



Fabrication and Evaluation of Print Quality of Polylactic Acid Cylindrical Scaffolds as Stents and the Effect of Geometry on their Shape Memory Properties

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Zare S.¹ *MSC*,
Golzar M.^{1*} *Phd*,
Ansari M.² *Phd*

How to cite this article

Zare S, Golzar M, Ansari M. Fabrication and Evaluation of Print Quality of Polylactic Acid Cylindrical Scaffolds as Stents and the Effect of Geometry on their Shape Memory Properties. *Modares Mechanical Engineering*.2021;21(2):91-98.

¹ Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Phone: -
Fax: -
M.golzar@modares.ac.ir

Article History

Received: September 09, 2020

Accepted: November 08, 2020

ePublished: February 16, 2021

ABSTRACT

Memory-shaped polymers are thermally induced subsets of intelligent materials that require thermomechanical behavior to accurately understand their function. In this study, polymeric memory scaffolds were fabricated using polylactic acid by molten labeling method in reticular honeycomb, rhombic and elliptical forms. Parameters such as longitudinal dimensions and the wall thickness of printed scaffolds compared to the designed scaffolds and solutions were presented to enhance the printing accuracy. Built-in scaffolds can be a good option for stent use. Formal memory properties experiments with 30% axial strain were performed to study the shape memory behavior of polymer on scaffolds. The results showed that the percentage of shape recovery in scaffolds with symmetric angular grid networks was higher than elliptical reticular stents. The minimum percentage of longitudinal recovery belonged to the elliptical reticular stent and was 74.5%. The percentage of longitudinal recovery of honeycomb and rhododendron reticular stents is approximately equal to 80.3%. The results of this study can be used to optimize the stent grid geometry to increase the retrieval force to resolving vascular clogging.

Keywords: Shape Memory Scaffold, Stent, Experimental Test, Shape Recovery

CITATION LINKS

[1] Smart materials and structures: Springer Science & Business Media. [2] fabrication of smart self-expanding biocompatible stents in body temperature. [3] Thermo-induced shape-memory PEG-PCL copolymer ... [4] Comparison of femoropopliteal artery stents under axial and radial compression, axial tension, bending, and torsion deformations. [5] Force recovery evaluation of thermo-induced shape-memory polymer stent ... [6] Improvement of mechanical performance of bioresorbable magnesium alloy coronary artery stents ... [7] Mechanical, biological, and microstructural properties of biodegradable models of polymeric stents made of PLLA and alginate fibers. [8] Unconstrained recovery characterization of shape-memory polymer networks for cardiovascular applications. [9] An experimental investigation on structural design of shape memory polymers. [10] Designing of PLA scaffolds for bone tissue replacement fabricated by ordinary commercial 3D printer. [11] Mechanical properties and shape memory effect of 3D-printed PLA-based porous scaffolds. [12] Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites ... [13] Preparation of Body-Temperature-Triggered Shape-Memory Polyurethane with biocompatibility using Isosorbide and Castor Oil. [14] Crystallinity as a tunable switch of poly (L-lactide) shape memory effects. [15] Pendant allyl crosslinking as a tunable shape memory actuator for vascular applications. [16] Tunable shape-memory behaviors in amorphous polymers through bound solvent. [17] Assessing hemo-compatibility and mechanical properties of shape memory polymer stent PU/PCL compared with metallic. [18] Drug-eluting stents: A multidisciplinary success story. [19] Thermal characterization of polylactides. [20] ASTM, editor Standard test method for transition temperatures of polymers by differential scanning calorimetry ... [21] Shape forming by thermal expansion mismatch and shape memory locking ... [22] BIORESORBABLE CORONARY SCAFFOLDS: CURRENT STATE OF EVIDENCE. [23] Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters...

ساخت و بررسی کیفیت چاپ داربست‌های استوانه‌ای مشبک پلی‌لاکتیک‌اسید با کاربرد استنت و تاثیر هندسه بر خواص حافظه شکلی آنها

شهاب‌الدین زارع MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمد گلزار * Phd

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مهدی انصاری Phd

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

چکیده

داربست‌های حافظه‌شکلی با محرک دما زیر مجموعه‌ای از مواد هوشمند می‌باشد که مطالعه رفتار ترمومکانیکی آن‌ها برای شناخت دقیق عملکرد ضروری است. در این مقاله داربست پلیمری حافظه‌شکلی از جنس پلی‌لاکتیک‌اسید به روش لایه نشانی مذاب در سه حالت استوانه‌ای مشبک لانه‌زنبوری، لوزی‌شکل و بیضی‌شکل ساخته شد. پارامترهایی نظیر ابعاد طولی و ضخامت دیواره‌ی داربست‌های به چاپ رسیده، نسبت به داربست‌های طراحی شده مورد مقایسه قرار گرفت و راهکارهایی جهت بالا بردن دقت چاپ ارائه گردید. داربست‌های ساخته شده گزینه مناسبی برای کاربرد استنت می‌باشند. آزمایش‌هایی با اعمال کرنش محوری ۳۰٪ به منظور مطالعه رفتار حافظه شکلی پلیمر بر روی داربست‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که درصد بازیابی شکل داربست‌های دارای شبکه‌های توری شکل متقارن زاویه‌دار، نسبت به ساختار مشبک بیضی‌شکل بیشتر است. کمینه درصد بازیابی طولی متعلق به ساختار مشبک بیضی‌شکل بوده و برابر است با ۷۴/۵٪. بازیابی طولی داربست‌های مشبک لانه‌زنبوری و لوزی‌شکل تقریباً یکسان و برابر با ۸۰/۳٪ می‌باشد. از نتایج این پژوهش می‌توان در طراحی استنت‌هایی با درصد بازیابی شکلی بالا و نیز بهینه‌سازی هندسه شبکه‌های استنت به منظور افزایش نیروی بازیابی هنگام برطرف کردن گرفتگی عروق استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: داربست حافظه‌شکلی، استنت، آزمایش تجربی، بازیابی شکلی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸

