



Characterization of the Shape Memory Effect of Recycled HDPE Filament

Sina Farahifar ^a, Mahmood Mehrdad Shokrieh ^{a*}

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Farahifar S, Shokrieh M M. Characterization of the Shape Memory Effect of Recycled HDPE Filament. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;5(3):421-434.

 <https://10.66224/masm.5.3.421>

KEYWORDS

Recycled shape memory filament,
Shape memory polymers,
Shape memory properties,
3D printer,
high-density polyethylene (HDPE).

ABSTRACT

Developing low-cost recycled filaments with desirable mechanical properties is a major challenge in the additive manufacturing industry. This research investigated the feasibility of producing 3D-printer filament from recycled high-density polyethylene (HDPE) bottle caps and characterized its shape-memory behavior. Unlike previous studies that neglected the residual stress history from production and spooling, this study demonstrated the inherent error in conventional testing methods by measuring the initial curvature angle and its variation after stress relaxation. The fabricated 1.75 mm filament was subjected to shape-memory bending tests, and the results were compared with those of commercial PLA, ABS, and TPU filaments. The recycled filament, with a shape-recovery ratio of about 80%, behaved similarly to PLA and outperformed ABS. Furthermore, the necessity of a stress-relaxation step in testing protocols was confirmed by observing a non-zero initial angle and unwanted shape recovery after stress relaxation in all samples. The fabricated filament also exhibited a lower density than the other materials, providing a key competitive advantage. Additionally, economic analysis revealed a significant cost reduction compared to commercial counterparts. It is concluded that high-value smart materials do not require expensive resources; recycling bottle caps is presented as an environmentally friendly solution with high application potential, affordability, and significant added value.

Extended Abstract

1. Introduction

The shape-memory phenomenon was first observed in a gold-cadmium alloy in 1932. However, the term "shape memory" was first introduced by Vernon in 1941 to describe this unique feature [1, 2]. Shape memory materials (SMMs) are smart materials that can adjust some of their characteristics, such as stiffness, color, and shape, in response to various external stimuli (e.g., heat, light, humidity, and magnetic or electric fields) [3-8]. Shape memory polymers (SMPs) have attracted researchers' interest and have been used in various biomedical and engineering fields [4, 9]. SMPs can deform to a temporary shape and return to their original shape in response to an external stimulus, known as the shape-memory effect (SME) [4]. SME is evaluated by the "shape fixity ratio" (R_f) and "shape recovery ratio" (R_r) parameters which respectively represent the material's ability to remember the programmed shape and recover the permanent shape after stimulation. Higher values for both parameters indicate a better SME in the material. The "Shape memory ratio" (R_{SME}) is calculated by

* Corresponding author. Tel.: +989121887925

E-mail address: shokrieh@iust.ac.ir

DOI: <https://10.66224/masm.5.3.421>

Received: May 05, 2026; Received in revised form: June 01, 2026; Accepted: August 02, 2026.

© Author



multiplying R_f and R_r , which is more suitable to assess SME [4, 10, 11]. Several methods are utilized to characterize the SME of polymers [12]. Bending is one of the most common methods in which the sample is bent to a certain angle θ_{max} at temperature T_{high} and cooled to T_{trans} while keeping the constraints. By removing the constraints, the sample transforms to its fixed state, and by heating above T_{high} , it recovers to its permanent shape [13]. 3D-printing filaments can be used as samples for this test [14, 15].

Plastics account for a significant share of municipal waste. High-density polyethylene (HDPE) is one of the most widely used types of plastic [16]. Its high chemical resistance and durability are the most important reasons why it should be recycled [16, 17].

Given the increasing importance and wide applications of SMPs, the main objective of this research is to investigate this behavior in HDPE filaments recycled from bottle caps. First, the feasibility of manufacturing a 3D printing filament was investigated, and then its SME was characterized. To better understand the SME behaviour of this material, it was compared with several commercial polymeric filaments.

2. Materials and methods

Some HDPE bottle caps were collected, washed several times with hot water and detergent, dried, sorted by type and color, and shredded with a single-blade shear shredder. Afterward, they were sieved with a 10 mm mesh screen. A single-screw extruder with a 3 mm nozzle equipped with a puller was used to manufacture filaments with a diameter of 1.75 ± 0.1 mm. The manufactured filament had a good surface quality. To evaluate the SME of the manufactured filament, some commercial filaments (PLA+, ABS+, and TPU HD-95A) were similarly tested. Pieces of filaments, 10 cm in length, were cut as samples, pairs of points on each arm were utilized to calculate the angles using GetData Graph Digitizer software (Figure 1).

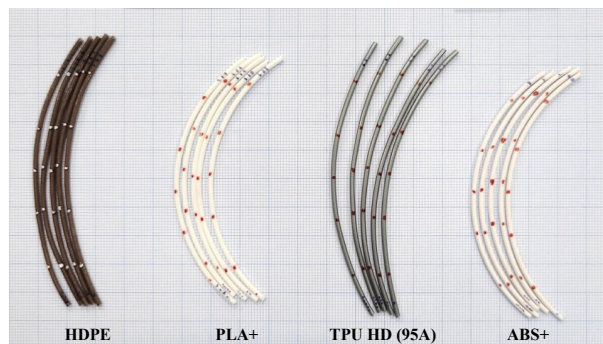


Figure 1. Samples with marked points on them

The experimental method is a modified version of the method proposed by Mehrpouya and Huang [14] to increase its accuracy. As a novelty of this paper, the samples were initially heated above 135°C (above the effective transition temperature range of all studied materials) for 5 minutes to remove their residual stress (unwanted memory). This phenomenon was not considered in the cited studies [14, 15, 18], which causes errors in their results. Other steps are presented in Figure 2. The start and end temperatures and times associated with each step are also specified.

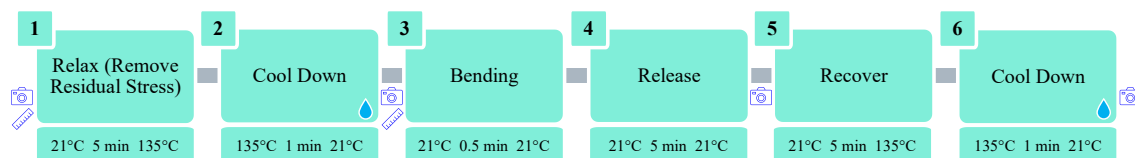


Figure 2. Steps of the shape memory bending test

The angle of the sample after bending (180°), the angle after the sample was released at ambient temperature, and the angle just after recovery in a hot oven were considered as the maximum angle (θ_{max}), the fixation angle (θ_{fix}), and the recovery angle (θ_{rec}). The three parameters of R_f , R_r , and R_{SME} used in this study are calculated according to equation (1).

$$\begin{cases} R_f(\%) = \frac{\theta_{fix}}{\theta_{max}} \times 100 \\ R_r(\%) = \frac{\theta_{max} - \theta_{rec.}}{\theta_{max}} \times 100 \\ R_{SME}(\%) = R_f \times R_r / 100 \end{cases} \quad (1)$$

3. Results and discussion

The results showed that after the initial heating, most filaments (except TPU) approached a more linear state, indicating a different unwanted memory in the studied filaments. The maximum initial angle in the ABS+ sample is due to cutting from the inner parts of the filament spool with a smaller radius of curvature. The diameter indicates a very good accuracy of the fabricated filament compared to commercial filaments. After initial recovery, it is observed that the smallest diameter changes occurred in the TPU and HDPE filaments, highlighting their dimensional stability under temperature changes.

