



Design and Fabrication a Robotic Gripper with Drag and Drop capability based on Shape Memory polymer

Mohammad Gohari ^{a*}, Mona Tahmasebi ^b, Hamdan Mozafari ^a

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

^b Department of Agricultural Engineering Research, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center.

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Gohari M, Tahmasebi M, Mozafari H. Design and Fabrication a Robotic Gripper with Drag and Drop capability based on Shape Memory polymer. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;5(1):72-85.

doi <https://10.61186/masm.5.1.72>

KEYWORDS

Smart Material,
Shape memory polymer,
Stress-strain diagram,
Strain rate,
Artificial muscle,
Drag and drop mechanism,
Robotic.

ABSTRACT

In this paper, shape memory polymers (SMPs) are reviewed, as they have demonstrated exceptional properties that make them suitable as advanced materials for current and potential applications, particularly in robotics. However, the thermomechanical properties and traditional shape memory features are somewhat limited due to their ability to recover their original shape solely through the use of a heating source. SMPs not only possess remarkable mechanical and shape memory properties but also their ease of fabrication makes them suitable candidates for numerous applications. In this research, an artificial muscle equipped with a shape memory polymer is introduced, and its mechanical properties are measured and tested in a simple gripping and releasing mechanism. The results showed that the device is capable of performing cyclic loading and provides a force-to-energy ratio of 0.25.

Extended Abstract

1. Introduction

Shape Memory Polymers (SMPs) are smart polymeric materials that have the ability to return from a deformed state (temporary shape) to their original (permanent) shape when triggered by an external stimulus, such as a change in temperature. SMPs can retain two or sometimes three shapes, and the transition between them is often induced by temperature changes. In addition to temperature changes, the shape change in SMPs can also be triggered by an electric or magnetic field, light, or a solution. Like polymers in general, SMPs cover a wide range of properties, from stable to biodegradable, soft to hard, and elastic to rigid, depending on the structural units that make up the SMP. SMPs include both thermoplastic and thermoset (covalently cross-linked) polymer materials. It is known that SMPs can store up to three different shapes. SMPs have demonstrated recoverable strains of over 800%.

Two important quantities used to describe the shape memory effects are the strain recovery rate (R_r) and the strain fixity rate (R_f). The strain recovery rate describes the material's ability to remember its permanent shape, while the strain fixity rate describes the ability of the switching segments to fix a mechanical deformation.

Polymers exhibiting shape memory effects have both a visible, current (temporary) shape and a stored (permanent) shape. After the material is conventionally fabricated, it is processed into another temporary shape by

* Corresponding author. Tel.: +989125044137

E-mail address: moh-gohari@arakut.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.5.1.72>.

Received: October 01, 2024; Received in revised form: February 25, 2025; Accepted: March 17, 2024.

© Author



heating, deforming, and finally cooling. The polymer retains this temporary shape until a pre-determined external stimulus activates the change back to its permanent shape. The secret behind these materials lies in their molecular network structure, which consists of at least two separate phases. The phase with the highest thermal transition, T_{perm} , is the temperature above which the physical crosslinks responsible for the permanent shape are formed. On the other hand, the switching segments are those that soften after reaching a specific transition temperature (T_{trans}) and are responsible for the temporary shape. In some cases, this transition temperature is the glass transition (T_g), and in others, it is the melting temperature (T_m). When the temperature exceeds T_{trans} (while remaining below T_{perm}), the switching is activated by softening these switching segments, allowing the material to resume its original (permanent) shape. Below T_{trans} , the flexibility of the segments is at least partially restricted. If T_m is selected for programming the SMP, strain-induced crystallization of the switching segment can be initiated when stretched above T_m and subsequently cooled below T_m . These crystals form covalent networks that prevent the modification of the polymer's normal coiled structure.

The ratio of hard to soft segments often ranges between 5/95 and 95/5, but ideally, this ratio is between 20/80 and 80/20. Shape memory polymers are effectively viscoelastic, and there are numerous models and analytical methods available for their analysis.

Given that the use of smart polymeric materials has been developed for sensors [13-14] and actuators [15-16], the exploration of shape memory polymers (SMPs) can assist engineers and designers in the field of robotics.

In this research, an attempt has been made to develop and evaluate a robotic actuator based on SMPs with the ability to grasp and release objects. This actuator can potentially be applied in areas such as robotic laparoscopic surgery or fruit and crop harvesting systems.

2. Methodology and Results

In this study, a shape memory polymer-based actuator was first constructed, followed by mechanical property measurements. Additionally, the feasibility of using it in a grasp-release tool was investigated. To build the actuator based on artificial muscles made from shape memory polymers, nylon threads were used. Figure 1 shows the research flowchart. Initially, single-strand nylon fibers, commercially known as (Shieldex PN# 260151011717), were twisted into a four-strand configuration to form a single thread. This twisted thread was then double-twisted to achieve the final form, as shown in Figure 1. To prevent the twisted structure from untwisting, two metal clamps were placed at both ends. During the twisting process, the nylon thread was subjected to tension by a constant 5 kg weight while the twisting occurred. As a result, a complete nylon coil was formed. Subsequently, an enameled copper wire was wound around the nylon coil (Figure 2). The combined assembly formed an actuator muscle with a length of 8 cm.

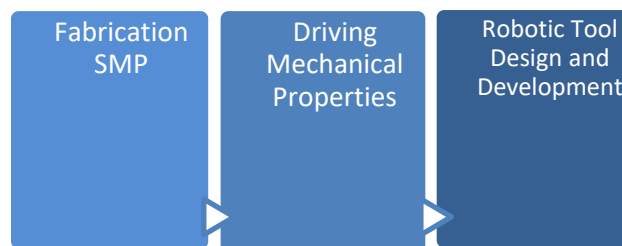


Figure 1. flowchart of study



Figure 2. SMP Muscle

provide thermal power to the fabricated artificial muscle, as shown in Figure 3, a 3.3-volt electric current was applied to the coil, which resulted in an increase in the coil's surface temperature. This caused the nylon strands to unwind, leading to a change in the length of the muscle. When the current was stopped, the muscle returned to its original length through the re-twisting of the strands and the expansion of the actuator.