*نویسنده مسئول: M.golzar@modares.ac.ir

۱-مقدمه

گرفتگی عروق همواره انسان‌ها را با مخاطرات جدی روبرو می‌کند. امروزه این عامل به یکی از عوامل اصلی مرگ و میر تبدیل شده است. در حال حاضر ضمن توجه به روش‌های پیشگیری بیماری‌های قلبی، در توسعه روش‌های درمان، گام‌های خوبی برداشته شده است. در سال‌های اخیر ورود مواد هوشمند (Smart material) به کاربردهای بیومواد راه‌های درمانی جدیدی را مطرح کرده است.

مواد هوشمند مشابه موجودات زنده به محرک‌های مختلفی مانند رطوبت، دما، میدان الکتریکی و پیزو الکتریک پاسخ نشان

می‌دهند^[1]. پلیمرهای حافظه‌شکلی (Shape memory polymers (SMPs)) با محرک دمایی، زیر مجموعه‌ای از مواد هوشمند است. در پلیمرهای حافظه‌شکلی با محرک دما، می‌توان با کنترل تابع دما نسبت به ثابت نگه‌داشتن و بازیابی شکل (Shape recovery) پلیمر اقدام نمود. در کاربردهای پزشکی از پلیمرهای هوشمند می‌توان در تجهیزات غیر کاشتنی و کاشتنی استفاده نمود. در کاربردهای کاشتنی باید توجه نمود پلیمر سبب بروز سمیت و تاثیرات منفی در تمایز و رشد سلول‌ها نشود. در این پژوهش بر روی کاربرد استنت‌های (Stents) پلیمری حافظه‌شکلی به عنوان یک وسیله کاشتنی تمرکز شده است. استنت قطعه‌ای است که در بازگشایی عروق و مجاری مانند رگ‌های قلب، کاروتید، سرخرگ شکمی، دستگاه گوارش، مجاری ادراری، نای و مجاری تنفسی کاربرد دارد. در کاربرد عروقی^[2]، استنت مشابه داربست برای جلوگیری از گسترش پلاک (Plaque) عمل می‌کند و سبب باز شدن مسیر جریان می‌شود. برخی از استنت‌ها به صورت خودبازشونده عمل می‌کنند^[3] ولی اکثریت قریب به اتفاق استنت‌ها به وسیله بالون^[4] باز می‌شوند. استفاده از مواد حافظه‌شکلی امکان ساخت استنت‌های خودبازشونده را فراهم می‌کنند. انصاری و همکاران استنت‌های لوله‌ای خودبازشونده PU/PCL را با قابلیت تحریک حرارتی به روش اختلاط حلال ساخته و نیروی بازیابی آن را اندازه‌گیری نموده‌اند^[5].

وانگ و همکاران رفتار خمشی استنت پی‌ال‌ال‌آ (PLLA) را در بارگذاری خمش سه نقطه به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. آن‌ها طراحی استنت را مشابه استنت‌های فلزی انجام داده و از بالن برای گسترش استنت استفاده کرده‌اند^[6]. علت وجود مسیرهای سینوسی در هندسه‌ی استنت‌های فلزی، ایجاد تغییر شکل پلاستیک در انحناها و ماندگاری شکل استنت پس از گسترش می‌باشد. حال آن‌که در نظر گرفتن این مکانیزم برای پلیمرها صحیح نمی‌باشد زیرا پلیمرها در کرنش‌های به مراتب بالاتری دچار تغییر شکل پلاستیک شده و لازم است بالن بیش از ابعاد نهایی استنت باز شود.

ماگدالنا و همکاران مقاومت فشاری استنت‌های ساخته شده از پی‌ال‌ال‌آ و رشته‌های آلزینات را در چهار هندسه با یکدیگر مقایسه کردند. آن‌ها نتایج آزمایش‌های خود را با استنت‌های فلزی مقایسه کردند^[7]. نتایج نشان‌دهنده آن است که در برخی از ضخامت‌های پی‌ال‌ال‌آ، سفتی شعاعی استنت‌های ساخته شده از برخی از استنت‌های فلزی بیشتر می‌باشد. کیفیت ساخت استنت‌های ماگدالنا و همکاران خیلی مطلوب نبوده و آن‌ها سایر خواص مکانیکی استنت را گزارش نکرده‌اند. بعلاوه اثر پارامترهایی مانند قطر که به شدت بر نتایج مقاومت شعاعی اثر دارد در نظر گرفته نشده است.

مالکیس و همکاران تحقیق جامعی در مورد ۱۲ استنت فلزی تجاری انجام دادند و استنت‌ها را در بارگذاری خمشی، فشار

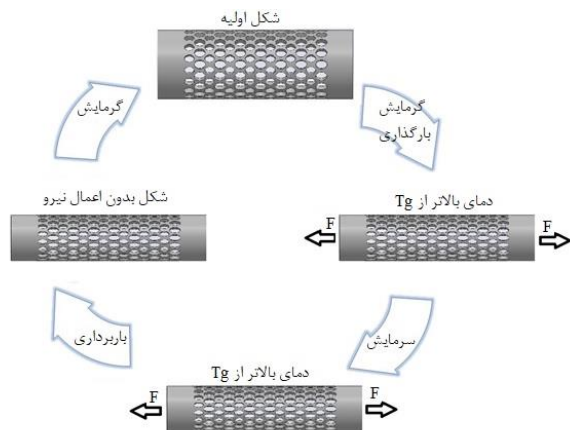
طراحی استنت‌های مشبک حافظه‌شکلی، با هدف بهبود رفتار بازیابی شکلی و نیرویی، قابلیت استفاده را دارد.

