

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

اشکان فتحیان^۱، گلبرگ نیک آیین^۲، انیس دارمحمدی^۳، حسین میرزائزاد^۴، محمد مهدی عاقلی حاجی آبادی^{۵*}

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، پست الکترونیکی، afathian@modares.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، g.nikaein@modares.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، پست الکترونیکی، a.darmohamadi@modares.ac.ir

۴- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، پست الکترونیکی، hossein.mirza@modares.ac.ir

۵- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، agheli@modares.ac.ir

چکیده

محرک‌های الاستومری تقویت شده با الیاف با کمک نیروی سیال تحریک می‌شوند و با توجه به زاویه‌ی پیچش الیاف به دور بدنه حرکت‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند. افزایش توجه روزافزون به ربات‌های نرم در کاربردهای مختلف، علت مطالعه روی رفتار این گونه محرک‌ها را به خوبی توجیه می‌کند. پژوهش پیش رو به بررسی تأثیر زاویه‌ی پیچش الیاف بر رفتار حرکتی محرک نرم الاستومری تقویت شده با الیاف با دو مقطع دایره و نیم‌دایره می‌پردازد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که زاویه‌ی تغییر فاز در محرک خطی سیلیکونی ۵۴/۲ درجه و در محرک سیلیکونی خطی-پیچشی ۳۰ درجه است. این نتایج همچنین نشان داد که در محرک‌های خمشی نیم‌استوانه‌ای بیشینه خمش در زاویه‌ی پیچش الیاف ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد. ارزیابی‌های تجربی جهت کسب اطمینان از نتایج شبیه‌سازی صورت گرفت. به این منظور محرک‌های خطی با چهار زاویه‌ی پیچش الیاف ۳۰، ۵۴/۲، ۷۵ و ۸۵ درجه، محرک‌های خطی-پیچشی با زوایای پیچش الیاف ۳۰، ۵۵، ۶۵ و ۸۵ درجه پادساعت‌گرد و ۴۵ درجه ساعت‌گرد و محرک خمشی با زاویه پیچش الیاف ۸۸ درجه ساخته شد و رفتار آن‌ها پس از تحریک ارزیابی شد. نتایج تجربی با حداکثر خطای ۱۴ درصد درستی نتایج شبیه‌سازی را تأیید کرد.

کلمات کلیدی

رباتیک نرم، محرک نرم، محرک نرم تقویت شده با الیاف

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

ماهیه‌های مصنوعی پنوماتیکی نوع خاصی از محرک‌های الاستومری تقویت شده با الیاف هستند. در این محرک‌ها زاویه‌ی پیچش الیاف باید کوچک‌تر از $54/7$ درجه باشد تا به این ترتیب بر اثر اعمال فشار هوا انقباض صورت گیرد و محرک رفتاری شبیه به ماهیه‌های طبیعی را از خود نشان دهد. ماهیه‌های مصنوعی برای اولین بار در سال ۱۹۵۸ توسط گیلورد^۱ استفاده شد [۱]. گیلورد با کمک این نوع محرک اجسام سنگین را از زمین بلند کرد. در سال ۱۹۹۶ چو^۲ و هانفورد^۳ به بررسی محرک‌های انقباضی تقویت شده با الیاف پرداختند و آن‌ها را با ماهیه‌های واقعی مقایسه کردند و نشان دادند که ویژگی‌های مکانیکی-استاتیکی این نوع محرک بسیار شبیه به ماهیه‌های بیولوژیکی است [۲]. آن‌ها همچنین نشان دادند که ویژگی‌های دینامیکی این نوع از محرک‌های نرم محدودتر از ماهیه است، شدت تنش بالاتر می‌باشد. از مهم‌ترین ویژگی‌های ماهیه‌های مصنوعی می‌توان به وزن سبک آن‌ها اشاره کرد. به دلیل آنکه اصلی‌ترین جزء سازنده‌ی آن‌ها غشای الاستومری می‌باشد این محرک‌ها بسیار سبک‌وزن هستند. این ویژگی سبب شده تا از این گونه محرک‌ها در ساخت و توسعه‌ی وسایل توان‌بخشی استفاده شود. به طور نمونه اسکلت خارجی نرم ساخته شده توسط فهام^۴ و همکارانش مثالی قابل توجه از استفاده‌ی محرک‌های ماهیه‌های مصنوعی جهت توان‌بخشی مچ دست می‌باشد [۳]. در این کار حرکات کشش، انحراف رادیال^۵ و انحراف اولنار^۶ توسط این محرک‌ها انجام گرفت. کانگ^۷ و همکارانش با استفاده از جرم و حجم سیال ورودی، یک مدل دینامیکی برای محرک‌های انقباضی تقویت شده با الیاف ارائه کردند [۴]. آن‌ها نشان دادند که این مدل می‌تواند در سیستم‌های کنترلی بازوهای مصنوعی که با این نوع محرک فعال می‌شوند، به کار رود.

پیل^۸ پژوهشی در زمینه‌ی الاستومرهای نرم تقویت شده با الیاف انجام داد و تأثیر زاویه‌ی پیچش الیاف را تنها در چند زاویه روی رفتار این نوع محرک‌ها بررسی کرد [۵]. کونولی^۹ و همکارانش 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 [۶]. آن‌ها نشان دادند که محرک‌های خطی با زاویه‌ی پیچش الیاف کمتر از $54/7$ درجه بر اثر تحریک دچار انقباض شده و محرک‌های با پیچش الیاف بیش از $54/7$ درجه پس از تحریک دچار افزایش طول می‌شوند. با آن‌ها این حال در این بررسی جنس الاستومر را مدنظر قرار ندادند. آن‌ها همچنین با چیدمان سری محرک‌های دارای زوایای فیبری متفاوت ربات ترمی جهت بازرسی خطوط لوله طراحی کردند.

¹ Gaylord

² Chou

³ Hannaford

⁴ Fahaam

⁵ Radial deviation

⁶ Ulnar deviation

⁷ Kang

⁸ Peel

⁹ Connolly

توندو^۱ و لوپز^۲ 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 [۷].

