

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(8) (2021) 1075-1078 DOI: 10.22060/mej.2021.16641.6405

# Study of the Motion Behavior of Soft Fiber Reinforced Actuators Based on Fiber Angle

A. Fathian, G. Nikaeen, A. Darmohammadi, H. Mirzanejad, M. M. Agheli Haji Abadi\*

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

**ABSTRACT:** The increasing tendency to soft robots in various applications justifies the reason for studying the behavior of such actuators. The present study investigates the effect of fiber angle on the motion behavior of elastomeric fiber-reinforced actuators with two circular and semicircular sections. Unlike previous researches, this study takes into account the elastomer material used in actuator construction. Furthermore, unlike previous researches in which phase angle variation was studied just in linear actuators, phase angle variation in linear-twisting actuators is also considered. The simulation results showed that the phase change angle is 54.2° in silicone linear actuator and 30° in linear-twisting silicon actuator. The results also showed that the maximum bending in the semi-cylindrical bending actuators occurs at a 90-degree angle of twisting fibers. To verify this behavior, experiments were done. Silicone linear actuators were made with four different fiber angles including 30, 54.2, 54.3, 75, and 85 degrees. Moreover, Linear-twisting actuators were made with two different fiber angles including 30, 55, 65, and 85 degrees was made. All these actuators were evaluated after actuation. The experimental results confirmed the simulation results with a maximum calculated error of 14%.

#### **Review History:**

Received: Jun. 25, 2019 Revised: Oct. 10, 2019 Accepted: Dec. 09, 2019 Available Online: May. 08, 2021

Keywords:

Soft robot

Soft actuator

Soft fiber-reinforced actuator

#### **1. INTRODUCTION**

Soft robotics is a branch of robotics dealing with modeling, designing, and fabricating robots which have soft materials and soft actuators in their structure. Among all kinds of soft robots, soft pneumatic fiber-reinforced actuators are very attractive for scientists as they are lightweight, easy fabricated, inexpensive, and also inherently safe. All these characteristics, make these soft actuators applicable in the rehabilitation field. Pneumatic artificial muscles are a particular type of fiber-reinforced elastomeric actuator that the fiber angle is less than 54.7. The artificial muscles were first employed in 1958 by Gaylord [1]. Colony et al. [2] showed that by changing the angle of the thread, a wide range of motions could be achieved and also showed that the actuator has an extension at angles higher than 54.7 degrees and contraction at angles less than 54.7 degrees. Polygrinus et al. [3] investigated the bending actuator of semi-circular cross-section fiber-reinforced and a mathematical model for signifying the relationship between the air pressure and the curvature.

Unlike previous studies in which only the phase shift angle of linear actuators was examined, this study also examines the phase shift angle of linear-torsional actuators. For this purpose, the effect of fiber twist angle on the motion of linear, linear-torsional, and flexural silicon actuators was investigated. Here, first, the motion behavior of the actuator was investigated with the help of simulation, then the accuracy of the simulation results was measured with the help of experimental evaluations.

#### 2. METHODOLOGY

This study was conducted in two main parts including simulation and experiment. In order to simulate actuators' behavior during torsion, linear and linear-torsional motions, each of these actuators was first modeled in Abacus. Their body was considered as cylindrical (for linear and lineartorsional actuators) and semi-cylindrical (for bending actuators) channels and fiber modeled with scripting python in Abacus. For instance, Fig. 1 depicts the linear motion cylindrical actuator model.

The type of analysis must be nonlinear and quasi-static. But, the excitation speed is low, so the analysis was considered static. For simulation, the body geometry was performed with Table 1 dimensions.

The fiber angle was varied from 0 to 90 degrees. The actuator behavior was then examined. Torsional linear actuators are wrapped only clockwise or counter-clockwise. As shown in the figure. In this type of actuator, the fiber angle was also changed from 0-90 degrees. In the bending actuator, the surface of the actuator cross-section is semicircular, and

\*Corresponding author's email: agheli@modares.ac.ir





Fig. 1. Linear motion cylindrical actuator model

an inextensible layer is placed on the part of its surface. To simulation verifying, several samples were made. The molds were designed with CATIA software. And then it was built with a 3D printer. Silicone with shore 25 was used for molding. And the ratio of silicon to hardener was 5 to 1. To degassing the silicon-hardener mixture, it was placed in a vacuum chamber and then placed in the oven to dry. The presence of a little bubble in the actuator body will cause the actuator to fail when pressurized. After wrapping fiber, the actuator was covered with a second layer of silicon.

#### **3. RESULTS AND DISCUSSION**

In this paper, three types of the actuator are investigated. In the first type, the cross-sectional area of the actuators is circular. The fibers are wrapped bilaterally (clockwise and counterclockwise) around them. The actuators whose fiber angle is higher than 54.2 have an extension, and their fiber angles lower than 54.2 have a contraction. Angle 54.2 is the angle of change of actuator motion. At this angle, the actuator will have no contraction and extension. This angle

Outer radius	Outer radius	Length actuator
20mm	16mm	60mm

is obtained in theory 54.7. The difference between the angles in the simulation and the theory is 0.9%. The simulation and experimental results can be seen in Fig. 2.

Generally, the non-threaded actuator will increase the length and diameter as the air enters the channel. A cylindrical actuator is twisted at a 0-degree angle. By stimulating the actuator, the fiber force will be higher than the pressure force inside the channel. The direction of the fiber force is the opposite of increasing the length of the actuator. As the fiber angle increases, the fiber force will not be in line with the actuator length, so the amount of force that the fiber exerts in the opposite direction will decrease. By decreasing the fiber force, at a specific angle, the fiber force and air pressure will be equal, which the actuator will have no longitudinal change.

In the second type, the actuator is wrapped only in one direction (clockwise or counterclockwise). Hence it will also have a twisting motion. In this type, in addition to the twisting motion, there is also a change in length. But the angle that the actuator has no change in length is less than that of the first type.

The third type is the semicircular cross-section fiberrained force actuator. This actuator will bend as the air enters the actuator channel. The higher the fiber angle, the higher the bending of motion (Fig. 3). The maximum bending motion occurs at the angle of fiber 90 degrees. It is difficult to achieve 90 degrees in the fabrication process so that the bending actuator is fabricated and tested at 88 degrees of fiber angles as shown in Fig. 4. On the one hand, several samples with different fiber angles were fabricated and tested to verify the simulation results. The repeatability of the test was also repeated five times. The results of the simulation show that as the cross-section changes (the angle of the fibers and the air pressure is kept constant), the closer to the semicircle it becomes, the higher the bending angle is achieved.



Fig. 2. Comparison of practical results and simulation results for linear actuator at 100 kPa inlet pressure.



