

Reducing the damping factor in shape-memory scaffolds by increasing pneumatic pressure during the bio-extrusion process

Kamyab Pourbagheri Jirandehi¹, *Abdolhossein Jalali Aghchai², Shahram Etemadi Haghighi³, Seyed Hashem Sezavar Seyed Jandaghi⁴

1- Research Assistant, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Research Center for Prevention of Cardiovascular Disease, Institute of Endocrinology and Metabolism, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Citation: Pourbagheri Jirandehi K, Jalali Aghchai A, Etemadi Haghighi S, Sezavar Seyed Jandaghi S.H. Reducing the damping factor in shape-memory scaffolds by increasing pneumatic pressure during the bio-extrusion process, *Metallurgical Engineering*, 2025; 28(2): 108-115 <https://doi.org/10.22076/me.2025.2042028.1417>

doi : <https://doi.org/10.22076/me.2025.2042028.1417>

ABSTRACT

Cardiac stent are intracorporeal structures used to open blocked coronary arteries caused by fatty plaques or metabolic abnormalities, and they can be utilized in either temporary or permanent forms. In this study, the effect of pressure parameter in the additive bio-manufacturing process (FDM) on the loss coefficient ($\tan \delta$) of smart polymeric stents was investigated. The objective of this research is to enhance the shape memory effect of polymeric stents without the use of plasticizers or lubricants, and without the addition of polymeric nanocomposites. The results obtained from experimental DMTA and SEM analysis indicate that pressure variation during manufacturing leads to an 18.8% reduction in the loss coefficient and enhances the shape memory effect in the range approaching the shape memory region. Additionally, the results confirm the increase in atomic Van der Waals forces and the reduction of covalent and molecular bond lengths within the structure of the memory stent. These molecular composition changes provide the memory stent with greater elasticity and an improved capacity for energy storage within the smart active range.

Keywords: Loss coefficient, $\tan \delta$, Shape memory polymer (SMP), Additive manufacturing process.

Received: September 26, 2024

Accepted: February 18, 2025

■ ■
***Corresponding Author:**

Abdolhossein Jalali Aghchai, PhD

Address: Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Tel: +98 (9123760474)

E-mail: jalali@kntu.ac.ir

کاهش ضریب اتلاف در اسکفولدهای حافظه‌دار توسط افزایش فشار پنوماتیک در فرآیند اکستروژن زیستی

کامیاب پورباقری جیرندهی^۱، * عبدالحسین جلالی آقچای^۲، شهرام اعتمادی حقیقی^۳، سید هاشم سزاوار سیدی جندقی^۴

۱- دستیار پژوهشی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۴- استاد، مرکز تحقیقات پیشگیری غدد و متابولیسم قلب و عروق، بیمارستان حضرت رسول اکرم (ص)، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران

چکیده

استنت‌های قلبی ساختارهای درون تنی جهت بازگشایی عروق قلبی انسداد پیدا کرده توسط پلاکت‌های چربی و یا ناهنجاری‌های متابولیکی هستند که به دو صورت موقت و دائمی قابلیت استفاده دارند. در این پژوهش به بررسی اثر پارامتر فشار در فرآیند ساخت افزایشی FDM زیستی بر ضریب اتلاف $\tan \delta$ استنت پلیمری هوشمند پرداخته شده است. هدف از پژوهش حاضر افزایش اثر حافظه شکلی استنت‌های پلیمری بدون استفاده از پلاستی‌سایزرها^۱ یا روان‌سازها و نیز بدون استفاده از ترکیب نانو ذرات پلیمری و مرکب بوده است. نتایج استخراج شده در بررسی آزمایشگاهی DMTA و SEM نشان داده است که تغییر فشار ساخت سبب کاهش ۱۸۸ درصدی ضریب اتلاف همچنین افزایش اثر حافظه شکلی در دامنه ورود به ناحیه حافظه شکلی شده است. همچنین، افزایش نیروی واندروالس اتمی و کاهش طول پیوندهای کووالانسی و مولکولی در ساختار استنت حافظه‌دار را اظهار و تایید می‌کند. این تغییرات در ترکیب مولکولی، به استنت حافظه‌دار قابلیت ارتجاعی بیشتر و ظرفیت بهبود یافته برای ذخیره انرژی در دامنه هوشمند فعال را می‌بخشد.