Calculated shape memory parameters obtained in this study are presented in Figure 3. TPU had the lowest R_{fix} which highlights its weakness in cold programming, while the other materials were in the same higher range. PLA+ and HDPE showed the highest $R_{rec.}$. TPU had the lowest R_{SME} (24%), but the other materials had a similar range (45-53%). A comparison of these three ratios shows that although the fabricated HDPE filament does not have the highest R_{SME} , its shape memory behavior can compete with commercial materials. The recycled HDPE filament had the lowest density among the materials studied in this investigation (and even water).

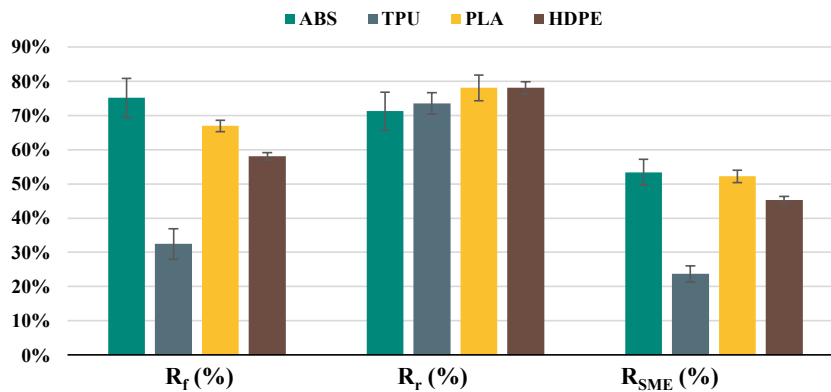


Figure 3. Shape fixity ratio (R_f), Shape recovery ratio (R_r), and Shape memory ratio (R_{SME})

4. Conclusion

In this study, a suitable process for manufacturing recycled HDPE filament from bottle caps was presented. The importance of the initial angle of the cut filament and residual stress in investigating the shape memory of the filament was also highlighted. By comparing key parameters, it was observed that the material manufactured in this study offers significant advantages, including: the lowest initial angle (unwanted memory), lower density than other materials and water, favorable cold shape memory behavior that is competitive with commercial 3D printing filaments, and very low total cost. The results showed that recycled HDPE filaments, despite being much lower in cost than common market samples, offer suitable shape memory properties that can be easily achieved without the need for complex technologies.



مشخصه‌یابی اثر حافظه شکلی فیلامنت بازیافتی پلی اتیلن با چگالی بالا

سینا فرهی^{الف}، محمود مهرداد^ب شکریه^{ب*}

^{الف} دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، s_farahi@mecheng.iust.ac.ir

^ب استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، shokrieh@iust.ac.ir

واژگان کلیدی	چکیده
فیلامنت بازیافتی حافظه شکلی، پلیمرهای حافظه شکلی، خواص حافظه شکلی، چاپگر سه بعدی، پلی اتیلن با چگالی بالا.	توسعه فیلامنت‌های بازیافتی ارزان قیمت با خواص مکانیکی مطلوب، یکی از چالش‌های اصلی در صنعت ساخت افزایشی است. در این پژوهش، امکان‌سنجی ساخت فیلامنت چاپگر سه بعدی از بازیافت درهای بطری (HDPE) و مشخصه‌یابی رفتار حافظه شکلی آن بررسی شده است. برخلاف مطالعات پیشین که اثر تاریخچه تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند ساخت و پیچیدن فیلامنت روی قرقره را نادیده گرفته‌اند، در این تحقیق با اندازه‌گیری زاویه انحنای اولیه و تغییرات آن پس از حرارت‌دهی (آزادسازی تنش)، خطای ذاتی روش‌های آزمون مرسوم نشان داده شد. فیلامنت ساخته شده با قطر ۱/۷۵ میلی‌متر تحت آزمون‌های خمش حافظه شکلی قرار گرفت و نتایج آن با نمونه‌های تجاری PLA، ABS و TPU مقایسه شد. نتایج نشان داد که فیلامنت بازیافتی با دارا بودن نسبت بازیابی شکلی حدود ۸۰٪، رفتاری مشابه با PLA و برتر از ABS دارد. همچنین مقدار غیرصفر پارامتر زاویه اولیه و حافظه ناخواسته بازیابی شده در تمام نمونه‌ها، لزوم در نظر گرفتن مرحله آزادسازی تنش در پروتکل‌های آزمون را اثبات نمود. فیلامنت ساخته شده در این پژوهش چگالی پایین‌تری نسبت به سایر مواد دارد که مزیت رقابتی مهمی در برابر نمونه‌های تجاری محسوب می‌شود. تحلیل اقتصادی نیز نشان‌دهنده کاهش چشمگیر هزینه این ماده نسبت به نمونه‌های تجاری است. این پژوهش نشان می‌دهد که برای ساخت یک ماده هوشمند و با ارزش بالا، مواد گران‌قیمت تنها گزینه موجود نیستند و می‌توان با بازیافت پسماند در بطری و حفظ محیط‌زیست، یک ماده هوشمند با پتانسیل کاربردی و ارزش‌افزوده بالا به دست آورد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱	

۱- مقدمه

الاندر^۱ در سال ۱۹۳۲ برای اولین بار پدیده حافظه شکلی را در آلیاژی از طلا و کادمیوم مشاهده نمود. باین‌حال، اصطلاح «حافظه شکلی»^۲ برای اولین بار توسط ورنون^۳ در سال ۱۹۴۱ برای توصیف ویژگی یکتایی از دسته‌ای خاص از مواد به کار گرفته شد. مواد حافظه شکلی^۴ مواد هوشمندی هستند که می‌توانند به محرک‌های خارجی گوناگونی (مانند حرارت، نور، رطوبت، میدان مغناطیسی یا الکتریکی) با تغییری در برخی ویژگی‌هایشان (برای مثال سفتی، رنگ و شکل) پاسخ دهند؛ همچنین تغییر شکل مواد دارای حافظه شکلی باید سریع و در یک محدوده زمانی کوتاه باشد [۳-۸]. این مواد به سرعت در دهه‌های اخیر توسعه

^۱ Ölander

^۲ Shape-memory

^۳ Vernon

^۴ Shape-memory materials (SMM)

یافته‌اند و می‌توان آن‌ها را به سه دسته آلیاژهای حافظه‌شکلی^۱، سرامیک‌های حافظه‌شکلی^۲ و پلیمرهای حافظه‌شکلی^۳ تقسیم کرد. اهمیت پلیمرهای حافظه‌شکلی تا دهه ۱۹۶۰، تا زمانی که پلی‌اتیلن دارای اتصالات عرضی برای ساخت لوله‌ها و غشاهای جمع‌شونده با حرارت استفاده شد، شناخته شده نبود. تلاش‌های بیشتری برای توسعه پلیمرهای حافظه‌شکلی در اواخر دهه ۱۹۸۰ آغاز شد و در دهه ۱۹۹۰ شتاب گرفت، ولی پیشرفت‌های چشمگیر تنها در ۵-۱۰ سال اخیر رخ داده است. این پلیمرها گروهی از مواد حافظه‌شکلی هستند که به‌خاطر اهمیت علمی و فناورانه، توجه روزافزونی را به خود جلب کرده‌اند [۹، ۴].