Fig. 3. Influence of the fiber angle on bending motion at constant pressure (70kPa)

#### 4. CONCLUSION

Fiber-reinforced soft actuators are very popular due to their unique features such as lightweight, easy fabrication, inherent safety, and low price. These actuators have a high potential for application in a variety of fields such as surgery, rehabilitation, transportation. Therefore, the behavioral study of such actuators seems necessary. In this paper, three types of the actuator are investigated. The linear actuators that their fiber angle is higher than 54.2 have an extension, and their fiber angles lower than 54.2 have a contraction. In lineartorsional mode, the actuators have extension and contraction but the angle that the actuator has no change in length is less



Fig. 4. Semi-cylinder bending actuator with 88-degree fiber angle a) Before applying air pressure. b) After applying 100 kPa air pressure. c) the experimental result and verification

than that of the first type. In a bending actuator, the maximum bending motion is at the angle of fiber 90 degrees.

#### REFERENCES

- [1] R.H. Gaylord, Fluid actuated motor system and stroking device, in, Google Patents, 1958.
- [2] F. Connolly, P. Polygerinos, C.J. Walsh, K. Bertoldi, Mechanical programming of soft actuators by varying fiber angle, Soft Robotics, 2(1) (2015) 26-32.
- [3] P. Polygerinos, Z. Wang, J.T. Overvelde, K.C. Galloway, R.J. Wood, K. Bertoldi, C.J. Walsh, Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators, IEEE Transactions on Robotics, 31(3) (2015) 778-789.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Fathian, G. Nikaeen, A. Darmohammadi, H. Mirzanejad, M. M. Agheli Haji Abadi, Study of the Motion Behavior of Soft Fiber Reinforced Actuators Based on Fiber Angle, Amirkabir. Mech Eng., 53(8) (2021) 1075-1078.

DOI: 10.22060/mej.2021.16641.6405



This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیر کبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۸، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۵۶۵ تا ۴۵۸۰ DOI: 10.22060/mej.2021.16641.6405

رفتارشناسی حرکتی محرکهای نرم بادی تقویت شده با الیاف بر اساس زاویهی پیچش الیاف

اشکان فتحیان، گلبرگ نیکآیین، انیس دارمحمدی، حسین میرزانژاد، محمد مهدی عاقلی حاجی آبادی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

خلاصه: محر کهای الاستومری تقویت شده با الیاف با کمک نیروی سیال تحریک می شوند و با توجه به زاویه ی پیچش الیاف به دور بدنه حرکتهای متفاوتی از خود نشان می دهند. افزایش توجه روزافزون به رباتهای نرم در کاربردهای مختلف، علت مطالعه روی رفتار این گونه محر کها را به خوبی توجیه می کند. پژوهش پیش رو به بررسی تأثیر زاویه ی پیچش الیاف بر رفتار حرکتی محرک نرم الاستومری تقویت شده با الیاف با دو مقطع دایره و نیم دایره می پردازد. نتایج شبیه سازی نشان داد که زاویه ی تغییر فاز در محرک خطی سیلیکونی ۲/۸۴ درجه و در محرک سیلیکونی خطی-پیچش الیاف ۹۰ درجه است. این نتایج همچنین نشان داد که در محرکهای خمشی نیم استوانه ای بیشینه خمش در زاویه ی پیچش الیاف ۹۰ درجه اتفاق می افتد. ارزیابی های تجربی جهت کسب اطمینان از نتایج شبیه سازی صورت گرفت. به این منظور محرکهای خطی با چهار زاویه ی پیچش الیاف ۳۰، ۲/۸۲، ۵۲/۵۵، ۷۵ و ۵۸ درجه، محرکهای خطی-پیچشی با زوایای پیچش الیاف ۳۰ مدی ۵۵، ۶۵ و ۵۵ درجه پادساعت گرد و ۵۵ درجه ساعت گرد و محرک خمشی با زاویه پیچش الیاف ۸۸ درجه ساخته شد و رفتار آنها پس از تحریک ارزیابی شد. نتایج تحربی با حداکثر خطای ۱۴ درصد درستی نتایج شبیه سازی را تائید کرد.

تاریخچه داوری: دریافت:۲۰۹۸/۰۴/۰۴ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۱۸ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸ ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸

کلمات کلیدی: رباتیک نرم محرک نرم محرک نرم تقویت شده با الیاف

#### ۱– مقدمه

رباتهای نرم رباتهایی هستند که در ساختار خود از مواد و محرکهای نرم بهره میبرند. محرکهای نرم انواع متفاوتی دارند که در میان آنها محرکهای الاستومری سیالی به علت ویژگیهای منحصربهفردی که دارند، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفتهاند. این گونه محرکها با کمک فشار سیال تحریک میشوند. ایمنی ذاتی، وزن سبک، روند ساخت نسبتاً آسان و قیمت ارزان محرکهای سیالی سبب شده تا از آنها در زمینههای مختلف از جمله گرفتن و حمل اجسام، توان بخشی و پزشکی استفاده شود.

محرکهای الاستومری تقویت شده با الیاف دستهای از محرکهای سیالی هستند که در بدنهی الاستومری خود پیچشهای منظمی از الیاف دارند. الیاف موجود در ساختار بدنه نه تنها از تورم \*نویسنده عهدهدار مکاتبات: agheli@modares.ac.ir

بیش از حد محرک پس از تحریک جلوگیری میکند بلکه با توجه به نحوهی پیچش، امکان انجام حرکتهای مختلف را برای محرک فراهم میآورد.

ماهیچههای مصنوعی پنوماتیکی نوع خاصی از محرکهای الاستومری تقویت شده با الیاف هستند. در این محرکها زاویهی پیچش الیاف باید کوچکتر از ۵۴/۷ درجه باشد تا به این ترتیب بر اثر اعمال فشار هوا انقباض صورت گیرد و محرک رفتاری شبیه به ماهیچههای طبیعی را از خود نشان دهد. ماهیچههای مصنوعی برای اولین بار در سال ۱۹۵۸ توسط گیلورد<sup>۱</sup> [۱] استفاده شد. گیلورد با کمک این نوع محرک اجسام سنگین را از زمین بلند کرد. در سال

1Gaylord 2Chou 3Hannaford

> حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) ۲۰ هزی از مرابع از مرابع از گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

با الیاف پرداختند و آنها را با ماهیچههای واقعی مقایسه کردند و نشان دادند که ویژگیهای مکانیکی-استاتیکی این نوع محرک بسیار شبیه به ماهیچههای بیولوژیکی است. آنها همچنین نشان دادند درحالی که ویژگیهای دینامیکی این نوع از محرکهای نرم محدودتر از ماهیچه است، شدت تنش بالاتر میباشد. از مهمترین ویژگیهای ماهیچهی مصنوعی میتوان به وزن سبک آنها اشاره کرد. به دلیل آنكه اصلى ترين جزء سازندهي آنها غشاي الاستومري ميباشد اين محركها بسیار سبكوزن هستند. این ویژگی سبب شده تا از این گونه محرکها در ساخت و توسعه ی وسایل توان بخشی استفاده شود. به طور نمونه اسکلت خارجی نرم ساخته شده توسط فهام و همکاران [۳] مثالی قابل توجه از استفادهی محرکهای ماهیچهی مصنوعی جهت توانبخشی مچ دست میباشد. در این کار حرکات کشش، انحراف راديال و انحراف اولنار توسط اين محركها انجام گرفت. کانگ ٔ و همکاران [۴] با استفاده از جرم و حجم سیال ورودی، یک مدل دینامیکی برای محرکهای انقباضی تقویت شده با الیاف ارائه کردند. آنها نشان دادند که این مدل می تواند در سیستمهای کنترلی بازوهای مصنوعی که با این نوع محرک فعال می شوند، به کار رود.