کلمات کلیدی: ضریب اتلاف، $\tan \delta$ ، پلیمر حافظه‌دار SMP، فرآیند ساخت افزایشی.

^۱ Plasticizer

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۵ | پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

۱. مقدمه

استنت‌ها مجموعه‌ای از ساختارهای فلزی و داربست‌های درمانی درون‌تن موقت برای رفع انسداد در شریان‌های قلبی، ریوی و کلیوی هستند که بخشی از سیستم‌های درمانی به شمار می‌آیند. استنت‌های هوشمند پلیمری ترموست دارای ویژگی‌های زیست‌سازگاری و دمای ناحیه فعال‌سازی مشخص (ناحیه هوشمند) هستند. تغییر از فاز غیرفعال یا شیشه‌ای به فاز فعال یا منعطف و همچنین تغییر از حالت اصلی به حالت ثانویه، و قابلیت بازگشت به حالت اولیه، این نسل از استنت‌ها را قادر می‌سازد تا بدون نیاز به هیچ‌گونه محرک خارجی، انسداد موضعی را برطرف کنند. ساختارهای پلیمری SMP همچنین می‌توانند در تولید عضلات هوشمند به کار

روند [۱،۲]. ساخت استنت‌های پلیمری به روش‌های ساخت افزایشی مانند FDM یکی از مؤثرترین روش‌ها از نظر کارایی در سیستم‌های تولید شده با مواد حافظه‌دار است [۳،۴]. روش FDM می‌تواند استنت‌هایی با هندسه پیچیده و طراحی بهینه برای بهبود عملکرد ساختارهای پلیمری تولید کند [۵،۶]. این فرآیندها شامل چندین روش، از جمله استریولیتوگرافی [۷،۸]، FDM [۹]، SLS [۱۰] و FFF [۵،۶] می‌شوند.

یکی از دلایل مهم این پژوهش، بر این مبنا استوار است که، استنت‌های مرسوم مورد استفاده در مصارف پزشکی به دلیل آلیاژی و فلزی بودن موجب بروز واکنش‌هایی در موضع مورد استفاده خواهند شد. در پژوهش‌های مشابه استنت‌های فلزی مسبب بروز تداخلات و عارضه‌هایی همچون رستونوسیس^۱

^۱ Restenosis

* نویسنده مسئول:

دکتر عبدالحسین جلالی آقچای

نشانی: دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تلفن: (۹۱۲۳۷۶۰۴۷۴) ۹۸+

پست الکترونیکی: jalali@kntu.ac.ir

جدول ۱: خواص فیزیکی پلی کاپرولاکتون (PCL)

خواص	واحد	PCL
درصد افزایش طول در نقطه شکست طبق آزمایش‌ها	% (Δ mm. min ⁻¹)	۸۰۰ - ۱۷۰۰
شاخص جریان مذاب (در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و وزن ۵ کیلوگرم)	g. (۱۰min) ⁻¹	۲۰۰۱-۴۰۳
نقطه ذوب	°C	۶۰
مقاومت ضربه	g. cm ⁻³	۸۳
چگالی	g. cm ⁻³	۱.۱۴۵

فرضیاتی ثابت و پارامترهایی متغیر استفاده شده است. از این روش تعداد ۶۰ نمونه استنت هوشمند زیستی توسط روش ساخت افزایشی زیستی به صورت تزریق مستقیم گرانول PCL یا پلی کاپرولاکتون در میکرو اکسترودر پنوماتیک که در جدول ۲ ذکر شده است، ساخته و مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه‌های مورد مطالعه در دو آزمایش تخصصی DMTA و SEM در دو فرآیند گرماده و گرماگیر مورد بررسی قرار گرفته اند. در شکل ۱ دو نمونه از این استنت‌ها نمایش داده شده‌اند.

در این پژوهش از پلیمر مونوگرانولار پلی کاپرولاکتون C₆H₁₀O₂ با قابلیت زیست سازگاری، انحلال بالا در مدت زمان به کارگیری درون عروق پس از تخریب پذیری زیستی و حافظه شکلی استفاده شده است. در جدول ۱ به بخشی از خواص مکانیکی پلیمر خالص پلی کاپرولاکتون اشاره شده است. پلی کاپرولاکتون با مشخصات ذیل PCL-Mn:80000/440744-2506 از شرکت سیگما آلد ریچ ایالات متحده خریداری شده است.

