باشد، نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه آن متغیر بر پاسخ است و بنابراین آن متغیر در مدل تجربی آورده می‌شود و ضرایب آن محاسبه می‌شود. متغیرهایی که مقدار P در آن‌ها بیشتر از ۰/۰۵ باشد از مدل حذف می‌شوند.

پریترهای سه‌بعدی یکی از مدرن‌ترین فناوری‌های عصر حاضر به حساب می‌آیند [۱]. این فناوری قابلیت چاپ مدل نرم‌افزاری را ایجاد می‌کند که می‌تواند مدل‌های سه‌بعدی با پیچیدگی‌های خاص را تولید کند [۲]. با پیشرفت روزافزون تکنولوژی پریترهای سه‌بعدی شاید در آینده‌ای نزدیک، بسیاری از فرآیندهای ساخت و تولید کنونی منسوخ شود [۳]. این فرآیند به عنوان یک روش سریع و مقرون‌به‌صرفه برای ایجاد نمونه‌های اولیه و همچنین توسعه تولید محصولات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. امروزه بخش عظیمی از تکنولوژی سه‌بعدی در بخش بهداشت و درمان کاربرد دارد. نمونه‌های پرکاربرد از این نوع چاپ، تولید قطعاتی مانند سمعک، براکت ارتودنسی، ایمپلنت‌های دندان، جایگذاری مفاصل ران استدر است [۵ و ۶]. در صنعت هوافضا نیز پریترهای سه‌بعدی پرکاربرد بوده و می‌تواند مقدار وزن هواپیما را کاهش دهد، راندمان موتور را بالاتر برده و به بیان ساده‌تر جایگزین مقرون‌به‌صرفه‌تری برای عملیات ماشین‌کاری باشد [۷]. با توجه به جدول مقادیر P همه متغیرها به جز BC و CD کمتر از ۰/۰۵ به دست آمد. به دلیل وجود متغیرهای مرتبه بالاتر BC و CD،

نشان می‌دهد، صحت تحلیل مذکور را می‌توان با مقایسه مقادیر F متغیرهای سرعت چاپ، دمای نازل، دمای بستر و ارتفاع لایه بررسی نمود که در این رابطه A ارتفاع لایه، B دمای بستر، C دمای نازل و D سرعت چاپ می‌باشند.

$$\begin{aligned} \sigma_{11} = & +13.39 - 19730.28A - 79.59B \\ & + 16.52C - 8.53D \\ & + 611.01AB + 44.25AC \\ & + 14.82AD + 0.09BC \\ & + 0.23BD + 0.04CD \\ & + 43309.45A^2 + 0.65B^2 \\ & - 0.05C^2 - 0.31ABC \quad (2) \\ & - 0.72ABD - 0.11ACD \\ & - 0.001BCD \\ & - 1278.09A^2B \\ & - 88.93A^2C + 22.77A^2D \\ & - 5.68AB^2 + 0.003ABCD \\ & + 13.25A^2B^2 \end{aligned}$$

(3) سرعت چاپ > ارتفاع لایه > دمای نازل > دمای بستر همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، با توجه به شکل پارامتر سرعت چاپ بیشترین تأثیر را بر خروجی دارد. برای بهتر نشان دادن این موضوع از نمودار سه‌بعدی شکل (9) استفاده شد. این شکل به ترتیب پارامتر سرعت چاپ را در سه سطح +1 و 0 و -1 نشان می‌دهد و با توجه به آن می‌توان دریافت که خروجی مدل به شدت تحت تأثیر این متغیر است. برای مثال اندازه پیش‌تنش ذخیره‌شده در قطعه زمانی بیشترین مقدار است که سرعت چاپ دارای بیشترین مقدار باشد لازم به ذکر است که مقدار متغیر دمای بستر در محدوده میانی خود در نظر گرفته شد زیرا کمترین تأثیر را بر خروجی دارد.