پیل<sup>۵</sup> و جنسن [۵] پژوهشی در زمینهی الاستومرهای نرم تقویت شده با الیاف انجام دادند و تأثیر زاویهی پیچش الیاف را تنها در چند زاویه روی رفتار این نوع محرکها بررسی کردند. کونولی<sup>2</sup> و همکاران [۶] مطالعهی جامعتری در این زمینه انجام دادند و تأثیر زاویهی پیچش الیاف را روی محرکهای تقویت شده با الیاف بررسی کردند و نشان دادند که به سادگی با تغییر زاویهی پیچش الیاف میتوان به گسترهی بزرگی از حرکت محرک شامل حرکتهای محوری، شعاعی و پیچشی دست یافت. آنها نشان دادند که محرکهای خطی انقباض شده و محرکهای با پیچش الیاف بیش از ۲۰۹۸ درجه پس از انقباض شده و محرکهای با پیچش الیاف بیش از ۲۰۹۸ درجه پس از محریک دچار افزایش طول میشوند. با آنها این حال در این بررسی جنس الاستومر را مدنظر قرار ندادند. آنها همچنین با چیدمان سری خطوط لوله طراحی کردند.

- 1 Fahaam
- 2 Radial deviation
- 3 Ulnar deviation 4Kang
- 5Peel
- 6 Connolly

توندو<sup>۷</sup> و لوپز<sup>۸</sup> [۷] با بررسی نیروی محرکهای تقویت شده با الیاف نشان دادند که اگرچه این محرکها دقت محرکهای سخت را ندارند اما به واسطهی نیروی بالایی که ایجاد میکنند میتوانند برای کشیدن اجسام بسیار کارا باشند.

ماسر و همکاران [۸] سه محرک نرم استوانه ای تقویت شده با الیاف را به صورت موازی در کنار هم قرار دادند تا یک ساختار مثلثی ایجاد شود. ساختار ایجاد شده قادر به انجام حرکات انتقالی، خمشی و پیچشی بود. آنها در این پژوهش رابطه میان تغییر شکل ساختار ارائه شده و پارامترهای هندسی محرکها را به دست آوردند. گالووی ( و همکاران [۹] با استفاده از یوششهای انعطاف پذیر و غیرقابل کشش به عنوان قیدهای فیزیکی، حرکتهای خمشی متفاوتی را برای محرکهای نرم خمشی نیم استوانه ای ایجاد کردند و شعاع خمش این محرکها را بهوسیلهی این قیدها تغییر دادند. آنها همچنین با استفاده از دو محرک خمشی یک گیرهی دوانگشتی تهیه کردند و یوشش روی محرکها را به گونهای جایگذاری کردند که هنگام بلند کردن یک جسم با هندسهی مکعب مستطیل، انگشتها به خوبی با هندسهی خارجی جسم منطبق شوند. پلیجرینوس (و همکاران [۱۰] محرک نرم خمشی تقویت شده با الیاف با مقطع نیمدایره را بررسی کردند و یک مدل ریاضی برای بیان ارتباط میان فشار هوای ورودی به کانال محرک و زاویهی خمش ارائه کردند. آنها همچنین در این پژوهش تأثیر طول و ضخامت محرک را بر میزان خمش آن بررسی کردند و نشان دادند که تحت فشار هوای ورودی یکسان، هرچه طول محرک بیشتر و ضخامت آن کمتر باشد، خمش بیشتری ایجاد می شود. آن ها با کمک نتایج به دست آمده از این پژوهش و با استفاده از محرکهای تقویت شده با الیاف به طراحی و ساخت یک دستکش توان بخش نرم مخصوص بازتوانی انگشتان دست پرداختند [۱۱]. تمامی این مطالعات با صرف نظر کردن از جنس محرک انجام شد. مطالعهی پیش رو در راستای توسعهی مطالعات فوق، به رفتارشناسی محرک نرم بادی تقویت شده با الیاف با در نظر گرفتن جنس آن می پردازد. همچنین برخلاف مطالعات مشابه پیشین که در آنها تنها به بررسی زاویهی تغییر فاز محرکهای خطی پرداخته می شد،

7Tondu 8Lopez 9Moser 10 Galloway 11 <sup>Polygerinos</sup>



شکل ۱. مدل محرک استوانهای سیلیکونی با حرکت خطی Fig. 1. Silicon cylindrical actuator model with linear motion

این مطالعه به بررسی زاویهی تغییر فاز محرکهای خطی-پیچشی نیز می پردازد. به این منظور تأثیر زاویهی پیچش الیاف در حرکت محرکهای سیلیکونی خطی، خطی-پیچشی و خمشی بررسی شد. با توجه به مطالعهی دقیق پیشینهی پژوهش توسط نویسندگان این مقاله، چنین مطالعهی جامعی در مطالعات پیشین به چشم نمی خورد. در اینجا ابتدا رفتار حرکتی محرکها با کمک شبیه سازی بررسی شد سپس صحت نتایج شبیه سازی با کمک ارزیابی های تجربی سنجیده شد.

همانطور که گفته شد این پژوهش در دو بخش شبیهسازی رفتار و سپس ارزیابی تجربی انجام گرفت. بهمنظور شبیهسازی رفتار حرکتی محرکهای خطی، خطی-پیچشی و خمشی ابتدا هر یک از این محرکها در نرمافزار آباکوس مدلسازی شدند. مدل بدنهی محرکها به صورت کانالهای استوانه و نیم استوانه در نظر گرفته شد. در اینجا الیاف موجود در بدنهی محرکها با کدنویسی در نرمافزار پایتون مدلسازی شد. در نهایت پس از مونتاژ الیاف و بدنه در محیط آباکوس، مدل کاملی از محرکهای مورد نظر به دست آمد. بدنهی محرکها از جنس لاستیک سیلیکون در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه لاستیک سیلیکون مادهای با رفتار غیرخطی میباشد و مقدار نسبت کش آمدگی<sup>۱</sup> آن در کاربرد مورد نظر کمتر از ۲/۱ است، برای مدلسازی رفتار آن از مدل نئوهوکین با  $P_{1,1} = -1$ برای مدلسازی رفتار آن از مدل نئوهوکین با میباشد و مقدار محاسبات بدست آورد. الیاف نیز از جنس الیاف شیشه با مدول یانگ محاسبات بدست آورد. الیاف نیز از جنس الیاف شیشه با مدول یانگ