۲- بیان مسئله، نوآوری و ذکر اهداف

بنظر می‌رسد ساخت داربست‌های پلیمری به منظور توسعه استنت‌ها از اهمیت و محبوبیت بالایی در بین کاربردهای پزشکی برخوردار است. در عین حال محدودیت‌های استنت‌های فلزی^[17] مانند لختگی خون در محل قرارگیری استنت، ناسازگاری بافت بیمار با آلیاژهای فلزی و عدم انطباق هندسه استنت با گرفتگی شریان مورد نظر، جزو چالش‌های برخی از استنت‌های فلزی می‌باشد^[18]. فناوری نوین چاپ سه بعدی توانایی حل برخی از محدودیت‌ها را دارد زیرا می‌توان آن را روشی سریع در ساخت استنت‌های شخصی‌سازی شده و مواد زیست‌سازگار دانست. چنین استنت‌های چاپی نه تنها کاملاً با هندسه‌ی بافت بیمار مطابقت دارد بلکه می‌تواند ریزساختارها و سایر ترکیبات سلولی را نیز داشته باشد. بنابراین چنین استنت‌هایی می‌توانند مشکل زیستی و دیگر مشکلات استنت‌های سنتی را حل کنند. از این رو بررسی تاثیر شکل اولیه استنت در خواص حافظه‌شکلی استنت‌های شخصی سازی شده مورد نیاز می‌باشد. ارائه‌ی هندسه‌های مختلفی از استنت‌های پلیمری حافظه‌شکلی و بررسی رفتار بازیابی شکلی آن‌ها از جنبه‌ها نوآوری این پژوهش می‌باشد. نتایج این تحقیق سبب نزدیک شدن به الزامات ساخت استنت‌های شخصی سازی شده در آینده خواهد شد.

۳- روش تحقیق

در این مقاله از آزمایش‌های تجربی به منظور ارزیابی رفتار بازیابی استنت‌های حافظه‌شکلی استفاده شده است. همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد مواد حافظه‌شکلی پس از تغییر شکل، توسط محرک‌های خارجی مانند دما به شکل اولیه خود بازمی‌گردند^[19]. چرخه حافظه‌شکلی مطابق شکل ۱ شامل مراحل گرمایش، بارگذاری، سرمایش، باربرداری و در نهایت گرمایش می‌باشد. ابتدا



شکل ۱) برنامه‌دهی به پلیمرهای حافظه شکلی

شعاعی، فشار محوری، کشش و پیچش با یکدیگر مقایسه کردند^[4]. نتایج نشان داد استنت‌های اف‌پی‌آ (FPA femoropopliteal artery) در پاسخهای مکانیکی خود نسبت به حالت‌های تغییر شکل شریانی که با خم شدن اندام اتفاق می‌افتند، تفاوت چشمگیری دارند. سفتی شعاعی زیاد و مقاومت کم در برابر فشرده سازی محوری، خم شدن و پیچ خوردگی برای عملکرد استنت فپی‌آ مفید است زیرا این امر به استنت اجازه می‌دهد تا قطر لومن را در شریان‌های بیمار حفظ کند و استنت می‌تواند با تغییر شکل‌هایی که به طور طبیعی با خم شدن اندام اتفاق می‌افتد همراهی کند.

یاکاکی و همکاران در بررسی استنت‌های قلبی عروقی پلیمری، پس از ساخت و مقایسه بین استنت استوانه‌ای سلب و مشبک با وزن ۵۰ درصد نسبت به استوانه سلب، گزارش کردند که استوانه مشبک در زمان کوتاه‌تر درصد بازیابی بالاتری را نسبت به استوانه سلب از خود نشان می‌دهد^[8]. نتایج این تحقیق را میتوان دلیلی بر انتخاب هندسه مشبک دانست.

در کنار بهره‌گیری از مواد حافظه‌شکلی استفاده از فناوری ساخت افزودنی این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان طراحی‌های مختلفی را در ساخت استنت بکار گرفت. طراحی ساختار مشبک به واسطه‌ی ایجاد قابلیت تغییر در کرنش وارد شده به استنت می‌تواند سبب کنترل در بازیابی شکلی و بازیابی نیرویی استنت شود^[9]. پلی‌لاکتیک‌اسیدها به واسطه خواص مطلوب بیولوژیکی^[10]، حافظه‌شکلی^[11] و فرایندپذیری^[12] گزینه مناسبی برای استفاده در کاربرد داربست‌های پزشکی مانند داربست‌های استخوانی و استنت‌ها^[13] می‌باشند.

ماده حافظه‌شکلی با قابلیت تحریک دمایی، در دمایی مشخص به نام دمای انتقال (Transition Temperature) دچار تغییر در ساختار می‌شود. بازیابی شکل به علت تغییر دما، اثر حافظه شکلی حرارتی نام دارد. معمولاً چنانچه دما به دمای انتقال ماده حافظه شکلی نرسد، اثر حافظه شکلی به صورت کامل دیده نمی‌شود^[14]. برای یافتن دما و بررسی عملکرد حرارتی ماده حافظه شکلی، از آزمایش گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) استفاده شده است.