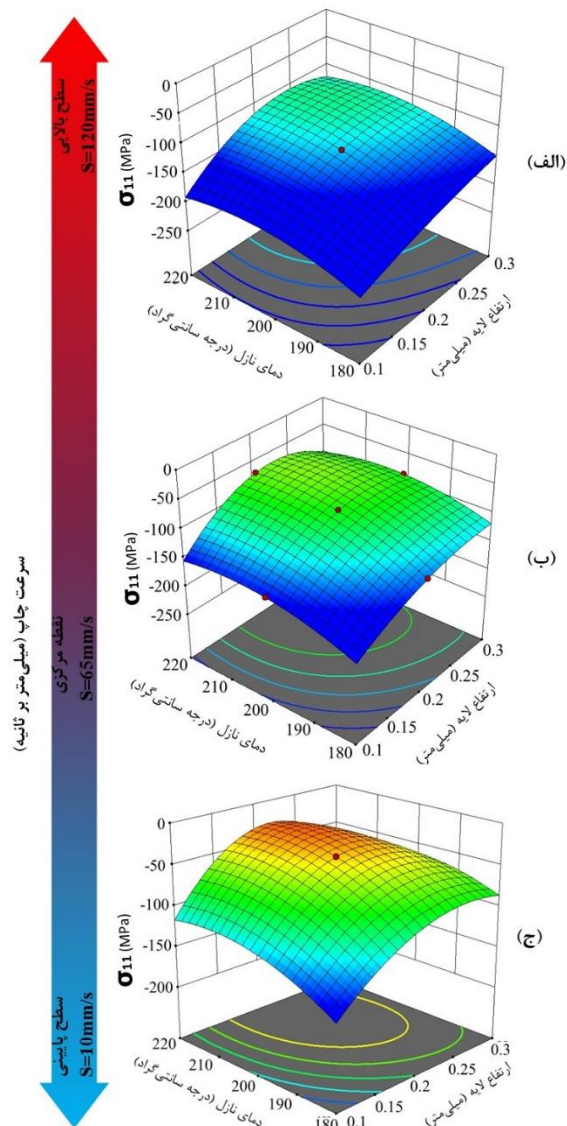
شکل (8): نمودار تأثیر انحراف در هر یک از پارامترها بر میزان خروجی مدل.

مقدار عدم برازش مدل برابر با ۰/۰۹۶۸ به دست آمد که این مقدار غیرقابل توجه (بدون تأثیر) است که نشان‌دهنده خطای بسیار پایین آزمایش است. عدم برازش مدل معیار دیگری است که برای سنجش مدل استفاده می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد حذف ترم‌های غیر مؤثر اثر نامناسبی در مدل ندارد. مقدار R^2 بیش از ۹۹ درصد حاصل شد که نشان می‌دهد داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده بسیار به هم نزدیک هستند. هم‌چنین Adj R^2 که معیار مناسب‌تری برای بررسی تشابه داده‌ها است، بیش از ۹۹ درصد به دست آمد که عدم تأثیر ترم‌هایی که قابل توجه نیستند را نشان می‌دهد. مقدار پیش‌تنش اعمالی به دیسک‌های دایروی با استفاده از معادله (2) قابل‌محاسبه است. لازم به ذکر است این معادله در حالت مقادیر واقعی پارامترها است و به کمک آن می‌توان در شرایط مختلف چاپ سه‌بعدی، مقدار ارتفاع مخروط چاپی چهاربعدی را پیش‌بینی کرد. در شکل اثرگذاری پارامترهای مختلف بر خروجی نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، شیب منحنی هر متغیر نشان‌دهنده شدت تأثیرگذاری آن بر خروجی می‌باشد؛ بنابراین میزان حساسیت خروجی نسبت به فاکتورها در معادله (3) آمده است که با توجه به آن ارتفاع مخروط نسبت به پارامتر سرعت چاپ بیشترین حساسیت و نسبت به پارامتر دمای بستر کمترین حساسیت را از خود نشان می‌دهد. هم‌چنین با توجه به نمودار، مقدار پیش‌تنش ذخیره‌شده با سرعت چاپ رابطه مستقیم دارد و با دیگر پارامترهای چاپ رابطه عکس دارد زیرا هرچه قدر نازل با سرعت بیشتری حرکت کند رشته نیز به مقدار بیشتری کشیده شده و پیش‌تنش بیشتری در آن ذخیره می‌شود. به هنگام بازیابی شکلی هرچه قدر پیش‌تنش ذخیره‌شده در رشته بیشتر باشد، تغییر شکل رشته نیز بیشتر است. هم‌چنین پارامترهای دمایی نظیر دمای بستر و دمای نازل باعث کاهش مقدار پیش‌تنش ذخیره‌شده می‌شوند زیرا دمای بالا باعث آزاد شدن پیش‌تنش‌های ایجادشده در لایه‌ها می‌شود. کاهش پارامتر ارتفاع لایه باعث افزایش تعداد لایه‌ها و در نتیجه افزایش تعداد رشته‌های چاپی می‌شود که منجر به افزایش مقدار پیش‌تنش ذخیره‌شده می‌گردد. با توجه به اینکه مقدار F نیز شدت تأثیرگذاری متغیر بر خروجی را