الیاف مقاومت خوبی در مقابل کشش از خود نشان میدهد و به این جهت برای کاربرد مورد نظر بسیار مناسب است. در مرحلهی مشبندی ابعاد مش به گونهای انتخاب شد که نتایج همگرا شود. نوع مش نیز به دلیل تراکمناپذیری مواد هایپرالاستیک به صورت هیبرید در نظر گرفته شد. نوع تحلیل محرک به صورت غیرخطی و شبه استاتیکی است که با کم در نظر گرفتن سرعت تغییرات میتوان آن را به صورت استاتیک تحلیل کرد. همزمان نمونههای ساخته شدهای از این سه نوع محرک با بدنهی سیلیکونی و الیافی از جنس الیاف شیشه سنجش صحت نتایج شبیه سازی قرار گیرد. در ادامه در بخش ۲–۱ روند مدل سازی سه نوع محرک یاد شده شرح داده شده است. بخش روند مدل سازی سه نوع محرک یاد شده شرح داده شده است. بخش تجهیزات لازم برای آزمایش و طریقه ین صب آن هاست.

## ۲-۴- شبیه سازی محرکها ۲-۱-۱- محرک استوانه ای با حرکت خطی

چنانچه بدنهی سیلیکونی محرک استوانهای توسط الیاف در جهتهای ساعتگرد و پادساعتگرد پیچیده شود، محرک در راستای محور طولی خود حرکت خطی خواهد داشت. به منظور شبیه سازی چنین حرکتی، یک محرک استوانه ای با قطر خارجی ۲۰، قطر داخلی ۱۶ و طول ۶۰ میلی متر در نظر گرفته شد. به این ترتیب شرط جدار نازک بودن محرک که در تئوری مشاهده می شود رعایت شد. برقرار بودن این شرط امکان مقایسه ینتایج شبیه سازی را با نتایج تئوری فراهم می آورد. از طرفی انتخاب ضخامت کمتر از ۲ میلی متر سبب

<sup>1</sup>Stretch ratio



شکل ۲. مدل محرک استوانهای سیلیکونی با حرکت خطی-پیچشی Fig. 2. Silicon cylindrical actuator model with linear-torsional motion



شکل ۳. مدل محرک نیم استوانه ای سیلیکونی با حرکت خمشی Fig. 3. Silicon bending actuator with a semi-circular cross-section

دشواری ساخت محرک می شود. طول ۶۰ میلی متر و قطر داخلی ۱۶ میلی متر نیز ابعاد مناسبی بودند که پس از چندین بار انجام عملیات ساخت محرک بدست آمد تا محرک ساخته شده دچار خمیدگی های نامطلوب نشود و نتایج حاصل از آزمایش تجربی را که باید با نتایج حاصل از شبیه سازی مقایسه شود، دستخوش تغییر نکند. شکل ۱ مدل محرک خطی مورد نظر را نشان می دهد. در شبیه سازی حرکت این محرک، زاویه ی پیچش الیاف به صورت متغیر از ۰ تا ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. این زاویه که در شکل ۱ نشان داده شده است، زاویه ای نظر گرفته شد. این زاویه که در شکل ۱ نشان داده شده است، زاویه ای ست که راست که راستای الیاف با محور ک می سازد.

#### ۲-۱-۲- محرک استوانهای با حرکت خطی-پیچشی

چنانچه بدنهی سیلیکونی محرک توسط الیاف به صورت یک طرفه تنها در یک جهت ساعت گرد یا پادساعت گرد پیچیده شود محرک حول محور طولی خود حرکت دورانی خواهد داشت. ابعاد این محرک

مشابه ابعاد محرک با حرکت خطی در نظر گرفته شد. در شبیه سازی حرکت این محرک زاویه ی پیچش الیاف به دور بدنه به صورت متغیر از ۰ تا ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. مدل این محرک در شکل ۲ نشان داده شده است.

## ۲-۱-۳- محرک با حرکت خمشی

در این محرکها برای ایجاد حرکت خمشی یک لایهی انعطاف پذیر و غیرقابل کشش به بخشی از بدنهی محرک چسبانده می شود. با ورود هوا به درون کانال الاستومری، محرک تمایل به افزایش حجم خواهد داشت. حضور لایهی منعطف و غیرقابل کشش سبب می شود که سطحی از بدنه که در تماس با لایه است مقید به این لایه شود و افزایش طول نداشته باشد. همزمان سطح دیگر بدنه که با لایه در تماس نیست با افزایش فشار هوا، افزایش طول پیدا می کند. این اختلاف طول بین دو سطح محرک سبب ایجاد حرکت



شکل ۴. اجزای تشکیلدهندهی قالب محرک استوانهای خطی-پیچشی Fig. 4. Components of linear-torsional actuator mold with circular cross-section

## خمشی میشود.

در اینجا ابتدا شبیهسازی قطاعهای مختلف استوانه برای این دسته از محرکها انجام شد. سپس مقطع با بیشترین خمش یعنی مقطع نیماستوانه برای ارزیابی انتخاب شد و تأثیر زاویهی پیچش الیاف در حرکت محرک خمشی با این مقطع بررسی شد. بنابراین در شبیهسازی زاویهی پیچش الیاف به صورت متغیر از ۰ تا ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. ابعاد محرک نیماستوانهای مدل سازی شده مشابه ابعاد دو محرک قبلی با مقطع دایره است. شکل ۳ مدل این محرک را نشان میدهد.

## ۲-۲- ساخت و آمادهسازی محرکها

طراحی قالبها در نرمافزار کتیا انجام شد. تمامی اجزای قالبها و قطعات مورد نیاز دیگر با کمک پرینتر سهبعدیBLACKBOT از جنس پلیلاکتیک اسید ساخته شدند. در ادامه طریقهی ساخت محرکها و آمادهسازی آنها جهت انجام ارزیابیهای تجربی شرح داده شده است.

#### ۲-۲-۱ ساخت محرکهای استوانهای

قالبهای مخصوص محرکهای استوانهای (شامل محرکهای خطی و خطی-پیچشی) به صورت چهار تکه شامل بدنه، دیواره، ماهیچه و درپوش طراحی و ساخته شد. شکل ۴ اجزای تشکیل دهندهی قالب مخصوص محرک استوانهای خطی-پیچشی را نشان میدهد.

شیارهای برجسته در بدنه و دیوارهی قالب مسیر حرکت پیچش الیاف را مشخص می کند.