To determine the mechanical properties of the actuator, changes in its length over time were recorded. Thus, the length variations were tracked in relation to time. Figure 4 illustrates the change in length versus the heat generated by the electric current after a certain time. It can be observed that the muscle length is a function of the amount of heat received through the copper coil. To measure the applied force, the fabricated actuator was connected to a force gauge with an accuracy of 0.1 N, allowing the force to be measured as electrical current was applied.

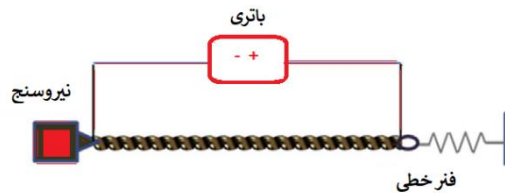


Figure 3. Actuating by electric current

3. Results and Discussion

In Figure 5, the changes in force are plotted against time through the application of voltage. As seen in Figure 4, after the force reaches a certain value, in this case, 4 N, the actuator stops generating additional force, and saturation appears to occur. This saturation is actually due to the internal structure of the twisted strands, as the twists in the strands have been undone, preventing further contraction of the twisted assembly.

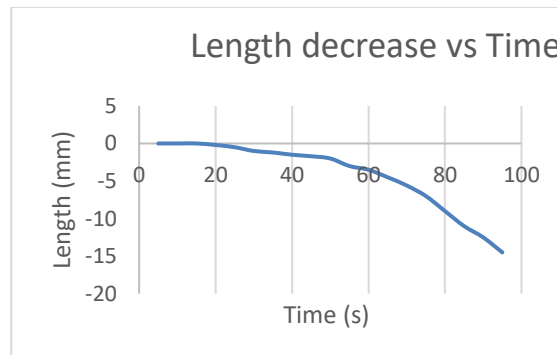


Figure 4. Length decreases by applying electrical current

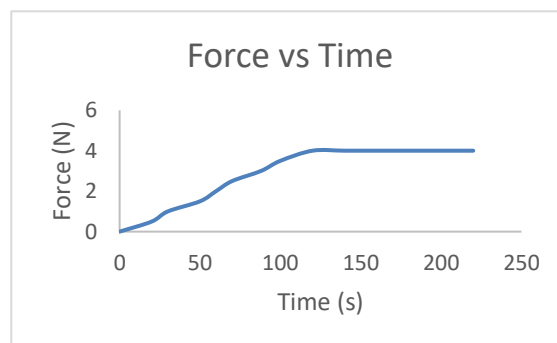


Figure 5. Force vs. Time by applying electrical current

The force-displacement graph was also obtained using a force gauge and a dial indicator. The graph in Figure 6 illustrates the variations in force against the displacement measured during this experiment.

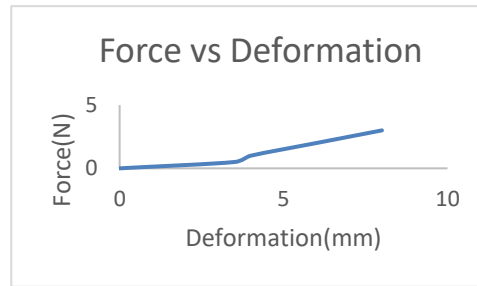


Figure 6. Force-Deformation diagram

To create a grasping and releasing actuator, the artificial muscle was placed under the pressure of a spring inside a circular tube with a diameter of 5 millimeters, with the other end connected to a scissor-gripper mechanism. Thus, when voltage is applied, the coil contracts, enabling the grasping action in the gripping mechanism. Figure 7 shows a prototype design and the constructed device. The aim of developing this equipment is to assess the feasibility of grasping and releasing actions in devices such as surgical robots and fruit harvesters.



Figure 7. Prototype of Gripper

In many cases, the artificial muscle must be able to alternately provide force to the robot's end effector. To achieve this, power was supplied in the form of voltage, varying between 5 volts and 9 volts to the constructed system (Figure 7), and the force changes were recorded using a force gauge. This cyclic loading is shown in Figure 8. It can be observed that the length recovery rate is faster than the loading path, indicating a quicker heat release of the polymer compared to its heat absorption.

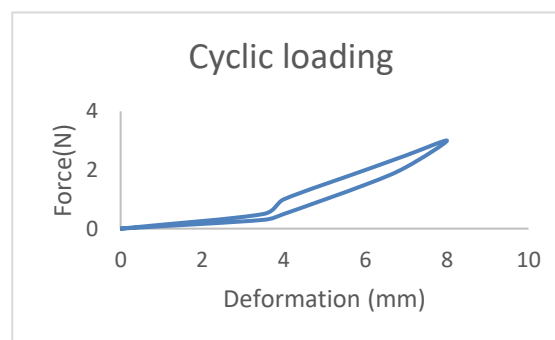


Figure 8. Cycling force

4. Conclusions

In this paper, shape memory polymers (SMPs) are examined for their exceptional properties, which have led to their use as advanced materials for current and potential applications. However, the traditional characteristics and features of shape memory are quite limited due to their ability to recover their original shape solely using a heat source. SMPs not only possess remarkable mechanical properties and shape memory capabilities, but they also gain original features after exposure to any electrical or thermal heating source. The results indicate that this actuator has a force saturation limit and can exert maximum force by receiving a specific amount of energy.

Furthermore, we believe that exploring the advanced properties of these materials is still evolving in the design and/or development of new composites. Therefore, a critical aspect can be found in identifying significant useful functionalities. To this end, the feasibility of cyclic loading in a simple grasp-release actuator was investigated, demonstrating its capability to perform a clamping mechanism for agricultural robotics and robotic surgery. However, the strain rates during loading and unloading are not equal, and the response time is not as high as that of piezoelectric materials and shape memory metals.



