



مدلسازی و آنالیز رفتار خمشی عملگر نرم پنوماتیکی ساختار شبکه‌ای با مدل‌های هاپیرالاستیک

سینا اسمعیلی پور، مسعود اجری*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴

کلمات کلیدی:

عملگر نرم ساختار شبکه‌ای
دراگون اسکین ۳۰
خمش استاتیکی
مدل هاپیرالاستیک آگدن

خلاصه: ربات‌های نرم که از مواد هاپیرالاستیک ساخته می‌شوند، به طور گسترده در پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. طراحی و تحلیل رفتار عملگرهای نرم به دلیل ماهیت غیر خطی مواد هاپیرالاستیک، پروسه‌ای چالش برانگیز است. این مقاله تاثیر پارامترهای هندسی از جمله ضخامت دیواره‌ها، فاصله بین محفظه‌ها، ضخامت لایه‌های پایینی اول و دوم، ضخامت دیواره‌های جانبی، شکل سطح مقطع و انتخاب جنس ماده در ساخت عملگر را بر رفتار خمشی، تنش‌های ایجاد شده در دیواره‌های داخلی و نیروی حاصل نوک عملگر را مورد بررسی قرار داده است تا حالت بهینه‌ترین حالت هندسی و ماده با هدف ایجاد بیشترین زاویه خمش و نیروی نوک عملگر بدست آید. برای مدلسازی دقیق رفتار مواد متداول سازنده عملگر نرم از قبیل: دراگون اسکین ۳۰، پلی‌اورتان ترموپلاستیک، اکوفلکس ۳۰ و سیلیکون شبکه‌ای شونده دو جزئی در دمای اتاق، پیش‌بینی پنج مدل هاپیرالاستیک با رفتار تنش-کرنش تک جهته این مواد مقایسه شده و دقیقترین مدل برای هر ماده انتخاب گردیده است. نتایج نشان می‌دهند با کاهش ضخامت دیواره‌ها، فاصله بین محفظه‌ها، ضخامت لایه‌های پایینی و استفاده از سطح مقطع مربع و ماده سیلیکون شبکه‌ای شونده دو جزئی در دمای اتاق، بیشترین زاویه خمش حاصل می‌شود. اما با افزایش ضخامت دیواره‌ها، تعداد محفظه‌ها، ضخامت لایه‌های پایینی و استفاده از ماده دراگون اسکین ۳۰ بیشترین نیروی نوک عملگر بدست می‌آید.

۱- مقدمه

طول، پیچش و خمش و اعمال نیرو استفاده می‌کنند. از انواع عملگرهای نرم می‌توان به عملگر تقویت شده با الیاف [۶]، عملگر پنوماتیکی شبکه‌ای [۷] و ماهیچه‌های مصنوعی پنوماتیکی [۸] اشاره کرد. عملگر پنوماتیکی شبکه‌ای روند ساخت آسان‌تری دارد ولی در مقایسه با انواع دیگر عملگرها، نیروی کمتری را تولید می‌کند.

به دلیل تازگی عملگرهای نرم و نبود استاندارد مشخص، طراحی ساختار و روند ساخت عملگر یکی از چالش‌های جدی و مهم در مقابل مهندسان می‌باشد [۹]. عواملی نظیر میزان خمش عملگر و نیروی وارد شده از نوک عملگر به اجسام خارجی نقش مهمی را در انتخاب عملگر مناسب ایفا می‌کنند. نیروی نوک عملگر معمولاً توسط نیروسنج و ترازو محاسبه و زاویه خمش با استفاده از صفحه شطرنجی [۱۰] و حسگرها اندازه‌گیری می‌شوند. این حسگرها شامل حسگرهای مکانیکی [۱۱] و نوری [۱۲] هستند. از روش‌های متداول در ساخت می‌توان به ریخته‌گری در قالب مواد لاستیکی

ربات‌های نرم^۱ با ویژگی‌هایی مانند قیمت ارزان مواد سازنده، سهولت در ساخت، وزن کم و کنترل سریع و آسان [۱] شناخته می‌شوند و کاربرد وسیعی در صنایع [۲] و پزشکی [۳] دارند. از این ربات‌ها به عنوان جراح و ابزاری برای توانبخشی اندام‌های بدن انسان استفاده می‌شود. عملگرهای نرم جز مهمی از اجزای سازنده ربات‌های نرم را تشکیل می‌دهند که بهبود عملکرد آن، تاثیر مستقیمی بر عملکرد ربات‌های نرم دارد. در مقابل این عملگرها، عملگرهای صلب قرار دارند که به دلیل استفاده از مواد سخت و دشواری ساخت، با محدودیت‌هایی مواجه هستند به عنوان مثال عملگرهای نرم، به دلیل استفاده از مواد نرم در ساخت آن‌ها به عنوان ابزار توانبخشی، فرم دست انسان را حفظ می‌کنند [۴]. این عملگرها از فشار هوا به صورت فشار مثبت و منفی (مکش) [۵] برای انجام حرکات مختلفی مانند افزایش

- 1 Soft Actuators
- 2 Vacuum

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.ajri@uma.ac.ir



عملگر پنوماتیکی شبکه‌ای هست. ژیلو^{۱۲} و همکارانش با محاسبه تغییر شکل نقاط تماسی بین محفظه‌های به هم چسبیده و استفاده از غشا^{۱۳} به صورت کرنش صفحه‌ای^{۱۴}، رابطه‌ای برای مقدار زاویه خمش و نیروی نوک عملگر بدست آوردند [۷]. در مطالعه اخیر یک مدل تحلیلی و المان محدود بر اساس مدل هایپرالاستیک یئو بدست آمده است. با استفاده از مدل و نتایج آزمایشگاهی زاویه خمش عملگر نرم ساختار شبکه‌ای از جنس دراگون اسکین ۳۰^{۱۵} اعتبارسنجی شد.

روش دیگر برای مدلسازی عملگر، جداسازی محفظه‌ها و بررسی خمش آن‌ها به عنوان قطعه صلب است. آلیسی^{۱۶} و همکارانش با استفاده از اصل تیر اویلر-برنولی^{۱۷} و با فرض شبه استاتیکی^{۱۸} بودن تغییر شکل، گشتاور خمشی هر یک از محفظه‌ها را بدست آوردند [۱۰]. چنگ^{۱۹} با در نظر گرفتن عملگر به عنوان تیر یک سر گیردار با توضیح یکنواخت نیرو، رفتار خمشی آن را بررسی کرد [۲۰].

تحقیقات گذشته بر روی این عملگرها به منظور رسیدن به بیشترین زاویه خمش و نیروی نوک عملگر با استفاده از کمترین فشار پنوماتیکی صورت گرفته است.

در این مطالعه، رفتار خمشی و نیروی حاصل در نوک عملگر ساختار شبکه‌ای با استفاده از یک مدل المان محدود و بسط مدل‌های هایپرالاستیک بررسی شده است. این مدل با نتایج روش تجربی و تحلیلی ارائه شده در مقاله [۷] اعتبارسنجی گردید. سپس مطالعه موثر و جامعی بر روی رفتار عملگر ساختار شبکه‌ای با تحریک پنوماتیکی انجام گرفته است. در این مطالعه علاوه بر تاثیر پارامترهای هندسی مانند l_g ، t_b و h که در کار اخیر چاپ شده در سال ۲۰۲۰ توسط ژیلو و همکارانش [۷] انجام گرفته، اثر پارامترهای مهم دیگری از جمله تعداد محفظه‌های عملگر و شکل سطح مقطع نیز بر رفتار خمشی عملگر مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه علاوه بر بررسی رفتار خمشی با ماده سازنده دراگون اسکین ۳۰، اثر ماده سازنده متداول این عملگرها از قبیل اکوفلکس ۳۰^{۲۰}، سیلیکون شبکه ای شونده

مانند سیلیکون و الاستومر، آلیاژهای حافظه‌دار [۱۳]، پلیمرهای فعال الکتریکی [۱۴] و هیدروژل‌ها [۱۵] اشاره کرد. این روش نیازمند این هست که اپراتور مهارت بالایی در تکنیک‌های ریخته‌گری داشته باشد [۹]. محققان در حال تحقیق بر روی روش‌های جدید از نظر سهولت و سرعت بالا در ساخت عملگرها هستند که می‌توان به استفاده از چاپگر سه‌بعدی^۴ افزایشی با فیلامنت‌هایی از قبیل پلی‌اورتان ترموپلاستیک^۵ اشاره کرد. آریفیانتو^۶ و همکارانش با انجام تست کشش نمونه‌های ساخته شده با فیلامنت پلی‌اورتان ترموپلاستیک، تاثیر جهت‌های لایه چینی چاپگر سه بعدی بر رفتار خمشی عملگر را مورد مطالعه قرار دادند [۱۶]. موادی که رفتار لاستیک مانند دارند به دلیل تغییر شکل زیاد و غیر خطی، جز مواد هایپر الاستیک قرار می‌گیرند. به منظور توصیف رفتار آن‌ها، مدل‌های مختلفی توسط دانشمندان ابداع شده است که عبارت اند از: یئو^۷، مونی رویلین^۸، آگدن^۹ و ...