ماسر^۳ و همکارانش سه محرک نرم استوانه‌ای تقویت شده با الیاف را به صورت موازی در کنار هم قرار دادند تا یک ساختار مثلثی ایجاد شود [۸]. 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^۴ و همکارانش با استفاده از پوشش‌های انعطاف‌پذیر و غیرقابل کشش به عنوان قیده‌های فیزیکی، حرکت‌های خمشی متفاوتی را برای محرک‌های نرم خمشی نیم‌استوانه‌ای ایجاد کردند و شعاع خمش این محرک‌ها را به وسیله‌ی این قیده‌ها تغییر دادند [۹]. آن‌ها همچنین با استفاده از دو محرک خمشی یک گیره‌ی دو انگشتی تهیه کردند و پوشش 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^۵ و همکارانش 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 [۱۰]. 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 می‌شود. آن‌ها با کمک نتایج به دست آمده از این پژوهش و با استفاده از محرک‌های تقویت شده با الیاف به طراحی و ساخت یک دستکش توان‌بخش 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 می‌پردازد. همچنین برخلاف مطالعات مشابه پیشین که در آن‌ها تنها به بررسی زاویه‌ی تغییر فاز محرک‌های خطی پرداخته می‌شد، این مطالعه به بررسی زاویه‌ی تغییر فاز محرک‌های خطی-پیچشی نیز می‌پردازد. 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 نمی‌خورد. در اینجا ابتدا رفتار حرکتی محرک‌ها با کمک شبیه‌سازی بررسی شد سپس صحت نتایج شبیه‌سازی با کمک ارزیابی‌های تجربی سنجیده شد.

۲- مواد و روش‌ها

همان‌طور که گفته شد این پژوهش در دو بخش شبیه‌سازی و سپس ارزیابی تجربی انجام گرفت. به منظور 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 نیم‌استوانه 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^۶ آن در کاربرد مورد نظر کمتر از ۱/۲ است، برای مدل‌سازی رفتار آن از مدل نئوهوکین با ضرایب $MPa \cdot 0.34$ و $C_{10}=0$ استفاده شد. این ضرایب را به سادگی می‌توان با کمک محاسبات بدست آورد. الیاف نیز از جنس الیاف شیشه با مدول یانگ $31/067$ گیگاپاسکال و ضریب پواسون 0.36 در نظر گرفته شد. این 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

¹ Tondu

² Lopez

³ Moser

⁴ Galloway

⁵ Polygerinos

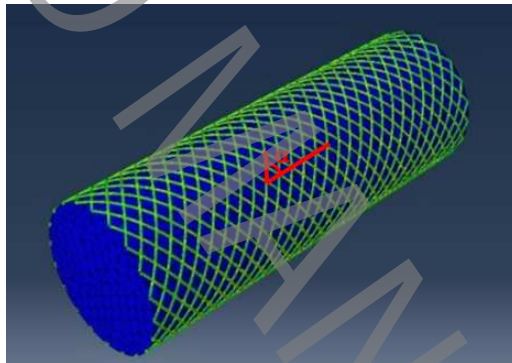
⁶ Stretch ratio

ساخته شده‌ای از این سه نوع محرک با بدنه‌ی سیلیکونی و الیافی از جنس الیاف شیشه تهیه شد تا در بخش ارزیابی تجربی، رفتار حرکتی آن‌ها مبنایی برای سنجش صحت نتایج شبیه‌سازی قرار گیرد. در ادامه در بخش ۲-۱ روند مدل‌سازی سه نوع محرک یادشده شرح داده شده است. بخش ۲-۲ نیز شامل توضیحاتی در رابطه با ساخت محرک‌ها و تهیه‌ی تجهیزات لازم برای آزمایش و طریقه‌ی نصب آن‌هاست.

۱-۲- شبیه‌سازی محرک‌ها

۱-۱-۲- محرک استوانه‌ای 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. به‌منظور شبیه‌سازی چنین حرکتی، یک محرک استوانه‌ای با قطر خارجی ۲۰، قطر داخلی ۱۶ و طول ۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. به این ترتیب شرط جدار نازک بودن محرک که در تئوری مشاهده می‌شود رعایت شد. برقرار بودن این شرط امکان مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی را با نتایج تئوری فراهم می‌آورد. از طرفی انتخاب ضخامت کمتر از ۲ میلی‌متر سبب دشواری ساخت محرک می‌شود. طول ۶۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۶ میلی‌متر نیز ابعاد مناسبی بودند که پس از چندین بار انجام عملیات ساخت محرک بدست آمد تا محرک ساخته شده دچار خمیدگی‌های نامطلوب نشود و نتایج حاصل از آزمایش تجربی را که باید با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شود، دستخوش تغییر نکند. شکل ۱ مدل محرک خطی مورد نظر را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی حرکت این محرک، زاویه‌ی پیچش الیاف به صورت متغیر از ۰ تا ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. این زاویه که در شکل ۱ نشان داده شده است، زاویه‌ای است که راستای الیاف با محور طولی محرک می‌سازد.

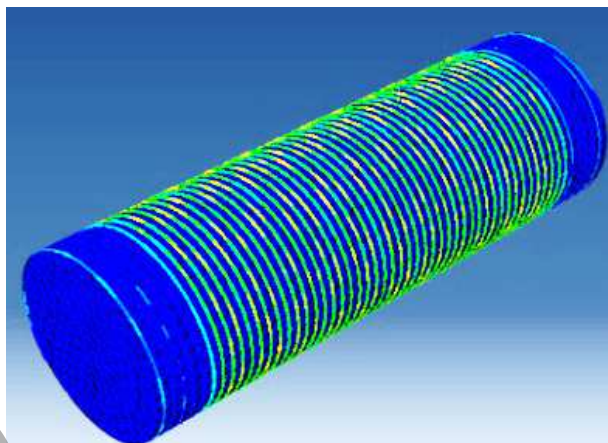


شکل ۱: مدل محرک استوانه‌ای سیلیکونی با حرکت خطی

Fig. 1: Silicon cylindrical actuator model with linear motion

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

چنانچه بدنه‌ی سیلیکونی محرک توسط الیاف به صورت یک‌طرفه تنها در یک جهت ساعت‌گرد یا پادساعت‌گرد 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 شبیه‌سازی حرکت این محرک زاویه‌ی 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.