طراحی و ساخت نمونه عملگر رباتیک با قابلیت گیرندگی بر پایه پلیمر حافظه‌دار

محمد گه‌ری^{الف}، منا طهماسبی^{ب*}، حمدان مظفری^ج

^{الف} دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، moh-gohari@arakut.ac.ir
^ب استادیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران، tahmasebi.mona@gmail.com
^ج دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، hamdanmozafari@gmail.com

| چکیده | واژگان کلیدی |
|--|---|
| <p>اخیراً پلیمرهای حافظه‌دار به علت خواص ترمومکانیکی مورد توجه طراحان مهندسی مکانیک قرار گرفته است چرا که ارزان بوده و قابلیت کنترل پذیری مناسبی برای استفاده در رباتیک دارند. این پلیمرها می‌توانند با سیکل حرارتی دچار کرنش شده و به شکل اولیه بازگردند. با این حال، خواص ترمومکانیکی و ویژگی‌های حافظه شکل سنتی به دلیل توانایی آن‌ها در بازیابی شکل اصلی تنها با استفاده از منبع گرمایش، کاملاً محدود است. SMP ها نه تنها دارای ویژگی‌های مکانیکی و حافظه شکل قابل توجهی هستند، بلکه سهولت ساخت آن‌ها باعث شده است کاندید خیلی از کاربردها شوند. در این تحقیق ضمن معرفی یک عضله مصنوعی ساخته شده مجهز به پلیمر حافظه‌دار، خواص مکانیکی آن اندازه‌گیری شده و به منظور ارزیابی در یک مکانیزم ساده گیرایش و رهایش آزمایش گردیده است. نتایج نشان داد که این تجهیز می‌تواند بارگذاری سیکلیک را اجرا کرده و شاخص نیرو به انرژی ۰/۲۵ را ارائه کند. همچنین در این نوع عضله بارگذاری سیکلیک نشان داد هیسترسیس وجود ندارد و این امر آن را مناسب کاربردهای رباتیک می‌کند. در آینده، امکان پذیری استفاده از این عملگر را در سایر کاربردهای رباتیک مانند جراحی رباتیک و چیننده‌های محصولات باغی بررسی خواهد شد.</p> | <p>مواد هوشمند، پلیمر حافظه دار، خواص ترمومکانیکی، نرخ کرنش، عضله مصنوعی، مکانیزم گیرایش-رهایش، رباتیک.</p> |
| | تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰ |
| | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۷ |
| | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷ |

۱- مقدمه

با گذشت زمان مواد هوشمند جای پای خود را در فناوری باز کرده‌اند و انواع کاربردها برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. مواد شکل حافظه‌دار نیز از این دسته مواد هستند که قابلیت بازیابی شکل اولیه خود را دارا هستند. معمولاً این مواد پس وارد شدن تنش مکانیکی یا حرارتی می‌توانند با اعمال گرما یا جریان الکتریسیته به شکل اولیه برگردند. علاوه بر آلیاژهای شکل حافظه‌دار، پلیمرهای حافظه‌دار (SMPs) نیز کاربرد رو به توسعه‌ای یافته‌اند. این مواد پلیمری هوشمندی هستند که توانایی بازگشت از حالت تغییر شکل یافته (شکل موقت) به شکل اولیه (دائمی) خود را دارند در زمانی که توسط یک محرک خارجی، مانند تغییر دما، القا یا برانگیخته شوند.

SMP ها می‌توانند دو یا گاهی اوقات سه شکل را حفظ کنند و انتقال بین آن‌ها اغلب با تغییر دما ایجاد می‌شود. علاوه بر تغییر دما، تغییر شکل SMP ها همچنین می‌تواند توسط یک میدان الکتریکی یا مغناطیسی [۳]، نور [۴] یا محلول ایجاد شود

[۵]. مانند بقیه پلیمرها به‌طور کلی، SMP ها بسته به مونومر^۱ تشکیل دهنده که SMP را تشکیل می‌دهند، طیف وسیعی از خواص از پایدار تا تجزیه‌پذیر، از نرم تا سخت و از الاستیک تا صلب را پوشش می‌دهند. SMP ها شامل مواد پلیمری ترموپلاستیک و ترموست^۲ (همبسته کووالانسی) هستند. در تحقیقات دریافته‌اند که SMP ها می‌توانند تا سه شکل مختلف را در حافظه ذخیره کنند [۶]. برخی از انواع تغییر شکل قابل بازیافت بالای ۸۰٪ را نشان داده‌اند [۷].

دو کمیت مهمی که برای توصیف اثرات حافظه شکل استفاده می‌شوند عبارت‌اند از نرخ بازیابی کرنش (Rr) و نرخ ثابت کرنش (Rf). نرخ بازیابی کرنش توانایی ماده برای به خاطر سپردن شکل دائمی آن را توصیف می‌کند، درحالی‌که نرخ ثابت کرنش توانایی قطعات سوئیچینگ برای رفع تغییر شکل مکانیکی را توصیف می‌کند [۸].

پلیمرهایی که اثر حافظه شکل را نشان می‌دهند، هم شکل قابل مشاهده، شکل فعلی (موقت) و هم یک شکل ذخیره شده (دائمی) دارند. هنگامی که ماده دوم با روش‌های مرسوم ساخته شد، مواد تشکیل‌دهنده پلیمر از طریق گرم کردن، تغییر شکل و درنهایت سرد شدن به شکل موقت دیگری تبدیل می‌شوند. پلیمر این شکل موقت را حفظ می‌کند تا زمانی که تغییر شکل به شکل دائمی توسط یک محرک خارجی از پیش تعیین شده فعال شود [۹]. راز پشت این مواد در ساختار شبکه مولکولی آن‌ها نهفته است که شامل حداقل دو فاز جداگانه است. فازی که بالاترین انتقال حرارتی را نشان می‌دهد، Tperm، دمایی است که برای ایجاد پیوندهای متقاطع فیزیکی مسئول شکل دائمی باید از آن فراتر رود. از سوی دیگر، بخش‌های سوئیچینگ، بخش‌هایی هستند که توانایی نرم شدن پس از یک دمای گذار معین (Ttrans) را دارند و مسئول شکل موقت هستند. در برخی موارد این دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) و برخی دیگر دمای ذوب (Tm) است. افزایش دما بیش از حد دمای گذار Ttrans (درحالی‌که زیر Tperm باقی می‌ماند) سوئیچینگ را با نرم کردن این بخش‌های سوئیچینگ فعال می‌کند و در نتیجه به مواد اجازه می‌دهد شکل اولیه (دائمی) خود را از سر بگیرند. در زیر دمای گذار Ttrans، انعطاف‌پذیری بخش‌ها حداقل تا حدی محدود است. اگر دمای ذوب Tm برای برنامه‌ریزی SMP انتخاب شود، تبلور ناشی از کرنش قطعه سوئیچینگ می‌تواند زمانی که بالای دمای ذوب Tm کشیده شود و متعاقباً در زیر Tm سرد شود، آغاز شود. این کریستال‌ها شبکه‌های کووالانسی را تشکیل می‌دهند که از اصلاح ساختار سیم‌پیچ معمولی پلیمر جلوگیری می‌کند [۱۰ و ۱۱]. نسبت قطعه سخت به نرم اغلب بین ۹۵/۵ و ۵/۹۵ است، اما در حالت ایده آل این نسبت بین ۸۰/۲۰ و ۲۰/۸۰ است [۱۲]. پلیمرهای حافظه‌دار به‌طور مؤثر ویسکوالاستیک هستند و مدل‌ها و روش‌های تجزیه و تحلیل زیادی وجود دارد.