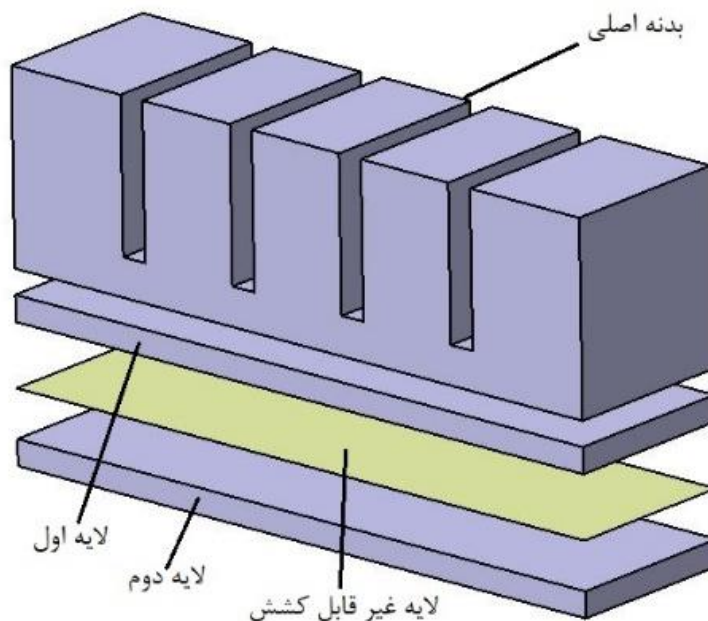
به دلیل غیر خطی بودن مواد سازنده عملگر، پیش بینی رفتار آن دشوار است [۱۷]؛ از این رو شبیه سازی عددی و تحلیلی برای بررسی عملکرد آن ضروری بوده و توجه زیادی را در بین محققان به خود جلب کرده است.

روش اجزای محدود، به علت کم هزینه بودن آن نسبت به آزمایش تجربی و قابلیت بررسی رفتارهای غیر خطی به طور وسیعی در بهینه سازی هندسه، ساختار و عملکرد عملگرها مورد استفاده قرار می‌گیرند. سان^{۱۱} و همکارانش با استفاده از روش المان محدود، حساسیت ۹ پارامتر طراحی به تغییر شکل خمشی عملگرها را بررسی کردند [۱۸]. از آنجایی که روش ریخته‌گری به آسانی قابل انجام نیست و کیفیت انجام کار به مهارت ریخته‌گر بستگی دارد، استفاده از پرینتر سه بعدی در ساخت این نوع عملگرها رو به گسترش است. وانگ^{۱۱} و همکارانش یک نوع گیره پنوماتیکی با استفاده از چاپگر سه‌بعدی ساخته و با انجام آزمایش‌های تجربی، نتایج حاصل از روش المان محدود را اعتبار سنجی کردند [۱۹].

یکی از روش‌های مدلسازی عملگر، محاسبه تغییر شکل و جابه‌جایی نقاط تماسی بین محفظه‌های به هم چسبیده برای بررسی رفتار خمشی

12 Zhu Liu
13 Membrane
14 Plain Strain
15 Dragon Skin 30 Silicone Rubber
16 Alici
17 Euler-Bernoulli
18 Quasi-Static
19 Cheng
20 Ecoflex 30

1 Shape-Memory Alloy
2 Electroactive Polymers
3 Hydrogels
4 3D Printer
5 Thermoplastic Poly Urethane Filament (TPU)
6 Arifvianto
7 Yeoh
8 Moony-Riviln
9 Ogden
10 Sun
11 Wang



شکل ۱. اجزای سازنده عملگر پنوماتیکی شبکه‌ای

Fig. 1. Components of network pneumatic actuator

عملگر پنوماتیکی شبکه‌ای، از تعدادی محفظه ایجاد شده که شامل بخش اصلی بدنه و لایه‌های زیرین که یک لایه کاغذ غیر قابل کشش درون آن قرار گرفته می‌شود، است.

با اعمال فشار هوا، دیواره‌های جانبی محفظه‌ها با برخورد به هم و ایجاد فشار، باعث افزایش طول عملگر شده و لایه‌های زیرین غیر قابل کشش، این افزایش طول را به خمش رو به پایین هدایت می‌کنند. هرچه فاصله بین محفظه‌ها کمتر باشد، فشار تماس دیواره‌ها بیشتر شده و در نتیجه میزان خمش بیشتر می‌شود (شکل ۲).

۳- مدل هایپرالاستیک

پارامترهای مدل هایپرالاستیک معمولاً از انجام تست کشش تک جهت بر روی نمونه‌های استاندارد بدست می‌آید. طبق تئوری محیط پیوسته کلاسیک نسبت کشیدگی در جهت i از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۱]:

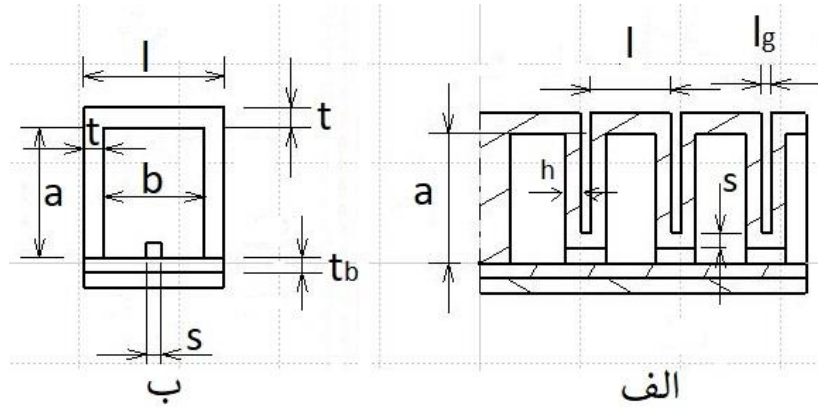
$$\lambda_i = \frac{l_i}{L_i} \quad (1)$$

دو جزئی در دمای اتاق^۱ و همچنین روش ساخت پرینت سه بعدی با ماده پلی‌اورتان ترموپلاستیک و زاویه لایه چینی [۹۰ و ۰] درجه بر زاویه خمش و نیروی نوک عملگر و تنش‌های وارد بر سطح داخلی محفظه‌ها بررسی می‌شود که در هر کدام از این مواد رفتار خمشی متفاوت است. در نهایت حالت هندسی بهینه و بهترین ماده با هدف ایجاد بیشترین زاویه خمش و بیشترین نیروی نوک عملگر بدست می‌آید. همچنین در این مقاله مطالعه جامعی روی پیش بینی رفتار خمشی عملگر نرم ساختار شبکه‌ای با استفاده از مدل‌های هایپرالاستیک متداول از قبیل نتوهوکین، یئو سه پارامتری، آگدن ۱، آگدن ۲ و مونی ریولین انجام گرفته است. بدین منظور روابط این مدل‌ها بسط داده شده و پارامترهای مدل با انجام برازش این مدل‌ها بر روی نمودار تست کرنش انجام گرفته یا داده‌های پیشین بدست آمده است تا دقیق‌ترین مدل برای پیش بینی رفتار خمشی در هر ماده بدست آید.

۲- ساختار و اجزای سازنده عملگر

مدل هندسی عملگر مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. این

1 Two-Component Room Temperature Vulcanizing (RTV2)



شکل ۲. ابعاد سطح مقطع محفظه‌ها. الف) در جهت طولی. ب) در جهت عرضی

Fig. 2. Dimensions of the cross-section of the chambers. a) in the longitudinal direction. b) in the transverse direction

بنابراین دو لایتغیر اول ماتریس کشیدگی در کشش و فشار برای مواد تراکم ناپذیر بصورت رابطه زیر بازنویسی می‌گردند:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda^2 + 2\lambda^{-1} \\ I_2 &= \lambda^{-2} + 2\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

تنش کوشی مواد تراکم ناپذیر بر حسب کشیدگی تک جهته را می‌توان به فرم زیر بیان کرد [۲۲]:

$$\sigma(\lambda) = \frac{\partial W}{\partial \lambda} = 2(\lambda - \lambda^{-2}) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (6)$$

که W تابع چگالی انرژی کرنشی^۱ می‌باشد.

در مدل هایپرالاستیک آگدن تابع چگالی انرژی با رابطه (۷) تعریف می‌شود [۲۳]:

$$W = \sum_{p=1}^n \frac{\mu_p}{\alpha_p} \left(\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3 \right) \quad (7)$$

که I_i و L_i به ترتیب طول تغییرشکل یافته و طول اولیه در جهت i می‌باشند.

لایتغیرهای ماتریس کشیدگی نیز به فرم زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \cdot \lambda_3^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

برای مواد تراکم ناپذیر داریم [۲۱]:

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1 \quad (3)$$

برای تست کشش تک جهته و با استفاده از رابطه (۳) روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda \\ \lambda_2 &= \lambda_3 = \lambda^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (4)$$

که در این رابطه:

$$W = \sum_{i=0, j=0}^n C_i \cdot (I_1 - 3)^i \quad (12)$$

n : تعداد پارامترهای مدل آگدن

μ_p, α_p : پارامترهای اولیه برازش مدل آگدن می‌باشند.