به دست آمدند که در جدول (۳۳) نشان داده شده است. قطعه‌ای با شرایط چاپ نشان داده شده در جدول (۳۳) چاپ شد و پس از انجام فرآیند بازیابی شکلی مقدار H برابر با ۱۵/۱۵ میلی‌متر حاصل شد (شکل الف). خطای رابطه (۲) با توجه به نتیجه حاصل شده ۵/۹ درصد است. شبیه‌سازی فرآیند بازیابی شکلی مخروطی با در نظر گرفتن مقادیر پیش‌تنش‌های محاسبه شده، انجام شد و مقدار H برابر با ۱۶/۵۷۵ میلی‌متر به دست آمد (شکل ب). با توجه به نتایج به دست آمده، خطای رابطه (۱) برابر با ۲/۹۵ درصد است که نشان از دقت بالای مدل دارد. لازم به ذکر است محدوده تعمیم‌پذیری و قابل‌اطمینان بودن رابطه (۲) برای نوع هندسه دایروی به قطر ۵۰ میلی‌متر در محدوده بازه‌های در نظر گرفته شده پارامترها می‌باشد و خارج از ابعاد هندسی مذکور و بازه‌های در نظر گرفته شده، خطای مدل بیشتر خواهد بود. همچنین اگر شکل هندسی تغییر کند این مدل مناسب نخواهد بود.

۷- نتیجه‌گیری

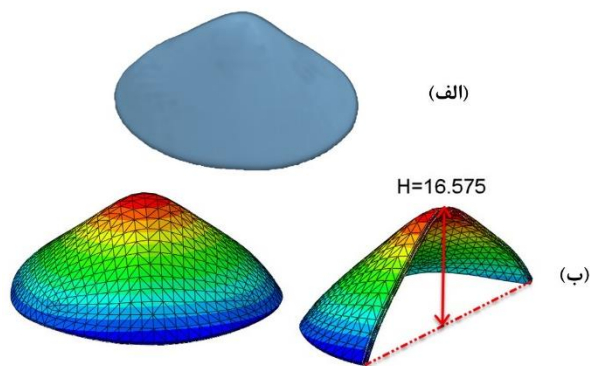
با توجه به پیشرفت‌های روزافزون فرآیند چاپ چهاربعدی و گسترده‌ی تحقیقات جدید پیرامون این موضوع، بررسی پارامترهای فرآیند چاپ چهاربعدی برای کنترل نوع و میزان بازیابی شکل نهایی امری مهم است؛ بنابراین در این پژوهش اثر پارامترهای چاپ سه‌بعدی بر بازیابی شکلی مخروطی در فرآیند چاپ چهاربعدی بررسی شده است. با توجه به اهمیت جهت پیش‌تنش‌های اعمالی و میزان آن برای کنترل نوع و میزان بازیابی شکلی، جهت رشته‌های چاپ شده به نحوی تنظیم شد تا بازیابی شکلی مخروطی به دست آید. همچنین رابطه بین مقدار پیش‌تنش اعمال شده و میزان بازیابی شکلی مخروطی به کمک شبیه‌سازی عددی محاسبه شد. در ادامه با استفاده از طراحی آزمایش به کمک روش طرح مرکب مرکزی، تعداد ۲۷ آزمایش تجربی به منظور بررسی اثر پارامترهای ارتفاع لایه، سرعت چاپ، دمای بستر و دمای نازل بر میزان پیش‌تنش اعمالی انجام شد. در این تحلیل R^2 و $Adj R^2$ مدل ارائه شده بالاتر از ۰/۹۹ به دست آمد. این نتیجه نشان می‌دهد داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده مدل بسیار به هم نزدیک هستند که دقت



شکل (۹): نمودار مقادیر پیش‌تنش با تغییر پارامتر D در الف) سطح بالا (+۱)، ب) سطح میانی (۰) و ج) سطح پایین (-۱).