۱-۱- ترمودینامیک اثر شکل-حافظه

در حالت آمورف^۳، زنجیره‌های پلیمری توزیع کاملاً تصادفی در ماتریس را در نظر می‌گیرند. W نشان‌دهنده احتمال یک ترکیب قوی سیم‌پیچی است که ترکیبی با حداکثر آنتروپی است و محتمل‌ترین حالت برای یک زنجیره پلیمری خطی آمورف است. این رابطه به‌صورت ریاضی با فرمول آنتروپی بولتزمن^۴ $S = k \ln W$ نشان داده می‌شود که در آن S آنتروپی و k ثابت بولتزمن است.

در گذار از حالت شیشه‌ای به حالت لاستیک-الاستیک با فعال‌سازی حرارتی، چرخش در اطراف پیوندهای قطعه به‌طور فزاینده‌ای بدون مانع می‌شود. این به زنجیره‌ها اجازه می‌دهد تا ترکیب‌های احتمالاً معادل انرژی دیگری را با مقدار کمی از هم‌گسیختگی در نظر بگیرند. در نتیجه، اکثر SMP ها سیم‌پیچ‌های تصادفی و فشرده را تشکیل می‌دهند زیرا این ترکیب از نظر آنتروپیک نسبت به یک ترکیب کشیده ترجیح داده می‌شود [۱].

پلیمرها در این حالت الاستیک با تعداد متوسط وزن مولکولی بیشتر از ۲۰۰۰۰ در جهت نیروی خارجی اعمال‌شده کشش می‌یابند. اگر نیرو برای مدت کوتاهی اعمال شود، درهم‌تنیدگی زنجیره‌های پلیمری با همسایه‌هایشان از حرکت زیاد زنجیره جلوگیری می‌کند و نمونه با حذف نیرو، شکل اولیه خود را بازیابی می‌کند. باین‌حال، اگر نیرو برای مدت طولانی‌تری اعمال

¹ Monomer

² Thermoset

³ Amorphous

⁴ Boltzmann

شود، یک فرآیند شل شدن صورت می‌گیرد که طی آن یک تغییر شکل پلاستیکی و غیرقابل برگشت نمونه به دلیل لغزش و ازهم گسیختگی زنجیره‌های پلیمری رخ می‌دهد [۱].

با توجه به اینکه استفاده از مواد هوشمند پلیمری در ربات -حسگرهای متحرکی مانند نانو اسلایم [۱۳] یا ربات‌های خزنده که برای چسبندگی به سطح بکار می‌روند [۱۴] و همچنین کاربردهایی در عملگرهای ضد ارتعاشی مانند دمپرهای مگنتورئولوژیک^۵ [۱۵-۱۶] توسعه پیدا کرده‌اند، بررسی امکان استفاده از پلیمر حافظه‌دار می‌تواند در زمینه‌ی رباتیک یاری‌گر مهندسان و طراحان باشد.

در این تحقیق، سعی شده است یک عملگر رباتیک با قابلیت گیرایش و رهایش اجسام بر پایه پلیمر حافظه‌دار ساخته و ارزیابی گردد تا بتواند برای مواردی مانند جراحی رباتیک لاپاراسکوپیک و یا چیننده میوه‌ها و محصولات باغی ارزیابی و استفاده گردد.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، برای ساخت عملگر رباتیک بر پایه پلیمر حافظه‌دار ابتدا باید خواص ترمومکانیکی آن استخراج گردد. بدین منظور یک عملگر بر پایه عضله پلیمری حافظه‌دار ساخته شد سپس اندازه‌گیری خواص مکانیکی آن مدنظر قرار گرفت. همچنین امکان‌سنجی استفاده از آن در ابزار گیرایش-رهایش مطالعه گردید. جهت ساخت عملگر بر پایه عضله مصنوعی ساخته‌شده از پلیمر حافظه‌دار از رشته‌های نایلون استفاده گردید چرا که در سایر مطالعات به علت ارزان بودن و داشتن خاصیت بازتابیدگی رشته‌های پیچیده شده این ساختار استفاده می‌گردد. در حقیقت رشته‌های پلیمر نایلون باید چندلایه تابیده شوند تا در اثر حرارت تغییر طول محسوس نشان داده و خاصیت بازگشت‌پذیری نشان دهند. شکل ۱ مراحل تحقیق را نشان می‌دهد. ابتدا الیاف نایلون تک‌رشته‌ای با نام تجاری (Shieldex PN# 260151011717) به صورت چهارلا تابیده شد تا یک رشته به دست آید. سپس رشته تابیده شده نیز به صورت دولا تابانده شد تا در نهایت به صورت شکل ۲ درآمد. برای اینکه تابش مورد نظر بازنگردد از دو بست فلزی در دو انتها استفاده شد. در مرحله تابیدن رشته نایلون تحت کشش بار یک وزنه ثابت ۵ کیلوگرمی قرار داشت و هم‌زمان تابیدن صورت گرفت زیرا اعمال نیروی وزنه یک پیش تنش ایجاد می‌کند که برای اعمال خاصیت بازگشت‌پذیری شکلی لازم است. بدین ترتیب یک کوپل کامل نایلونی به دست آمد. سپس سیم‌پیچ مسی با روکش لاک‌ی روی این کوپل نایلونی تابانده شد (شکل ۲). مجموعه ترکیبی یک عضله عملگر به طول ۸ سانتی‌متر را ایجاد کرد. شاخص فنر^۶ برای عملگر ساخته شده از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$C = D/d \quad (1)$$

که در آن D قطر کوپل ساخته‌شده و d قطر رشته نایلون بکار رفته است.