با جایگذاری رابطه (۷) در رابطه (۶)، رابطه (۸) برای تنش محوری

بدست می‌آید:

با جایگذاری رابطه (۱۲) در رابطه (۶)، رابطه بین تنش و کشش برای

ماده تراکم ناپذیر با مدل نیو-هوکین بدست می‌آید [۲۴]:

$$\sigma_{uni} = 2C_1 (\lambda - \lambda^{-2}) \quad (13)$$

$$\sigma_{uni} = \sum_{p=1}^n \frac{2\mu_p}{\alpha_p} \left(\lambda^{\alpha_p-1} - 2\nu \lambda^{-\alpha_p\nu-1} \right) + 2(1-2\nu \lambda^{-2\nu}) \sum_{p=1}^n p D_p (J-1)^{2p-1} \quad (8)$$

همچنین برای مدل یئو رابطه بین تنش و کشش با شرط تراکم ناپذیر

بودن ماده به صورت زیر می‌باشد [۲۷]:

$$\sigma_{uni} = \sum_{i=0}^n 2i C_i (\lambda - \lambda^{-2}) (\lambda^2 + 2\lambda^{-1} - 3)^{i-1} \quad (14)$$

که با در نظر گرفتن حالت تراکم ناپذیر در مواد هایپروالاستیک، به صورت

رابطه (۹) ساده می‌شود [۲۴]:

$$\sigma_{uni} = \sum_{p=1}^n \frac{2\mu_p}{\alpha_p^2} \left(\lambda^{\alpha_p-1} - \lambda^{\frac{\alpha_p-1}{2}} \right) \quad (9)$$

سپس با استفاده از روش حداقل مربعات نرمالیزه شده [۲۸] پارامترهای

مدل‌های ذکر شده برای چهار ماده دراگون اسکین ۳۰، پلی‌اورتان

ترموپلاستیک، اکوفلکس ۳۰ و سیلیکون شبکه ای شونده دو جزئی در دمای

اتاق بدست آمده و نمودارهای تست کشش در ادامه ترسیم خواهند شد تا

بهترین مدل هایپروالاستیک برای بیان رفتار مکانیکی این مواد بدست آید.

در مدل‌های هایپروالاستیک چند جمله‌ای و مدل مونی ریولین تابع

چگالی انرژی با رابطه (۱۰) تعریف می‌شوند [۲۵]:

$$W = \sum_{i=0, j=0}^n C_{ij} \cdot (I_1 - 3)^i \cdot (I_2 - 3)^j \quad (10)$$

که C_{ij} پارامترهای مدل می‌باشد.

با جایگذاری رابطه (۱۰) در رابطه (۶)، و با در نظر گرفتن شرط مرزی

تراکم ناپذیری ماده، رابطه (۱۱) برای مدل مونی ریولین ۲ پارامتری تحت

تنش محوری بدست می‌آید [۲۴]:

$$\sigma_{uni} = 2C_1 (\lambda - \lambda^{-2}) + 2C_2 (1 - \lambda^{-3}) \quad (11)$$

۳-۱- دراگون اسکین ۳۰

در شکل ۳ برای دراگون اسکین ۳۰ پیش بینی نمودار تنش-کرنش با

استفاده از پنج مدل نئوهوکین، یئو سه پارامتری، آگدن با بسط تک جمله‌ای

(آگدن ۱)، آگدن با بسط دو جمله‌ای (آگدن ۲) و مونی ریولین رسم شده

است. ملاحظه می‌شود که مدل آگدن ۱ نسبت به مدل یئو که در مطالعه [۷]

مورد استفاده فرار گرفته است به نمودار تست کشش این ماده نزدیک‌تر است

و نتایج بهتری نسبت به مدل‌های دیگر بدست می‌دهد.

۳-۲- پلی‌اورتان ترموپلاستیک (۹۰ و ۰)

نمودار تست کشش پلی‌اورتان ترموپلاستیک به عنوان یکی از مواد

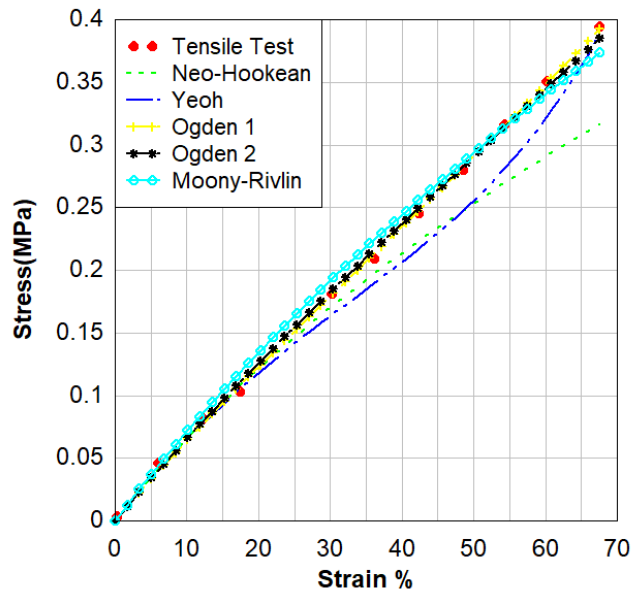
مهم ساخت عملگرهای نرم، که اکثراً به روش پرینت سه بعدی افزایشی و

با زاویه لایه چینی ۰ و ۹۰ درجه ساخته می‌شود در شکل ۴ نشان داده شده

است [۱۶]. همانطور که دیده می‌شود از بین ۵ مدل هایپروالاستیک بررسی

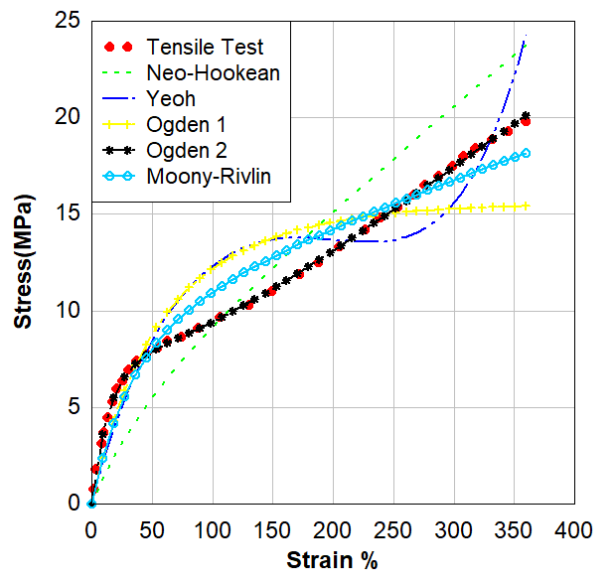
برای مدل هایپروالاستیک یئو و نیو-هوکین (با $n=1$) نیز تابع چگالی

انرژی با رابطه (۱۲) تعریف می‌شود [۲۶]:



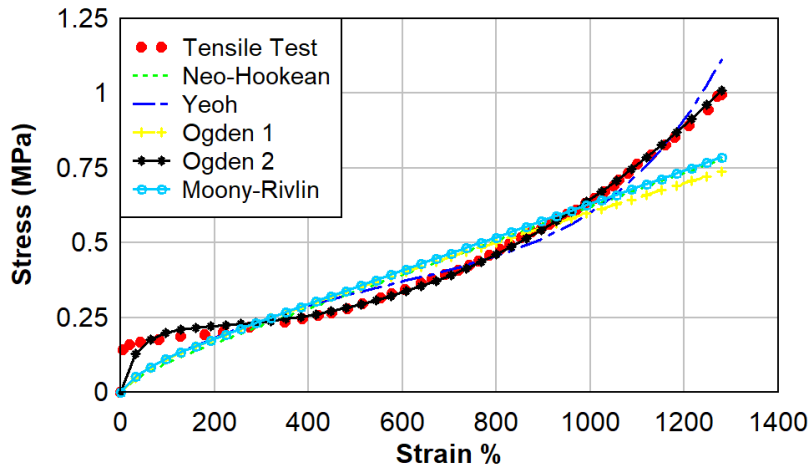
شکل ۳. نمودار تنش کرنش تک جهته دراگون اسکین ۳۰ پیش بینی شده با مدل‌های هایپیرالاستیک (نتایج تست برگرفته از رفرنس [۲۹])

Fig. 3. Uniaxial strain stress diagram of Dragon Skin 30 predicted by Hyperelastic models (test results taken from reference [29])



شکل ۴. نمودار تنش کرنش تک جهته پلی اورتان ترموپلاستیک (۹۰+۰) پیش‌بینی شده با مدل‌های هایپیرالاستیک (نتایج تست برگرفته از رفرنس [۱۶])

Fig. 4. Uniaxial strain stress diagram of TPU (0,90) predicted by hyperelastic models (test results taken from reference [16])



شکل ۵. نمودار تنش کرنش تک جهته اکوفلکس ۳۰ پیش بینی شده با مدل‌های هایپروالاستیک (نتایج تست برگرفته از رفرنس [۳۰])

Fig. 5. Ecoflex 30 uniaxial strain stress diagram predicted by hyperelastic models (test results taken from reference [30])

بررسی شده برای سیلیکون شبکه ای شونده دو جزئی در دمای اتاق، مدل یئو ۳ پارامتری نتیجه بهتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد. در جدول ۱ پارامترهای بهترین مدل هایپروالاستیک برای بیان رفتار تنش-کرنشی این چهار ماده آورده شده است

۴- شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل المان محدود

برای بررسی پارامتری عملکرد عملگر، مدل سه بعدی از عملگر پنوماتیکی شبکه‌ای با فاصله l_g برابر با ۲ میلی متر، سطح مقطع مربع و ابعاد هندسی نشان داده شده در جدول ۲، ایجاد شده است.

فشار هوای استاتیکی به صورت فشار^۱ به اندازه ۰/۰۵ مگاپاسکال به دیواره‌های محفظه‌های داخلی عملگر وارد شده و قسمت انتهایی عملگر با قید تکیه‌گاه گیردار^۲ به طور کامل مقید می‌شود (شکل ۸).