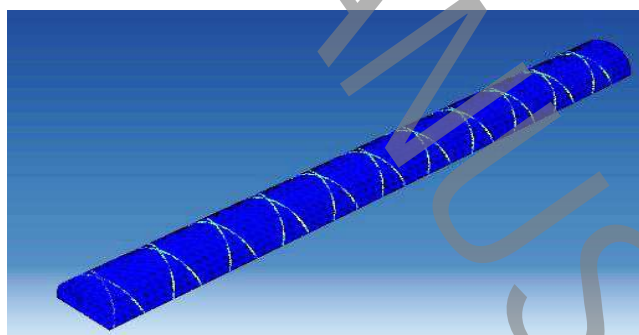
شکل ۲: مدل محرک استوانه‌ای سیلیکونی با حرکت خطی-پیچشی

Fig. 2: Silicon cylindrical actuator model with linear-torsional motion

۲-۱-۳- محرک با حرکت خمشی

در این محرک‌ها برای ایجاد حرکت خمشی یک لایه‌ی انعطاف‌پذیر و غیرقابل کشش به بخشی از بدنه‌ی محرک چسبانده می‌شود. با ورود هوا به درون کانال الاستومری، محرک تمایل به افزایش حجم خواهد داشت. حضور لایه‌ی منعطف و غیرقابل کشش سبب می‌شود 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 می‌کند. این اختلاف طول بین دو سطح محرک سبب ایجاد حرکت خمشی می‌شود.

در اینجا ابتدا شبیه‌سازی قطعه‌های 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 مدل‌سازی شده مشابه ابعاد دو محرک قبلی با مقطع دایره است. شکل ۳ مدل این محرک را نشان می‌دهد.



شکل ۳: مدل محرک نیم‌استوانه‌ای سیلیکونی با حرکت خمشی

Fig. 3: Silicon bending actuator with a semi-circular cross-section

۲-۲- ساخت و آماده‌سازی محرک‌ها

طراحی قالب‌ها در نرم‌افزار کتیا انجام شد. تمامی اجزای قالب‌ها و قطعات مورد نیاز دیگر با کمک پرینتر سه‌بعدی BLACKBOT PLUS 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 تشکیل‌دهنده قالب مخصوص محرک استوانه‌ای خطی-پیچشی را نشان می‌دهد. شیارهای برجسته در بدنه و دیواره‌ی قالب مسیر حرکت پیچش الیاف را مشخص می‌کند.



شکل ۴: اجزای تشکیل‌دهنده قالب محرک استوانه‌ای خطی-پیچشی

Fig. 4: Components of linear-torsional actuator mold with circular cross-section

همان‌طور 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. مرحله‌ی حباب‌زدایی مرحله‌ای است که در آن حباب‌های موجود در سیلیکون تحت فشار خلأ خارج می‌شوند و یک مرحله‌ی 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 قالب‌گیری شده عاری از کوچک‌ترین 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 می‌تواند سبب عدم پر شدن کامل قالب و ناقص ماندن قطعه‌ی قالب‌گیری شود. در مواردی نیز وجود حباب سبب خروج ماهیچه‌ی قالب از مرکز و در نهایت غیریکنواخت شدن ضخامت دیواره‌ی محرک می‌شود. این عیوب در شکل ۵ نشان داده شده است. به این ترتیب ترکیب سیلیکون و سفت‌کننده‌ی آن پیش از آنکه قالب محرک را پر کند به منظور حباب‌زدایی در محفظه‌ی خلأ 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 wall b) Mold not filled with silicone and hardener c) Non-uniform wall thickness.

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 سانتی‌گراد 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 تثبیت جایگاه این الیاف در محل‌های خود، یک لایه سیلیکون روی 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 نیم‌استوانه به صورت سه تکه شامل بدنه، ماهیچه و درپوش طراحی و ساخته شد. شکل ۶ اجزای تشکیل‌دهنده‌ی این محرک را نشان می‌دهد.



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

مراحل ساخت محرک نیم‌استوانه‌ای مشابه محرک استوانه‌ای است و تنها تفاوت این است که هنگام ساخت محرک نیم‌استوانه، پیش از پیچش الیاف لازم است لایه‌ی انعطاف‌پذیر و غیرقابل کشش در محل مخصوص خود قرار گیرد و سپس الیاف به دور آن پیچیده شود. شکل ۷ محرک خمشی را پس از ساخت در دو نما از روبه‌رو و از بالا نشان می‌دهد.



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

۳-۲-۲- تجهیزات آزمایش و طریقه نصب آن‌ها

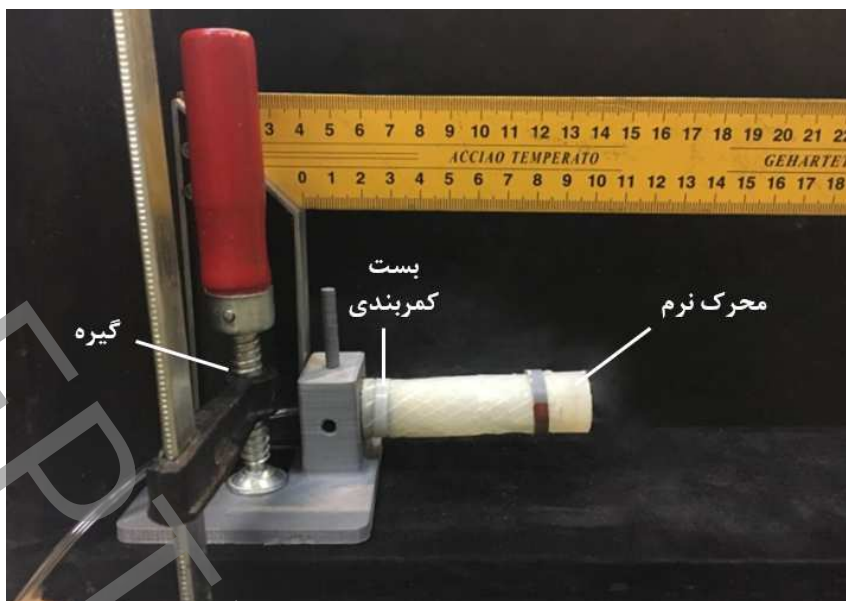
برای ارزیابی هر محرک می‌بایست سمتی از آن که به لوله‌ی هوا اتصال داشت ثابت می‌شد. بدین منظور یک پایه که در آن یک ماهیچه‌ی استوانه‌ای با قطری به اندازه‌ی قطر داخلی محرک تعبیه شده بود جهت سوار کردن قسمت ابتدایی محرک در نظر گرفته شد تا هنگام ثابت کردن قسمت ابتدایی به وسیله‌ی بست کمربندی، محرک از آن ناحیه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



شکل ۸: پایه‌ی ساخته شده جهت ارزیابی محرک‌ها

Fig. 8: Fabricated stand to hold stable the actuator during test

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 می‌شد. به منظور پایش تغییر شکل محرک یک علامت قرمز رنگ روی محرک نشانه‌گذاری شد. سپس با کمک پردازش تصویر در نرم‌افزار لب‌ویو آن علامت ردیابی شد و مقدار جابه‌جایی آن ثبت گردید. شکل ۹ نحوه‌ی قرارگیری محرک را در دستگاه آزمایش نشان می‌دهد.