همچنین طبق رابطه ۲ می‌توان نیروی کشش را بر اساس تنش برشی وارد شده بر کوپل به دست آورد [۱۳].

$$F = \tau^2 / 2EI \quad (2)$$

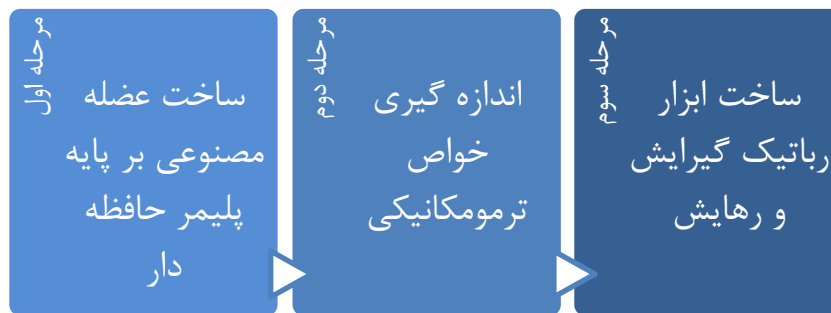
که در آن EI صلبیت و تنش برشی τ برحسب پاسکال است. تنش برشی نیز از رابطه معروف ۳ محاسبه می‌گردد:

$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad (3)$$

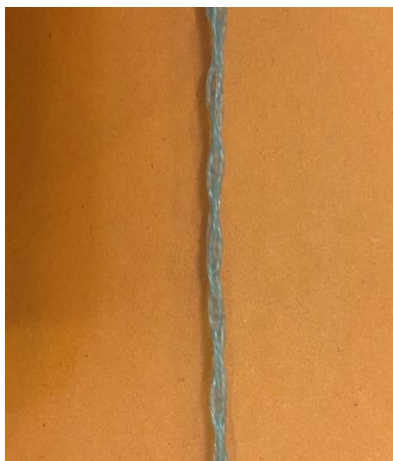
که T گشتاور وارده برحسب نیوتن متر برای تابیدن رشته پلیمر و J گشتاور دوم سطح مقطع قطبی است برحسب متر به توان ۴. از نظر تئوری نیروی عضله مصنوعی ساخته‌شده را می‌توان از رابطه ۲ به دست آورد اما در حالت تجربی پس از ساخته شدن عضله مصنوعی باید آن را به صورت تجربی اندازه‌گیری کرد تا بتوان در کاربرد عملی در بخش طراحی بکار برد.

⁵ Magnetorheological

⁶ Spring Index



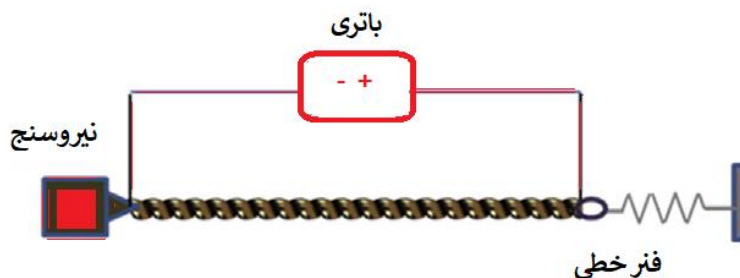
شکل ۱ مراحل تحقیق



شکل ۲ عضله ساخته شده از رشته پلیمری تابیده شده

۱-۲- نیرودهی حرارتی عضله نایلونی

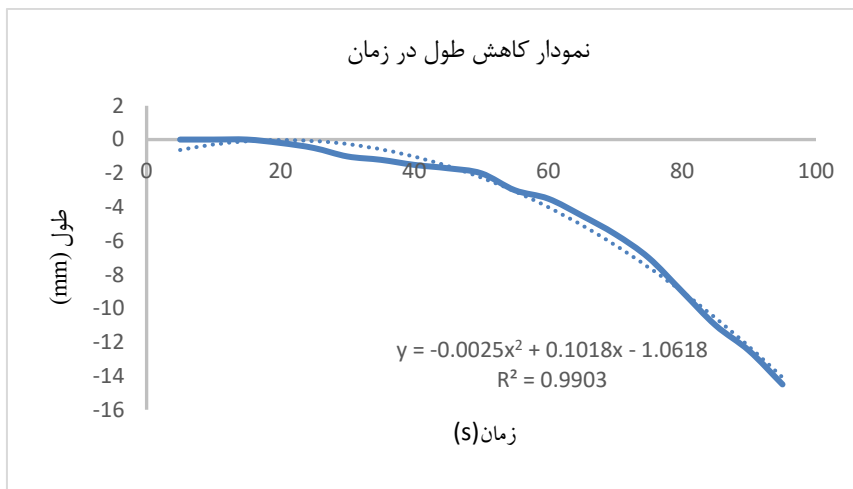
برای نیرودهی حرارتی عضله مصنوعی ساخته شده همانند شکل ۳، جریان الکتریسیته $3/3$ ولت به سیم پیچ وارد گردید تا باعث افزایش حرارت سطح کویل شود. این امر منتج به باز شدن تاب رشته‌های نایلون شده و طول عضله تغییر می‌کند. با قطع شدن جریان عضله با عمل بازتابیدن رشته‌ها و انبساط عملگر، مجموعه به طول سابق خود باز می‌گردد. برای به دست آوردن خواص مکانیکی عملگر، باید تغییرات طول عملگر نسبت به زمان ثبت گردد. از این رو تغییرات طول در واحد زمان ثبت شد. نمودار شکل ۴ تغییر طول در برابر حرارت ناشی از جریان الکتریکی را پس از گذشت زمان نشان می‌دهد. می‌توان دید که طول عضله تابعی از میزان حرارت دریافت شده از طریق سیم پیچ مسی بکار رفته است. برای اندازه‌گیری نیروی وارده، عملگر ساخته شده به یک نیروسنج با دقت یک دهم نیوتن متصل گردید تا با اعمال جریان الکتریکی بتوان نیرو را اندازه گرفت.