مواد حافظه‌شکلی علی‌رغم نوظهور بودن، در زمینه‌های مختلفی از جمله هوافضا، زیست‌پزشکی، حمل‌ونقل، عمران، الکترونیک و نساجی توجه زیادی را برای حل چالش‌ها به خود جلب کرده‌اند. پلیمرهای حافظه‌شکلی نه تنها دارای مزایای رایج پلیمرها (تغییر شکل الاستیک زیاد، قیمت ارزان، چگالی کم، زیست‌سازگاری^۴ و زیست‌تخریب‌پذیری^۵) هستند، بلکه فرآیندپذیری^۶ ساده، سفتی قابل تنظیم و دامنه دمایی کاربری وسیعی دارند. این مزایا گستردگی کاربرد این مواد را به‌ویژه در حوزه‌های تولیدات هوشمند، حمل‌ونقل، تجهیزات زیست‌پزشکی، الکترونیک، رباتیک، هوافضا و بسته‌بندی مواد غذایی توضیح می‌دهد [۴، ۹، ۱۹-۲۴]. توانایی مواد حافظه‌شکلی برای «به‌خاطر سپردن» شکل اصلی^۷ و بازیابی^۸ به آن از یک شکل موقت^۹ تغییر یافته تحت محرک^{۱۰} مناسب «اثر حافظه‌شکلی»^{۱۱} نامیده می‌شود. تغییر شکل در فرآیند برنامه‌ریزی معمولاً به‌صورت مکانیکی اعمال می‌شود و مهم‌ترین ویژگی اثر حافظه‌شکلی پایداری شکل موقت در غیاب محرک مناسب است [۴]. اثر حافظه‌شکلی در این پلیمرها و کارایی آن‌ها با استفاده از دو مشخصه «نسبت تثبیت‌شکلی»^{۱۲} و «نسبت بازیابی‌شکلی»^{۱۳} ارزیابی می‌شود. نسبت تثبیت‌شکلی، بیانگر توانایی حفظ شکل برنامه‌ریزی‌شده و نسبت بازیابی‌شکلی نشان‌دهنده میزان بازیابی به شکل اولیه پس از اعمال محرک است. یک پلیمر حافظه‌شکلی ایده‌آل باید بتواند شکل موقت را دقیقاً به‌خاطر بسپارد و حین بازیابی کاملاً به شکل اصلی خود بازیابی شود؛ بدین معنا که هر دو پارامتر نسبت تثبیت‌شکلی و نسبت بازیابی‌شکلی در آن پلیمر برابر یک باشند. اگرچه در واقعیت این مقادیر کمتر از ۱ هستند، اما مقادیر بیشتر برای این دو نسبت نشان‌دهنده رفتار حافظه‌شکلی مطلوب‌تر است. پارامتر «نسبت حافظه‌شکلی»^{۱۴} که با استفاده از حاصل ضرب این دو نسبت محاسبه می‌شود و امکان ارزیابی بهتری برای کارایی پلیمر حافظه‌شکلی را ارائه می‌دهد [۴، ۱۰، ۱۱].

در مطالعات گوناگون، روش‌های متنوعی به‌منظور مشخصه‌یابی ترمومکانیکی و ارزیابی اثر حافظه‌شکلی در پلیمرها به‌کار گرفته شده است. اثر حافظه‌شکلی گرمایی معمولاً از طریق بررسی‌های چرخه‌ای ترمومکانیکی کمی می‌شود. در بیشتر موارد، از دستگاه آزمون کشش یونیورسال مجهز به محفظه حرارتی استفاده می‌شود که امکان کنترل دما در حین تغییر شکل مکانیکی را مطابق با پروتکل‌های دمایی خاص فراهم می‌آورد. علاوه بر آزمون‌های ترمومکانیکی چرخه‌ای، روش‌هایی چون آزمون‌های خمشی (ساده یا سه‌نقطه‌ای) و فشاری نیز برای مشخصه‌یابی این اثر مرسوم هستند [۱۲]. در میان این روش‌ها، آزمون خمشی یکی از پرکاربردترین روش‌ها محسوب می‌شود. در این آزمون، نمونه تا زاویه معین (θ_{max}) در دمای مشخص (T_{high}) خم شده و سپس با حفظ قیود تا دمای پایین (T_{trans}) خنک می‌شود. متعاقباً با حذف قیود (باربرداری)، تنش تغییر شکل آزاد می‌شود. در نهایت نمونه مجدداً تا دمای T_{high} گرم شده و بازیابی‌شکلی دائمی ثبت می‌شود [۱۳]. برخی محققان [۱۴، ۱۵] مستقیماً از فیلامنت مورد استفاده در چاپگر سه‌بعدی به‌عنوان نمونه استفاده کرده‌اند. این رویکرد، ساده‌ترین روش ارزیابی اثر حافظه‌شکلی در نمونه

¹ Shape-memory alloys (SMA)

² Shape-memory ceramics (SMC)

³ Shape-memory polymers (SMP)

⁴ Biocompatibility

⁵ Biodegradability

⁶ Processability

⁷ Permanent

⁸ Recover

⁹ Temporary

¹⁰ Stimulus

¹¹ Shape memory effect (SME)

¹² Shape fixity ratio

¹³ Shape recovery ratio

¹⁴ Shape memory ratio (RSME)

پلیمری است؛ زیرا پیچیدگی های مربوط به تأثیر پارامترهای چاپ حین ساخت نمونه با چاپ سه بعدی را حذف می کند. برای محاسبه زوایا و ثوابت مربوط به اثر حافظه شکلی، روش های گوناگونی استفاده شده است. برای مثال لن^۱ و همکاران [۲۵] با انتقال مرکز دوران، از مختصات نقاط نوک بازوهای نمونه برای اندازه گیری دقیق زاویه بین دو بازو استفاده کردند. میر اسدی و همکاران [۲۶] با اتصال نقاط میانی دوسر نمونه به مرکز، مقدار زاویه را محاسبه نمودند. ایراد اصلی روش مورد استفاده در آن مطالعه عدم یکپارچگی در مینای محاسبات است؛ به طوری که در محاسبه زاویه بیشینه، زاویه محاسبه شده از 180° کسر شد و این یعنی مقداری غیر از 180° برای زاویه بیشینه در نظر گرفته شد اما برای سایر محاسبات این زاویه نادیده گرفته شد که باعث خطا و ناهماهنگی در روش می شود. این تناقض اندازه گیری زاویه در روابط منجر به بروز خطا در نتایج نهایی می گردد. سرسولی^۲ و همکاران [۱۸] بازیابی بیش از ۱۰۰٪ را گزارش کردند که این مقدار بازیابی به تنش پسماند در نمونه نسبت داده شده است.