شکل ۹: نحوه‌ی قرارگیری محرک در دستگاه آزمایش

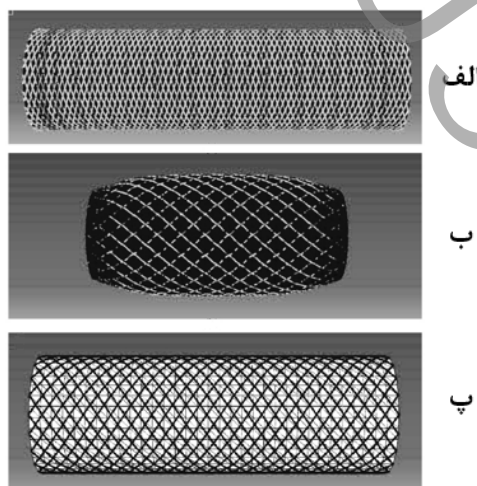
Fig. 9: Deployment of the actuator in the test setup

۳- نتایج

۱-۳- نتایج شبیه‌سازی

۱-۱-۳- محرک استوانه‌ای با حرکت خطی

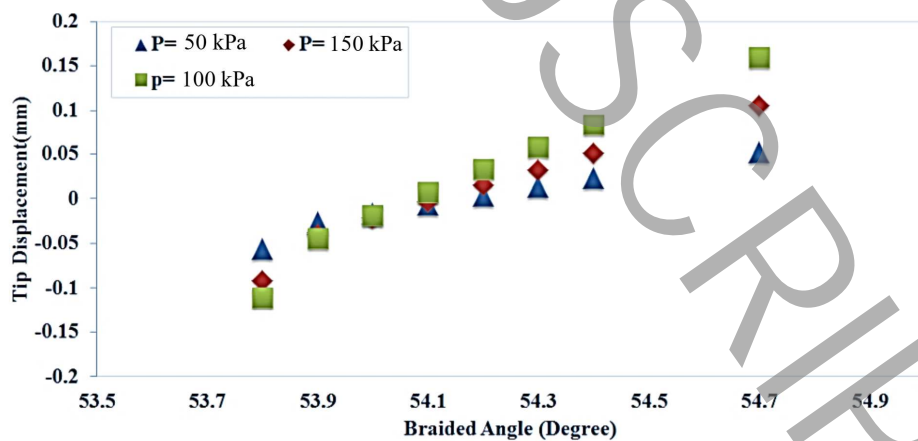
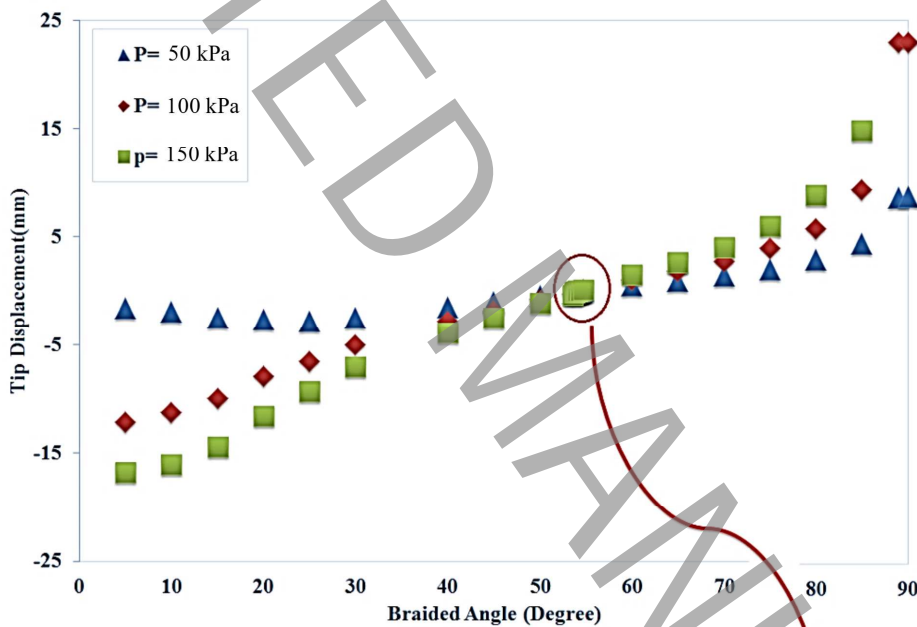
در این پژوهش زاویه‌ی پیچش الیاف به دور محرک، زاویه‌ای در نظر گرفته شد که راستای الیاف با محور طولی محرک ایجاد می‌کند. نتایج نشان داد که زاویه‌ی پیچش $54/2$ درجه برای محرک‌های خطی سیلیکونی یک زاویه‌ی مرزی است. به طوری که پیچش الیاف با زاویه‌ی کمتر از $54/2$ درجه سبب کاهش طول محرک پس از تحریک می‌شود و زاویه‌ی پیچش بیش از $54/2$ درجه سبب افزایش طول محرک می‌شود. محرک در زاویه‌ی پیچش الیاف $54/2$ درجه نه افزایش طول و نه کاهش طول دارد. شکل ۱۰ تفاوت رفتار محرک سیلیکونی خطی را در سه زاویه‌ی متفاوت پیچش الیاف (بیشتر از $54/2$ درجه، کمتر از $54/2$ درجه و $54/2$ درجه) نشان می‌دهد.



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 ۵۴/۲ 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.