به منظور اندازه‌گیری زاویه خمش عملگر، نقطه‌ای به عنوان رفرنس پوینت ایجاد گردید. این نقطه به صفحه نوک عملگر با استفاده از قید کوپل، متصل شده تا مقادیر زاویه خمش نقاط صفحه نوک عملگر در این نقطه اعمال شود. در نهایت در قسمت تاریخچه خروجی^۳، خروجی زاویه^۴ در این

شده برای این ماده مدل آگدن ۲ نتایج بهتری نسبت به مدل‌های دیگر نشان می‌دهد.

۳-۳- اکوفلکس ۳۰

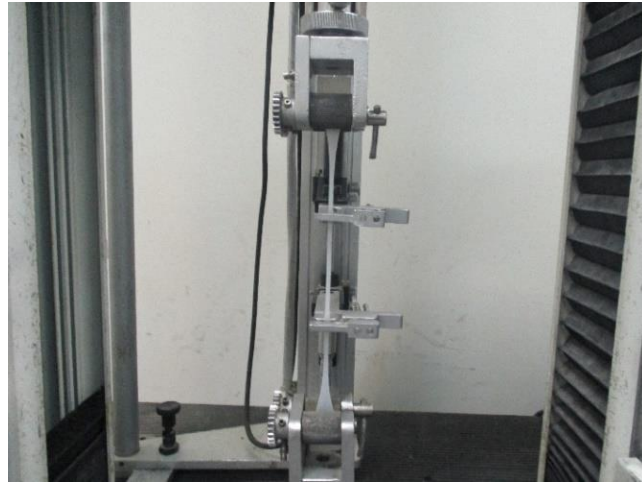
نمودار تنش کرنش اکوفلکس ۳۰ طبق استاندارد کشش ASTM D412 در شکل ۵ نشان داده شده است. برای بدست آوردن ضرایب هایپروالاستیک آن، نمودار تنش-کرنش تست کشش با استفاده از مدل‌های مختلف هایپروالاستیک برازش شده و در این شکل نشان داده شده است. نتایج می‌دهد که مدل آگدن ۲ مدلی مناسب برای تعریف رفتار مکانیکی ماده اکوفلکس ۳۰ است.

۳-۴- سیلیکون شبکه‌ای شونده دو جزئی در دمای اتاق

در این مقاله برای بدست آوردن نمودار تنش کرنش سیلیکون شبکه‌ای شونده دو جزئی در دمای اتاق چهار نمونه تست کشش طبق استاندارد ASTM D412 C برای مواد لاستیکی ساخته شده و با سرعت کشش ۵۰۰ (میلی‌متر / دقیقه) و طول گیج ۲۵ میلی متر تحت کشش قرار گرفت. (شکل ۶)

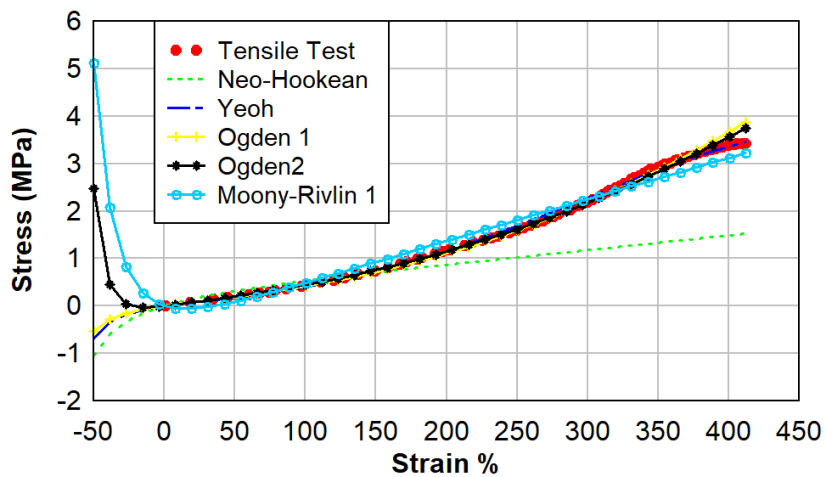
سپس مدل‌های پنج‌گانه ذکر شده بر روی نمودار تست کشش برازش شده‌اند. همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود از بین ۵ مدل هایپروالاستیک

- 1 Pressure
- 2 ENCASTER
- 3 History Output
- 4 UR



شکل ۶. انجام تست کشش نمونه سیلیکون شبکه ای شونده دو جزئی در دمای اتاق طبق استاندارد ASTM D412 C

Fig. 6. Conducting tensile test of RTV2 sample according to ASTM D412 C standard



شکل ۷. نمودار تنش کرنش تک جهته سیلیکون شبکه ای شونده دو جزئی در دمای اتاق پیش بینی شده با مدل های هایپرالاستیک

Fig. 7. RTV2 uniaxial strain stress diagram predicted by hyperelastic models

جدول ۱. ضرایب مواد هایپرالاستیک

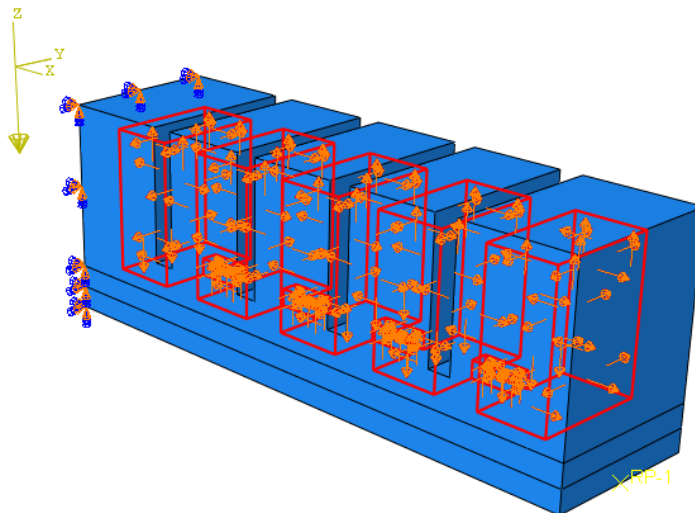
Table 1. Coefficients of hyperelastic materials

مقدار	ضرایب	ماده
۰/۲۲۷۷	μ_1	دراگون اسکین ۳۰
۳/۰۷۸	α_1	
-۱۰/۵۱	μ_1	پلی اورتان ترموپلاستیک (۹۰ و ۰)
۲۸/۶۲	μ_2	
۲/۴۵	α_1	
-۴/۷۵	α_2	
۰/۰۰۲۱۶۴	μ_1	اکوفلکس ۳۰
۰/۲۱۸۱	μ_2	
۳/۴۹۴۳	α_1	
-۱/۴۶۰۱	α_2	
۰/۰۷۱۱	C_{10}	سیلیکون شبکه ای شونده دو جزئی در دمای اتاق
۰/۰۱۱۱	C_{20}	
-۰/۰۰۰۱۵	C_{30}	

جدول ۲. ابعاد هندسی عملگر

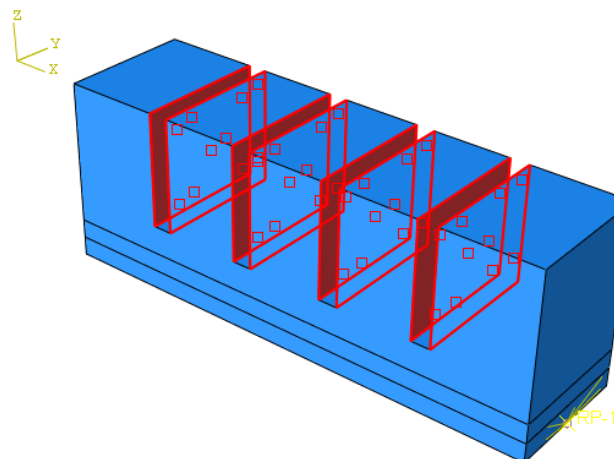
Table 2. Geometric dimensions of the actuator

مقدار	نام پارامتر
۱۰	b (mm)
۱۳	a (mm)
۱	h (mm)
۲	t_b (mm)
۸	l (mm)
۲	l_g (mm)
۲	t (mm)
۳	s (mm)
۵	n



شکل ۸. اعمال فشار هوا به دیواره داخلی عملگر با در نظر گرفتن نیروی گرانش زمین و مقید کردن انتهای عملگر

Fig. 8. Applying air pressure to the inner wall of the actuator, taking into account the earth's gravity and fixing the end of the actuator



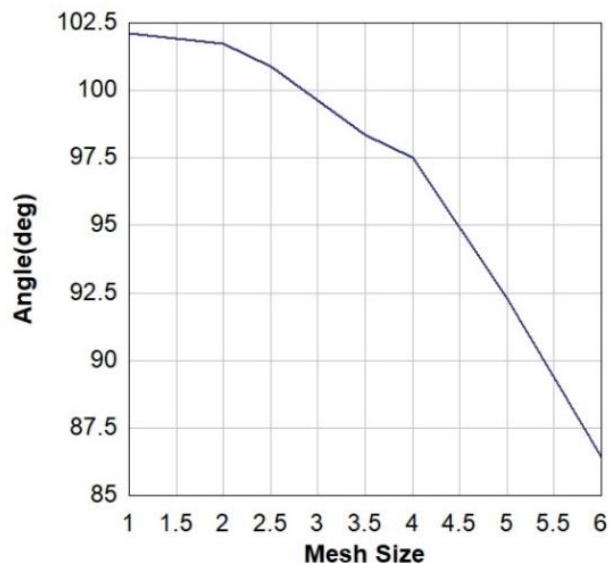
شکل ۹. تعریف تماس بدون لغزش بین دیواره‌های بیرونی عملگر

Fig. 9. Definition of non-slip contact between the outer walls of the actuator

پس از بررسی استقلال از شبکه مطابق شکل ۱۰، اجزای عملگر با مش چهاروجهی هرمی^۴ و المان به اندازه ۲ میلی متر مش بندی شده اند. المان *C3D10H* به تعداد ۹۳۶۱ برای بخش الاستومر و *S3* به تعداد ۳۶۴ برای لایه غیر قابل کشش استفاده شده است. نمودار زاویه خمش عملگر با فاصله بین محفظه ۲ میلی متر در فشارهای مختلف تحریک در شکل ۱۱ با روش تجربی و روش تحلیلی مقایسه گردیده است.