همان طور که گفته شد لاستیک سیلیکون به عنوان مادهی سازندهی محرکها در نظر گرفته شد. به این ترتیب سیلیکون بهداشتی ۳۰۴۰ با سفتی ۲۵ برای ساخت بدنهی محرکها از شرکت شیمی افسون خریداری شد. سیلیکون و سفتکنندهی آن با نسبت ۵ به ۱ با یکدیگر ترکیب شدند. دلیل انتخاب چنین نسبتی این بود که سیلیکون در مرحلهی حبابزدایی که یک مرحلهی مدتدار است سفت نشود. مرحله ی حباب دایی مرحله ای است که در آن حبابهای موجود در سیلیکون تحت فشار خلأ خارج می شوند و یک مرحله ی مهم و حساس در ساخت محرک به شمار میرود. در این مرحله لازم است سیلیکون به طور کامل حبابزدایی شود تا پس از ریختن آن در قالب و پخت آن، محرک قالب گیری شده عاری از کوچک ترین حبابی باشد. دلیل اهمیت حبابزدایی سیلیکون این است که وجود حتی یک حباب کوچک میتواند سبب ترکیدگی محرک پس از تحریک آن شود. حبابزدایی نامناسب همچنین می تواند سبب عدم پر شدن کامل قالب و ناقص ماندن قطعهی قالب گیری شود. در مواردی نیز وجود حباب سبب خروج ماهیچهی قالب از مرکز و در نهایت غیریکنواخت شدن ضخامت دیوارهی محرک می شود. این عیوب در شکل ۵ نشان داده شده است. به این ترتیب ترکیب سیلیکون و سفت کننده ی آن پیش از آنکه قالب محرک را پر کند به منظور حباب:دایی در محفظهی خلاً قرار گرفت.



شکل ۵. عیوب قالبگیری قطعه سیلیکونی در اثر حبابزدایی نامناسب سیلیکون. الف) تشکیل حباب در دیوارهی محرک، ب) پر نشدن کامل قالب و ناقص ماندن قطعه قالبگیری شده و پ) خروج ماهیچه از مرکز و غیریکنواخت شدن ضخامت دیوارهی محرک

Fig. 5. Defects of silicon part due to unsuitable degassing a) The bubble in the actuator wallb) Mold not filled with silicone and hardener c) Non-uniform wall thickness.



شکل ۶:. اجزای تشکیلدهندهی قالب محرک خمشی نیم استوانهای Fig. 6. Components of bending actuator mold with semi-circular cross-section

پس از حبابزدایی کامل، قالب از سیلیکون پر شد و در کوره قرار گرفت تا روند پخت به سرعت انجام شود. به این منظور قالب به مدت ۱ ساعت در دمای ۷۵ درجهی سانتی گراد در کوره حرارت دید. دماهای بالاتر از این مقدار میتوانست قالب را دچار تغییر شکل کند. پس از پخت سیلیکون و بیرون آوردن قالب از کوره، بدنهی اصلی محرک از قالب خارج شد. سپس نوبت به مرحلهی پیچش الیاف به دور بدنهی محرک رسید. الیاف شیشه به علت قطر کم و مقاومت خوب آن در برابر تغییر طول برای پیچش به دور محرک انتخاب شد. پس از پیچیدن الیاف در مسیرهای مخصوص به دور محرک، به منظور

بدنهی محرک اضافه و سپس این لایه پخته شد. سپس یک انتهای باز محرک با سیلیکون و با کمک قالب مخصوص آببندی شد. انتهای دیگر که محل ورود لولهی تأمینکنندهی هوا بود، پس از ورود لوله به داخل آن، با کمک یک بست کمربندی پلاستیکی آببندی شد.

## ۲-۲-۲ ساخت محرک نیماستوانه

قالب مخصوص محرک خمشی نیم استوانه به صورت سه تکه شامل بدنه، ماهیچه و درپوش طراحی و ساخته شد. شکل ۶ اجزای تشکیل دهنده ی این محرک را نشان می دهد.

مراحل ساخت محرك نيم استوانه اى مشابه محرك استوانه اى



شکل ۷. محرک خمشی نیم استوانه پس از ساخت Fig. 7. Fabricated bending actuator



شکل ۸. پایهی ساخته شده جهت ارزیابی محرکها Fig. 8. Fabricated stand to hold stable the actuator during test

است و تنها تفاوت این است که هنگام ساخت محرک نیم استوانه، پیش از پیچش الیاف لازم است لایهی انعطاف پذیر و غیرقابل کشش در محل مخصوص خود قرار گیرد و سپس الیاف به دور آن پیچیده شود. شکل ۲ محرک خمشی را پس از ساخت در دو نما از روبهرو و از بالا نشان می دهد.

## ۲-۲-۳ تجهیزات آزمایش و طریقهی نصب آنها

برای ارزیابی هر محرک میبایست سمتی از آن که به لولهی هوا اتصال داشت ثابت میشد. بدین منظور یک پایه که در آن یک ماهیچهی استوانهای با قطری به اندازهی قطر داخلی محرک تعبیه شده بود جهت سوار کردن قسمت ابتدایی محرک در نظر گرفته شد تا هنگام ثابت

کردن قسمت ابتدایی بهوسیلهی بست کمربندی، محرک از آن ناحیه دچار خمش و چروکیدگی نشود. همچنین برای موقعیتدهی و ثابت کردن ماهیچه، از دو عدد پین استفاده شد. در شکل ۸ پایهی ساخته شده توسط پرینتر به همراه پینها نشان داده شده است.

جهت تحریک محرکها از یک مدار شامل یک شیر روشن/ خاموش، رله و میکروکنترلر آردوینو استفاده شد. جریان هوا به داخل محرکها با فشردن یک دکمه برقرار می شد. به منظور پایش تغییر شکل محرک یک علامت قرمز رنگ روی محرک نشانه گذاری شد. سپس با کمک پردازش تصویر در نرمافزار لبویو آن علامت ردیابی شد و مقدار جابه جایی آن ثبت گردید. شکل ۹ نحوه یقرار گیری محرک را در دستگاه آزمایش نشان می دهد.



شکل ۹. نحوهی قرارگیری محرک در دستگاه آزمایش Fig. 9. Deployment of the actuator in the test setup



شکل ۱۰. رفتار محرک خطی سیلیکونی در زوایای مختلف پیچش الیاف الف) محرک با زاویهی پیچش الیاف بیش از ۵۴/۲ درجه، ب) محرک با زاویهی پیچش الیاف کمتر از ۵۴/۲ درجه و پ) محرک با زاویهی پیچش الیاف ۲۰/۲ درجه

Fig. 10. Silicon linear actuator behavior at different fiber angles a) fiber angle higher than 54.2 b) fiber angle lower than 54.2 c) The fiber angle is equal to 54.2.