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 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 نتیجه‌گیری کرد که الیاف پیچیده شده به دور بدنه‌ی محرک با زاویه‌ی پیچش کمتر از ۵۴/۲ درجه نیرویی در جهت کاهش طول محرک به آن وارد 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.



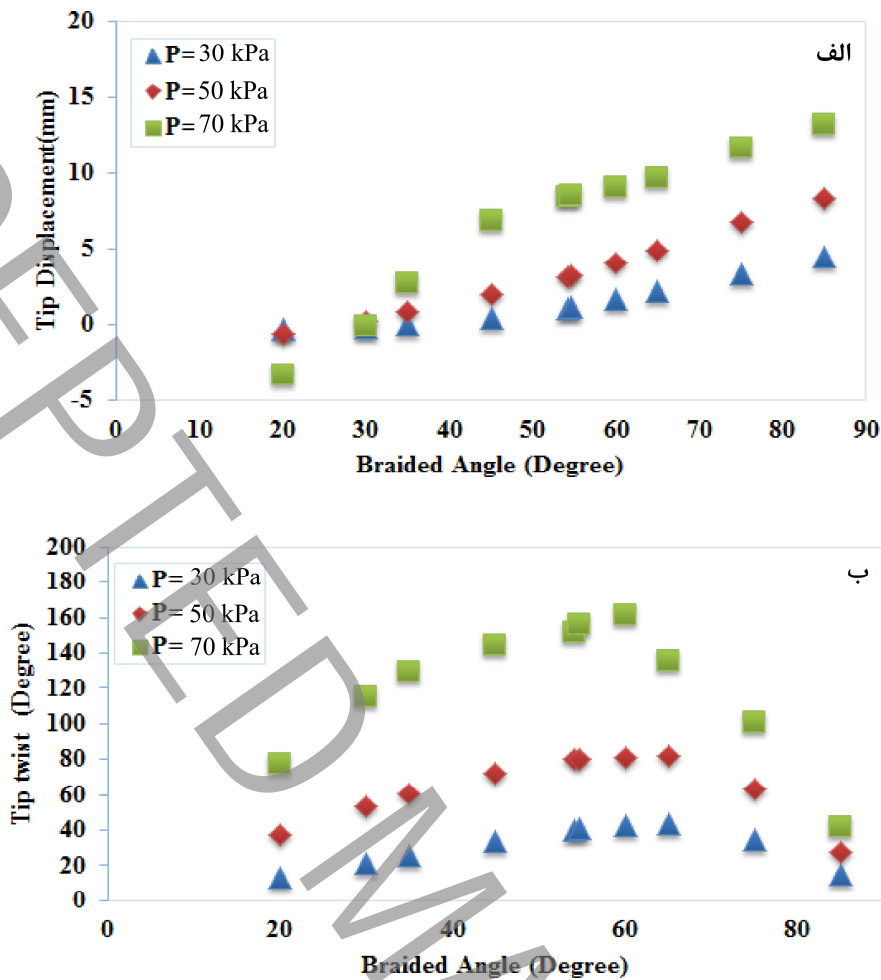
شکل ۱۱: نمودار تغییر طول محرک سیلیکونی خطی برحسب زاویه‌ی پیچش الیاف تحت سه فشار متفاوت بر اساس نتایج شبیه‌سازی

Fig. 11: Diagram of changes in actuator length by varying its fiber angle at three different pressures based on simulation result

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 نمی‌شود بلکه در محرک سیلیکونی خطی-پیچشی تغییر رفتار محرک از فاز کاهش طول به فاز افزایش طول در زاویه‌ی ۳۰ درجه اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه در محرک خطی از سری‌های دوگانه‌ی الیاف و در محرک خطی-پیچشی از سری‌های یگانه‌ی الیاف جهت مهار دیواره استفاده می‌شود، نیروی وارد شده از طرف الیاف به بدنه‌ی محرک خطی-پیچشی کمتر از نیروی وارده از طرف الیاف به بدنه‌ی محرک خطی است. همین مسئله سبب می‌شود که نیروی عقب‌کشی الیاف در محرک خطی-پیچشی در زاویه‌ی پیچش الیاف بیش از ۳۰ درجه مغلوب نیروی پیش‌کشندگی 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 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.

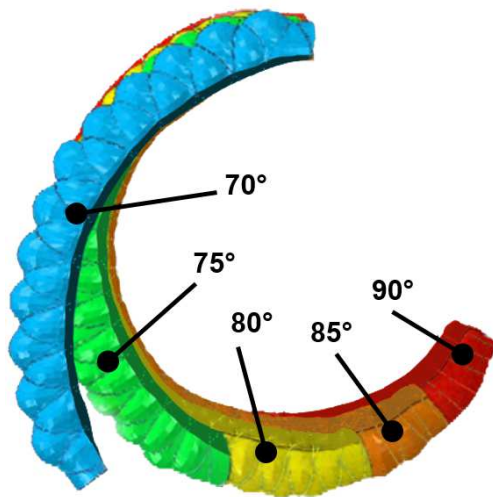


شکل ۱۲: نتایج شبیه‌سازی محرک سیلیکونی خطی-پیچشی تحت سه فشار متفاوت الف) نمودار تغییر طول محرک برحسب زاویه‌ی پیچش الیاف و ب) نمودار مربوط به میزان پیچش محرک برحسب زاویه‌ی پیچش الیاف

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.