پروتکل های آزمون چرخه ای را می توان باتوجه به دمای تغییر شکل به سه دسته سرد، گرم و داغ تقسیم نمود [۱۰، ۱۱، ۲۷، ۲۸]. در برنامه ریزی سرد بارگذاری در دمای محیط انجام می شود، یعنی برای دستیابی به شکل موقت زمان و انرژی کمتری نسبت به سایر روش ها مورد نیاز است و مراحل کمتری دارد. مزیت اصلی این برنامه ریزی، بازیابی سریع و تقریباً کامل به شکل اولیه است [۱۱، ۲۸]؛ به گونه ای که با اعمال حرارت، تمام کرنش پلاستیک القاشده در فرآیند قابل بازیابی خواهد بود [۲۹]. مطالعات پیشین نشان داده اند که تاریخچه حرارتی، نرخ سرد شدن و تنش های پسماند ناشی از فرآیند تولید و پیچش روی قرقره می توانند به طور معناداری بر انحنای اولیه، تغییر شکل نهایی و رفتار ترمومکانیکی مواد اثر بگذارند [۳۰-۳۳].

پلاستیک ها سهم قابل توجهی از پسماندهای شهری را به خود اختصاص داده و به طور میانگین حدود ۱۰ درصد از وزن کل زباله ها را تشکیل می دهند. در این میان، پلی اتیلن با چگالی بالا^۳ یکی از انواع پر کاربرد پلاستیک ها است که به دلیل خواص مکانیکی و مقاومت شیمیایی مناسب، نه تنها در تولید اسباب بازی کودکان و برخی ظروف، بلکه در صنایع بسته بندی (از جمله مواد غذایی) استفاده می شود [۱۶]. این پلیمر با کد ۲ در نماد بازیافت جهانی مشخص می شود. مقاومت شیمیایی و پایداری بالای این مواد از مهم ترین دلایلی است که باید به طور صحیح بازیافت شوند [۱۶، ۱۷]. به طور کلی، بطری های پلاستیکی که با روش دمشی تولید شده اند از سه ماده مختلف تشکیل شده اند: (۱) در بطری از پلی اتیلن با چگالی بالا، (۲) بدنه بطری از پلی اتیلن ترفتالات و (۳) برچسب چاپ شده آن از پلی اتیلن با چگالی پایین [۱۷، ۳۴].

باتوجه به اهمیت روزافزون و کاربردهای گسترده پلیمرهای حافظه شکلی، هدف اصلی این پژوهش بررسی این رفتار در پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) بازیافت شده از در بطری های نوشیدنی است. در این راستا، ابتدا امکان سنجی ساخت فیلامنت چاپ سه بعدی به عنوان یک محصول با ارزش افزوده انجام شده و سپس خواص حافظه شکلی آن مشخصه یابی گردیده است. در نهایت، به منظور درک بهتر عملکرد این ماده، رفتار آن با چند فیلامنت پلیمری تجاری و مرسوم در بازار مقایسه شده است.

۲- روش انجام پژوهش

۲-۱- ماده اولیه

پس از جمع آوری مقداری در بطری، با توجه به کد ۲ در نماد بازیافت جهانی به جداسازی درهای ساخته شده از جنس پلی اتیلن با چگالی بالا پرداخته شد. این درها به عنوان ماده اولیه در فرآیند ساخت فیلامنت استفاده شدند. تمامی درها طی چند مرحله با آب داغ و شوینده شسته شدند. این مرحله که به منظور زدودن آلودگی های ناشی از محتویات داخل بطری یا مواد خارجی بود، از مهم ترین گام های ساخت فیلامنت بازیافتی است و می تواند بر کیفیت فیلامنت و خواص مکانیکی آن تأثیر بسزایی داشته باشد. پس از اطمینان از خشک شدن کامل درهای شسته شده، آن ها باتوجه به نوع، رنگ و سایر نمادهای داخلی شان دسته بندی شدند و برای جلوگیری از جذب رطوبت و آلودگی محیطی در کیسه های مجزا در یک محفظه در بسته نگهداری شدند. از یک خردکن برشی تک تیغه برای خرد کردن درهای بطری و تبدیل آن ها به ذراتی با ابعاد مشخص جهت تغذیه اکسترودر استفاده شد. باتوجه به اهمیت ابعادی ذرات ورودی به اکسترودر، از یک صافی با چشمه های ۱۰ میلی متری استفاده شد تا قطعات

¹ Lan

² Cersoli

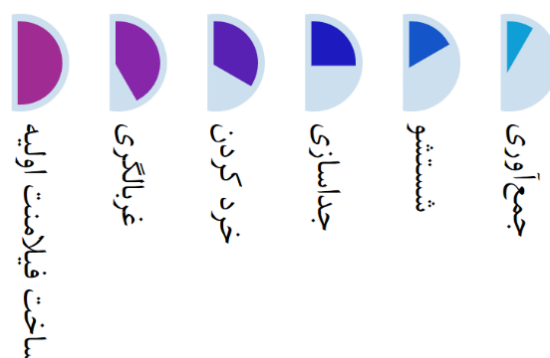
³ High-density polyethylene (HDPE)

درشت‌تر جداسازی شود. به‌منظور ساخت فیلامنت، از اکسترودر تک ماردون ساخته‌شده توسط شرکت کاجاران استفاده شد. این اکسترودر دارای قطر نازل ۳ میلی‌متر بود. سرعت اکسترودر و سه محدوده دمایی مربوط به آن، مطابق با ۰ تنظیم شد.

جدول ۱ تنظیمات اعمال شده در اکسترودر

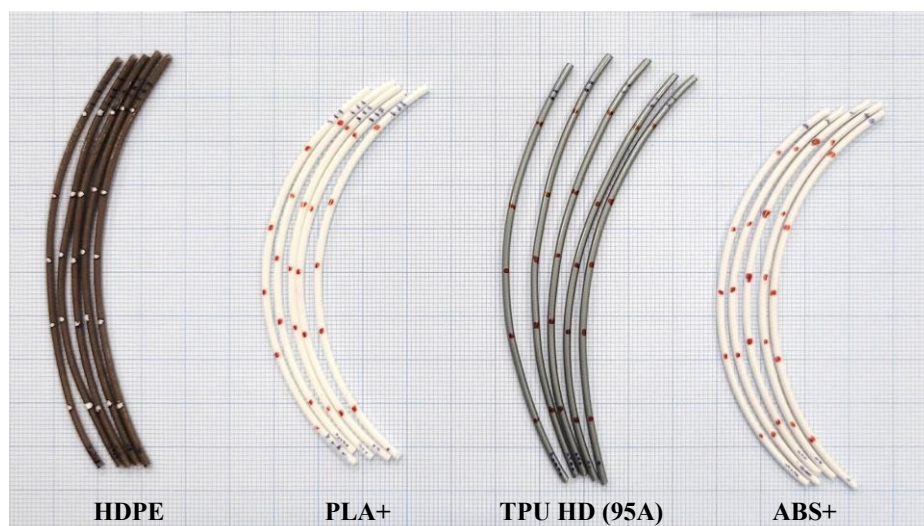
سرعت اکسترودر (rpm)	دمای ناحیه ۱ (°C)	دمای ناحیه ۲ (°C)	دمای ناحیه ۳ (°C)
۱۵	۱۶۵	۱۷۵	۱۸۵

به‌منظور کاهش قطر فیلامنت خارج شده از اکسترودر و دستیابی به قطر یکنواخت، از یک کشنده با سرعت ثابت استفاده شد. قطر نهایی فیلامنت ساخته شده $1/75 \pm 0/1$ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. این میزان دقت ابعادی، بیانگر پایداری فرآیند ساخت بوده و کیفیت فیلامنت حاصل را هم‌تراز با نمونه‌های تجاری موجود در بازار قرار می‌دهد. افزون‌بر این، فیلامنت ساخته شده از کیفیت سطحی و ظاهری مطلوبی برخوردار بود. مراحل فرآیند ساخت فیلامنت در این پژوهش در ۰ ارائه شده است.