خطی سیلیکونی یک زاویه یمرزی است. به طوری که پیچش الیاف با زاویه یکمتر از ۵۴/۲ درجه سبب کاهش طول محرک پس از تحریک می شود و زاویه ی پیچش بیش از ۵۴/۲ درجه سبب افزایش طول محرک می شود. محرک در زاویه ی پیچش الیاف ۵۴/۲ درجه نه افزایش طول و نه کاهش طول دارد. شکل ۱۰ تفاوت رفتار محرک سیلیکونی خطی را در سه زاویه ی متفاوت پیچش الیاف (بیشتر از ۳ - نتایج
 ۳-۱- نتایج شبیه سازی
 ۳-۱-۱- محرک استوانه ای با حرکت خطی
 در این پژوهش زاویه ی پیچش الیاف به دور محرک، زاویه ای در
 نظر گرفته شد که راستای الیاف با محور طولی محرک ایجاد می کند.
 نتایج نشان داد که زاویه ییچش ۵۴/۲ درجه برای محرکهای



شکل ۱۱. نمودار تغییر طول محرک سیلیکونی خطی برحسب زاویهی پیچش الیاف تحت سه فشار متفاوت بر اساس نتایج شبیهسازی Fig. 11. Diagram of changes in actuator length by varying its fiber angle at three different pressures based on simulation result

میکند. در اینجا این نیرو نیروی عقبکشی نامیده شد. همچنین از شکل ۱۱ استنباط میشود که محرک با زاویهی الیاف بین ۰ تا ۵۴/۲ درجه تغییر طول کمتری نسبت به محرک با زاویهی الیاف بین ۵۴/۲ تا ۹۰ درجه دارد.

## ۳-۱-۲- محرک استوانهای با حرکت خطی-پیچشی

نتایج شبیهسازی نشان داد که اختلاف رفتاری محرک خطی-پیچشی و محرک خطی به حرکت پیچشی محدود نمی شود بلکه در محرک سیلیکونی خطی-پیچشی تغییر رفتار محرک از فاز کاهش ۵۴/۲ درجه، کمتر از ۵۴/۲ درجه و ۵۴/۲ درجه) نشان میدهد. لازم به ذکر است که در بحث تئوری مربوط به محرک خطی جدار نازک بدون در نظر گرفتن جنس محرک، زاویهی ۵۴/۷ درجه به عنوان زاویهی تغییر فاز اعلام شده است [۲] که مقدار این زاویه با زاویهی بدست آمده از نتایج شبیهسازی ۹/۰ درصد تفاوت دارد. با توجه به اینکه با افزایش فشار داخلی، بدنهی سیلیکونی تقویت نشده با الیاف دچار افزایش طول و افزایش قطر میشود، میتوان نتیجه گیری کرد که الیاف پیچیده شده به دور بدنهی محرک با زاویهی پیچش



شکل ۱۲. نتایج شبیهسازی محرک سیلیکونی خطی-پیچشی تحت سه فشار متفاوت الف) نمودار تغییر طول محرک برحسب زاویهی پیچش الیاف و ب) نمودار مربوط به میزان پیچش محرک برحسب زاویهی پیچش الیاف

Fig. 12. Simulation results for linear-torsional actuator at three different pressures a) diagram length change based on fiber angle b) Diagram of the value of twisting based on the fiber angle.

نشان میدهد. همانطور که در شکل ۱۲-الف مشخص است، در زاویهی مرزی ۳۰ درجه تغییر طول محرک صفر است. همچنین شکل ۱۲-ب نشان میدهد که بیشترین میزان پیچش در زاویهی پیچش ۶۰ درجهی الیاف رخ میدهد. نتایج همچنین نشان داد که محرک خطی-پیچشی با پیچش ساعتگرد الیاف به دور آن، حرکت پیچشی ساعتگرد و محرک خطی-پیچشی با پیچش پادساعتگرد الیاف به دور آن حرکت پیچشی پادساعتگرد دارد.

#### ۳-۱-۳ محرک نیم استوانه ای با حرکت خمشی

نتایج نشان داد که در شبیهسازی حرکت محرکهای خمشی که مقطع آنها به صورت قطاعی از دایره میباشد در یک زاویهی معین طول به فاز افزایش طول در زاویه ی۳۰ درجه اتفاق میافتد. با توجه به اینکه در محرک خطی از سریهای دوگانه یالیاف و در محرک خطی-پیچشی از سریهای یگانه یالیاف جهت مهار دیواره استفاده میشود، نیروی وارد شده از طرف الیاف به بدنه یمحرک خطی پیچشی کمتر از نیروی وارده از طرف الیاف به بدنه یمحرک خطی است. همین مسئله سبب میشود که نیروی عقب کشی الیاف در محرک خطی-پیچشی در زاویه یپچش الیاف بیش از ۳۰ درجه مغلوب نیروی پیش کشندگی بدنه شود و افزایش طول محرک رخ دهد.

شکل ۱۲ مقادیر تغییر طول و پیچش را برای محرک سیلیکونی خطی-پیچشی تحت سه فشار متفاوت ۳۰، ۵۰ و ۷۰ کیلوپاسکال



شکل ۱۳. تأثیر زاویهی پیچش الیاف بر میزان خمش محرک سیلیکونی خمشی تحت فشار هوای ورودی ۷۰ کیلوپاسکال Fig. 13. Influence of the fiber angle on bending motion at constant pressure (70kPa)



شکل ۱۴. محرک سیلیکونی خمشی نیماستوانه با زاویهی پیچش الیاف ۸۸ درجه الف) پیش از تحریک و ب) پس از تحریک تحت فشار هوای ورودی ۱۰۰ کیلوپاسکال

Fig. 14. Semi-cylinder bending actuator with 88-degree fiber angle a) Before applying air pressure. b) After applying 100 kPa air pressure

شکل ۱۴ محرک سیلیکونی نیم استوانه را با زاویه یپیچش الیاف ۸۸ درجه (تقریباً ۹۰ درجه) پیش و پس از تحریک نشان می دهد. در اینجا فشار ورودی به داخل کانال محرک برابر ۱۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد. همان گونه که از شکل برمی آید، محرک تحت چنین فشاری تقریباً به میزان ۳۶۰ درجه خم می شود.

## ۲-۳- بررسی صحت نتایج شبیهسازی از طریق ارزیابیهای تجربی

با توجه به نتایج بهدستآمده از شبیهسازی برای ارزیابی حرکت محرکهای خطی، پنج محرک سیلیکونی با زاویهی پیچش الیاف ۳۰، ۵۴/۲، ۵۴/۳، ۷۵ و ۸۵ درجه، برای ارزیابی محرکهای خطی-پیچشی، پنج محرک سیلیکونی با زاویهی پیچش الیاف ۳۰، ۵۵، ۶۹ بیچش الیاف و تحت یک فشار ثابت، هر چه زاویهی قطاع به ۱۸۰ درجه نزدیک تر باشد، میزان خمش محرک بیشتر است. با توجه به اینکه محرک با زاویه یقطاع ۱۸۰ درجه (نیم استوانه) بیشترین خمش را در بین دیگر قطاعها دارد، برای بررسی تأثیر زاویه ی پیچش الیاف بر میزان خمش، محرک خمشی به صورت نیم استوانه در نظر گرفته شد. شکل ۱۳ محرک های نیم استوانه ای سیلیکونی با زاویه ی پیچش الیاف ۷۰، ۷۵، ۸۰، ۵۵ و ۹۰ درجه را پس از تحریک تحت فشار ۷۰ کیلوپاسکال نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص است در فشار یکسان میزان خمش محرک با زاویه ی پیچش الیاف بزر گتر، بیشتر است. بیشترین خمش در محرک با زاویه ی پیچش الیاف ۹۰ درجه رخ می دهد.