۳-۶- صحت‌سنجی

به منظور صحت‌سنجی مدل‌های تجربی به دست آمده بیشترین مقدار ارتفاع مخروط بازیابی شده یعنی ۱۶/۱ H = در نظر گرفته شد. سپس به کمک رابطه (۱) مقدار σ_{11} متناظر با آن برابر با ۲۱۹/۹۱۶- مگاپاسکال به دست آمد. در ادامه مقادیر پارامترهای چاپ سه‌بعدی یعنی ارتفاع لایه، دمای نازل، دمای بستر و سرعت چاپ به کمک رابطه (۲)



شکل (۱۰): الف) نتایج آزمایش تجربی؛ ب) نتایج شبیه‌سازی عددی برای بازیابی مخروطی به ارتفاع ۱۶/۱ میلی‌متر.

۸-مراجع

- [1] Khoo 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] Raviv D, Zhao W, McKnelly C, Papadopoulou A, Kadambi A, Shi B, et al. Active Printed Materials for Complex Self-Evolving Deformations. *Scientific Reports*. 2014;4(1):7422.
- [5] 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.
- [6] Schubert C, van Langeveld MC, Donoso LA. Innovations in 3D printing: a 3D overview from optics to organs. *British Journal of Ophthalmology*. 2014;98(2):159.
- [7] Madhav, CH Venu Kesav, RSNH Narayan, Y Shivraj. Importance and utilization of 3D printing in various applications. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2016;24-29
- [8] Carneiro OS, Silva AF, Gomes R. Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design*. 2015;83:768-76.

بالای مدل ارائه‌شده را نشان می‌دهد. نتایج مدل به‌دست‌آمده نشان داد ترتیب شدت اثرگذاری پارامترهای چاپ بر خروجی به ترتیب پارامتر سرعت چاپ، ارتفاع لایه، دمای نازل و دمای بستر است. هم‌چنین پیش‌تنش اعمالی در فرآیند چاپ چهاربعدی با سرعت چاپ رابطه مستقیم و با دمای نازل، دمای بستر و ارتفاع لایه رابطه عکس دارد. سپس میزان تغییرشکل مخروطی ۱۶/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد و به کمک رابطه بین پیش‌تنش اعمالی و میزان بازیابی‌شکلی مقدار پیش‌تنش موردنیاز برای این مقدار ارتفاع مخروط به دست آمد. مقدار ارتفاع مخروط شبیه‌سازی‌شده ۱۶/۵۷۵ میلی‌متر حاصل شد؛ یعنی خطای این رابطه برابر با ۲/۹۵ درصد محاسبه شد که نشان‌دهنده صحت و اعتبار بالای رابطه محاسبه‌شده است. سپس پارامترهای سرعت چاپ، ارتفاع لایه، دمای بستر و دمای نازل برای این مقدار پیش‌تنش به دست آمد و با توجه به آن آزمایش تجربی انجام شد. نتیجه تغییرشکل مخروطی در آزمایش تجربی برابر ۱۵/۱۵ میلی‌متر حاصل شد که بر اساس آن خطای مدل ۵/۹ درصد حاصل شد که نشان از اعتبار و صحت مدل ایجادشده دارد. مدل تجربی تأثیر پارامترهای فرآیند بر میزان پیش‌تنش اعمالی و رابطه بین پیش‌تنش اعمالی و میزان تغییرشکل مخروطی در این پژوهش می‌تواند نقشه راهی برای ادامه کار محققین برای کنترل نمودن فرآیند چاپ چهاربعدی باشد.