۳-۱-۳- محرک نیم‌استوانه‌ای با حرکت خمشی

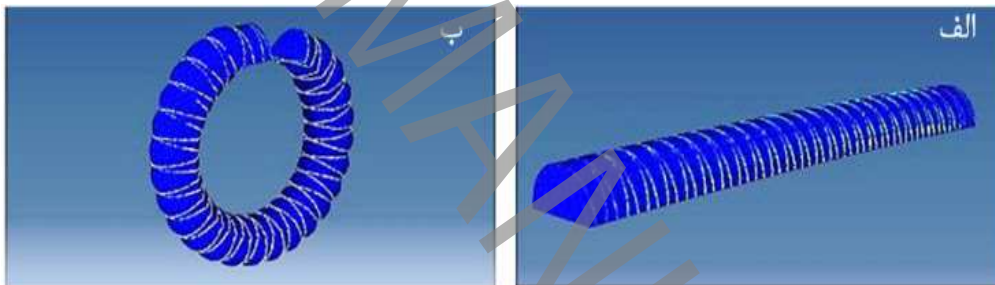
نتایج نشان داد که در شبیه‌سازی حرکت محرک‌های خمشی که مقطع آن‌ها به صورت قطاعی از دایره می‌باشد در یک زاویه‌ی معین پیچش الیاف و تحت یک فشار ثابت، هر چه زاویه‌ی قطاع به 180° درجه نزدیک‌تر باشد، میزان خمش محرک بیشتر است. با توجه به اینکه محرک با زاویه‌ی قطاع 180° درجه (نیم‌استوانه) بیشترین خمش را در بین دیگر قطاع‌ها دارد، برای بررسی تأثیر زاویه‌ی پیچش الیاف بر میزان خمش، محرک خمشی به صورت نیم‌استوانه در نظر گرفته شد. شکل ۱۳ محرک‌های نیم‌استوانه‌ای سیلیکونی با زاویه‌ی پیچش الیاف 70° ، 75° ، 80° ، 85° و 90° درجه را پس از تحریک تحت فشار 70 کیلوپاسکال نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است در فشار یکسان میزان خمش محرک با زاویه‌ی پیچش الیاف بزرگ‌تر، بیشتر است. بیشترین خمش در محرک با زاویه‌ی پیچش الیاف 90° درجه رخ می‌دهد.



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 نیم‌استوانه را با زاویه‌ی پیچش الیاف ۸۸ درجه (تقریباً ۹۰ درجه) پیش و پس از تحریک نشان می‌دهد. در اینجا فشار ورودی به داخل کانال محرک برابر ۱۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد. همان‌گونه که از شکل برمی‌آید، محرک تحت چنین فشاری تقریباً به میزان ۳۶۰ درجه خم می‌شود.



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

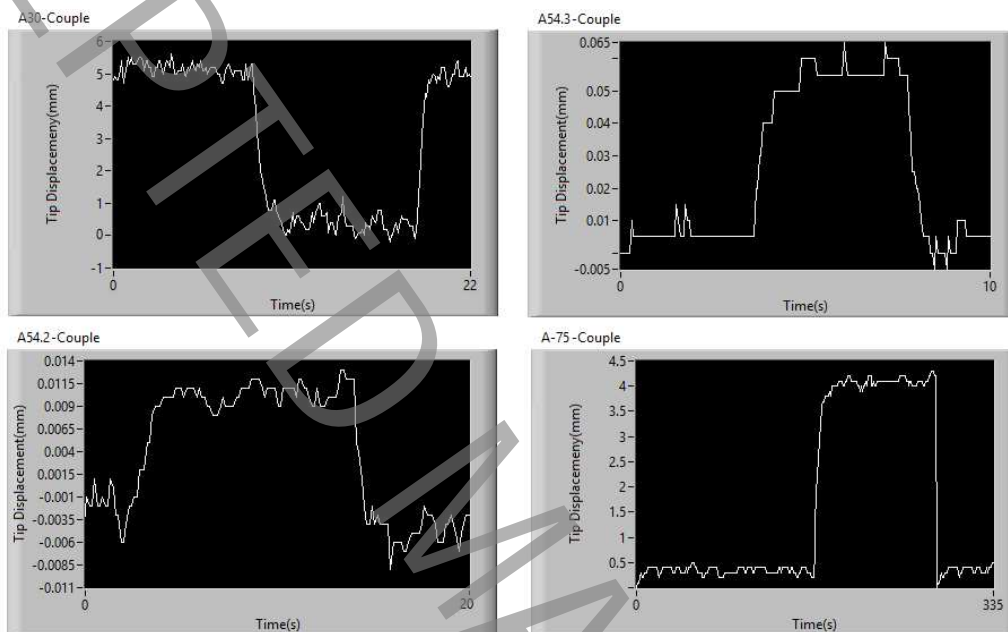
Fig. 14: Semi-cylinder bending actuator with 88-degree fiber angle a) Before applying air pressure. b) After applying 100 kPa air pressure

۳-۲- 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، ۵۴/۳، ۷۵ و ۸۵ درجه، برای ارزیابی محرک‌های خطی-پیچشی، پنج محرک سیلیکونی با زاویه‌ی پیچش الیاف ۳۰، ۵۵، ۶۵ و ۸۵ درجه‌ی پادساعت‌گرد و ۴۵ درجه‌ی ساعت‌گرد 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 اندازه‌گیری شد. هر اندازه‌گیری ۵ مرتبه تکرار شد تا از تکرارپذیری نتایج اطمینان حاصل شود.

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

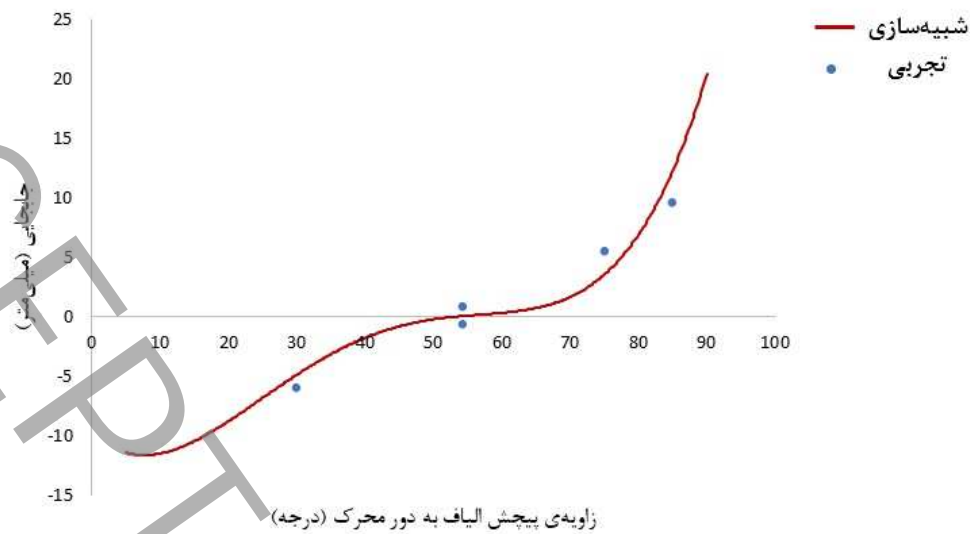
در شکل ۱۵ نتایج ارزیابی تجربی محرک‌های خطی با زوایای پیچش الیاف ۳۰، ۵۴/۲، ۵۴/۳ و ۷۵ درجه نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارها مشخص است مطابق با آنچه از نتایج شبیه‌سازی حاصل شد محرک با زاویه‌ی پیچش الیاف ۳۰ درجه دچار کاهش طول می‌شود و محرک‌های با زاویه‌ی پیچش الیاف ۵۴/۳ و ۷۵ درجه دچار افزایش طول می‌شوند. بیشترین میزان تغییر طول برای محرک خطی با زاویه‌ی پیچش الیاف ۵۴/۲ درجه معادل ۰/۰۱۳ میلی‌متر بدست آمد که این میزان تغییر طول به دلیل وجود خطا در حین آزمایش قابل چشم‌پوشی است و می‌توان گفت که مطابق با نتایج شبیه‌سازی، محرک خطی سیلیکونی در زاویه‌ی پیچش الیاف ۵۴/۲ درجه تغییر طولی از خود نشان نمی‌دهد. لازم به ذکر است که نتیجه‌ی ارزیابی تجربی برای زاویه‌ی پیچش الیاف ۸۵ درجه در شکل ۱۵ نشان داده نشده است. در این زاویه نیز افزایش طول مشاهده شد.