تحلیل دینامیکی، مکانیکی و حرارتی، DMTA با استفاده از این آزمون، خواص استنت‌های حافظه دار از جمله Tan δ، به عنوان تابعی از دما اندازه‌گیری شده است. برای این منظور، در حالی که دما زیر دمای انتقال شیشه‌ای پلیمر با یک نرخ مشخص افزایش می‌یافت، یک تغییر شکل سینوسی با فرکانس ثابت به پلیمر اعمال شده است. استنت‌ها با فرکانس ثابت ۱ هرتز در یک سیکل دمایی در محدوده دمایی از ۱۲۰- تا ۵۰+ درجه سانتی‌گراد آزمایش شدند. دقت این دستگاه حدود ۰.۱ نانومتر بوده و نتایج به دست آمده بسیار دقیق‌تر از تست گرماسنجی اسکن تفاضلی DSC بوده است. این آزمون طبق استاندارد ASTM-D 5026 نیز انجام شده است. دستگاه DMTA مورد استفاده در این مطالعه، که در پژوهشگاه ملی پلیمر و پتروشیمی ایران قرار دارد، توسط شرکت Triton در ایالات متحده آمریکا ساخته شده است.

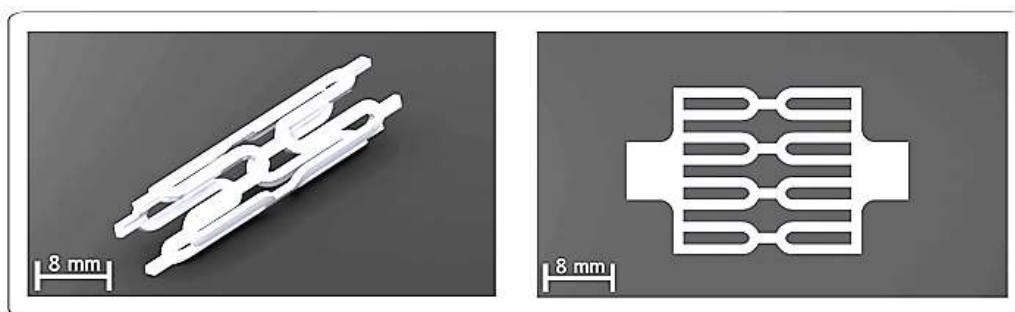
تحلیل مورفولوژی سطح، در این مطالعه، از استاندارد RMRC-WI-550-104-02 برای تحلیل با میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مدل QUANTA ESEM FEI 200، مستقر در آزمایشگاه نانوساختار پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، استفاده شده است. همچنین، برای پوشش دهی هر نمونه با طلا از استاندارد RMRC-WI-550-103-01 استفاده شده است.

و ترومبوسیس^۲ عروق خواهند شد. از جهاتی دیگر استفاده از استنت‌های فلزی به سبب عدم انعطاف پذیری کافی سبب بروز دردهایی در قفسه سینه بیمار پس از قرارگیری در فعالیت‌های شدید حرکتی خواهد شد. بنابراین یکی از دلایل مهم انجام این پژوهش استفاده از ساختارهای اسکفولد^۳ پلیمری زیستی با ایجاد و توسعه فرآیند به کارگیری آن که به صورت القایی ترموست در اثر حافظه شکلی آن می‌باشد خواهد بود. اما یکی از دلایل مهم که می‌توان به عنوان عملکرد نوآورانه در این پژوهش به آن اشاره کرد عدم استفاده از ترکیبات شیمیایی و نانوذراتی با معادلات شیمیایی پیچیده و و پرهزینه در این ساختار می‌باشد. در نتیجه سعی بر این شد تا با تغییرات در فاکتورهای ورودی ساخت که در این پژوهش از فرآیند ساخت افزایشی بیولوژیکی زیستی استفاده شده است عزم بر افزایش اثر حافظه شکلی در استنت‌ها ساخته شده به وسیله این مواد به انجام رسد. در نهایت با بررسی نوآوری‌ها، اهمیت و اهداف بلند مدت این مطالعه را می‌توان به چندین موضوع مهم تقسیم کرد، از جمله: ۱- ظرفیت حمل داروی بیشتر، به دلیل تخلخل ساختاری استنت‌ها نسبت به نمونه‌های فلزی مرسوم ۲- انعطاف پذیری بالا و وزن کم ۳- قابلیت ساخت هندسه‌های پیچیده توسط روش‌های بسیار کم هزینه. استفاده از فرآیند FDM بیولوژیکی و بررسی اثر پارامتر فشار بر افزایش و یا کاهش خواص حافظه شکلی هر استنت، به عنوان یکی از نوآوری‌های این تحقیق معرفی می‌شود.