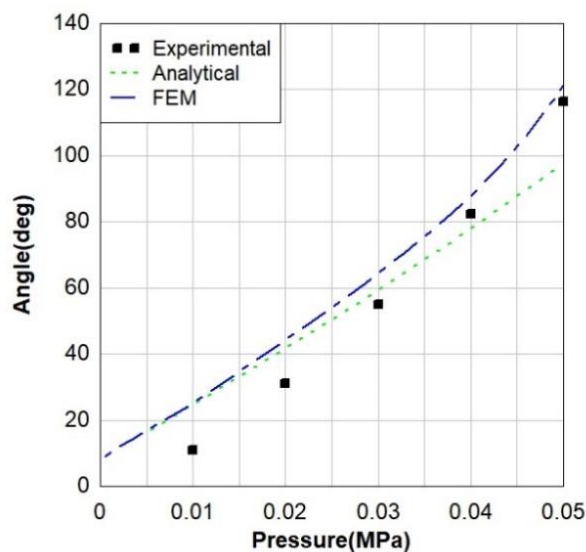
نقطه ایجاد شد. بدنه اصلی عملگر و لایه‌های اول و دوم به صورت تو پر^۱ و لایه کاغذ به صورت پوسته^۲ و با مدول یانگ ۶/۵ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ تعریف شده‌اند. در این بخش از دراگون اسکین ۳۰ برای ساخت قسمت اصلی و لایه‌های اول و دوم عملگر استفاده شده است. دیواره‌ها نسبت به هم به صورت تماس با خود^۳ و بدون لغزش در تماس در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۹).

-
- 1 Solid
 - 2 Skin
 - 3 Self Contact



شکل ۱۰. تاثیر اندازه مش در زاویه خمش عملگر

Fig. 10. The effect of mesh size on the bending angle of the actuator



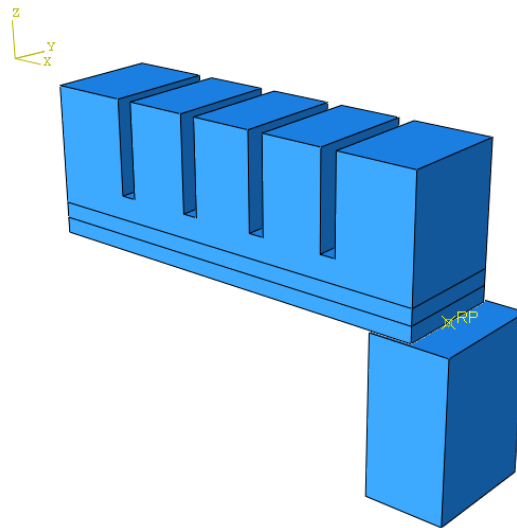
شکل ۱۱. مقایسه نتایج حاصل از روش‌های المان محدود، روش تحلیلی [۷] و آزمون تجربی [۷]

Fig. 11. Comparison of the results of finite element methods, analytical method [7] and experimental test [7]

می‌رسد، مقدار خمش حاصل از روش المان محدود به مقدار ۴/۰۶ درصد بیشتر از زاویه خمش بدست آمده توسط روش تجربی می‌شود. در روش المان محدود، میزان زاویه خمش عملگر تا فشار ۴۰ کیلو پاسکال به صورت خطی و بعد از آن به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج مدل تحلیلی ارائه شده توسط ژو لیو^۱ و همکارانش [۷] در تغییر شکل‌های کوچک

همچنین به منظور شبیه‌سازی نیروی نوک عملگر، از یک جسم صلب به عنوان نیروسنج استفاده شد (شکل ۱۲).

با توجه به شکل ۱۱، مشخص می‌شود که زاویه خمش پیشبینی شده با روش المان محدود در فشارهای کمتر از ۴۰ کیلو پاسکال از روش تجربی بیشتر است. زمانی که فشار هوای ورودی به عملگر به ۵۰ کیلو پاسکال



شکل ۱۲. شبیه سازی نیروی نوک عملگر

Fig. 12. Actuator tip force simulation

جدول ۳. بیشینه زاویه خمش عملگر

Table 3. The maximum bending angle of the actuator

فاصله بین محفظه‌ها (l_g)	بیشینه زاویه خمش (درجه)
۱ میلی متر	۱۲۸/۱
۱/۵ میلی متر	۱۲۴/۶۴
۲ میلی متر	۱۲۱/۲۳
۲/۵ میلی متر	۱۱۷/۶۶
۲/۸ میلی متر	۱۱۵/۳۶
۳/۵ میلی متر	۱۰۹/۸۶
۴ میلی متر	۱۰۷/۴۶

۵- نتایج

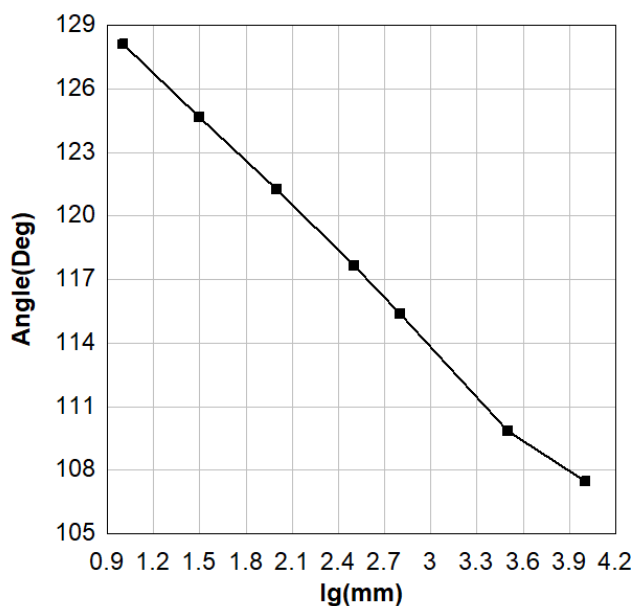
۵-۱- بررسی تاثیر پارامترهای هندسی و مادی بر زاویه خمش عملگر

در این بخش برای بدست آوردن حالت هندسی بهینه، تاثیر تغییرات پارامترهای هندسی مهم بر رفتار خمشی عملگر ساخته شده بادراگون اسکین ۳۰ با استفاده از بهینه‌ترین مدل هایپرالاستیک بدست آمده در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفته است.

در جدول ۳، بیشترین زوایای خمش عملگر با فاصله بین محفظه‌های مختلف در فشار ۵۰ کیلوپاسکال آورده شده است.

به نتایج مدل المان محدود نزدیک‌تر می‌باشد و در تغییر شکل‌های بزرگ به دلیل ماهیت غیرخطی رفتار ماده فاصله نتایج پیشبینی شده بیشتر می‌گردد. به عنوان مثال خطای مدل تحلیلی با مدل المان محدود در فشار ۵۰ کیلو پاسکال در حدود ۲۰ درصد است.

درکل همان طور که مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین نتایج بدست آمده از مدل تحلیلی، تجربی و مدل شبیه‌سازی شده برقرار است که نشان دهنده صحت مدل المان محدود شبیه‌سازی شده است.



شکل ۱۳. تاثیر فاصله بین محفظه‌ها بر زاویه خمش عملگر

Fig. 13. The effect of the distance between the chambers on the bending angle of the actuator

دوم مختلف در شکل ۱۵- الف و عملگری با ضخامت لایه اول و دوم ۱/۵ میلی متر و تعداد محفظه‌های متفاوت (۳، ۴ و ۵ محفظه) در شکل ۱۵- ب نشان داده شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از بررسی تغییرات ضخامت لایه‌های اول و دوم و تعداد محفظه‌ها نشان می‌دهد با کاهش ضخامت لایه‌های اول و دوم و افزایش تعداد محفظه‌ها، عملگر با زاویه بیشتری خم شده است. همچنین این خمش در فشارهای بالاتر بیشتر می‌گردد به طوری که برای عملگر با ضخامت لایه ۱/۵ میلی متر و تعداد محفظه ۶، زاویه خمش عملگر به ۱۸۰ درجه می‌رسد.

تاثیر ضخامت دیواره جانبی محفظه‌ها بر زاویه خمش عملگر در شکل ۱۶ نشان داده شده است. دیده می‌شود با کاهش ضخامت دیواره جانبی محفظه‌ها، زاویه خمش بیشتر می‌شود.

