ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2023;23(04):235-247

Behavior Modeling of Pneumatic Soft Bending Actuators in Free and Contact Conditions

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Akbari S[1],
Namdar Ghalati M H[1],
Ghafarirad H[1]*,
Rezaei S M[1]

How to cite this article
Akbari S, Namdar M H, Ghafarirad H, Rezaei S M. Behavior Modeling of Pneumatic Soft Bending Actuators in Free and Contact Conditions. Modares Mechanical Engineering. 2023;23(04):235-247.

ABSTRACT

Pneumatic Soft bending actuators as safe and highly adaptable robots are being considered by researchers, such that they become an ideal choice for making devices that interact more with humans. These advantages come along with several disadvantages. Their great adaptability is provided by their high degrees of freedom, and consequently, it makes the modeling a significant challenge for researchers. In this paper, the modeling of a soft fiber-reinforced bending actuator that is in contact with the environment has been conducted by utilizing the finite rigid element method. This method provides a context within which the modeling theories of traditional rigid robots, such as the Denavit-Hartenberg method, become usable for a soft continuum actuator. Therefore, in the following, resorting to this theory, the static and dynamic behavior of a soft actuator under the effect of the external load has been investigated and compared with the empirical results derived from a fabricated actuator. The results show a minimum accuracy of 9 percent, although being as simple as can be used for other purposes like implementing control systems based on that.

Keywords Soft Robot, Soft Bending Actuator, Constrained Static and Dynamic Modeling, Finite Rigid Element Method

[1] Mecahnical Engineering Department, Amirkabir University of Technoogy, Tehran, Iran

**Correspondence*
Address Mecahnical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, No. 350, Hafez Ave, Valiasr Square, Tehran, Iran
Ghafarirad@aut.ac.ir

Article History
Received: August 29, 2022
Accepted: January 04, 2023
ePublished: April 25, 2023

CITATION LINKS

1- Design, fabrication and control of soft robots. Nature 2- Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges 3- a perspective—current trends and prospects for the future. Soft robotics 4- Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation 5- A soft wearable robot for the shoulder 6- Soft printable pneumatics for wrist rehabilitation. InConverging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation II .7- Bending analysis and contact force modeling of… 8- Soft robots based on dielectric elastomer actuators 9- Toward task autonomy in robotic cardiac ablation 10- Examining the coiling motion of …11- Novel bending and helical extensile/contractile pneumatic artificial muscles inspired by elephant trunk. Soft robotics 12- Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length 13- Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation 14- Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators 15- A computationally efficient dynamical model of… 16- Static modeling of soft reinforced bending actuator considering external force constraints 17- Discrete Cosserat approach for soft robot dynamics: A new piece-wise constant strain model with torsion and shears 18- A. Continuum analysis of a soft bending actuator dynamics. Mechatronics.19- A. Dynamic Finite-Element analysis of a soft bending actuator. Mechatronics. 20- Shape estimation and control of a soft continuum robot under external payloads 21- Adaptive neuro-fuzzy modeling of a soft finger-like actuator for cyber-physical industrial

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مدل‌سازی رفتار عملگرهای نرم خمشی نیوماتیکی در شرایط آزاد و تعامل با محیط

سپیده اکبری[۱]، محمد هادی نامدار قلاتی[۱]، حامد غفاری راد[۱*]، سید مهدی رضاعی[۱]