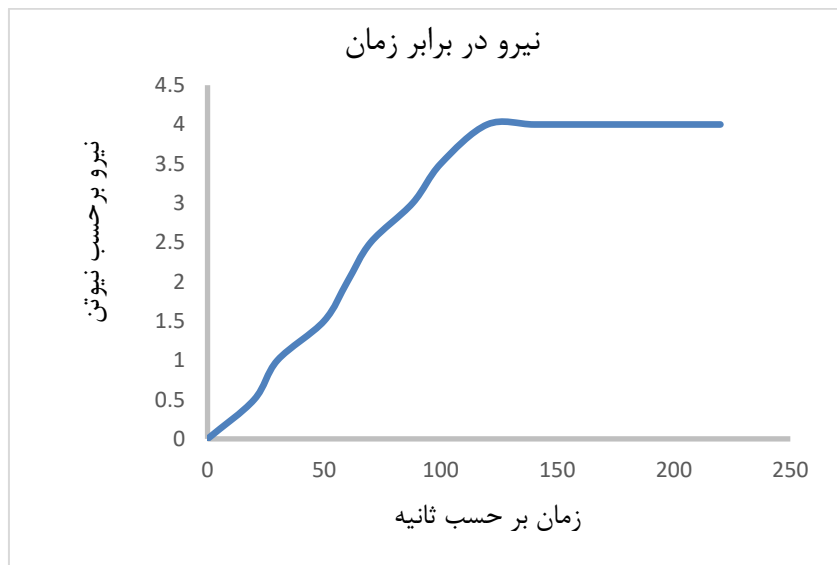
شکل ۳ اندازه‌گیری تنش کششی عملگر پلیمری حافظه‌دار توسط نیروسنج

۳- نتایج و بحث

در شکل ۵، تغییرات نیرو از طریق اعمال ولتاژ در مقابل گذشت زمان ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، پس از رسیدن نیرو به مقدار مشخصی، در این مورد ۴ نیوتن، عملگر از اعمال نیرو بازمی‌ماند و گویی اشباع رخ می‌دهد. این اشباع در حقیقت به ساختار داخلی رشته‌های تابیده‌شده برمی‌گردد زیرا تاب‌های ایجادشده در رشته باز شده‌اند و امکان انقباض مجموعه تابیده‌شده وجود ندارد. در هنگام اعمال برق یا گرما الیاف تابیده‌شده باز می‌گردند و قطر حلقه افزایش می‌یابد و این امر باعث کاهش طول مجموعه عضله بافته‌شده می‌گردد. در حالت اشباع شدن عملگر امکان ادامه تغییر نیرو از دست می‌رود تا زمانی که تنش حرارتی به نقطه اول برگردد. دانستن این خاصیت برای طراحی کنترلر ضروری است و از این‌رو برای همه نوع عملگر استخراج می‌گردد. همچنین معادله درجه دوم با دقت ۹۹/۰۳ درصد بر این منحنی با استفاده از رگرسیون برازش شد. با استفاده از این رابطه می‌توان تغییرات طول را بر اساس زمان محاسبه کرد.



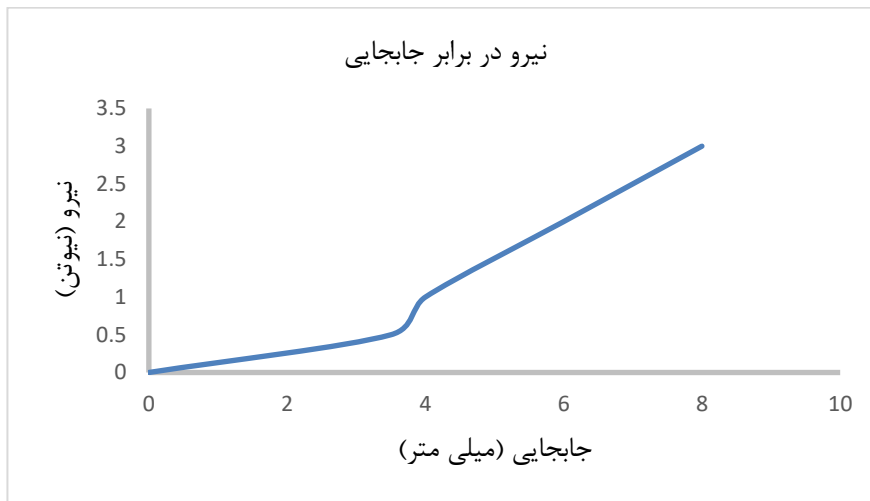
شکل ۴ نمودار تغییر طول رشته بافته‌شده با زمان از طریق اعمال ولتاژ و رابطه برازش شده



شکل ۵ نیروی اندازه‌گیری شده توسط نیروسنج در طی زمان اعمال ولتاژ

همچنین نمودار نیرو - جابجایی با استفاده از نیروسنج و نشانگر صفحه مدرج به دست آمد. نمودار شکل ۶ نشان‌دهنده تغییرات نیرو در برابر تغییر طول به دست‌آمده از این آزمایش است. همان‌طور که در نمودار به دست‌آمده مشاهده می‌گردد تغییرات نیرو نسبت به جابجایی شبه خطی است چنان‌که از تئوری بیان شده و رابطه ۳ انتظار می‌رفت. مقادیر به دست‌آمده با دیگر منابع

تفاوت داشت اما از نظر روند تغییر شبیه بود [۱۷-۱۹].