شکل ۱ مراحل ساخت فیلامنت

به‌منظور ارزیابی دقیق رفتار حافظه شکلی فیلامنت ساخته شده و مقایسه عملکرد آن با سایر مواد، آزمون‌های تجربی حافظه شکلی روی این نمونه و چند فیلامنت تجاری رایج انجام شد. مواد تجاری مورد استفاده شامل PLA+ (سفید، شرکت یوسو)، ABS+ (سفید سرد، شرکت ایسان) و TPU HD-95A (خاکستری، شرکت مدریک) بودند. تصویر نمونه‌های آماده‌سازی شده در ۰ ارائه شده است. به‌منظور بررسی تکرارپذیری این آزمون، هر آزمون ۵ بار تکرار شد و نتایج نهایی بر اساس میانگین و انحراف معیار حداقل ۳ تکرار معتبر گزارش شده‌اند.



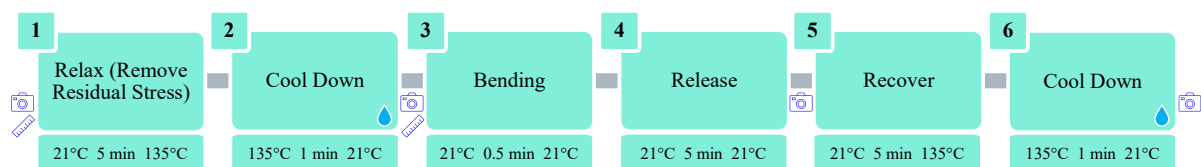
شکل ۲ نمونه‌های بریده‌شده به همراه نقاط علامت زده شده بر روی آن و کدگذاری نام نمونه

۲-۲- روش انجام آزمایش

پروتکل آزمون مورد استفاده در این پژوهش، بر اساس روش پیشنهادی مهرپویا و هونگ^۱ [۱۴] بوده که برای افزایش دقت اصلاحاتی بر آن اعمال شد. نمونه‌ها با برش قطعات ۱۰ سانتی‌متری از فیلامنت مورد استفاده در چاپ سه‌بعدی تهیه شدند. برای ارزیابی تغییرات زاویه، ۵ نقطه شاخص (یک نقطه در وسط و ۴ نقطه با فاصله ۱/۵ سانتی‌متری از مرکز و دو سر نمونه) مطابق ۰ روی نمونه علامت‌گذاری شد. مختصات نقاط با استفاده از نرم‌افزار GetData Graph Digitizer از تصاویر ثبت‌شده در هر مرحله استخراج شد و از دو نقطه میانی هر بازو برای اندازه‌گیری زاویه بین دو بازوی نمونه استفاده شد. شایان ذکر است که به‌منظور حذف خطای ناشی از تغییر شکل موضعی در نواحی انتهایی، از دو نوک نمونه برای اندازه‌گیری زوایا استفاده نشد. برای اندازه‌گیری قطر نمونه، میانگین حداقل ۶ داده در سرتاسر نمونه‌ها ملاک قرار گرفت. همچنین از ابعاد اندازه‌گیری‌شده (قطر و طول قطعات مختلف) برای محاسبه حجم مورد نیاز در محاسبه چگالی فیلامنت‌ها استفاده شد. برای کاهش خطا اندازه‌گیری چگالی برای فیلامنت‌هایی با طول ۱ متر نیز تکرار شد و نتایج مشابهی حاصل شد.

این آزمون در ۶ مرحله انجام شد. در گام نخست (تنش‌زدایی)، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در کوره با دمای 135°C (بالتر از دمای انتقال شیشه‌ای تمام مواد مورد بررسی در این پژوهش) قرار گرفتند تا تنش پسماند (حافظه اولیه ناخواسته) در نمونه‌ها حذف شود. افزودن این مرحله، از اصلاحات کلیدی پروتکل حاضر است؛ زیرا در تمام مطالعات پیشین [۱۴، ۱۵، ۱۸]، شکل خام فیلامنت (که دارای تنش پسماند ساخت است) به اشتباه به‌عنوان شکل دائمی در نظر گرفته شد و در صورت نادیده گرفتن آن، نتایج نهایی قابل اعتماد نخواهند بود. در این مرحله نمونه با فعال‌سازی به شکل اولیه ناخواسته بازیابی شد.

در گام دوم، نمونه بلافاصله به حمام آب سرد (با دمای 21°C) منتقل شده و ۱ دقیقه در حمام نگهداری شد تا شکل آن تثبیت شود؛ پس از خروج نمونه از حمام، قطر و تصویر آن ثبت شد. در گام سوم (برنامه‌ریزی سرد)، نمونه در دمای محیط (21°C) به مدت ۳۰ ثانیه حول استوانه‌ای با قطر ۶ میلی‌متر تا زاویه 180° درجه خم شد. در گام چهارم (آزادسازی)، نمونه به مدت ۵ دقیقه در دمای محیط آزمایشگاه (21°C) رها شد تا شکل آن تثبیت شود. پس از ثبت تصویر، نمونه برای بازیابی شکلی مجدداً به مدت ۵ دقیقه در کوره با دمای 135°C قرار گرفت و درنهایت در آب با دمای 21°C خنک‌کاری شد تا حالت نهایی آن ثبت گردد و تصویر نهایی نمونه گرفته شد. فلوچارت مراحل آزمون به همراه علائم اختصاری مربوط به ثبت تصاویر (نماد دوربین)، اندازه‌گیری قطر با کولیس (نماد خط‌کش) و محیط آبی (نماد قطره)، در ۰ ارائه شده است. در هر مرحله، دمای شروع و پایان و زمان مربوط به آن مرحله نیز مشخص شده است.



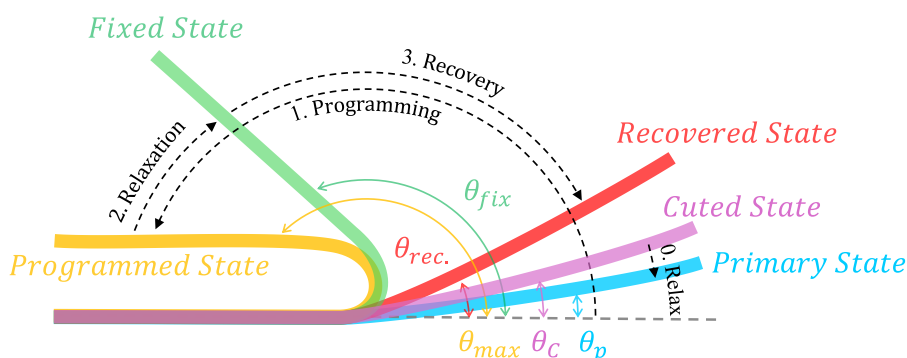
شکل ۳ مراحل انجام آزمایش خمش حافظه شکلی فیلامنت پلیمرهای حافظه شکلی

در بخش مقدمه توضیحاتی درباره روش‌های مختلف اندازه‌گیری پارامترهای حافظه شکلی در مطالعات گوناگون بیان شد. مقادیر زاویه فیلامنت برش‌خورده و زاویه پس از رهاسازی تنش پسماند اولیه به ترتیب θ_c و θ_p نامیده شدند. زاویه نمونه پس از خمش (180°)، زاویه پس از رهاسازی نمونه در دمای محیط و زاویه دقیقاً پس از بازیابی در کوره گرم به ترتیب به‌عنوان زاویه بیشینه (θ_{max})، زاویه تثبیت (θ_{fix}) و زاویه بازیابی (θ_{rec}) در نظر گرفته شدند. این زوایا در ۰ نشان داده شده‌اند.