[۱] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

عملگرهای نرم خمشی نیوماتیکی به عنوان عملگرهایی با ایمنی و قابلیت تطبیق‌پذیری بالا، بسیار قابل توجه محققان قرار گرفته‌اند، به طوری که آن‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای ساخت تجهیزاتی که تعامل بالایی با انسان‌ها دارند تبدیل کرده‌است. این ویژگی‌های مثبت، مشکلاتی را نیز به همراه دارد. تطبیق-پذیری بالای ربات‌های نرم به واسطه درجات آزادی زیاد آن‌ها فراهم شده و بدین ترتیب مدل‌سازی آن‌ها را به چالشی جدی برای پژوهشگران تبدیل کرده‌است. در این مقاله با به‌کارگیری روش اجزای صلب محدود، به مدل‌سازی یک عملگر نرم خمشی با رشته‌های تقویت‌کننده که در تعامل با محیط قرار دارد، پرداخته شده‌است. استفاده از روش معرفی شده این امکان را فراهم آورده تا بتوان برای عملگرهای نرم پیوسته، روش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی ربات-های صلب متداول مانند روش دناویت-هارتنبرگ را به کار گرفت. بنابراین در ادامه به کمک همین تئوری رفتار استاتیکی و دینامیکی عملگر نرم در حالت آزاد و در حضور نیروی خارجی تحلیل و بررسی شده و در نهایت با نتایج تجربی بدست آمده از یک عملگر ساخته شده، مقایسه شده‌است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که روش پیشنهادی در عین اینکه مدل ساده‌ای را برای مقاصد بعدی مانند پیاده‌سازی کنترل‌کننده ارائه می‌کند، دارای خطای مدل‌سازی کمتر از ۹ درصد می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ربات نرم، عملگر نرم خمشی، مدل‌سازی استاتیکی و دینامیکی مقید، روش اجزای صلب محدود

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

*نویسنده مسئول: Ghafarirad@aut.ac.ir

۱- مقدمه

تعامل ایمن بین ربات و محیط، موضوع اساسی در دانش رباتیک جدید است. از این رو ربات‌های نرم موضوع تحقیقات بسیاری از پژوهشگران در سال‌های اخیر بوده‌اند. دو دهه تحقیقات بر روی ربات‌های نرم با رشد روزافزونی همراه بوده‌است؛ به‌طوری که امروزه شاهد استفاده از این ربات‌ها در بخش‌هایی از صنایع بسته‌بندی و اتوماسیون، ساخت تجهیزات جراحی و پزشکی، وسایل توان‌بخشی و حتی ربات‌های یاری‌رسان در امور روزمره‌ی انسان‌ها هستیم.[1,2] ربات نرم به ربات‌هایی اطلاق می‌شود که به جای مواد صلب، عمدتا از مواد نرم در ساختار آن‌ها استفاده شده‌است. به بیان پژوهشگران، موادی که دارای مدول یانگ در بازه 10^2 تا 10^6 پاسکال هستند، مواد نرم محسوب می‌شوند[3]. به دلیل امکان‌پذیر بودن تعامل نرم با محیط در این ربات‌ها، ایمنی، ابعاد کوچک، سبکی و قابلیت حمل ساده‌تر، شکل‌پذیری زیاد و در نتیجه تطبیق‌پذیری بهتر با محیط، یکی از مهم‌ترین کاربردهای ربات‌های نرم، ساخت وسایل و تجهیزات درمانی است. از سوی دیگر، افزایش جمعیت سالمند در جهان، تعداد سکته‌های قلبی و مغزی و در نتیجه تعداد بیماران حرکتی در سال‌های اخیر، موجب مورد توجه قرار گرفتن عملگرهای نرم به عنوان اجزای یاری‌رسان حرکتی در دستکش‌های پوشیدنی توان‌بخشی دست[4]، ربات‌های توان‌بخشی زانو، شانه[5]، مچ [6] و غیره شده‌است.

ربات‌های نرم را بر اساس نوع و عامل تحریک به دسته‌های مختلفی، مانند تحریک نیوماتیکی[7]، الکتریکی[8]، تاندونی[9] و ...، می‌توان تقسیم کرد. از این میان ربات‌هایی که دارای تحریک نیوماتیکی می‌باشند، به دلیل ویژگی‌هایی همچون ایمنی بیشتر، هزینه تحریک کمتر و توانایی اعمال نیروی بیشتر به نسبت سایر نمونه‌ها، مانند ربات‌های با تحریک الکتریکی، بیشتر مورد استقبال قرار گرفته‌اند.