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

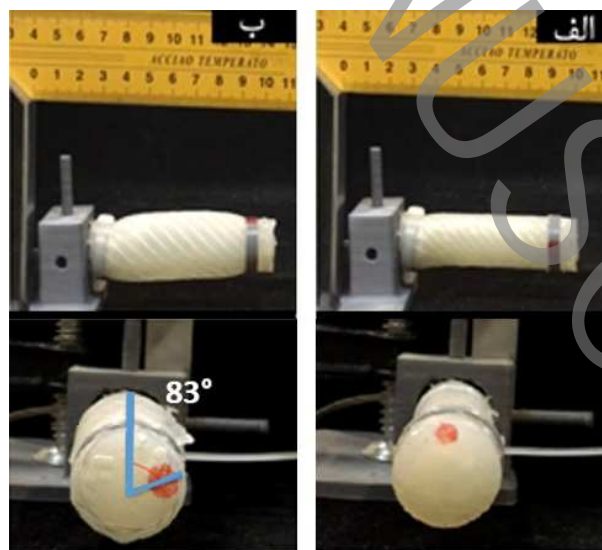
حدود تطابق نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی تجربی برای محرک‌های خطی تحت فشار هوای ورودی ۱۰۰ کیلوپاسکال در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



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

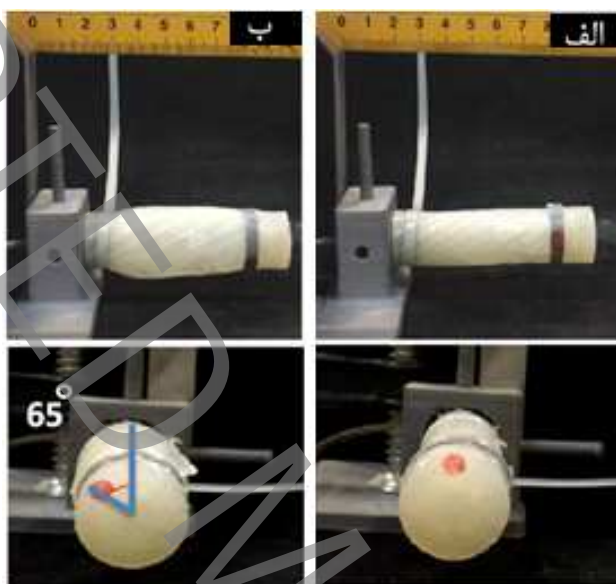
۳-۲-۳- ارزیابی تجربی محرک‌های استوانه‌ای با حرکت خطی-پیچشی
 ارزیابی تجربی محرک‌های خطی پیچشی برای زوایای پیچش الیاف ۴۵ درجه‌ی ساعت‌گرد، ۳۰، ۵۵، ۶۵ و ۸۵ درجه‌ی پادساعت‌گرد انجام شد. شکل ۱۷-الف محرک سیلیکونی خطی-پیچشی با زاویه‌ی پیچش الیاف ۴۵ درجه‌ی ساعت‌گرد را در دو نما در حالت غیرفعال و شکل ۱۷-ب تغییر 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 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)