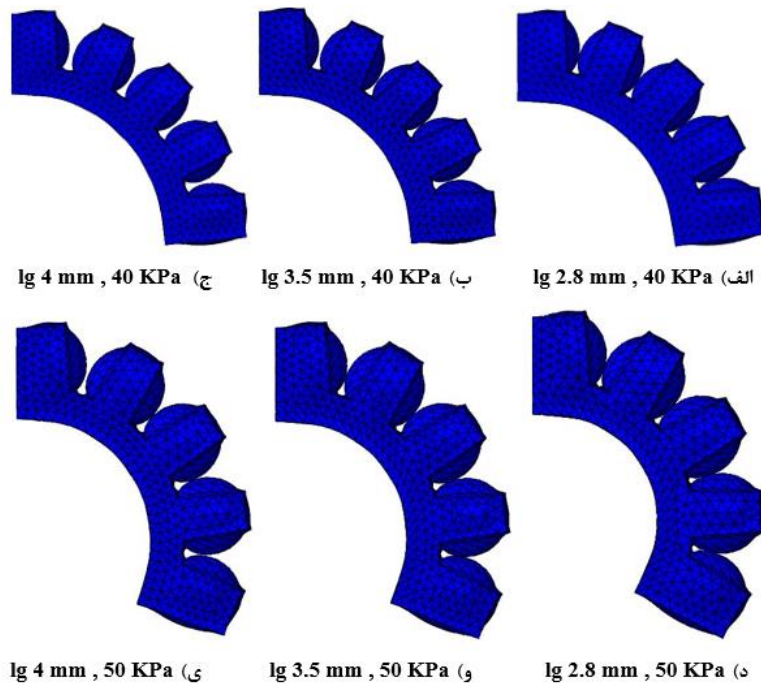
در ادامه اثر سطح مقطع عملگر بر عملکرد خمشی آن نیز بررسی شده است. از دو شکل مربع و مثلث به عنوان سطح مقطع عملگر مطابق شکل ۱۷ استفاده شده است.

با توجه به شکل ۱۸، در فشار ۵۰ کیلو پاسکال، عملگر ساخته شده با سطح مقطع مربع به میزان ۳۲/۳ درصد بیشتر از عملگر با سطح مقطع مثلث

ملاحظه می‌شود که با کاهش فاصله بین محفظه، برخورد دیواره خارجی محفظه‌ها با هم بیشتر شده بنابراین بیشینه زاویه خمش عملگر نیز افزایش می‌یابد. در شرایطی که فاصله بین محفظه‌ها افزایش پیدا کند، با انبساط دیواره خارجی محفظه‌ها، فشار وارده به محفظه‌ها از طرف محفظه‌های کناری کمتر شده و در نتیجه زاویه خمش عملگر کاهش می‌یابد. در شکل ۱۳، نمودار تاثیر فاصله بین محفظه‌ها بر زاویه خمش عملگر در فشار تحریک ۰ تا ۵۰ کیلو پاسکال رسم شده است.

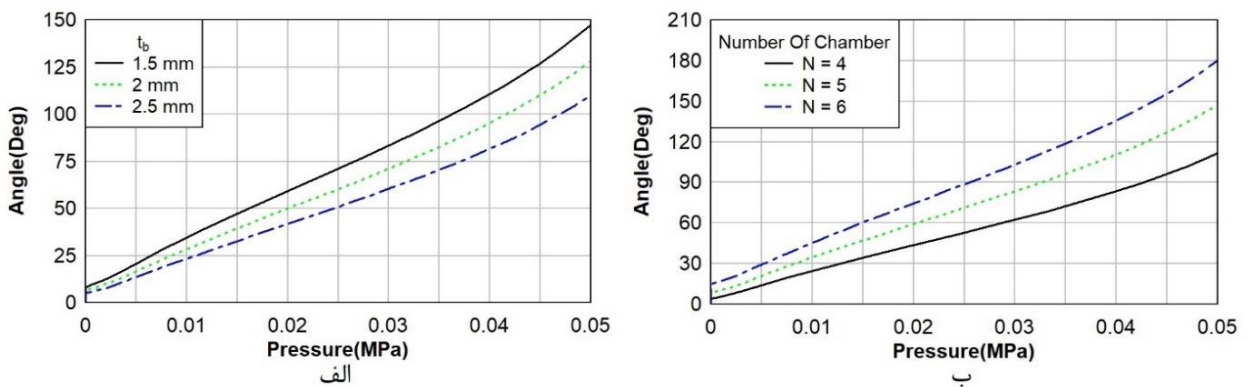
در شکل ۱۴، تغییر شکل عملگر در فشارهای مختلف تحریک را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در فشارهای بالا، تغییر فاصله بین محفظه‌ها تاثیر آنچنانی بر میزان خمش عملگر ندارد. در واقع، مقدار خمش عملگر به دو عامل میزان انبساط دیواره‌های بیرونی محفظه‌ها و افزایش طول لایه‌های زیرین عملگر بستگی دارد. با ثابت بودن وضعیت دیواره‌های بیرونی محفظه‌ها، میزان خمش عملگر متأثر از افزایش ناچیز طول لایه‌های زیرین تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

زاویه خمش عملگر با تعداد ۵ محفظه در ضخامت‌های لایه اول و



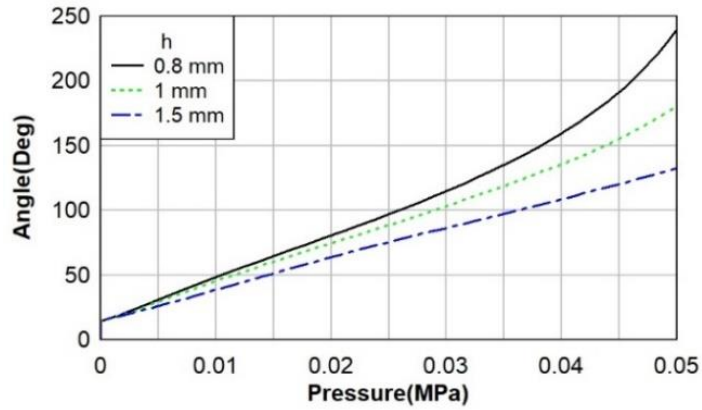
شکل ۱۴. میزان خمش عملگر در فشار ۴۰ کیلوپاسکال با فاصله l_g الف) ۲/۸ میلی متر ب) ۳/۵ میلی متر ج) ۴ میلی متر. در فشار ۵۰ کیلو پاسکال با فاصله l_g د) ۲/۸ میلی متر و) ۳/۵ میلی متر ی) ۴ میلی متر

Fig. 14. The bending of the actuator at a pressure of 40 kPa with a distance of l_g a) 2.8 mm b) 3.5 mm c) 4 mm. at a pressure of 50 kPa with a distance of l_g d) 2.8 mm f) 3.5 mm j) 4 mm



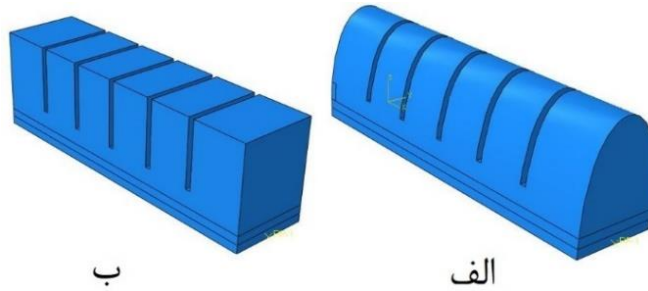
شکل ۱۵. زاویه خمش عملگر الف) برحسب ضخامت لایه‌های اول و دوم ب) برحسب تعداد محفظه‌ها

Fig. 15. The bending angle of the actuator a) according to the thickness of the first and second layers b) according to the number of chambers



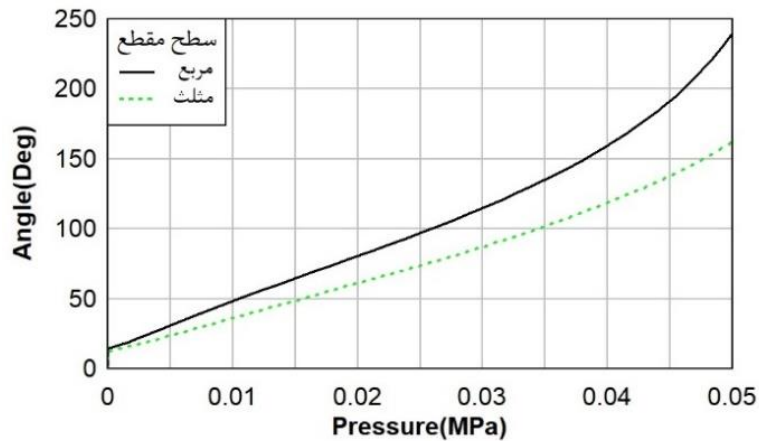
شکل ۱۶. تاثیر ضخامت دیواره جانبی محفظه‌ها بر زاویه خمش عملگر

Fig. 16. The effect of the thickness of the side walls of the chambers on the bending angle of the actuator



شکل ۱۷. شکل سطح مقطع عملگر الف) مثلث ب) مربع

Fig. 17. Actuator cross-sectional shape of a) triangle b) square



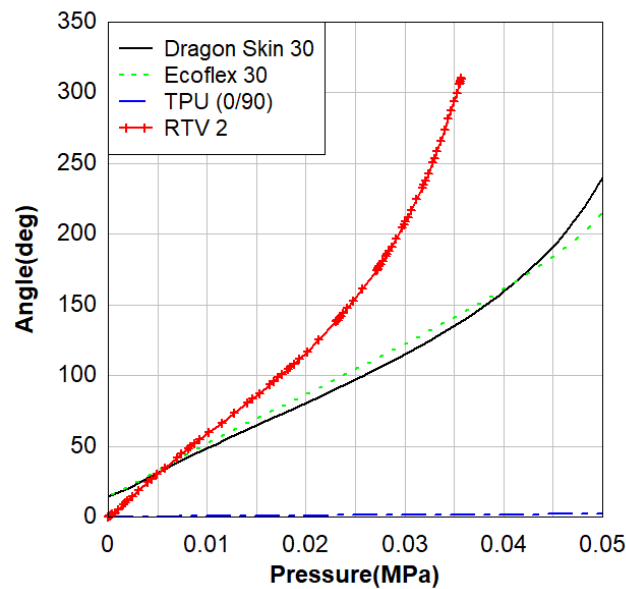
شکل ۱۸. تاثیر شکل سطح مقطع عملگر بر زاویه خمش