معیار دیگر برای دسته‌بندی ربات‌های نرم، نحوه‌ی تغییر شکل آن‌ها می‌باشد. برخلاف ربات‌های سنتی که دارای قسمت‌های مجزایی شامل بازوها، مفصل‌ها و مجری نهایی می‌باشد، در ربات‌های نرم، عمدتا کل ساختار یکپارچه بوده و در یک قالب قرار می‌گیرد؛ بدین معنا که عملگرهای ربات در واقع همان بازوهای ربات نیز می‌باشند. بدین ترتیب نوع حرکت ربات وابسته به نحوه‌ی تغییر شکل اجزای نرم آن است. برخی از عملگرهای نرم دارای تغییرشکل‌های ساده‌تر مانند افزایش طول، خمش و یا پیچش[10] و برخی دارای حرکات پیچیده‌تر و ترکیبی[11] هستند. با این وجود، تغییرشکل خمشی را می‌توان در بسیاری از کاربردها از جمله بازوهای رباتیکی برای گیرش اشیا[12]، ربات‌های توان‌بخشی اجزای بدن و ... یافت. از این رو بررسی عملگرهای خمشی از اهمیت زیادی برخودار است. عملگرهای نرم خمشی را به طور عمده می-توان در دو دسته‌ی عملگرهای چندبخشی[13] و عملگرهای نرم تقویت‌شده قرار داد.

در این پژوهش از عملگر نرم خمشی تقویت‌شده با نخ که ساخت آسان و کم‌هزینه و همچنین عملکرد مناسبی برای توان‌بخشی دست از کار افتاده دارد، استفاده شده‌است و جنبه‌های مختلف طراحی، ساخت، مدل‌سازی و کنترل آن مورد بررسی قرار گرفته‌است. به طور طبیعی، نقطه‌ی قوت عملگرها و ربات‌های نرم یعنی تطبیق‌پذیری بالا، در مدل‌سازی و کنترل آن‌ها، به ویژه در زمانی که ربات در تعامل با محیط باشد، نقطه‌ی ضعف و محل چالش است. این انعطاف‌پذیری موجب شده‌است تا بسیاری از روش‌های مدل‌سازی و کنترل رباتیکی که برای ربات‌های صلب قابل استفاده بودند، در این ربات‌ها کاربردی نداشته؛ یا درصورت مورد استفاده بودن، نیاز به تغییرات و به‌روزرسانی‌های متعدد، و اعمال فرضیات ساده‌کننده داشته باشند.

شاید بتوان اولین پژوهش جدی صورت‌گرفته بر روی عملگرهای نرم خمشی با رشته‌های تقویت‌کننده را به پلیجرینوس و همکارانش در سال ۲۰۱۵ نسبت داد[14]. آن‌ها با به‌کارگیری تئوری نئوهوکین برای مدل‌سازی مواد هایپرالاستیک، به مدل‌سازی رفتار

ایستایی این عملگر در شرایط آزاد و بدون حضور نیروی خارجی پرداخته‌اند. با وجود آن که این پژوهش مبنای کار بسیاری از محققان قرار گرفته، اما به دلیل در نظر گرفتن فرض انحنای ثابت برای عملگر و عدم بررسی اثر نیروهای خارجی، دارای کاستی‌هایی می‌باشد.

در سال ۲۰۱۹، وانگ و همکارانش به بررسی رفتار دینامیکی همین عملگر تحت شرایط آزاد پرداخته‌اند[15]. در این پژوهش، با بهره‌گیری از روش انرژی اویلر-لاگرانژ و انتخاب زاویه خمش عملگر به عنوان مختصات تعمیم یافته، کار فشار داخلی، انرژی-های پتانسیل کشسانی و گرانشی و انرژی جنبشی عملگر محاسبه شده تا رابطه دینامیکی حاکم بر رفتار عملگر بدست‌آید. مجددا در این روش فرض بر آن بوده که عملگر دارای انحنای ثابت است؛ که به نظر فرض صحیحی در حضور نیروی وزن نمی‌باشد.

نامدار و همکارانش در پژوهشی به بررسی رفتار ایستایی عملگر در تعامل با محیط خارجی پرداخته‌اند [16]. در این پژوهش عملگر خمشی به عنوان یک تیر یک‌سرگیردار در نظر گرفته شده و با استفاده از تئوری تیر اویلر-برنولی تغییر شکل آن تحت اثر نیروهای خارجی مورد بررسی قرار گرفته‌است. استفاده از این روش اگرچه رفتار ایستایی عملگر در تعامل با محیط را به خوبی نشان می‌دهد، اما قابلیت استفاده برای بررسی رفتار دینامیکی عملگر را ندارد.