شکل ۶ نمودار نیرو-جابجایی در پلیمر حافظه‌دار تابیده‌شده

از طریق این نمودار می‌توان دریافت که ضریب تغییر طول بر نیرو برابر $2/6$ نیوتن بر میلی‌متر است. از طریق اندازه‌گیری سطح زیر این نمودار می‌توان میزان انرژی مصرف‌شده را به دست آورد که طبق رابطه زیر انتگرال نیرو، F ، در مسیر جابجایی dx است:

$$E = \int F dx \quad (۴)$$

طبق رابطه ۴ میزان انرژی مصرف‌شده یا کار انجام شده برابر ۱۲ نیوتن میلی‌متر محاسبه گردید. بنابراین شاخص نیروی دریافتی به انرژی مصرف‌شده $0/25$ به دست آمد. این شاخص هرچه بزرگ‌تر باشد راندمان بالاتری را پدیدار می‌کند درحالی‌که منابع دیگر کار ویژه را به‌عنوان شاخص ارزیابی معرفی کرده‌اند [۱۷]. برای بهینه‌سازی عضله مصنوعی ساخته‌شده باید بتوان شرایطی مهیا کرد تا اتلاف حرارتی کمتری ایجاد گردد اما میزان نیروی به‌دست‌آمده افزون گردد.

۳-۱- ساخت عملگر با گیرش و توانایی بارگذاری سیکلیک

به‌منظور ابداع یک عملگر گیرایش و رهایش، عضله مصنوعی ساخته‌شده تحت فشار یک فنر درون یک لوله مدور به قطر ۵ میلی‌متر قرار داده شد و انتهای دیگر آن به مکانیزم قیچی-گیره ساخته‌شده متصل گردید. بدین ترتیب با اعمال ولتاژ انقباض کوپل انجام می‌گیرد و عمل گیرایش در مکانیزم انبر رخ می‌دهد. شکل ۷ نمونه طراحی و ساخته‌شده این وسیله را نشان می‌دهد. هدف از ساخت این تجهیز امکان‌سنجی عمل گیرایش و رهایش در وسایلی مانند ربات‌های جراحی و یا چیننده‌های محصولات باغی است.

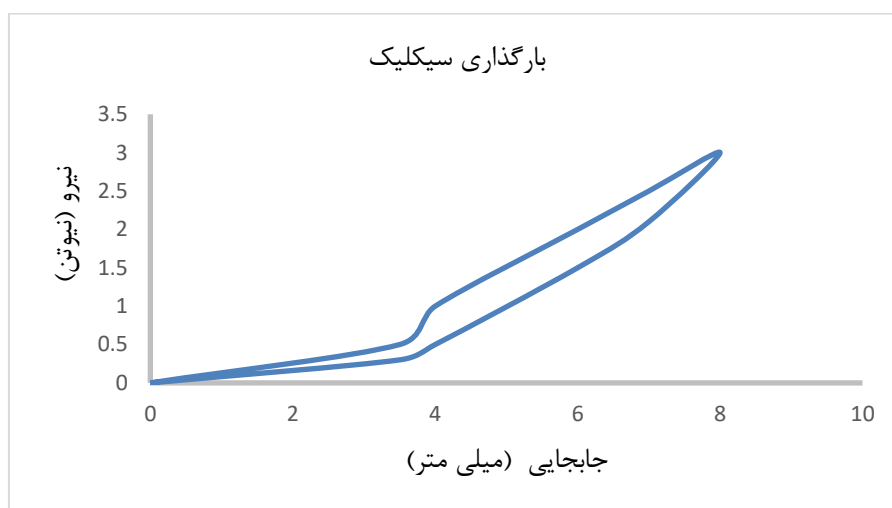


شکل ۷ گیره طراحی‌شده جهت گیرایش و رهایش قطعه

در خیلی از مواقع عضله مصنوعی باید بتواند به صورت متناوب نیرو را برای گیرنده نهایی ربات فراهم نماید. بدین منظور توان دهی به صورت ولتاژ با افزایش و کاهش در دامنه ۵ ولت تا ۹ ولت به مجموعه ساخته شده انجام شد (شکل ۸) و تغییر نیرو در نیروسنج ثبت گردید. این بارگذاری سیکلک در شکل ۹ نمایش داده شده است. مشاهده می شود که نرخ بازگشت طول سریع تر از مسیر بارگذاری است که نشان دهنده باز پس دهی سریع تر پلیمر گرما توسط این نوع پلیمر نسبت به گرماگیری آن است. شباهت روند نمودار بارگذاری با باربرداری کمک می کند تا عملگر عملکرد مناسبی داشته باشد. این بارگذاری سیکلک به صورت بازگشت به نقطه اول و بدون هیسترسیس در منابع دیگر آورده شده است [۲۰ و ۱۹].



شکل ۸ نمونه اولیه عملگر ساخته شده مجهز به پلیمر حافظه دار



شکل ۹ بارگذاری سیکلک در عضله مصنوعی پلیمر حافظه دار ساخته شده در این تحقیق

۴- نتیجه گیری

در این مقاله پلیمرهای حافظه دار بررسی شد چراکه آن‌ها ویژگی‌های استثنایی از خود نشان داده‌اند که منجر به استفاده آن‌ها به عنوان مواد پیشرفته برای کاربردهای فعلی و بالقوه شده است. با این حال، ویژگی‌های حافظه شکل سنتی به دلیل توانایی آن‌ها در بازیابی شکل اصلی تنها با استفاده از منبع گرمایش، کاملاً محدود است. SMPها نه تنها دارای ویژگی‌های مکانیکی و حافظه شکل قابل توجهی هستند، بلکه پس از قرار گرفتن در معرض هر منبع گرمایش الکتریکی یا حرارتی، ویژگی‌های اصلی نیز به دست می‌آوردند. پس از ساخت این عضله مصنوعی و بررسی خواص ترمومکانیکی بارگذاری آن، نتایج آزمایش‌ها نشان داد که این عملگر دارای حد اشباع نیرو بوده و رفتار شبه خطی دارد و با دریافت میزان مشخصی از انرژی می‌تواند اعمال نیرو بیشینه را داشته باشد که استخراج گردید. همچنین مشخص گردید این گونه عملگر بر اساس عضله مصنوعی سرعت پاسخ نسبتاً سریعی ندارد و مناسب عملکردهای سریع پاسخ نیست در حالی که اعمال نیروی مناسبی نسبت به انرژی مصرفی نشان داد. علاوه بر این، ما معتقدیم که بررسی ویژگی‌های پیشرفته این نوع مواد هنوز در حال توسعه طراحی و با ترکیبات جدید است. از این رو، امر حیاتی

واقعی را می‌توان در یافتن کارکردهای مفید قابل‌توجهی یافت. بدین منظور امکان‌پذیری بارگذاری سیکلیک در یک عملگر گیرایش و رهایش ساده بررسی شد و نشان داد می‌تواند مکانیزم گیره مانند را برای مقاصد رباتیک کشاورزی و یا جراحی رباتیک انجام دهد هر چند نرخ تغییر شکل در بارگذاری و بار برداری برابر نیست و زمان پاسخ مانند پیزوالکتریک و فلزات حافظه‌دار بالا به دست نیامد.