۲. مواد و روش تحقیق

استنت‌های مرسوم مورد استفاده در بازگشایی عروق به دو دسته استنت‌های بالونی^۴ و استنت‌های گسترشی^۵ تقسیم‌بندی می‌شوند. دو مورد از تقسیم بندی نام برده شده فوق، به سه دسته استنت‌های سلول باز، استنت‌های سلول بسته و استنت‌های هوشمند^۶ تقسیم‌بندی می‌شوند. در این مطالعه یک نمونه استنت سلول باز با قابلیت انعطاف پذیری بالا در زوایای تند عروق با روابط ریاضیاتی حاکم طراحی و مورد مطالعه واقع شده است. همچنین با استفاده از روش طراحی پاسخ سطح RSM^۷ جهت طراحی مراحل آزمایشگاهی تحت

2 Thrombosis
3 Scaffold
4 Balloon-expandable
5 Self-expandable
6 Smart-expandable
7 Response surface methodology



شکل ۱: نمونه استنت پلیمری هوشمند طراحی شده در این پژوهش

جدول ۲: شرایط ساخت استنت‌ها و طراحی آزمایش توسط تئوری پاسخ سطح و روش باکس بنکن BBD

	واحد	بازه	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₁₅
فشار	bar	4.57-6.5	4.5	6.5	4.5	6.5	4.5	6.5	4.5	6.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
دما	°C	70-90	70	70	90	90	80	80	80	80	70	90	70	90	80	80	80
سرعت	mm/min	50-65	57.5	57.5	57.5	57.5	50	50	65	65	50	50	65	65	57.5	57.5	57.5

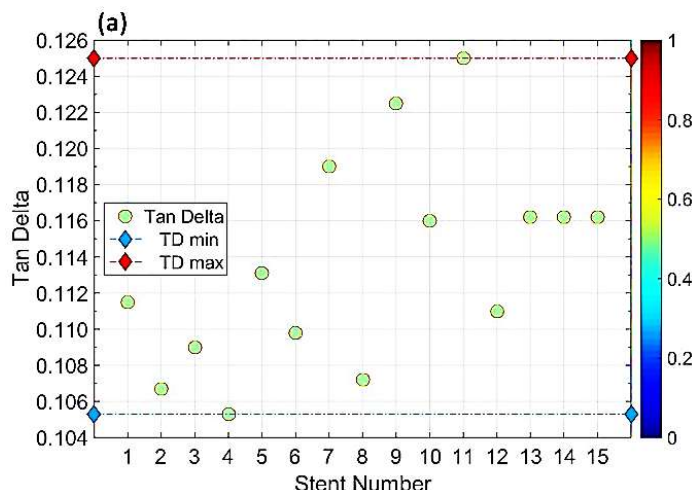
۳. متغیرها و طراحی آزمایش

اثر پارامتر فشار زیستی به عنوان یکی از متغیرهای تاثیرگذار و ورودی مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر می‌باشد که در این پژوهش دو متغیر زیستی دیگر از جمله دما و سرعت نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند اما هدف تنها بررسی پارامتر فشار زیستی به عنوان یکی از متغیرهای تاثیرگذار در تغییرات اثر حافظه شکلی استنت‌ها می‌باشد. در جدول ۳، پارامترهای ورودی مورد مطالعه در این طراحی شامل سرعت، دما، و فشار زیستی هستند. پارامترهای ثابت با مقادیر مورد نظر آن‌ها شامل قطر نازل، دمای محفظه، و دمای بستر هستند که به ترتیب برابر با ۰.۴ میلی‌متر، ۲۸ درجه سانتی‌گراد، و ۲۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. S₁₋₁₅ در جدول ذیل تعداد استنت‌ها می‌باشد.