رندا و همکارانش با بهره‌گیری از روش کاسرات گسسته، مدلی برای رفتار دینامیکی عملگر با در نظر گرفتن اثرات خارجی پرداخته‌اند [17]. با وجود دقت بالای این روش، پیچیدگی و حجم محاسباتی بالا موجب شده‌است تا مدل ارائه شده، برای مقاصدی همچون کنترل کاربردی نباشد. غروی و همکارانش طی دو پژوهش به بررسی رفتار دینامیکی عملگر و آنالیز مودال آن بر پایه‌ی تئوری-های محیط پیوسته و همچنین المان محدود پرداخته‌اند[18,19]. به جز روش‌های تحلیلی ارائه‌شده، استفاده از روش‌های مبتنی بر تئوری‌های یادگیری ماشین نیز در این حوزه مرسوم است [20,21].

در این مقاله، برای جبران کمبودهای تحقیقات گذشته مبنی بر ارائه‌ی یک مدل جامع برای حالت استاتیکی و دینامیکی در حرکت آزاد و مقید، مدل‌سازی رفتار عملگر نرم خمشی در حضور نیروی خارجی، به روش تبدیل به ربات صلب تکه‌ای بررسی می‌شود. این روش از ترکیب نظریه‌های رباتیک صلب غیرخطی و اجزا محدود صلب غیرخطی استفاده می‌کند، بنابراین، ساختار معادلات رباتیک استاندارد را می‌توان برای سیستم‌های پیوسته‌ی غیرخطی استفاده کرد. این امر چندین مزیت نسبت به کارهای تحقیقاتی قبلی با این روش به شرح زیر دارد:

۱- در این روش نیازی به استفاده از فرض انحناثابت نیست.

۲- تأثیر نیروهای خارجی را می‌توان به راحتی بدون توجه به موقعیت نیروی اعمالی مورد مطالعه قرار داد. در واقع، اثر آن می‌تواند از طریق ماتریس ژاکوبین بدست آمده از سینماتیک ربات، به مفاصل منتقل شود.

۳- مدل دینامیکی حلقه بسته‌ی عملگر را می‌توان به آسانی با کمک فرمول استاندارد نیوتن-اویلر برای سیستم‌های رباتیکی بدست آورد. این قابلیت برای کاربردهای کنترل ربات مفید است و هزینه محاسباتی بالایی به همراه ندارد.

در ادامه‌ی این مقاله، در قسمت ۲، نحوه‌ی طراحی و ساخت عملگر نرم مورد بررسی، ذکر شده‌است. سپس در قسمت ۳ و ۴ به بیان جزییات و نحوه عملکرد روش تکه‌ای صلب در مدل‌سازی استاتیکی و دینامیکی عملگر در زمان تماس با محیط و اعمال نیروی خارجی پرداخته شده‌است. در قسمت ۵، نتایج تجربی بررسی شده‌اند و در نهایت در قسمت ۶، جمع‌بندی پژوهش و پیشنهادهایی برای مطالعات آتی بیان گردیده‌است.

۲- طراحی و ساخت عملگر نرم خمشی

عملگر نرم خمشی نیوماتیکی، ساختاری مانند شکل ۱ دارد که برای ساخت آن، نیاز به دو مرحله ریخته‌گری سیلیکون مایع RTV2-325 و دو بار هواگیری در هر مرحله -یک بار برای خروج حباب‌های هوای محلول در سیلیکون مایع خام، و بار دیگر برای خروج هوا از سیلیکون ترکیب شده با ۳/۵ درصد سخت‌کننده (Hardener)- است. لازم به ذکر است که هواگیری به کمک پمپ خلا مدل Value VE225N برای جلوگیری از ایجاد سوراخ و نواحی تمرکز تنش در عملگر انجام شده‌است که می‌تواند منجر به پارگی و از کار افتادن آن شود.