سه پارامتر نسبت تثبیت شکلی (R_f)، نسبت بازیابی شکلی (R_r) و نسبت حافظه شکلی (R_{SME}) مورد استفاده در این پژوهش مطابق با رابطه ۰ محاسبه می‌شوند. این نسبت‌ها به‌منظور مقایسه رفتار حافظه شکلی در پلیمرها استفاده شدند.

¹ Huang

$$\left\{ \begin{array}{l} R_f(\%) = \frac{\theta_{fix}}{\theta_{max}} \times 100 \\ R_r(\%) = \frac{\theta_{max} - \theta_{rec.}}{\theta_{max}} \times 100 \\ R_{SME}(\%) = R_f \times R_r / 100 \end{array} \right. \quad (1)$$



شکل ۴ مراحل و پارامترهای مربوط به آزمایش حافظه شکلی خمشی

۳- نتایج و بحث

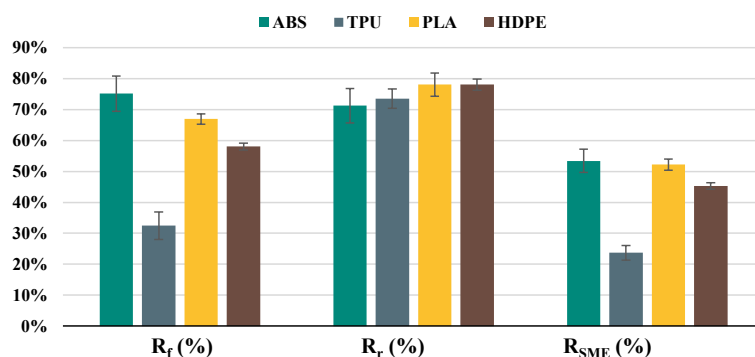
مقادیر اندازه‌گیری شده برای زاویه و قطر فیلامنت (پیش و پس از بازیابی حافظه اولیه)، هزینه هر کیلوگرم فیلامنت (بر اساس قیمت‌های پایگاه اینترنتی دیجی کالا [۳۵]) و چگالی اندازه‌گیری شده برای قطعات نمونه مورد بررسی در **Error! Reference source not found.** گزارش شده است. با مقایسه مقادیر زاویه فیلامنت برش خورده (θ_c) و زاویه پس از رهاسازی تنش پسماند اولیه (θ_p) مشاهده می‌شود که اکثر فیلامنت‌ها پس از اعمال حرارت اولیه، به حالت بازتری تغییر شکل داده و به حالت خطی نزدیک‌تر شدند (مقدار زاویه اولیه نسبت به خط افقی کاهش یافته که با شماتیک ۰ تطابق دارد)؛ اما در نمونه TPU رفتار معکوسی مشاهده شد و مقدار این زاویه افزایش یافت. این امر بیانگر انحنای بیشتر در نمونه TPU و حافظه اولیه متفاوت در این فیلامنت است. بیشینه بودن زاویه اولیه در نمونه ABS+، به دلیل برش خوردن نمونه از بخش‌های داخلی کلاف فیلامنت (پیچیده‌شده با شعاع انحنای کمتر به دور قرقره) است. داده‌های مربوط به قطر نشانگر دقت بسیار مناسب فیلامنت ساخته شده، به‌ویژه در مقایسه با فیلامنت‌های تجاری است. مشاهده می‌شود که پس از بازیابی حافظه اولیه، کمترین تغییر قطرها تنها با مقدار ۰/۰۲ و ۰/۰۳ میلی‌متر به ترتیب در فیلامنت‌های TPU و HDPE ساخته شده رخ داده؛ درحالی‌که این مقدار برای دو فیلامنت تجاری رایج دیگر یعنی ABS+ و PLA+ برابر ۰/۱ و ۰/۰۵ میلی‌متر بود. این موضوع، پایداری ابعادی فیلامنت ساخته شده تحت تغییرات دمایی را نشان می‌دهد. مشاهده شد که چگالی فیلامنت ساخته شده از سایر فیلامنت‌ها و حتی از آب کمتر است که با مشاهده شناوری نمونه‌های مربوطه روی آب و چگالی مربوط به HDPE تطابق داشت. قیمت فیلامنت‌های گزارش شده در این جدول، بیانگر کاهش قابل توجه هزینه در هنگام استفاده از مواد بازیافتی است.

جدول ۲ قیمت، ابعاد و زوایا اندازه‌گیری شده مواد در آزمایش

مواد	قیمت (Rial/kg)	ρ (kg/m ³)	d_c (mm)	p (mm)	θ_c (°)	θ_p (°)	θ_{fix} (°)	$\theta_{rec.}$ (°)
ABS+	۱۴,۵۰۰,۰۰۰	۱۱۳۱±۱۸	۱/۷۴±۰/۰۲	۱/۸۴±۰/۰۴	۵۴/۲۶±۰/۸۸	۳۰/۹۱±۸/۳۲	۱۳۵/۲۴±۱۰/۱۵	۵۱/۶۷±۱۰/۰۲
TPU (95A)	۲۲,۰۰۰,۰۰۰	۱۲۷۴±۳	۱/۷۴±۰/۰۲	۱/۷۴±۰/۰۲	۳۳/۹۱±۵/۰۹	۴۴/۶۷±۷/۰۸	۵۸/۳۷±۸	۴۷/۶۴±۵/۷۱
PLA+	۱۷,۸۰۰,۰۰۰	۱۲۳۸±۳	۱/۷۵±۰/۰۲	۱/۸۵±۰/۰۳	۵۱/۶۳±۳/۳۸	۲۷/۵۶±۶/۴۵	۱۲۰/۵۲±۳/۰۳	۳۹/۵۴±۶/۶۷
HDPE	-	۹۶۸±۸	۱/۷۶±۰/۰۳	۱/۷۹±۰/۰۸	۳۳/۹۴±۱/۱۴	۲۳/۹۶±۳/۳۵	۱۰۴/۴۵±۲/۰۹	۳۹/۴۲±۳/۲۴