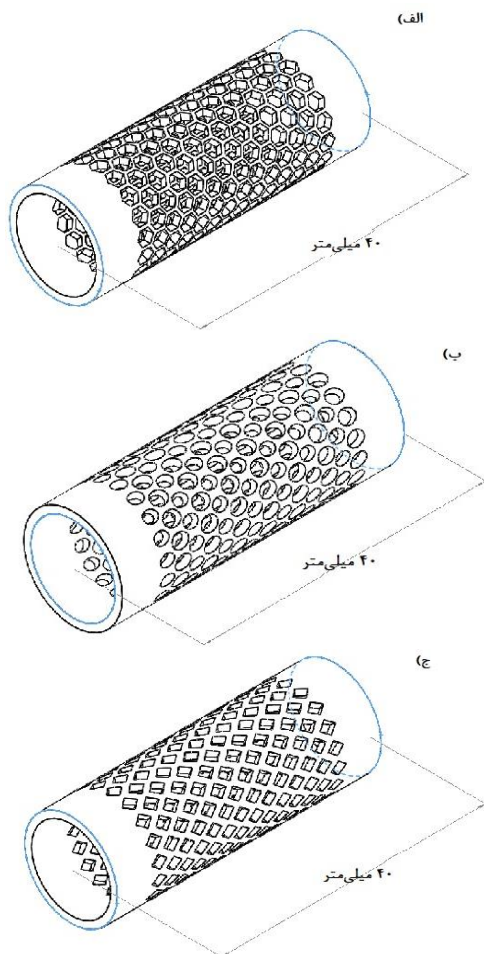
در استفاده از مواد حافظه‌شکلی برای ساخت استنت، بررسی خواص مواد جهت تغییر شکل (Deformation)، بازگشت به شکل مورد نظر^[15] و تاثیر شکل اولیه در کارکرد نهایی استنت از اهمیت بالایی برخوردار است^[16]. لذا در این پژوهش تاثیر اشکال اولیه استنت‌های استوانه‌ای مشبک در خاصیت حافظه شکلی مورد بررسی قرار گرفته است. استنت‌ها به طول ۴۰ میلی‌متر، شعاع ۷ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر به صورت مشبک لانه‌زنبوری، لوزی‌شکل و بیضی‌شکل ساخته شد و تاثیر هندسه‌ی اولیه در رفتار بازیابی شکلی بررسی شد. نتایج این تحقیق در توسعه

۴- ساخت قطعات

۴-۱- طراحی داریست

برای طراحی داریست‌ها از سه طرح مشبک، مشابه طرح استنت‌های فلزی [22] الگو برداری شد. برای ساخت از فرآیند لایه نشانی مذاب توسط دستگاه افدی‌ام (FDM) استفاده شده است. بر مبنای پژوهش رودباریان و همکاران [9] به منظور مقایسه بهتر و نرمالیز کردن نتایج، مبنای وزن ثابت برای تمامی طراحی‌ها انتخاب شد. طراحی داریست‌ها، دارای وزن مشابه ۱/۱۲ گرم با تلورانس ± 0.03 می‌باشد. وزن توسط برنامه سالی‌دورکز (SolidWorks) با در نظر گرفتن چگالی پلی‌لاکتیک اسید به مقدار ۱/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب محاسبه شده است.

در شکل ۳، شماتیک سه طرح استنت در محیط شبیه‌سازی (Simulation) مشاهده می‌شود که مورد استفاده در فرایند چاپ می‌باشد. ضخامت هر سه استنت برابر با ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ الف استنت مشبک لانه‌زنبوری با شبکه‌های لانه‌زنبوری به ضلع ۱/۱۵ میلی‌متر، ۳ ب استنت مشبک بیضی‌شکل به ابعاد قطر کوچک ۱/۵۰ و قطر بزرگ ۲/۰۰ میلی‌متر و قسمت ۳ ج استنت مشبک لوزی‌شکل به ضلع ۱/۵۰ نمایش داده شده است.

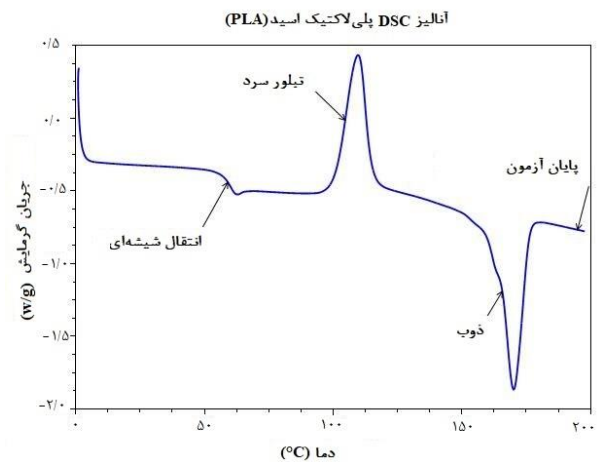


شکل ۳) استنت‌های طراحی شده، الف) مشبک لانه‌زنبوری ب) مشبک بیضی‌شکل ج) مشبک لوزی‌شکل

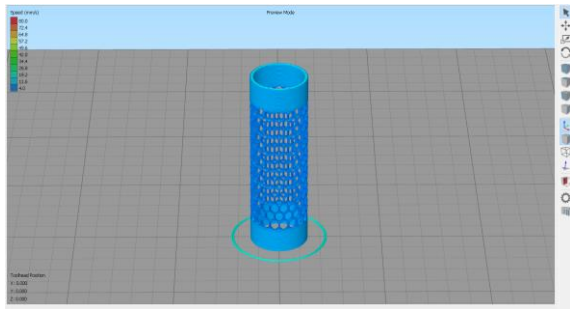
شکل اولیه حرارت داده می‌شود و تغییر شکل اعمال می‌شود. در مرحله دوم پس از سرمایش تقریباً شکل موقت در ماده باقی می‌ماند و پس از گرمایش، ماده مجدداً تمایل به بازگشت به شکل اولیه خود را دارد.

آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی، یک ابزار بنیادی در آنالیز حرارتی است و در بسیاری صنایع از قبیل داروسازی، پلیمر، کشاورزی، مطالعه نیمه هادی‌ها، صنایع غذایی و غیره کاربرد دارد. در این آزمون مقداری از ماده گرم یا سرد و تغییرات ظرفیت حرارتی آن با گرما ثبت می‌شود. بررسی تغییرات ظرفیت حرارتی امکان تشخیص انتقالی از قبیل ذوب، انتقال شیشه‌ای، تغییرات فازی و پخت را می‌دهد. در کالریمتری روبشی تفاضلی، انرژی مورد نیاز برای برقراری اختلاف دمایی صفر بین ماده و نمونه مرجع به صورت تابعی از دما یا زمان اندازه‌گیری می‌شود. این آزمون امکان تشخیص اثرات حرارتی گرماگیر و گرمازا، آنتالپی‌های انتقال و واکنش (مساحت پیک‌ها)، تعیین دماهای انتقال و اندازه‌گیری ظرفیت گرمایی را فراهم می‌کند. نمونه باید به خوبی در ظرف نمونه متراکم شود و با ظرف نمونه در تماس حرارتی مناسب باشد که در این مورد نرخ گرمایش برابر با ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه بوده است. گاز نیتروژن (N₂) با درجه خلوص بالا، رایج‌ترین گاز مورد استفاده می‌باشد. طبیعت گازی که استفاده می‌شود تأثیر مهمی بر شکل پیک DSC دارد. شرایط آزمایش DSC جهت تعیین نقطه ذوب، بلورینگی و نقطه شیشه‌ای شدن مطابق با استاندارد ASTM D3418 در نظر گرفته شده است [20].

نتایج آزمایش DSC در شکل ۲ نشان می‌دهد که دمای انتقال شیشه‌ای ماده پلی‌لاکتیک‌اسید برابر ۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بنابراین دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای اعمال تغییر شکل و دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) به عنوان دمای سرمایش انتخاب گردید.



شکل ۲) نتایج آنالیز DSC پلی‌لاکتیک‌اسید [21]



شکل ۵) نمایی از آماده‌سازی استنت در برنامه سیمپلی‌فای‌تری‌دی

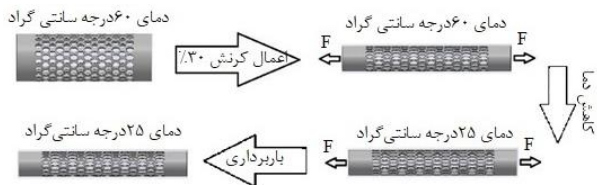
(۲۵ درجه سانتی‌گراد) به مدت ۶۰ ثانیه قرار داده شدند. سپس کرنش محوری حذف شد. شکل ۶ شماتیکی از فرآیند اعمال کرنش به استنت را نشان می‌دهد. در مرحله بعد استنت‌ها بدون اعمال نیرو ۹۰ ثانیه در دمای انتقال شیشه‌ای قرار گرفتند تا به شکل اولیه خود بازگردند. اندازه قطعات بعد از سرد کردن استنت‌ها تا دمای محیط و بعد از قرارگیری در برابر محرک دما ثبت و در جدول ۲ گزارش شده است. نتایج تست بازیابی شکل از طریق فرمول (۱) محاسبه و در جدول ۲ گزارش شده است.

$$\frac{l_1 - l_0}{l_0} = SR \quad (1)$$

در فرمول (۱) متغیر l_0 طول اولیه، l_1 طول شکل بعد از بازیابی و SR بازیابی شکل می‌باشد.

۵-ارائه نتایج و بحث

پس از چاپ، جرم قطعات توسط ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم مورد بررسی قرارگرفت که وزن داربست‌های بیضی‌شکل، لانه‌زنبوری و لوزی‌شکل به ترتیب برابر با ۱/۱۲ و ۱/۱۱ و ۱/۱۵ گرم اندازه‌گیری شد. نمونه‌های چاپ شده دارای وزن بیشتر می‌باشد و درصد تطبیق آن‌ها با وزن محاسبه شده، برای نمونه‌ی لوزی‌شکل برابر با ۹۶/۵۲ درصد، نمونه‌ی بیضی‌شکل ۹۷/۳۲ درصد و نمونه‌ی لانه‌زنبوری ۹۶/۳۹ درصد می‌باشد. علت این عدم تطابق را میتوان تغییر چگالی فیلامنت پی‌ال‌آ (PLA) پس از رسیدن به چاپ و عدم تطابق ابعادی نمونه‌ها دانست.