Authorship Contribution Statement

Dr. Mohammad Gohari



Biography: Mohammad Gohari holds a PhD in Mechanical Engineering from UTM University, Malaysia. He completed his first postdoctoral fellowship in the field of artificial intelligence in rotor fault detection using vibration signals at UTM. He has been a faculty member of Arak University of Technology since 2013 and is working in the field of vibration control. He is currently working as a Senior Researcher at PRISMA LAB Robotics Laboratory, Federico II University, Italy, in the field of robotics application in medical engineering. One of his research topics is the application of robotics in Rehabilitation and Surgical Robots with a vibration control approach.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Project administration, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Dr. Mona Tahmasebi



Biography: Mona Tahmasebi got her PhD in Mechanical Engineering from UTM University, Malaysia. She is faculty member of Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. She is currently working in Design of Machines and automation.

Contribution Statement: Validation, Formal analysis, Investigation, Software, review & editing.

Hamdan Mozafari



Biography: Hamdan Mozafari is graduated from Arak University of Technology in Mechanical Engineering. Now he is working in an industrial center.

Contribution Statement: Conceptualization, Resources, Investigation, Software.

۴- مراجع

- [1] Lendlein A, Kelch S. Shape-memory polymers. *Angewandte Chemie International Edition*. 2002;41(12):2034-2057.
- [2] Horie K, Barón M, Fox RB, He J, Hess M, Kahovec J, Kitayama T, Kubisa P, Maréchal E, Mormann W, Stepto RFT, Tabak D, Vohlidal J, Wilks ES, Work WJ. Definitions of terms relating to reactions of polymers and to functional polymeric materials (IUPAC Recommendations 2003). *Pure and Applied Chemistry*. 2004;76(4):889-906.
- [3] Mohr R, Kratz K, Weigel T, Lucka-Gabor M, Moneke M, Lendlein A. Initiation of shape-memory effect by inductive heating of magnetic nanoparticles in thermoplastic polymers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2006;103(10):3540-3545.

- [4] Lendlein A, Jiang H, Jünger O, Langer R. Light-induced shape-memory polymers. *Nature*. 2005;434(7035):879-882.
- [5] Leng J, Lv H, Liu Y, Du S. Comment on "Water-driven programmable polyurethane shape memory polymer: Demonstration and mechanism". *Applied Physics Letters*. 2008;92(20):206105.
- [6] Toensmeier PA. Shape memory polymers reshape product design. *Plastics Engineering*. 2009;April 2.
- [7] Voit W, Ware T, Dasari RR, Smith P, Danz L, Simon D, Barlow S, Marder SR, Gall K. High-strain shape-memory polymers. *Advanced Functional Materials*. 2010;20(1):162-171.
- [8] Kim BK, Lee SY, Xu M. Polyurethanes having shape memory effects. *Polymer*. 1996;37(26):5781-5787.
- [9] Bellin I, Kelch S, Langer R, Lendlein A. Polymeric triple-shape materials. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2006;103(48):18043-18047.
- [10] Pretsch T. Triple-shape properties of a thermos responsive polyester urethane. *Smart Materials and Structures*. 2010;19(1):015006.
- [11] Bothe M, Mya KY, Lin EMJ, Yeo CC, Lu X, He C, Pretsch T. Triple-shape properties of star-shaped POSS-poly caprolactone polyurethane networks. *Soft Matter*. 2012;8(4):965-972.
- [12] Shanmugasundaram OL. Shape memory polymers & their applications. *The Indian Textile Journal*. 2009.
- [13] Gehari M, Tahmasbi M, Pak A, Farahadian A. Sakhte nemone nano slime magnetisi va karbordhaye an. In Persian, *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 1402;3(3):398-412.
- [14] Pourmirzaaghalangroodi I, Modaberi Far M, Sheikh Eslami MR, Hemmati M. Barrasi tajrobi chasbandegi microstructurehaye chasbande masnooi harami marmoolaki az jense Silgard 184 mored estefade dar gripperha. In Persian, *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 1400;1(1):43-55.
- [15] Tahmasbi M, Gehari M, Mobarak Abadi M. Tarahi controlgar faal niru systeme taaliq sandali ranande majhaz shode be miragar hooshmand magnetorheological. In Persian, *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 1400;1(2):175-200.
- [16] Khakzad Esfehelan F, Ali Nejad Z, Rezaei Shirinabadi A, Mahdavian A. Polymerhaye hooshmand: 1- moarefi va karbord. In Persian, *Basparesh Journal*. 1391;2(3):10-17.
- [17] Wu C, Zheng W. A modeling of twisted and coiled polymer artificial muscles based on elastic rod theory. *Actuators*. 2020;9(2):25.
- [18] Dicker MP, Baker AB, Iredale RJ, Naficy S, Bond IP, Faul CF, Weaver PM. Light-triggered soft artificial muscles: Molecular-level amplification of actuation control signals. *Scientific Reports*. 2017;7(1):9197.
- [19] Kotak P, Maxson S, Weerakkody T, Cichella V, Lamuta C. Octopus-inspired muscular hydrostats powered by twisted and coiled artificial muscles. *Soft Robotics*. 2024;11(3):432-443.
- [20] Haines CS, Li N, Spinks GM, Aliev AE, Di J, Baughman RH. New twist on artificial muscles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016;113(42):11709-11716.