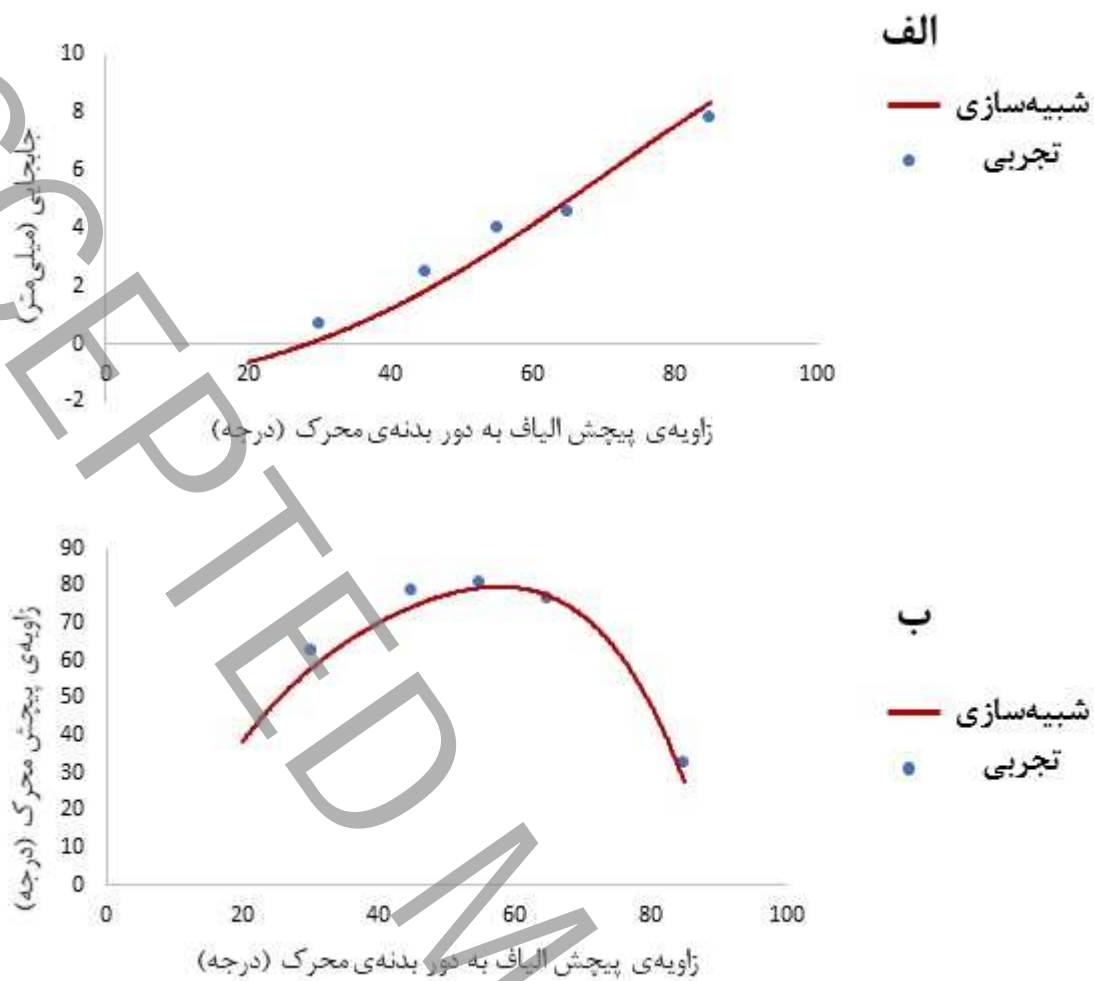
شکل ۱۸-الف محرک سیلیکونی خطی-پیچشی با زاویه‌ی پیچش الیاف ۳۰ درجه‌ی پادساعت‌گرد را در دو نما در حالت غیرفعال و شکل ۱۸-ب تغییر طول و پیچش همان محرک را در همان دو نما پس از تحریک نشان می‌دهد. این محرک پس از تحریک تحت فشار هوای ورودی ۵۰ کیلوپاسکال، ۰/۷ میلی‌متر افزایش طول و ۶۳ درجه پیچش پادساعت‌گرد از خود نشان داد.



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)

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.



شکل ۱۹: مقایسه‌ی نتایج شبهه‌سازی 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 شبهه‌سازی و نقاط مجزا نشان‌دهنده‌ی نتایج تجربی است.

Fig. 19: Comparison of practical results and simulation results for linear-torsional 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.

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 شبهه‌سازی در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال ۳۶۰ درجه خم شده است.



شکل ۲۰: ارزیابی تجربی حرکت محرک سیلیکونی خمشی نیم‌استوانه 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 محرک‌های نرم تقویت شده با الیاف به واسطه‌ی ویژگی‌های منحصربه‌فردی که دارند از جمله وزن کم، سادگی ساخت، ایمنی ذاتی و قیمت ارزان بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این محرک‌ها پتانسیل زیادی جهت کاربرد در زمینه‌های مختلف همچون جراحی، توان‌بخشی، حمل و انتقال اجسام و غیره دارند. از این‌رو مطالعه‌ی رفتاری 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 $54/2$ درجه پس از تحریک دچار کاهش طول می‌شود و چنانچه زاویه‌ی پیچش الیاف به دور بدنه‌ی محرک بیش از $54/2$ درجه باشد محرک پس از تحریک دچار افزایش طول خواهد شد. علاوه بر آن نشان داده شد که محرک خطی-پیچشی سیلیکونی با زاویه‌ی پیچش الیاف کمتر از 30 درجه پس از تحریک دچار کاهش طول می‌شود و چنانچه زاویه‌ی پیچش الیاف به دور بدنه‌ی سیلیکونی محرک بیش از 30 درجه باشد محرک پس از تحریک دچار افزایش طول خواهد شد. همچنین نشان داده شد که این محرک‌ها در صورتیکه دارای پیچش الیاف ساعت‌گرد باشند، حرکت پیچشی ساعت‌گرد و در صورتی که دارای پیچش الیاف پادساعت‌گرد باشند، حرکت پیچشی پادساعت‌گرد 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 90 درجه رخ می‌دهد. نتایج ارائه شده در این مطالعه با مقایسه‌ی خروجی شبیه‌سازی المان محدود و آزمون‌های عملی با بیشینه خطای 14 درصد صحت‌گذاری شد.

۵- تشکر و قدردانی

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

- [1] 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*, 12(1) (1996) 90-102.
- [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 Conference on*, IEEE, 2009, pp. 182-187.
- [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*, 2(1) (2015) 26-32.
- [7] B. Tondu, P. Lopez, Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators, *IEEE control systems*, 20(2) (2000) 15-38.
- [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 International Conference on*, IEEE, 2012, pp. 4264-4269.
- [9] K.C. Galloway, P. Polygerinos, C.J. Walsh, R.J. Wood, Mechanically programmable bend radius for fiber-reinforced soft actuators, in: *Advanced Robotics (ICAR), 2013 16th International Conference on*, IEEE, 2013, pp. 1-6.
- [10] 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.
- [11] P. Polygerinos, Z. Wang, K.C. Galloway, R.J. Wood, C.J. Walsh, Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation, *Robotics and Autonomous Systems*, 73 (2015) 135-143.

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

Ashkan Fathian^a, Golbarg Nikaeen^b, Anis Darmohammadi^c, Hossein Mirzanejad^d, Mohammad Mahdi Agheli Haji Abadi^{e1}

^a Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

^b Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

^c Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

^d Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

^e Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

ABSTRACT

Elastomeric Fiber-reinforced actuators are stimulated with the aid of fluid force and exhibit different motions due to angle of the fibers wound around the body of the actuator. 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 motion behavior of elastomeric fiber reinforced actuators with two circular and semicircular sections. The simulation results showed that the phase change angle is 54.2° in silicon 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 clockwise and 45 degrees counterclockwise. At last, one bending actuator with fibers at the angle of 88 degrees was made. All these actuators were evaluated after actuation. The experimental results confirmed the simulation results with a maximum calculated error of 14%.

KEYWORDS

Soft Robot, Soft Actuator, Soft fiber reinforced actuator

¹ agheli@modares.ac.ir