شکل ۶) شماتیکی از اعمال کرنش

جدول ۲) نتایج بررسی دقت چاپ (وزن)

اشکال	وزن محاسبه شده توسط برنامه solidworks (g)		وزن اندازه‌گیری شده درصد تطابق وزن
	(g)	(%)	
مشبک لوزی شکل	۱/۱۱	۱/۰±۱۵/۰۱	۹۶/۵۲
مشبک بیضی شکل	۱/۰۹	۱/۰±۱۲/۰۱	۹۷/۳۲
مشبک لانه‌زنبوری	۱/۰۷	۱/۰±۱۱/۰۱	۹۶/۳۹

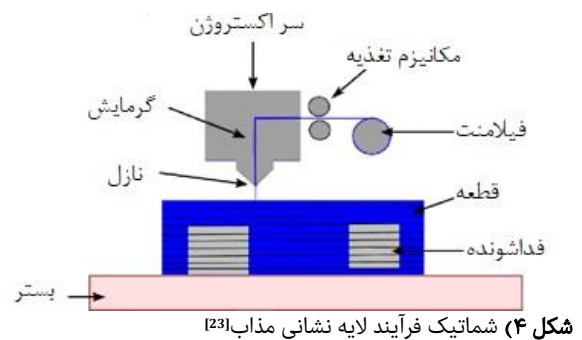
۲-۴- آماده سازی چاپ

روش ساخت افزودنی مورد استفاده در این پژوهش روش لایه نشانی مذاب (FDM) (Fused Deposition Modeling) است. فرآیند افدئی‌ام (FDM) فرآیندی است که در آن ماده ترموپلاستیک به شکل فیلامنت از میان یک سر نازل گرم‌کن عبور کرده، ذوب شده و بر روی میز نشاندن می‌شود. قطعه بر اساس طرح از قبل مشخص شده به صورت لایه به لایه ساخته شده و بر روی هم به کمک حرکت افقی عمودی نازل قرار می‌گیرد. (شکل ۴)

برای رسیدن به پارامترهای چاپگر سه بعدی (چاپگر سه‌بعدی کوانتوم ۲۰۲۵ Quantum 2025) متغیرهایی نظیر دمای مذاب، سرعت پرینت، ضخامت لایه و ارتفاع لایه بر روی استنت‌ها زیادی آزمایش شدند و در نهایت بهترین و مناسب‌ترین پارامترها تعیین شدند. هر سه نوع استنت با استفاده از پارامترهای یکسان مشخص شده در جدول ۱ ساخته شده‌اند. زمان تقریبی چاپ هر سه نوع استنت ۶۵ دقیقه می‌باشد.

برای ساخت سه طرح استنت، ابتدا مدل استنت از نرم افزار شبیه‌سازی به نرم افزار چاپگر سه بعدی انتقال داده شده و سپس پارامترهای چاپ تعیین می‌شود. پارامترهای چاپ دستگاه لایه‌نشانی مذاب در جدول ۱ بیان شده است. برنامه‌ی استفاده شده در پژوهش یکی از پرکاربردترین برنامه‌های چاپگرهای سه بعدی به نام سیمپلی‌فای‌تری‌دی (Simplify3D) می‌باشد. شکل ۵ نمایی از این برنامه است.

برای بررسی عملکرد استنت حافظه شکلی و مشاهده کمی و کیفی عملکرد استنت‌ها، فرآیند مطابق با شکل ۱ انجام شد. ابتدا با افزایش دما تا دمای انتقال شیشه‌ای (۶۰ درجه سانتی‌گراد) و اعمال کرنش محوری ۳۰٪، استنت‌ها به شکل ثانویه خود رسیدند. سپس استنت‌ها با حفظ تغییر شکل در دمای محیط



شکل ۴) شماتیک فرآیند لایه نشانی مذاب [23]

جدول ۱) پارامترهای دستگاه افام‌دی (FDM)

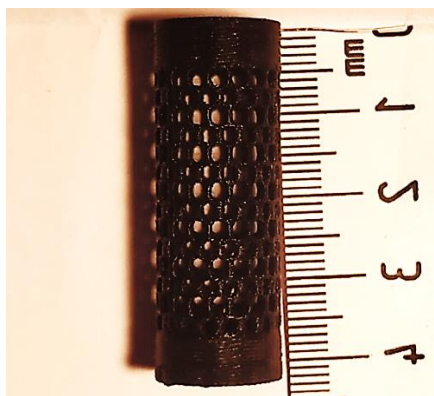
مشخصات	واحد	مقدار
قطر فیلامنت	mm	۱/۲۵
قطر نازل	mm	۰/۳
سرعت پرینت	mm/s	۴۰
ضخامت لایه	mm	۰/۳۶
ارتفاع لایه	mm	۰/۱
دمای مذاب	°C	۱۹۰
درصد پرشوندگی	%	۱۰۰

استنت مشبک لوزی شکل، ب استنت مشبک لانه‌زنبری و ج استنت مشبک بیضی شکل نشان داده شده است.

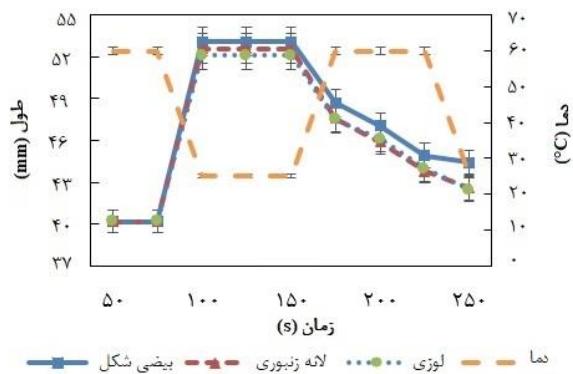
شکل ۸ تصویری از استنت بیضی شکل چاپ شده می‌باشد که طول آن نمایش داده شده است.