شکل ۱۵. نمودارهای مربوط به ارزیابی تجربی محرکهای سیلیکونی خطی تحت فشار هوای ورودی ۱۰۰ کیلوپاسکال Fig. 15. Practical evaluation diagram of linear actuators at 100 kPa inlet pressure



شکل ۱۶. مقایسهی نتایج شبیهسازی و ارزیابی تجربی برای محرک خطی تحت فشار هوای ورودی ۱۰۰ کیلوپاسکال. خط ممتد نشاندهندهی نتایج شبیهسازی و نقاط مجزا نشاندهندهی نتایج تجربی است.

Fig. 16: Comparison of practical results and simulation results for linear actuator at 100 kPa inlet pressure. The continuous line represents the simulation results and the points represent the practical results

۳-۲-۱- ارزیابی تجربی محرکهای استوانهای با حرکت خطی در شکل ۱۵ نتایج ارزیابی تجربی محرکهای خطی با زوایای پیچش الیاف ۳۰، ۵۴/۲۵، ۵۴/۳ و ۷۵ درجه نشان داده شده است. همان طور که در نمودارها مشخص است مطابق با آنچه از نتایج شبیه سازی حاصل شد محرک با زاویه ی پیچش الیاف ۳۰ درجه دچار و ۸۵ درجهی پادساعت گرد و ۴۵ درجهی ساعت گرد و برای ارزیابی محرکهای خمشی، یک محرک سیلیکونی با زاویهی پیچش الیاف ۸۸ درجه ساخته شد. سپس تغییر طول، پیچش و خمش محرکها پس از تحریک اندازه گیری شد. هر اندازه گیری ۵ مرتبه تکرار شد تا از تکرارپذیری نتایج اطمینان حاصل شود.



شکل ۱۷. ارزیابی تجربی حرکت محرک سیلیکونی خطی-پیچشی با زاویهی پیچش الیاف ۴۵ درجهی ساعتگرد الف) محرک در حالت غیرفعال در دو نمای از کنار و از روبهرو و ب) محرک پس از تحریک تحت فشار هوای ورودی ۵۰ کیلوپاسکال در دو نمای از کنار و از روبهرو Fig. 17. Experimental evaluation of linear-torsional silicon actuator with 45 degree fiber angle (cw) a) different actuator views before applying pressure b) Different actuator views after applying pressure (50 kPa)

> کاهش طول می شود و محرکهای با زاویه ی پیچش الیاف ۵۴/۳ و ۷۵ درجه دچار افزایش طول می شوند. بیشترین میزان تغییر طول برای محرک خطی با زاویه ی پیچش الیاف ۲/۹۲ درجه معادل ۱۳/۰ میلی متر بدست آمد که این میزان تغییر طول به دلیل وجود خطا در حین آزمایش قابل چشم پوشی است و می توان گفت که مطابق با نتایج شبیه سازی، محرک خطی سیلیکونی در زاویه ی پیچش الیاف ۱۵/۲ درجه تغییر طولی از خود نشان نمی دهد. لازم به ذکر است که نتیجه ی ارزیابی تجربی برای زاویه ی پیچش الیاف ۸۵ درجه در شکل ۱۵ نشان داده نشده است. در این زاویه نیز افزایش طول مشاهده شد.

> حدود تطابق نتایج شبیه سازی و ارزیابی تجربی برای محرکهای خطی تحت فشار هوای ورودی ۱۰۰ کیلوپاسکال در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

## ۳-۲-۲- ارزیابی تجربی محرکهای استوانهای با حرکت خطی-پیچشی

ارزیابی تجربی محرکهای خطی پیچشی برای زوایای پیچش الیاف ۴۵ درجهی ساعتگرد، ۳۰، ۵۵، ۶۵ و ۸۵ درجهی پادساعتگرد انجام شد. شکل ۱۷–الف محرک سیلیکونی خطی-پیچشی با زاویهی پیچش الیاف ۴۵ درجهی ساعتگرد را در دو نما در حالت غیرفعال و شکل ۱۷–ب

تغییر طول و پیچش همان محرک را در همان دو نما پس از تحریک نشان میدهد. این محرک تحت فشار هوای ورودی ۵۰ کیلوپاسکال، ۲/۵ میلیمتر افزایش طول و ۷۹ درجه پیچش ساعتگرد از خود نشان داد.

شکل ۱۸-الف محرک سیلیکونی خطی-پیچشی با زاویه یپیچش الیاف ۳۰ درجه یپادساعت گرد را در دو نما در حالت غیرفعال و شکل ۱۸-ب تغییر طول و پیچش همان محرک را در همان دو نما پس از تحریک نشان میدهد. این محرک پس از تحریک تحت فشار هوای ورودی ۵۰ کیلوپاسکال، ۲/۲ میلیمتر افزایش طول و ۶۳ درجه پیچش پادساعت گرد از خود نشان داد.

در شکل ۱۹ نتایج شبیهسازی و تجربی برای محرک خطی-پیچشی تحت فشار هوای ورودی ۵۰ کیلوپاسکال باهم مقایسه شدهاند. شکل ۱۹–الف نشاندهندهی میزان جابجایی سر محرک و شکل ۱۹–ب نشاندهندهی میزان پیچش محرک است.

## ۳-۲-۳ ارزیابی تجربی محرکهای نیماستوانهای با حرکت خمشی

شکل ۲۰ محرک سیلیکونی خمشی نیماستوانهای با زاویهی پیچش الیاف ۸۸ درجه را نشان میدهد که همانند نتیجهی شبیهسازی در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال ۳۶۰ درجه خم شده است.



شکل ۱۸. ارزیابی تجربی حرکت محرک سیلیکونی خطی-پیچشی با زاویهی پیچش الیاف ۳۰ درجهی پادساعتگرد الف) محرک در حالت غیرفعال در دو نمای از کنار و از روبهرو و ب) محرک پس از تحریک تحت فشار هوای ورودی ۵۰ کیلوپاسکال در دو نمای از کنار و از روبهرو

Fig. 18. Experimental evaluation of linear-torsional silicon actuator with 30 degree fiber angle (cw) a) different actuator views before applying pressure b) Different actuator views after applying pressure (50 kPa)



شکل ۱۹. مقایسهی نتایج شبیهسازی و ارزیابی تجربی برای محرک خطی- پیچشی تحت فشار هوای ورودی ۵۰ کیلوپاسکال. الف) نمودار جابجایی سر محرک برحسب زاویهی پیچش الیاف به دور بدنهی محرک و ب) نمودار زاویهی پیچش محرک برحسب زاویهی پیچش الیاف به دور بدنهی محرک. خط ممتد نشاندهندهی نتایج شبیهسازی و نقاط مجزا نشاندهندهی نتایج تجربی است.