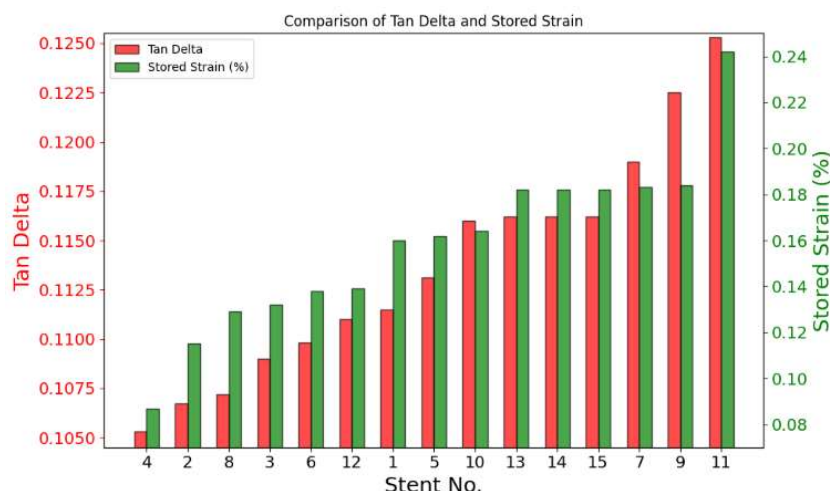
۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این بخش، اثر تک‌متغیر فشار بر نتایج مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با کاهش مقدار ضریب اتلاف Tan δ در ساختار میکروسکوپی مواد پلیمری، پیوندهای کربنی دچار تغییرات اساسی می‌شوند. کاهش طول پیوندهای کووالانسی ملوکولی موجب کاهش مقدار ضریب اتلاف Tan δ می‌شود. این امر موجب افزایش نیروی واندروالس بین پیوندهای قطبی کربن و اکسیژن می‌گردد. همچنین نیروی بین‌اتمی بین پیوندهای قطبی هیدروژن و کربن افزایش می‌یابد [۱۵، ۱۶، ۱۷]. در نتیجه، پس از عبور از ناحیه غیرفعال یا منجمد، برای ورود

به ناحیه فعال یا منعطف، انرژی بیشتری جهت شکستن پیوندهای مولکولی مورد نیاز است و در نتیجه استنت در مقیاس میکروسکوپی پایداری بیشتری خواهد داشت [۱۸، ۱۹]. همچنین، استنت دارای خواص الاستیک فعال خواهد بود که با افزایش درصد تغییر شکل، از حالت ثانویه به حالت اولیه بازگردد. نرخ تغییرات کرنش ذخیره‌سازی^۸ و ضریب اتلاف در شکل ۲ بررسی شده است. با توجه به تغییرات نقطه اوج نمودار ضریب اتلاف برای هر یک از پانزده استنت مورد بررسی، نتیجه گرفته می‌شود که استنت شماره ۴ دارای کمترین مقدار ضریب اتلاف و بیشترین اثر حافظه شکلی است. همچنین استنت شماره ۱۱ دارای بیشترین مقدار ضریب اتلاف و کمترین اثر حافظه شکلی می‌باشد. در شکل ۲ دامنه و پراکندگی تغییرات ضریب اتلاف ۱۵ استنت مورد مطالعه قرار گرفته که با پارامتر Tan δ نمایش داده شده است بررسی شده است. در شکل ۳ بر خلاف شکل ۲ به بررسی و مشاهده روند نرخ تغییرات ضریب اتلاف پراخته شده است همچنین با توجه به اینکه کرنش ذخیره‌سازی یک خروجی وابسته با تغییرات مستقیم به ضریب اتلاف می‌باشد نرخ تغییرات آن نیز با توجه به ضریب اتلاف نمایش داده شده است. لازم به ذکر است پیوستگی و گسستگی متغیرها در دو شکل ۲ و ۳ کاملاً ملموس بوده و در شکل ۳ استنت‌ها بر اساس میزان تغییرات ضریب اتلاف به صورت صعودی - نزولی طبقه‌بندی شده‌اند. پارامتر کرنش ذخیره‌سازی به‌عنوان یک پارامتر وابسته به ضریب اتلاف، مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۲: دامنه تغییرات ضریب اتلاف در آزمون DMTA برای ۱۵ استنت مورد مطالعه در این پژوهش.