نتایج مربوط به زوایا، بیانگر کمترین زاویه تثبیت (θ_{fix}) در نمونه TPU نسبت به سایر مواد است که ضعف این پلیمر را در حفظ شکل موقت طی فرآیند برنامه‌ریزی سرد (روش مورد استفاده در این پژوهش) نشان می‌دهد. کمینه‌بودن زاویه بازیابی نهایی (θ_{rec}) در فیلامنت ساخته شده در این پژوهش، بیانگر بهترین عملکرد آن در بازیابی شکلی نسبت به سایر مواد انتخابی است. البته با لحاظ کردن زاویه اولیه (پس از بازیابی حافظه ناخواسته)، مشاهده می‌شود که TPU بیشترین و ABS+ کمترین میزان بازیابی را نسبت به حالت دائمی خود داشته‌اند. اگرچه لحاظ نمودن اثر بازیابی حافظه اولیه (تنش پسماند) در نتایج اثرگذار است، اما از آنجاکه این پارامتر در مطالعات پیشین [۱۴، ۱۵، ۱۸] مرسوم نبوده است، در این پژوهش نیز به‌منظور همگام‌سازی روش محاسبات با ادبیات موضوع، درک بهتر و اطمینان از قابلیت مقایسه نتایج با سایر پژوهش‌ها، از تغییرات زاویه ناشی از حافظه اولیه صرف‌نظر شد. میانگین مقادیر محاسبه‌شده برای نسبت‌های حافظه شکلی حاصل از این پژوهش طبق روابط 0 به همراه انحراف معیار داده‌های مربوط به تکرارهای هر نمونه (به‌صورت نوار خط^۱) در نمودار ۵ ارائه شده است. مطابق با زوایای گزارش‌شده در **Error! Reference source not found.** نمونه TPU کمترین مقدار نسبت تثبیت شکلی (R_f) را داشت درحالی‌که این نسبت برای سایر مواد در بازه ۵۸ تا ۷۵ درصد قرار داشت و نمونه ABS+ بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد. نسبت تثبیت شکلی بیشتر به معنای توانایی بهتر پلیمر برای به‌خاطر سپردن شکل موقت نمونه (مطابق با روند برنامه‌ریزی مورد استفاده) است. نسبت بازیابی شکلی (R_r) برای دو نمونه PLA+ و فیلامنت HDPE ساخته شده بیشترین مقدار را داشت که نشانگر توانایی بهتر پلیمر برای بازگشت به شکل اولیه بود. نسبت اثر حافظه شکلی (R_{SME}) که با استفاده از حاصل‌ضرب دو نسبت R_r و R_f محاسبه می‌شود، می‌تواند به‌عنوان ملاک بهتری برای مقایسه رفتار حافظه شکلی فیلامنت‌ها استفاده شود. R_{SME} برای نمونه‌های TPU کمترین مقدار (۲۴٪) بود، اما برای سه ماده دیگر این نسبت در محدوده مشابه ۴۵ تا ۵۳ درصدی قرار داشت. این سه نسبت هر چقدر به ۱۰۰٪ نزدیک‌تر باشند، رفتار حافظه شکلی بهتر در ماده مورد استفاده را نشان می‌دهند. مقایسه این سه نسبت نشان می‌دهد که اگرچه فیلامنت HDPE ساخته شده بالاترین نسبت اثر حافظه شکلی را ندارد، اما رفتار حافظه شکلی آن در محدوده قابل‌قبولی بوده و امکان رقابت با مواد تجاری را دارد. باتوجه به حذف هزینه مواد اولیه در این فیلامنت، قیمت تمام‌شده آن نیز کاهش خواهد داشت. مطابق با قیمت و چگالی کمتر این ماده نسبت به سایر مواد مورد بررسی در این پژوهش، فیلامنت HDPE می‌تواند گزینه‌ای کارآمد برای کاربردهای خاص باشد؛ همچنین این پلیمر بازیافتی پتانسیل مطالعات خواص گوناگون برای کاربردهای گسترده‌تری را دارد.

از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان بررسی تنها یک نوع فیلامنت بازیافتی و استفاده از یک پروتکل مشخص آزمون خمشی حافظه شکلی، دما و زمان مورد استفاده برای مراحل تنش‌زدایی و بازیابی حرارتی را نام برد زیرا در صورت نادیده گرفتن آن، نمونه می‌تواند به حالت خمیری برود و تغییر شکل شدید و خارج از کنترل در حین آزمایش اتفاق بیفتد. این فیلامنت می‌تواند به‌صورت بالقوه به‌عنوان یک ماده هوشمند کم‌هزینه، سبک و قابل‌رقابت برای کاربردهای خاص و نمونه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵ نمودار مقادیر نسبت‌های تثبیت (R_f)، بازیابی (R_r)، حافظه شکلی (R_{SME})

^۱ Error bar

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش فرآیند مناسبی برای ساخت فیلامنت بازیافتی با استفاده از درهای بطری از جنس پلی اتیلن با چگالی بالا ارائه شد. همچنین اهمیت پارامتر مقدار زاویه اولیه فیلامنت بریده شده و حافظه ناخواسته در بررسی حافظه شکلی فیلامنت بیان شد. با مقایسه پارامترهای حائز اهمیت، مشاهده شد که ماده ساخته شده در این پژوهش دارای برتری‌های قابل توجهی است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: کمترین زاویه اولیه (و حافظه ناخواسته) پس از حرارت‌دهی، چگالی پایین‌تر نسبت به سایر مواد، چگالی کمتر از آب، رفتار حافظه شکلی سرد مطلوب و قابل رقابت با پلیمرهای تجاری مورد استفاده در چاپ سه بعدی و در نهایت هزینه تمام شده بسیار پایین. نتایج نشان داد که فیلامنت HDPE بازیافتی، علی‌رغم هزینه بسیار کمتر نسبت به نمونه‌های رایج بازار، خواص حافظه شکلی مناسبی ارائه می‌دهد که به سهولت و بدون نیاز به فناوری‌های پیچیده قابل دستیابی است.

در بررسی شکل دائمی نمونه‌ها مشاهده شد که شکل فیلامنت‌های حافظه‌دار پیش و پس از حرارت‌دادن (حذف حافظه اولیه ناخواسته) متفاوت است. درواقع نمونه‌های فیلامنت بریده شده دو پارامتر دارند که پیش‌ازاین به آن‌ها توجه نشده بود؛ اولین مورد انحنای اولیه نمونه (حافظه موقت مربوط به فرآیند تولید و بسته‌بندی) و دومین مورد انحنای پس از بازیابی حافظه اولیه ناخواسته است. مشاهده شد هر دو زاویه مقداری غیر از صفر درجه بودند و این به معنای شکل دائمی متفاوتی در نمونه‌ها نسبت به فرضیات مطالعات قبلی (حالت خطی صاف) است که بر مقدار خواص حافظه شکلی گزارش شده اثرگذار خواهد بود. عدم بررسی این مورد در پژوهش‌های موجود، خلأ تحقیقاتی در این زمینه و نیاز به مطالعات آینده را مشخص می‌کند.

۵- تشکر و قدردانی

از دکتر محمد فصیحی دستجردی در دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز دانشگاه علم و صنعت ایران برای در اختیار قراردادن دستگاه اکسترودر کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
R	نسبت، %
d	قطر فیلامنت، mm
علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m^3
θ	زاویه، °
زیرنویس	
c	بریده شده
p	اولیه
max	بیشینه
fix	تثبیت شده
$rec.$	بازیابی شده
f	تثبیت
r	بازیابی
SME	اثر حافظه شکلی
بالانویس	
*	شرایط مرجع

Authorship Contribution Statement

Sina Farahifar



Biography: Sina Farahifar is a Ph.D. candidate in Mechanical Engineering (Solid Mechanics) at Iran University of Science and Technology (IUST). His research focuses on auxetic structures, smart materials, shape memory polymers, and 3D/4D printing, with an emphasis on experimental investigation and numerical modeling. He completed a visiting research period at the University of Stuttgart, Germany, where he worked on advanced and smart materials. His research interests include the mechanical behavior of smart and composite materials, finite element analysis, and additive manufacturing.