شکل ۹ گزارشی از روند تغییرات دما و طول هر سه داربست را در زمان‌های مختلف در روند انجام آزمایش نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹، محور افقی مدت زمان سپری شده از شروع آزمایش بر حسب ثانیه، محور عمودی سمت چپ طول بر حسب میلی‌متر و محور عمودی سمت راست دما بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

شکل ۱۰ مقایسه‌ی بین درصد بازگشت استنت‌های مشبک لوزی شکل، بیضی شکل و لانه‌زنبری را نسبت به شکل اولیه نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شکل ۱۰، استنت‌هایی که به صورت مشبک بیضی شکل تولید شده‌اند از توانایی بازیابی شکل اولیه کمتری نسبت به لوزی شکل و لانه‌زنبری برخوردار می‌باشند. اگرچه مقدار بازیابی در حدود ۸۰٪ مطلوب است اما هدف پژوهش‌های بعدی افزایش بازیابی در کرنش‌های بیشتر می‌باشد. درصد بازگشت شکل شکل‌های مختلف داربست‌های حافظه‌شکلی در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۸ طول استنت بیضی شکل چاپ شده



شکل ۹ نمودار زمان-طول-دما استنت حافظه‌شکلی

جدول ۳ نتایج اندازه‌گیری قطعات به کمک کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر و مقایسه آن با ابعاد داربست طراحی شده و چاپ شده را نشان می‌دهد. مطابق اطلاعات جدول مشاهده می‌گردد که در کمترین حالت، طول داربست‌ها با دقت ۹۹/۵۷ درصد نسبت به نمونه‌ی طراحی شده به چاپ رسیده است که این اختلاف می‌تواند بر اثر عیوب دستگاه، انقباض فیلامنت پلی‌لاکتیک اسید و مشکلات ضمن چاپ باشد. برای افزایش این تطابق در مواردی که به دقت بالاتری نیاز است می‌توان به دو روش به شکل نهایی با دقت بالاتر دست یافت که در زیر بیان شده است:

در روش اول می‌توان به عیوب احتمالی دستگاه و مشکلات ضمن چاپ نظیر ایزوله کردن دستگاه برای پیشگیری از افت دما، تنظیم دقیق استپ‌موتورها برای جلوگیری از عیوب حرکتی و دیگر مشکلات دستگاه و چاپ پرداخت. در روش دوم با توجه به اینکه درصد تطابق شکل‌ها در بازه‌ی نسبتاً مشابه از هم هستند، می‌توان نمونه‌های اولیه را طوری طراحی کرد که پس از چاپ به ابعاد مورد نظر برسند.

طبق نتایج، دقت چاپ در ضخامت نمونه‌ها در کمینه‌ترین حالت برابر با ۸۱/۹۶ درصد می‌باشد. برای افزایش درصد تطابق می‌توان به روش مذکور برای تطابق ابعاد طولی عمل کرد همچنین می‌توان با بررسی درصد پرشوندگی (که در این نمونه ۱۰۰٪ می‌باشد) و کاهش آن، از افزایش ناخواسته در ضخامت جلوگیری نمود و نمونه‌ای با دقت بالاتری به چاپ رساند.

شکل ۷ تصویری از استنت‌های به چاپ رسیده می‌باشد که در الف

جدول ۳ نتایج بررسی دقت چاپ (ابعاد)

اشکال	طول طراحی شده (mm)	طول به چاپ رسیده (mm)	ضخامت به چاپ رسیده (mm)	ضخامت طراحی شده (mm)	درصد تطابق ضخامت (%)
مشبک لوزی شکل	۴۰	۴۰/۰±۱۷/۰۵	۱	۱/۰±۱۹/۰۲	۹۹/۵۷
مشبک بیضی شکل	۴۰	۴۰/۰±۱۵/۰۵	۱	۱/۰±۲۲/۰۲	۹۹/۶۲
مشبک لانه‌زنبری	۴۰	۴۰/۰±۱۶/۰۵	۱	۱/۰±۲۲/۰۲	۹۹/۶۰

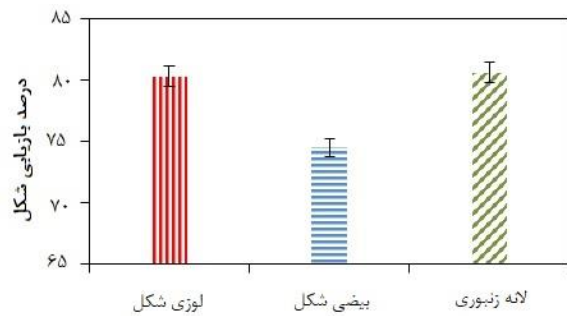


شکل ۷ استنت چاپ شده، (الف) مشبک لوزی شکل (ب) مشبک لانه‌زنبری (ج) مشبک بیضی شکل

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.
منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