Fig. 18. The effect of the shape of the cross section of the actuator on the bending angle

جدول ۴. مشخصات هندسی و موادی عملگر نرم

Table 4. Geometric and material characteristics of the soft actuator

مقدار	نام پارامتر
۱۰	b (mm)
۱۳	a (mm)
۰/۸	h (mm)
۱/۵	t_b (mm)
۸	l (mm)
۱	l_g (mm)
۲	t (mm)
۳	s (mm)
۶	N
مربع	سطح مقطع



شکل ۱۹. تاثیر مواد مختلف بر خمش عملگر

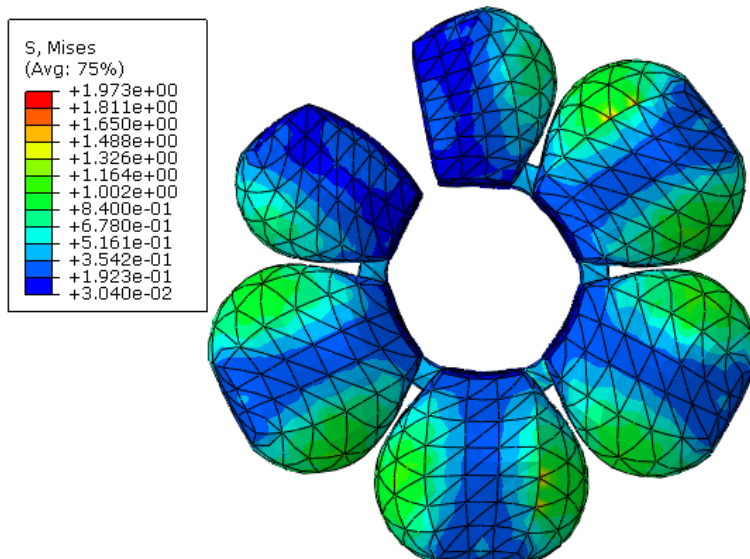
Fig. 19. The effect of different materials on the bending of the actuator

و زاویه خمش این چهار عملگر با پارامترهای هندسی ذکر شده در جدول ۴ مورد بررسی قرار گرفته و در شکل ۱۹ رسم شده‌اند.

عملگر ساخته شده با دراگون اسکین ۳۰، اکوفلکس ۳۰ و پلی‌اورتان ترموپلاستیک (۹۰ و ۰) به ترتیب به مقدار زاویه خمشی ۲۴۰/۵، ۲۱۶/۳ و ۲/۰۲ درجه در فشار ۵۰ کیلو پاسکال می‌رسد. لیکن عملگر با ماده سیلیکون شبکه ای شونده دو جزئی در دمای اتاق به اندازه ۳۱۱/۴۷ درجه در فشار هوای ۴۰ کیلو پاسکال خم می‌شود. ماده سیلیکون شبکه ای شونده دو جزئی

خم می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از بررسی دو سطح مقطع مربع و مثلث، هر چه مساحت سطح داخلی محفظه‌ها که تحت فشار هوا قرار گرفته‌اند بیشتر باشد، عملگر زاویه خمش بیشتری بدست می‌دهد.

برای بررسی نوع مواد سازنده عملگر بر رفتار خمشی آن چهار نوع ماده هایپرالاستیک دراگون اسکین ۳۰، پلی‌اورتان ترموپلاستیک (۰ و ۹۰)، اکوفلکس ۳۰ و سیلیکون شبکه ای شونده دو جزئی در دمای اتاق به عنوان مواد سازنده بدنه اصلی عملگر و لایه‌های اول و دوم آن در نظر گرفته شده



شکل ۲۰. تنش فون میسز در سطح داخلی محفظه‌های عملگر در فشار ۳۵/۸ کیلو پاسکل با ماده سیلیکون شبکه ای شونده دو جزئی در دمای اتاق و مشخصات هندسی ذکر شده در جدول ۴

Fig. 20. Von Mises stress on the inner surface of the actuator chambers at a pressure of 35.8 kPa with RTV2 material and the geometric characteristics listed in Table 4

۵-۳- نیروی نوک عملگر

بررسی پارامترهای هندسی عملگر در بخش‌های قبل نشان می‌دهد که عملگر با مشخصات بیان شده در جدول ۵، بیشترین نیروی نوک عملگر را دارد.

در این بخش، نیروی حاصل در نوک عملگر با مواد ذکر شده بدست آمده و در شکل ۲۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که بغیر ماده پلی‌اورتان ترموپلاستیک (۹۰+۰)، بقیه مواد نیروی نوک عملگر بیشتری بدست می‌دهند به طوری که در فشار ۵۰ کیلوپاسکال نیروی ایجاد شده در نوک عملگر به ۱/۳۸ تا ۱/۵ نیوتن نیز می‌رسد. همچنین دیده می‌شود که عملگر با دراگون اسکین ۳۰ نیروی نوک عملگر بیشتری نسبت به بقیه دارد.

۶- نتیجه‌گیری

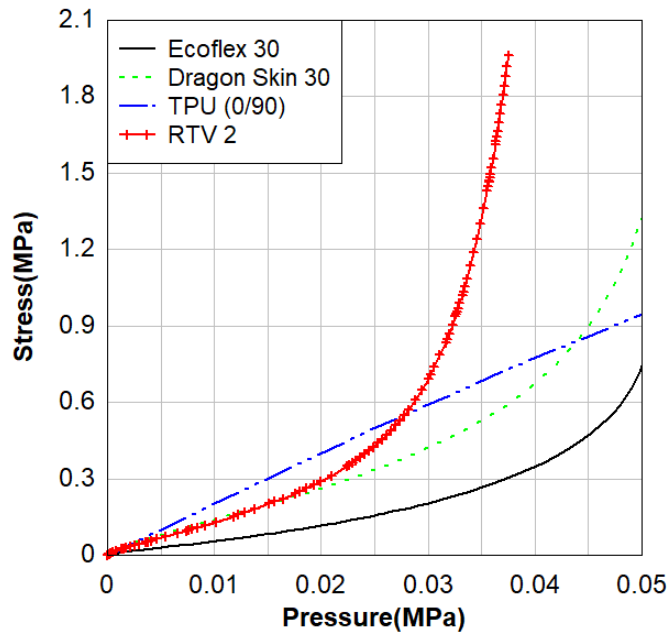
در این مطالعه عملکرد خمشی عملگر نرم ساختار شبکه‌ای با تحریک پنوماتیکی مورد بررسی قرار گرفت. مدل المان محدود ایجاد شده به کمک

در دمای اتاق نسبت به سه ماده دیگر سفتی کمتری دارد در نتیجه با کاهش سفتی ماده‌های پیرالاستیک، زاویه خمش بیشتری بدست می‌آید.

۵-۲- تنش وارد بر سطح داخلی محفظه‌ها

به منظور بررسی تنش‌های ایجاد شده در سطح داخلی محفظه‌های عملگر نرم ساختار شبکه‌ای، در شکل ۲۰ تنش سطح داخلی عملگر و در شکل ۲۱ تنش سطح داخلی عملگر بر حسب فشار هوای تحریک عملگر با چهار ماده‌های پیرالاستیک ذکر شده، نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهند که در مدل ساخته شده با ماده سیلیکون شبکه ای شونده دو جزئی در دمای اتاق، بیشینه تنش ایجاد شده از اعمال فشار هوا و خمش عملگر به صورت غیر خطی افزایش پیدا کرده و در قسمت دیواره جانبی محفظه‌ها و محل عبور هوا به محفظه دیگر اعمال می‌شود. در نتیجه در فشار ۳۷/۵ کیلوپاسکال، تنش در سطح داخلی این عملگر به ۱/۹۶ مگاپاسکال می‌رسد.



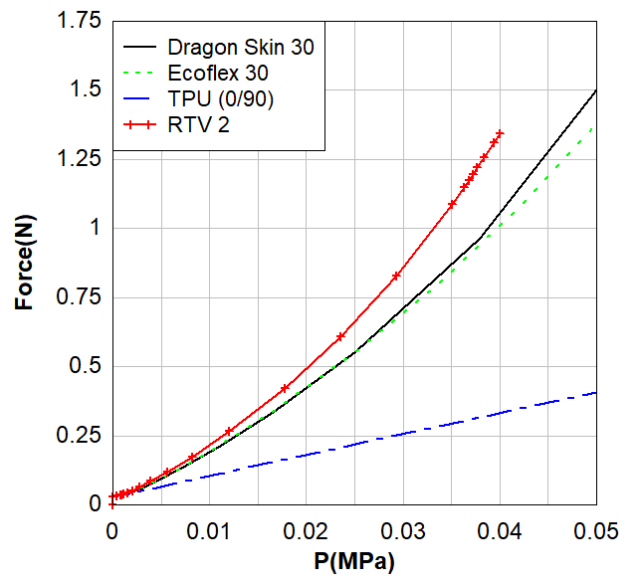
شکل ۲۱. بیشینه تنش فون میسز ایجاد شده در سطح داخلی محفظه‌های عملگر

Fig. 21. The maximum Von Mises stress created on the inner surface of the actuator chambers