جدول (۳): مقادیر محاسبه‌شده پارامترهای چاپ سه‌بعدی، نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی برای تغییرشکل مخروطی (ارتفاع در نظر گرفته‌شده ۱۶/۱ میلی‌متر است)

ارتفاع لایه (mm)	دمای نازل (°C)	دمای بستر (°C)	سرعت چاپ (mm/s)
۰/۰۵۴	۲۱۰/۰۰۱	۵۱/۹۹۹	۱۱۴
نتیجه آزمایش (mm)	نتیجه شبیه‌سازی (mm)	پیش‌تنش محاسبه‌شده σ_{11} (MPa)	
۱۵/۱۵	۱۶/۵۷۵	-۲۱۹/۹۱۶	

- Printed Polylactic Acid Samples. *Materials* (Basel, Switzerland). 2017;10.
- [22] van Manen T, Janbaz S, Zadpoor AA. Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers. *Materials Horizons*. 2017;4(6):1064-9.
- [23] Noroozi R, Bodaghi M, Jafari H, Zolfagharian A, Fotouhi M. Shape-Adaptive Metastructures with Variable Bandgap Regions by 4D Printing. *Polymers*. 2020;12(3):519.
- [24] Hu GF, Damanpack AR, Bodaghi M, Liao WH. Increasing dimension of structures by 4D printing shape memory polymers via fused deposition modeling. *Smart Materials and Structures*. 2017;26(12):125023.
- [25] Rajkumar AR, Shanmugam K. Additive manufacturing-enabled shape transformations via FFF 4D printing. *Journal of Materials Research*. 2018;33(24):4362-76.
- [26] Maharana T, Pattanaik S, Routaray A, Nath N, Sutar AK. Synthesis and characterization of poly(lactic acid) based graft copolymers. *Reactive and Functional Polymers*. 2015;93:47-67.
- [27] Wang K, Strandman S, Zhu XX. A mini review: Shape memory polymers for biomedical applications. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2017;11(2):143-53.
- [28] Dehghan Tezerjani S M, Sadegh Yazdi M, Hosseinzadeh M H. The effect of 3D printing parameters on the shape memory properties of 4D printed polylactic acid circular disks: An experimental investigation and parameters optimization. *Materials Today Communications*. 2022; 33: 104262.
- [29] 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
- [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.
- [9] S. Tibbits, The emergence of "4D printing", TED conference, 2013.
- [10] Momeni F, M.Mehdi Hassani, N S, Liu X, Ni J. A review of 4D printing. *Materials & Design*. 2017;122:42-79.
- [11] González-Henríquez CM, Sarabia-Vallejos MA, Rodríguez-Hernández J. Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications. *Progress in Polymer Science*. 2019;94:57-116.
- [12] Lui Y, Sow W, Tan L, Wu Y, Lai Y and Li H. 4D Printing and Stimuli-responsive Materials in Biomedical Applications. *Acta Biomaterialia*. 2019;92:19-36.
- [13] Yarali E, Taheri A, and Baghani M. A comprehensive review on thermomechanical constitutive models for shape memory polymers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2020;31:1243-1283.
- [14] Prasad A, Moon S, Joga. Rao I. Thermo-mechanical modeling of viscoelastic crystallizable shape memory polymers. *International Journal of Engineering Science*. 2021;167:103524.
- [15] 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.
- [16] Liu Y, Zhang W, Zhang F, Lan X, Leng J, Liu S, et al. Shape memory behavior and recovery force of 4D printed laminated Miura-origami structures subjected to compressive loading. *Composites Part B: Engineering*. 2018;153:233-42.
- [17] Tandon G, Baur J, McClung A. *Shape Memory Polymers for Aerospace Applications: Novel Synthesis, Modeling, Characterization and Design*: Destech Publications, Incorporated; 2015.
- [18] Carrell J, Gruss G, Gomez E. Four-dimensional printing using fused-deposition modeling: a review. *Rapid Prototyping Journal*. 2020;26(5):855-69.
- [19] Solomon IJ, Sevvel P, Gunasekaran J. A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today: Proceedings*. 2021;37:509-14.
- [20] Bodaghi M, Damanpack AR, Liao WH. Adaptive metamaterials by functionally graded 4D printing. *Materials & Design*. 2017;135:26-36.
- [21] 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-

پیوست:

جدول الف: تحلیل واریانس مدل میزان ارتفاع مخروط بازیابی شده

منبع	مقدار P	مقدار F	میانگین توان دوم	df	مجموع مربعات
مدل	<0/0001	910/06	1815/59	23	41758/59
A (ارتفاع لایه)	<0/0001	1023/35	2041/60	1	2041/60
B (دمای بستر)	0/0002	591/72	1180/49	1	1180/49
C (دمای نازل)	<0/0001	1010/58	2016/13	1	2016/13
D (سرعت چاپ)	<0/0001	1752/02	3495/32	1	3495/32
AB	0/0006	234/89	468/61	1	468/61
AC	0/001	163/44	326/07	1	326/07
AD	0/0035	71/25	142/15	1	142/15
BC	0/4089	0/9169	1/83	1	1/83
BD	0/0006	227/14	453/16	1	453/16
CD	0/8041	0/0733	0/1463	1	0/1463
A ²	<0/0001	969/41	1934	1	1934
B ²	0/0005	260/71	520/12	1	520/12
C ²	0/0004	327/44	653/25	1	653/25
ABC	0/0028	83/70	166/99	1	166/99
ABD	0/0074	42/36	84/50	1	84/50
ACD	0/0008	189/67	378/40	1	378/40
BCD	0/0001	642/87	1282/54	1	1282/54
A ² B	0/0005	260/97	520/64	1	520/64
A ² C	0/0005	281/92	562/44	1	562/44
A ² D	0/0013	139/81	278/92	1	278/92
AB ²	0/0007	207/83	414/63	1	414/63
ABCD	0/0002	469/27	936/21	1	936/21
A ² B ²	0/0002	596/01	1189/05	1	1189/05
Residual			2	3	5/99
Lack of Fit	0/9993	1/114×10 ⁻⁶	3/333×10 ⁻⁶	1	3/333×10 ⁻⁶
Pure Error			2/99	2	5/99
Cor Total				26	41764/57
		Adj R ² = 0/9988			
					R ² = 0/9999



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

Seyyed Mohammad Dehghan Tezerjani¹, Mohammadhadi Hosseinzadeh^{2*}, Milad Sadegh Yazdi³

¹ M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

² Researcher, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

³ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

HIGHLIGHTS

- Making the 4D printing process controllable is very important.
- Controllability is possible by adjusting the printing parameters.
- The relationship between applied pre-stress and the effective parameters was obtained.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 13 August 2022

Received in revised form: 23 August 2022

Accepted: 12 September 2022

Available online: 18 October 2022

*Correspondence:

m.hadi.hosseinzadeh@gmail.com

How to cite this article:

S.M.D. Tezerjani, M. Hosseinzadeh, M.S. Yazdi. Investigation of the effect of FDM 3D printing parameters on conical shape recovery in the 4D printing process. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2022; 18(4):133-146.

Keywords:

4D printing

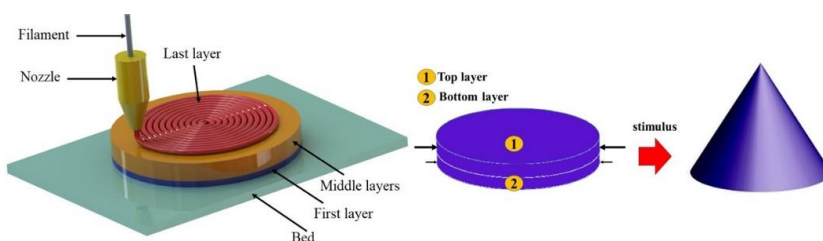
Controllability

Pre-stress

Shape recovery

FDM parameters

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

4D printing is an emerging technology in which the printed parts can change their shapes when exposed to an external stimulus. In this research, a relationship between the pre-stress stored in the printed discs and the amount of shape recovery was obtained using FE simulations. Then, the effect of layer height, bed temperature, nozzle temperature, and printing speed on the amount of pre-stress applied in the printed discs based on polylactic acid material in the Fused deposition modeling 3D printing was investigated. In this paper, 27 experimental tests were performed using a central composite design, and modeling was done with the least cost and time and the most reliability and accuracy. Then a relationship between the mentioned parameters and the amount of pre-stress applied to the printed discs was obtained. R^2 and Adj R^2 of the model were obtained more than 99% which shows the high accuracy of the model. In order to validate the experimental model, simulation and experimental tests were carried out in the conditions of the highest amount of shape recovery. The results showed that the experimental model error is 5.9% and the error between the applied pre-stress and the amount of shape recovery is 2.95%.