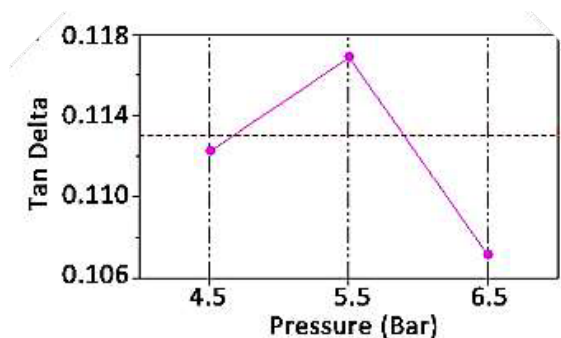
شکل ۳: نرخ تغییرات ضریب اتلاف و کرنش ذخیره سازی به عنوان دو پارامتر وابسته در بررسی ۱۵ استنت مورد مطالعه.

در ادامه به بررسی اثر پارامتر ورودی فشار در تغییرات اثر حافظه شکلی این ساختارها پرداخته خواهد شد. با توجه به نتایج، زمانی که مقدار فشار در بالاترین بازه عملیاتی قرار می گیرند اثر حافظه شکلی دارای افزایش چشمگیری خواهد بود. همچنین زمانی که زنجیرهای پلیمری در ماتریس پلیمری کاهش یافته اند اثر سفتی در ساختار پلیمری افزایش یافته است [۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴]. در شکل ۴ اثر متغیر فشار بین بر ضریب اتلاف نمایش داده شده است.

همچنین در شکل ۵ به بررسی اثر برهمکنش بین دو پارامتر ورودی دما و فشار در پانزده نمونه از استنت های ساخته شده در یک سیکل گرماگیر پرداخته شده است.

در جدول ۳ به بررسی مقادیر ضریب اتلاف $\tan \delta$ دقیق هر یک از استنت های مورد مطالعه در آزمایش DMTA پرداخته شده است. در این جدول داده های خروجی از آزمون تست مکانیکی، دینامیکی حرارتی بررسی شده اند. از جمله داده های موجود در این طبقه بندی می توان به دمای حالت انتقال شیشه T_g ، ضریب اتلاف در اثر حافظه شکلی، کرنش ذخیره سازی در شرایط دمایی محیط بدن انسان در سیکل گرماگیر و گرماده در محیط آزمایشگاهی^{۱۰} پرداخته شده است.

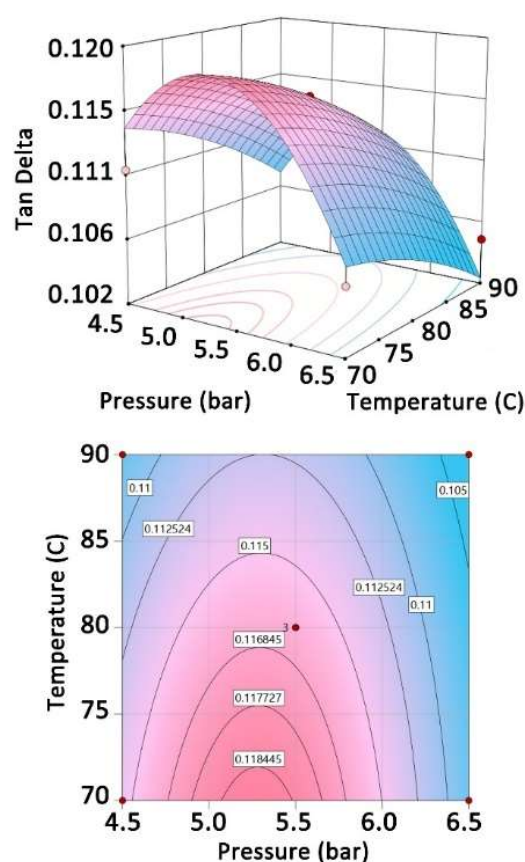
داده ها نشان می دهند که استنت شماره ۴ دارای کمترین مقدار ضریب اتلاف و استنت شماره ۱۱ دارای بیشترین ضریب اتلاف می باشد. بنابراین میزان کاهندگی و فزاینده گی داده ها در این جدول به خوبی مشهود است.



شکل ۴: تغییرات پارامتر ورودی فشار در یک سیکل حرارتی گرماگیر در بررسی دینامیکی حرارتی پانزده نمونه از استنت‌های ساخته‌شده.