جدول ۵. مشخصات هندسی و موادی عملگر نرم

Table 5. Geometric and material characteristics of the soft actuator

مقدار	نام پارامتر
۱۰	b (mm)
۱۳	a (mm)
۱	h (mm)
۲/۵	t_b (mm)
۸	l (mm)
۱	l_g (mm)
۲	t (mm)
۳	s (mm)
۴	N



شکل ۲۲. نیروی نوک عملگر با توجه به مواد مختلف سازنده

Fig. 22. The tip force of the actuator according to different materials

۷- فهرست علائم

تعداد پارامترهای مدل هایپیرالاستیک	n
لایتغیر ماتریس کشیدگی	I
ضرایب مدل یئو	C_{30}, C_{20}, C_{10}
طول تغییر شکل یافته. m	l
طول اولیه m .	L
تابع چگالی انرژی کرنشی	W
پارامترهای اولیه برازش مدل آگدن	μ_i و α_i
کشش‌های اصلی	λ
تانسور تنش کوشی. Pa	σ

منابع

- [1] J. Li, M. Sun, Z. Wu, Design and fabrication of a low-cost silicone and water-based soft actuator with a high load-to-weight ratio, *Soft Robotics*, 8(4) (2021) 448-461.
- [2] J. Walker, T. Zidek, C. Harbel, S. Yoon, F.S. Strickland, S. Kumar, M. Shin, Soft robotics: A review of recent developments of pneumatic soft actuators, in: *Actuators*, MDPI, 9 (1) (2020).

نتایج تجربی و تحلیلی مقایسه و اعتبارسنجی شد. سپس به کمک این مدل، تاثیر پارامترهای هندسی از جمله ضخامت دیواره‌های محفظه‌ها، فاصله بین محفظه‌ها، ضخامت لایه‌های پایینی اول و دوم و تعداد محفظه‌ها بر زاویه خمش و نیروی حاصل در نوک عملگر مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی اثر مواد سازنده، نمودار تست کشش دراگون اسکین ۳۰، پلی‌اورتان ترموپلاستیک (۹۰ و ۰)، اکوفلکس ۳۰ و سیلیکون شبکه ای شونده دو جزئی در دمای اتاق با استفاده از تست کشش تک جهت بر اساس استاندارد ASTM D412 C بدست آمد. در ادامه ۵ مدل هایپیرالاستیک نئوهوکین، یئو سه پارامتری، آگدن ۱، آگدن ۲ و مونی ریولین بسط داده شدند و بر نمودارهای تست تنش کرنش برازش گردیدند تا بهترین مدل برای پیش بینی رفتار این مواد بدست آید.

طبق نتایج بدست آمده، کاهش ضخامت دیواره‌ها، فاصله بین محفظه‌ها و ضخامت لایه‌های پایینی باعث افزایش زاویه خمش و افزایش ضخامت لایه‌های پایینی باعث افزایش نیروی نوک عملگر می‌شود. همچنین در بررسی ماده سازنده عملگر مشاهده گردید، سختی ماده هایپیرالاستیک رابطه عکس با زاویه خمش آن دارد. در نهایت بهترین حالت زاویه خمش عملگر به مقدار ۳۱۱/۴۸ درجه در فشار ۳۸ کیلو پاسکال و نیروی ۱/۵ نیوتن در فشار ۵۰ کیلو پاسکال بدست آمد.

- [13] J. Mersch, M. Bruns, A. Nocke, C. Cherif, G. Gerlach, High-Displacement, Fiber-Reinforced Shape Memory Alloy Soft Actuator with Integrated Sensors and Its Equivalent Network Model, *Advanced Intelligent Systems*, 3(7) (2021) 2000221.
- [14] A. Kanan, M. Kaliske, Numerical modelling of electro-viscoelasticity for fibre reinforced electro-active polymers, *PAMM*, 20(1) (2021) e202000118.
- [15] W. Sun, S. Schaffer, K. Dai, L. Yao, A. Feinberg, V. Webster-Wood, 3D printing hydrogel-based soft and biohybrid actuators: a mini-review on fabrication techniques, applications, and challenges, *Frontiers in Robotics and AI*, 8 (2021) 673533.
- [16] B. Arifvianto, T.N. Iman, B.T. Prayoga, R. Dharmastiti, U.A. Salim, M. Mahardika, Tensile properties of the FFF-processed thermoplastic polyurethane (TPU) elastomer, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(5) (2021) 1709-1719.
- [17] M.S. Xavier, A.J. Fleming, Y.K. Yong, Finite element modeling of soft fluidic actuators: Overview and recent developments, *Advanced Intelligent Systems*, 3(2) (2021) 2000187.
- [18] Y. Sun, Q. Zhang, X. Chen, H. Chen, An optimum design method of pneu-net actuators for trajectory matching utilizing a bending model and ga, *Mathematical Problems in Engineering*, 2019(1) (2019).
- [19] Z. Wang, Y. Torigoe, S. Hirai, A prestressed soft gripper: design, modeling, fabrication, and tests for food handling, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(4) (2017) 1909-1916.
- [20] C. Zheng, Design and simulation of a pneumatic actuator bending soft robotics based on 3D printing, Marshall University, (2018). Theses, Dissertations and Capstones. 1243.
- [21] L. Treloar, The elasticity and related properties of rubbers, *Reports on progress in physics*, 36(7) (1973) 755.
- [22] M. Destrade, G. Saccomandi, I. Sgura, Methodical fitting for mathematical models of rubber-like materials, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical*,
- [3] H.B. Khaniki, M.H. Ghayesh, R. Chin, M. Amabili, Hyperelastic structures: A review on the mechanics and biomechanics, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 148 (2023) 104275.
- [4] Y. Chen, Z. Yang, Y. Wen, A soft exoskeleton glove for hand bilateral training via surface EMG, *Sensors*, 21(2) (2021) 578.
- [5] C. Tawk, G. Alici, Finite element modeling in the design process of 3D printed pneumatic soft actuators and sensors, *Robotics*, 9(3) (2020) 52.
- [6] Z. Wang, P. Polygerinos, J.T. Overvelde, K.C. Galloway, K. Bertoldi, C.J. Walsh, Interaction forces of soft fiber reinforced bending actuators, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(2) (2016) 717-727.
- [7] Z. Liu, F. Wang, S. Liu, Y. Tian, D. Zhang, Modeling and analysis of soft pneumatic network bending actuators, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 26(4) (2020) 2195-2203.
- [8] S. Sridar, P.H. Nguyen, M. Zhu, Q.P. Lam, P. Polygerinos, Development of a soft-inflatable exosuit for knee rehabilitation, in: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2017, pp. 3722-3727.
- [9] J. Fras, K. Althoefer, Soft fiber-reinforced pneumatic actuator design and fabrication: Towards robust, soft robotic systems. in: *Towards Autonomous Robotic Systems: 20th Annual Conference, TAROS 2019*, London, UK, July 3–5, 2019, ppp.103-114.
- [10] G. Alici, T. Canty, R. Mutlu, W. Hu, V. Sencadas, Modeling and experimental evaluation of bending behavior of soft pneumatic actuators made of discrete actuation chambers, *Soft robotics*, 5(1) (2018) 24-35.
- [11] W. Chen, C. Xiong, C. Liu, P. Li, Y. Chen, Fabrication and dynamic modeling of bidirectional bending soft actuator integrated with optical waveguide curvature sensor, *Soft robotics*, 6(4) (2019) 495-506.
- [12] F. Aghaei, H. Bahador, High sensitivity metal-insulator-metal sensor based on ring-hexagonal resonator with a couple of square cavities connected, *Physica Scripta*, 97(6) (2022).

- [27] M. Rackl, Curve fitting for Ogden, Yeoh and polynomial models, in: ScilabTEC Conference, 2015, pp. 1-11.
- [28] L. Papula, Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler-und Ausgleichsrechnung: mit 550 Abbildungen, zahlreichen Beispielen aus Naturwissenschaft und Technik sowie 295 Übungsaufgaben mit ausführlichen Lösungen, Springer Vieweg, 2016.
- [29] P. Polygerinos, S. Lyne, Z. Wang, L.F. Nicolini, B. Mosadegh, G.M. Whitesides, C.J. Walsh, Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation, in: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2013, pp. 1512-1517.
- [30] S.H.K.B.a.J. Mahmud, Tensile Properties of Silicone Rubber via. Experimental and Analytical Method Adapting Hyperelastic Constitutive Models, Journal of Engineering and Applied Sciences, 12(6 SI) (2017) 7703 - 7707.
- Physical and Engineering Sciences, 473(2198) (2017) 20160811.
- [23] R.W. Ogden, Large deformation isotropic elasticity—on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids, Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 326(1567) (1972) 565-584.
- [24] H.B. Khaniki, M.H. Ghayesh, R. Chin, M. Amabili, A review on the nonlinear dynamics of hyperelastic structures, Nonlinear Dynamics, 110(2) (2022) 963-994.
- [25] R.S. Rivlin, Large elastic deformations of isotropic materials IV. Further developments of the general theory, Philosophical transactions of the royal society of London. Series A, Mathematical and physical sciences, 241(835) (1948) 379-397.
- [26] O.H. Yeoh, Some forms of the strain energy function for rubber, Rubber Chemistry and technology, 66(5) (1993) 754-771.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Esmalipour, M. Ajri, Modeling and Analysis of the Bending Behavior of Soft Pneumatic Network Actuator with Hyperelastic Models, Amirkabir J. Mech Eng., 55(8) (2023) 1021-1042.

DOI: 10.22060/mej.2023.22104.7567