Contribution Statement: Data curation, Formal analysis, Investigation, Software, Validation, Visualization, Writing – original draft

Dr. Mahmood Mehrdad Shokrieh



Biography: Professor Mahmood M. Shokrieh is a Distinguished Professor of Mechanical Engineering (Solid Mechanics) at Iran University of Science and Technology (IUST). He received his Ph.D. from McGill University, Canada, in 1996 and is internationally recognized for his extensive contributions to composite materials, including polymeric, fiber-reinforced, nano-, and smart composites. In recent years, his research has increasingly focused on smart materials and advanced multifunctional composites. He is the editor and conference chair of two major international biennial conferences, which have been held for more than 13 editions. He has authored numerous high-impact publications while supervising a large number of graduate students.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Project administration, Resources, Supervision, Validation, Writing – review & editing

۷- مراجع

- [1] Fang C, Wang W. Shape memory alloys for seismic resilience. 1 ed: Springer Nature Singapore, 2019.
- [2] Vernon LB, Vernon HM. Process of manufacturing articles of thermoplastic synthetic resins. 1941 - 993.
- [3] Das HR, Uthaman A, Lal HM, Babu A, Thomas S. Shape memory polymers as sutures. In: Thomas S, Coates P, Whiteside B, Joseph B, Nair K, editors. Advanced Technologies and Polymer Materials for Surgical Sutures: Woodhead Publishing; 2023. 265-81.
- [4] Hu J. Shape memory polymers: fundamentals, advances and applications. Shrewsbury, UK: Smithers Rapra, 2014.
- [5] Abavisani I, Rezaifar O, Kheyroddin A. Multifunctional properties of shape memory materials in civil engineering applications: a state-of-the-art review. Journal of Building Engineering. 2021;44:102657.
- [6] Peponi L, Navarro-Baena I, Kenny JM. Shape memory polymers: properties, synthesis and applications. In: Aguilar MR, San Román J, editors. Smart polymers and their applications: Woodhead Publishing; 2014. p. 204-36.
- [7] Xie T. Tunable polymer multi-shape memory effect. Nature. 2010;464:267-70.
- [8] Chen Y, Chen C, Rehman HU, Zheng X, Li H, Liu H, et al. Shape-memory polymeric artificial muscles: mechanisms, applications and challenges. Molecules. 2020;25:4246.
- [9] Hu J, Zhu Y, Huang H, Lu J. Recent advances in shape-memory polymers: Structure, mechanism, functionality, modeling and applications. Progress in Polymer Science. 2012;37:1720-63.
- [10] Fallah A, Saleem Q, Koc B. Assessment of mechanical properties and shape memory behavior of 4D printed continuous fiber-reinforced PETG composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2024;181:108165.

- [11] Fallah A, Asif S, Gokcer G, Koc B. 4D printing of continuous fiber-reinforced electroactive smart composites by coaxial additive manufacturing. *Composite Structures*. 2023;316:117034.
- [12] Functional polymers. 1 ed. Cham: Springer Cham, 2019.
- [13] Wagermaier W, Kratz K, Heuchel M, Lendlein A. Characterization methods for shape-memory polymers. In: Lendlein A, editor. *Shape-Memory Polymers*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2010. 97-145.
- [14] Mehrpouya M, Huang WM. 11 - Origami-inspired 4D printing. In: Bodaghi M, Zolfagharian ABT-SMiAM, editors. *Additive Manufacturing Materials and Technologies*: Elsevier; 2022. 373-94.
- [15] Sava ŞD, Pricop B, Comănesci RI, Cimpoeşu N, Popa M, Lohan NM, et al. Variations in the thermomechanical and structural properties during the cooling of shape-memory R-PETG. *Polymers*. 2024;16.
- [16] Winkler S. *Recycling For Dummies*: Wiley, 2023.
- [17] Nikolaev AA. The Physical Characterization and Terminal Velocities of Aluminium, Iron and Plastic Bottle Caps in a Water Environment. *Recycling*. 2022;7.
- [18] Cersoli T, Cresanto A, Herberger C, MacDonald E, Cortes P. 3D Printed Shape Memory Polymers Produced via Direct Pellet Extrusion. *Micromachines (Basel)*. 2021;12.
- [19] Gao H, Li J, Zhang F, Liu Y, Leng J. The research status and challenges of shape memory polymer-based flexible electronics. *Materials Horizons*. 2019;6:931-44.
- [20] Shape memory polymers, blends and composites: Advances and applications. Singapore: Springer Singapore, 2020.
- [21] Lendlein A, Langer R. Biodegradable, elastic shape-memory polymers for potential biomedical applications. *Science*. 2002;296:1673-6.
- [22] Behl M, Lendlein A. Shape-memory polymers. *Materials Today*. 2007;10:20-8.
- [23] Ducheyne P. *Comprehensive biomaterials*. Elsevier Science. 2011.
- [24] McGinty S. A decade of modelling drug release from arterial stents. *Mathematical Biosciences*. 2014;257:80-90.
- [25] Lan X, Liu Y, Lv H, Wang X, Leng J, Du S. Fiber reinforced shape-memory polymer composite and its application in a deployable hinge. *Smart Materials and Structures*. 2009;18:024002.
- [26] Mirasadi K, Rahmatabadi D, Ghasemi I, Khodaei M, Baniassadi M, Baghani M. Investigating the effect of ABS on the mechanical Properties, morphology, printability, and 4D printing of PETG-ABS blends. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2024;309:1-11.
- [27] Li G, Wang A. Cold, warm, and hot programming of shape memory polymers. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 2016;54:1319-39.
- [28] Soleyman E, Rahmatabadi D, Soltanmohammadi K, Aberoumand M, Ghasemi I, Abrinia K, et al. Shape memory performance of PETG 4D printed parts under compression in cold, warm, and hot programming. *Smart Materials and Structures*. 2022;31.
- [29] Bodaghi M, Serjouei A, Zolfagharian A, Fotouhi M, Rahman H, Durand D. Reversible energy absorbing meta-sandwiches by FDM 4D printing. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020;173:105451.
- [30] Mobarakian M, Safarabadi M, Farahani M. Developing a thermomechanical and thermochemical model for investigating the cooling rate effects on the distortion of unsymmetrical viscoelastic polymeric composite laminates. *Polymer Testing*. 2020;87.

- [31] Mobarakian M, Safarabadi M, Farahani M. Investigating the effects of cooling rate on distortion of asymmetric composite laminates. *Composite Structures*. 2020;236.
- [32] Jafarpour A, Safarabadi Farahani M, Haghighi-Yazdi M. Numerical investigation of oriented CNFs effects on thermo-mechanical properties and curing residual stresses field of polymeric nanocomposites. *Mechanics of Materials*. 2019;138.
- [33] Jafarpour A, Safarabadi M, Haghighi-Yazdi M, Yousefi A. Numerical study of curing thermal residual stresses in GF/CNF/epoxy nanocomposite using a random generator model. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2020;28:2618-28.
- [34] Barletta M, Aversa C, Puopolo M, Vesco S. Extrusion blow molding of environmentally friendly bottles in biodegradable polyesters blends. *Polymer Testing*. 2019;77.
- [35] Digikala. www.digikala.com. accessed: 2026.01.01 (in Persian).