جدول ۳: نتایج خواص استنت‌ها در بررسی‌های دینامیکی حرارتی

شماره استنت	آزمون تست دینامیکی، مکانیکی، حرارتی DMTA		
	کرنش ذخیره‌سازی (%)	Tan δ (—)	T _g (°C)
۴	۰.۰۸۷	۰.۱۰۵۳	-۴۲.۸
۲	۰.۱۱۵	۰.۱۰۶۷	-۳۸.۰
۸	۰.۱۲۹	۰.۱۰۷۲	-۳۹.۳
۳	۰.۱۳۲	۰.۱۰۹۰	-۳۸.۴
۶	۰.۱۳۸	۰.۱۰۹۸	-۳۸.۹
۱۲	۰.۱۳۹	۰.۱۱۱۰	-۴۱.۲
۱	۰.۱۶۰	۰.۱۱۱۵	-۳۰.۵
۵	۰.۱۶۲	۰.۱۱۳۱	-۳۴.۲
۱۰	۰.۱۶۴	۰.۱۱۶۰	-۴۰.۱
۱۳	۰.۱۸۲	۰.۱۱۶۲	-۳۸.۲
۱۴	۰.۱۸۲	۰.۱۱۶۲	-۳۸.۲
۱۵	۰.۱۸۲	۰.۱۱۶۲	-۳۸.۲
۷	۰.۱۸۳	۰.۱۱۹۰	-۳۵.۰
۹	۰.۱۸۴	۰.۱۲۲۵	-۳۷.۷
۱۱	۰.۲۴۲	۰.۱۲۵۰	-۳۶.۹



شکل ۵: برهمکنش پارامترهای فشار و دما در یک سیکل حرارتی گرماگیر و تاثیر آنها بر تغییرات ضریب اتلاف استنت‌ها.

جدول ۴: مدل آماری - ریاضی ANOVA

$\alpha = 0.05$							
Source	DF	SS	MS	F-Value	P-Value	R ²	
Model	9	0.000425	0.000047	5.35	0.040	90.59%	Significant
Linear	3	0.000144	0.000048	5.45	0.049		
Pressure	1	0.000070	0.000070	7.89	0.038		
Temperature	1	0.000074	0.000074	8.44	0.034		
Velocity	1	0.000000	0.000000	0.01	0.928		
Square	3	0.000248	0.000083	9.38	0.017		
P ²	1	0.000192	0.000192	21.78	0.005		
T ²	1	0.000003	0.000003	0.31	0.601		
V ²	1	0.000040	0.000040	4.52	0.087		
2-Way Interaction	3	0.000032	0.000011	1.23	0.392		
P × T	1	0.000000	0.000000	0.03	0.860		
P × V	1	0.000018	0.000018	2.05	0.212		
T × V	1	0.000014	0.000014	1.59	0.262		
Error	5	0.000044	0.000009				
Total	14	0.000425					

References

- [1] Takashima K, Noritsugu T, Rossiter J, Guo S, Mukai T. Development of curved type pneumatic artificial rubber muscle using shape-memory polymer. InSICE Annual Conference 2011 2011 Sep 13 (pp. 1691-1695). IEEE.
- [2] Takashima K, Sugitani K, Morimoto N, Sakaguchi S, Noritsugu T, Mukai T. Pneumatic artificial rubber muscle using shape-memory polymer sheet with embedded electrical heating wire. Smart materials and structures. 2014 Oct 16; 23(12):125005.
- [3] Chua CK, Leong KF, Lim CS. Rapid prototyping: principles and applications. World scientific; 2010.
- [4] Espalin D, Muse DW, MacDonald E, Wicker RB. 3D Printing multi-functionality: structures with electronics. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014 May; 72:963-78.
- [5] Vanek J, Galicia JA, Benes B. Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication. InComputer graphics forum 2014 Aug (Vol. 33, No. 5, pp. 117-125).
- [6] Langelaar M. Topology optimization of 3D self-supporting structures for additive manufacturing. Addit Manuf 12: 60-70.
- [7] Wu J, Yuan C, Ding Z, Isakov M, Mao Y, Wang T, Dunn ML, Qi HJ. Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers. Scientific reports. 2016 Apr 13; 6(1):24224.
- [8] Ge Q, Sakhaei AH, Lee H, Dunn CK, Fang NX, Dunn ML. Multi-material 4D printing with tailorable shape memory polymers. Scientific reports. 2016 Aug 8; 6(1):31110.
- [9] Yang Y, Chen Y, Wei Y, Li Y. 3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016 Jun; 84:2079-95.
- [10] Yuan S, Bai J, Kai Chua C, Zhou K, Wei J. Characterization of creeping and shape memory effect in laser sintered thermoplastic polyurethane. Journal of Computing and Information Science in Engineering. 2016 Dec 1; 16(4):041007.
- [11] Anas K, David S, Babu RR, Selvakumar M, Chattopadhyay S. Energy dissipation characteristics of crosslinks in natural rubber: an assessment using low and high-frequency analyzer. Journal of Polymer Engineering. 2018 Aug 28; 38(8):723-9.