- 1- Gandhi MV, Thompson B. Smart materials and structures: Springer Science & Business Media; 1992.
- 2- Shirsavar MA, Golzar M, Baghani M, Taghavimehr M. 67: fabrication of smart self-expanding biocompatible stents in body temperature. *BMJ Open*. 2017;7(Suppl 1).
- 3- Yang C-S, Wu H-C, Sun J-S, Hsiao H-M, Wang T-W. Thermo-induced shape-memory PEG-PCL copolymer as a dual-drug-eluting biodegradable stent. *ACS applied materials & interfaces*. 2013;5(21):10985-94.
- 4- Maleckis K, Deegan P, Poulson W, Sievers C, Desyatova A, MacTaggart J, et al. Comparison of femoropopliteal artery stents under axial and radial compression, axial tension, bending, and torsion deformations. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2017;75:160-8.
- 5- Ansari M, Golzar M, Baghani M, Shirsavar MA, Taghavimehr M. Force recovery evaluation of thermo-induced shape-memory polymer stent: Material, process and thermo-viscoelastic characterization. *Smart Materials and Structures*. 2019.
- 6- Wang Q, Fang G, Zhao Y-H, Zhou J. Improvement of mechanical performance of bioresorbable magnesium alloy coronary artery stents through stent pattern redesign. *Applied Sciences*. 2018;8(12):2461.
- 7- Bartkowiak-Jowska M, Będziński R, Szaraniec B, Chłopek J. Mechanical, biological, and microstructural properties of biodegradable models of polymeric stents made of PLLA and alginate fibers. *Acta of bioengineering and biomechanics*. 2011;13(4):21-8.
- 8- Yakacki CM, Shandas R, Lanning C, Rech B, Eckstein A, Gall K. Unconstrained recovery characterization of shape-memory polymer networks for cardiovascular applications. *Biomaterials*. 2007;28(14):2255-63.
- 9- 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.
- 10- Gregor A, Filová E, Novák M, Kronek J, Chlup H, Buzgo M, et al. Designing of PLA scaffolds for bone tissue replacement fabricated by ordinary commercial 3D printer. *Journal of biological engineering*. 2017;11(1):31.
- 11- Senatov FS, Niaza KV, Zadorozhnyy MY, Maksimkin A, Kaloshkin S, Estrin Y. Mechanical properties and shape memory effect of 3D-printed PLA-based porous scaffolds. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2016;57:139-48.
- 12- Akhoundi B, Behraves AH, Bagheri Saed A. Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2019;38(3):99-116.
- 13- Hong S-M, Cha J-R, Kim J-G. Preparation of Body-Temperature-Triggered Shape-Memory Polyurethane with biocompatibility using Isosorbide and Castor Oil. *Polymer Testing*. 2020:106852.



شکل ۱۰) نتایج تست‌های حافظه شکلی

جدول ۴) نتایج تست‌های بازیابی شکل

اشکال	کرنش (%)	طول اولیه 10 (mm)	طول ثانویه قبل از بازیابی 12 (mm)	طول بعد از بازیابی 11 (mm)	بازگشت SR (%)
مشبک لوزی شکل	۳۰	۴۰/۱۷	۵۲/۱	۴۲/۴۳	۸۰/۳
مشبک بیضی شکل	۳۰	۴۰/۱۵	۵۳/۱	۴۴/۴۱	۷۴/۵
مشبک لانه زنبوری	۳۰	۴۰/۱۶	۵۲/۶	۴۲/۵۷	۸۰/۶

۶- نتیجه‌گیری

بنابر کارکرد اصلی استنت‌ها یعنی برطرف کردن گرفتگی‌های عروقی، بدیهی است که افزایش درصد بازیابی شکلی و بازیابی نیرویی، دو مشخصه مهم استنت‌های حافظه شکلی می‌باشند. در این پژوهش درصد بازیابی شکلی سه نمونه استنت ساخته شده به روش ساخت افزودنی و از جنس پلی‌لاکتیک‌اسید به روش تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از بررسی و مقایسه نتایج حاصل از تست حافظه شکلی، مشاهده شد که استنت‌های مشبک بیضی شکل ساخته شده درصد بازیابی شکلی کمتری (۷۴/۵٪) نسبت به هندسه مشبک لوزی شکل (۸۰/۳٪) و لانه زنبوری (۸۰/۶٪) دارند.

دلایل مختلفی در بازیابی شکل پلیمرهای حافظه شکلی از قبیل ساختار کریستالی یا بی‌شکلی (آمورف) پلیمر بر آزادسازی تنش‌های پسماند توسط قطعه پلیمری موثر است. در این مقاله علت اختلافات ابعادی مشاهده شده در هندسه‌های مختلف را می‌توان کشیده شدن لایه‌های میانی و وارد شدن قسمت‌های بیشتری از داربست بیضی شکل به ناحیه پلاستیک نسبت به دو شبکه‌ی زاویه‌دار دیگر دانست.

تشکر و قدرانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده است.
تعارض منافع: مقاله حاضر حاصل پژوهش نویسندگان این مقاله است و هیچ‌گونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی و حقوقی وجود ندارد.

- 14- Sobota M, Jurczyk S, Kwiecień M, Smola-Dmochowska A, Musioł M, Domański M, et al. Crystallinity as a tunable switch of poly (L-lactide) shape memory effects. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2017;66:144-51.
- 15- Boire TC, Gupta MK, Zachman AL, Lee SH, Balikov DA, Kim K, et al. Pendant allyl crosslinking as a tunable shape memory actuator for vascular applications. *Acta biomaterialia*. 2015;24:53-63.
- 16- Xiao R, Zhang C, Gou X, Huang WM. Tunable shape-memory behaviors in amorphous polymers through bound solvent. *Materials letters*. 2017;209:131-3.
- 17- Yahyavi tafreshi M. Assessing hemo-compatibility and mechanical properties of shape memory polymer stent PU/PCL compared with metallic stent MSC thesis tmu. 2017.
- 18- Burt HM, Hunter WL. Drug-eluting stents: A multidisciplinary success story. *Advanced drug delivery reviews*. 2006;58(3):350-7.
- 19- Jamshidi K, Hyon S-H, Ikada Y. Thermal characterization of polylactides. *Polymer*. 1988;29(12):2229-34.
- 20- ASTM, editor Standard test method for transition temperatures of polymers by differential scanning calorimetry. ASTM; 1999.
- 21- Yuan C, Ding Z, Wang T, Dunn ML, Qi HJ. Shape forming by thermal expansion mismatch and shape memory locking in polymer/elastomer laminates. *Smart Materials and Structures*. 2017;26(10):105027.
- 22- .Goel S, Raj S, Sharma A, Gidwani U, Frankel R, Shani J. Bioresorbable coronary scaffolds: current state of evidence. *Cardiology*. 2017.
- 23- Qattawi A, Alrawi B, Guzman A. Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach. *Procedia Manufacturing*. 2017;10:791-803.