Fig. 19. Comparison of practical results and simulation results for linear-tortional actuator a) The amount of displacement of the actuator head in terms of the fiber angle b) The amount of twisting of the actuator in terms of the fiber angle. The continuous line represents the simulation results and the points represent the practical results.



شکل ۲۰. ارزیابی تجربی حرکت محرک سیلیکونی خمشی نی<sub>م</sub>استوانه با زاویهی پیچش الیاف ۸۸ درجه تحت فشار هوای ورودی ۱۰۰ کیلوپاسکال Fig. 20. Experimental evaluation of bending actuator with 88 ° fiber angle at 100 kPa input air pressure

#### ۴- نتیجهگیری

امروزه محر کهای نرم تقویت شده با الیاف به واسطه ی ویژگیهای منحصربهفردی که دارند از جمله وزن کم، سادگی ساخت، ایمنی ذاتی و قیمت ارزان بسیار مورد توجه قرار گرفتهاند. این محرکها یتانسیل زیادی جهت کاربرد در زمینههای مختلف همچون جراحی، توان بخشی، حمل و انتقال اجسام و غیره دارند. ازاین و مطالعه ی ,فتاری این گونه محرکها امری ضروری به نظر میرسد. در این پژوهش تأثیر زاویهی پیچش الیاف بر رفتار حرکتی محرک نرم بادی تقویت شده با الیاف با دو مقطع دایره و نیمدایره با در نظر گرفتن جنس سیلیکونی محرک بررسی شد. این بررسی در دو مرحلهی شبیهسازی و ارزیابی تجربی انجام گرفت. به طوریکه ابتدا به شبیهسازی محرکهای نرم پرداخته شد و سپس به کمک آزمونهای تجربی از صحت نتایج شبیهسازی اطمینان حاصل شد. با توجه به نتایج شبیهسازی و آزمونهای تجربی مشخص شد که محرک خطی سیلیکونی با زاویهی پیچش الیاف کمتر از ۵۴/۲ درجه پس از تحریک دچار کاهش طول می شود و چنانچه زاویهی پیچش الیاف به دور بدنهی محرک بیش از ۵۴/۲ درجه باشد محرک پس از تحریک دچار افزایش طول خواهد شد. علاوه بر آن نشان داده شد که محرک خطی-پیچشی سیلیکونی با زاویه یپچش الیاف کمتر از ۳۰ درجه پس از تحریک دچار کاهش طول می شود و چنانچه زاویه ی پیچش الیاف به دور بدنهی سیلیکونی محرک بیش از ۳۰ درجه باشد محرک پس از تحریک دچار افزایش طول خواهد شد. همچنین نشان داده شد که این محرکها در صورتیکه دارای پیچش الیاف ساعت گرد باشند، حرکت پیچشی ساعت گرد و در صورتی که دارای پیچش الیاف پادساعت گرد باشند، حرکت پیچشی پادساعت گرد دارند. با توجه به این نتایج میتوان گفت زاویهی تغییر فاز در محرکهای

خطی متفاوت از محرکهای خطی-پیچشی میباشد. همچنین نشان داده شد که در یک فشار معین، محرکهای خمشی با زاویهی پیچش الیاف بزرگتر میزان خمش بیشتری دارند و بیشینه خمش در زاویهی پیچش الیاف ۹۰ درجه رخ میدهد. نتایج ارائه شده در این مطالعه با مقایسهی خروجی شبیهسازی المان محدود و آزمونهای عملی با بیشینه خطای ۱۴ درصد صحه گذاری شد.

## تشكر و قدرداني

کلیهی هزینههای مربوط به این پژوهش از طرف صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور برای کد زیر طرح ۹۵۸۴۳۵۰۲ تأمین شده است.

#### مراجع

- R.H. Gaylord, Fluid actuated motor system and stroking device, in, Google Patents, 1958.
- [2] C.-P. Chou, B. Hannaford, Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles, IEEE Transactions on robotics and automation, 102-90 (1996) (1)12.
- [3] H. Al-Fahaam, S. Davis, S. Nefti-Meziani, Wrist rehabilitation exoskeleton robot based on pneumatic soft actuators, in: 2016 International Conference for Students on Applied Engineering (ICSAE), IEEE, 2016, pp. -491 496.
- [4] B.-S. Kang, C.S. Kothera, B.K. Woods, N.M. Wereley, Dynamic modeling of Mckibben pneumatic artificial muscles for antagonistic actuation, in: Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International

International Conference on, IEEE, 2012, pp. 4269-4264.

- [9] K.C. Galloway, P. Polygerinos, C.J. Walsh, R.J. Wood, Mechanically programmable bend radius for fiberreinforced soft actuators, in: Advanced Robotics (ICAR), 16 2013th International Conference on, IEEE, 2013, pp. 6-1.
- [10] P. Polygerinos, Z. Wang, J.T. Overvelde, K.C. Galloway, R.J. Wood, K. Bertoldi, C.J. Walsh, Modeling of soft fiberreinforced bending actuators, IEEE Transactions on Robotics, 789-778 (2015) (3)31.
- [11] P. Polygerinos, Z. Wang, K.C. Galloway, R.J. Wood, C.J.
  Walsh, Soft robotic glove for combined assistance and athome rehabilitation, Robotics and Autonomous Systems, 143-135 (2015) 73.

Conference on, IEEE, 2009, pp. 187-182.

- [5] L.D. Peel, D. Jensen, Fabrication and mechanics of fiber-reinforced elastomers, Brigham Young University. Department of Mechanical Engineering, 1998.
- [6] F. Connolly, P. Polygerinos, C.J. Walsh, K. Bertoldi, Mechanical programming of soft actuators by varying fiber angle, Soft Robotics, 32-26 (2015) (1)2.
- [7] B. Tondu, P. Lopez, Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators, IEEE control systems, 38-15 (2000) (2)20.
- [8] J. Bishop-Moser, G. Krishnan, C. Kim, S. Kota, Design of soft robotic actuators using fluid-filled fiber-reinforced elastomeric enclosures in parallel combinations, in: Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ

چگونه به اين مقاله ارجاع دهيم A. Fathian, G. Nikaeen, A. Darmohammadi, H. Mirzanejad, M. M. Agheli Haji Abadi, Study of the Motion Behavior of Soft Fiber Reinforced Actuators Based on Fiber Angle, Amirkabir. Mech Eng., 53(8) (2021) 4565-4580. DOI: 10.22060/mej.2021.16641.6405