جدول ۴ نتایج تحلیل واریانس ANOVA انجام شده برای $\tan \delta$ را نشان می‌دهد. برای تعیین اینکه آیا یک پارامتر یا عامل معنادار است، مقدار P-value بررسی شده است. بازه اطمینان برابر با ۹۵٪ تعیین شده است. مقدار P-value مدل کمتر از ۰.۰۵ است. بنابراین، مدل آماری مؤثر است. علاوه بر این DF، SS و MS به ترتیب نشان‌دهنده درجات آزادی، مجموع مربعات و میانگین مربعات هستند.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان نتیجه‌ای مبنی بر اینکه با افزایش اثر فشار و دما در فرآیند پرینت زیستی این استنت‌ها، ضریب اتلاف به عنوان فاکتوری تعیین‌کننده در تشریح خواص حافظه‌شکلی این ساختارها دارای رشد کاهنده‌ای خواهد شد و می‌توان این مهم را از این داده‌ها استنتاج کرد. کاهش میزان ضریب اتلاف در ساختارهای متشکل از مواد حافظه‌دار سبب بروز افزایش اثر حافظه‌شکلی در این ساختارها می‌شود. در این پژوهش نشان داده شد که پارامتر فشار زیستی در فرآیند ساخت افزایشی زیستی بیشترین تاثیر را در تغییرات اثر حافظه‌شکلی در مواد حافظه‌دار ایفا می‌کند. در نتیجه با افزایش مقدار فشار به ترتیب به میزان ۴۴،۴۵ درصد اثر حافظه‌شکلی به میزان ۱۸،۸ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین این نکته نیز تایید شد که می‌توان بدون استفاده از ترکیبات پلیمری، پلاستی‌سایزرها^{۱۱} و نانوذرات کربنی-فلزی اثر حافظه‌شکلی و پارامتر مرتبط با توصیف این اثر را تغییر داد.

- [12] Ornaghi HL, Neves RM, Monticeli FM, Thomas S. Modeling of dynamic mechanical curves of kenaf/polyester composites using surface response methodology. *Journal of Applied Polymer Science*. 2022 May 10; 139(18):52078.
- [13] Pothan LA, Oommen Z, Thomas S. Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites. *Composites Science and technology*. 2003 Feb 1; 63(2):283-93.
- [14] Lorandi NP, Cioffi MO, Ornaghi Jr H. Dynamic mechanical analysis (DMA) of polymeric composite materials. *Scientia cum Industria*. 2016 Mar 20; 4(1):48-60.
- [15] Ornaghi, H.L., Neves, R.M., Monticeli, F.M. and Thomas, S., 2021. Modeling of dynamic mechanical curves of kenaf/polyester composites using surface response methodology. *Journal of Applied Polymer Science*, p.52078.
- [16] Pothan, L.A., Oommen, Z. and Thomas, S., 2003. Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites. *Composites Science and technology*, 63(2), pp.283-293.
- [17] Lorandi, N.P., Cioffi, M.O.H. and Ornaghi Jr, H., 2016. Dynamic mechanical analysis (DMA) of polymeric composite materials. *Scientia cum Industria*, 4(1), pp.48-60.
- [18] Pothan, L.A., Thomas, S. and Groeninckx, G., 2006. The role of fibre/matrix interactions on the dynamic mechanical properties of chemically modified banana fibre/polyester composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(9), pp.1260-1269.
- [19] Vijayan, P.P., Puglia, D., Kenny, J.M. and Thomas, S., 2013. Effect of organically modified nanoclay on the miscibility, rheology, morphology and properties of epoxy/carboxyl-terminated (butadiene-co-acrylonitrile) blend. *Soft Matter*, 9(10), pp.2899-2911.