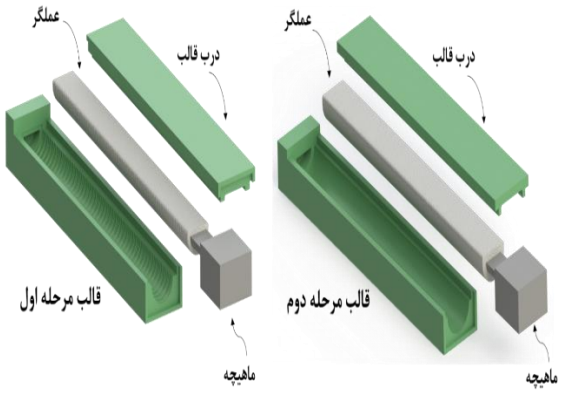
پس از آماده‌سازی مخلوط، مایع در قالب مرحله اول ریخته می‌شود و ماهیچه داخل مایع قرار داده می‌شود. پس از حدود ۱۰ ساعت، عملگر خروجی مرحله اول به صورت مارپیچی با گام ۳/۶ میلی‌متر نخ‌پیچی شده، در قالب مرحله دوم قرار داده می‌شود تا ریخته‌گری مرحله دوم انجام شود. ریخته‌گری در قالب مرحله اول برای ایجاد کانال هوا و شکل کلی عملگر، همچنین تشکیل محل نخ‌ها روی قالب، و مرحله دوم برای تثبیت نخ‌ها روی عملگر و افزایش سختی عملگر می‌باشد.

شکل ۱) عملگر نرم خمشی تقویت‌شده با فیبر در فشارهای مختلف

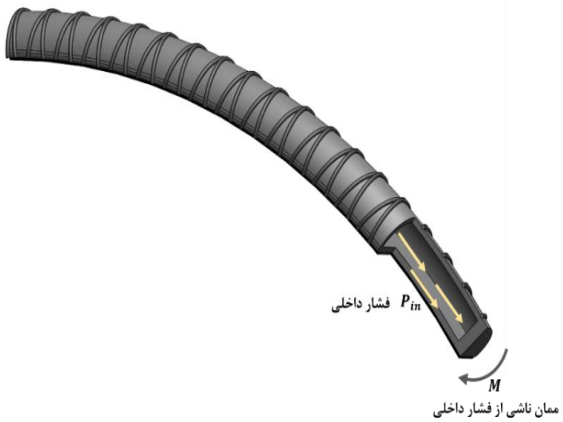
برای ساخت قالب‌های ریخته‌گری، ابتدا عملگر نهایی با طول ۱۶۴ میلی‌متر، شعاع داخلی ۶/۶ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر در نرم‌افزار سالیدورکس طراحی می‌شود. سپس متناسب با این عملگر، قالب مرحله اول و دوم، مطابق شکل ۲ طراحی شده، با دستگاه چاپ‌گر سه‌بعدی کوانتوم کایزن (Quantum Kaizen) با قطر نازل ۰/۴ میلی‌متر، دقت چاپ ۰/۰۱ میلی‌متر و ماده ورودی PLA به قطر ۱/۷۵ میلی‌متر ساخته می‌شوند.

در نهایت بعد از خروج عملگر از قالب مرحله دوم، انتهای عملگر با سیلیکون بسته و لایه‌ی مقیدکننده که افزایش طول نمی‌دهد و خمش عملگر ناشی از آن است، به عملگر چسبانده می‌شود. سر عملگر نیز توسط بست یا چسب آکواریوم، آب‌بندی می‌گردد.

در اثر ورود هوا به این عملگر، فرآیند خمش مطابق شکل ۳ اتفاق می‌افتد. از این خمش می‌توان در کاربردهای مختلفی استفاده کرد و برای تحلیل آن روش‌های متفاوتی وجود دارد.



شکل ۲) ماهیچه ریخته‌گری و قالب‌های مرحله اول و دوم به همراه عملگر درون آن‌ها



شکل ۳) نمایش فشار ورودی و اثر گشتاور ناشی از آن به عملگر خمشی

۳- مدل‌سازی استاتیکی

در روش پیشنهادی برای مدل‌سازی عملگر نرم خمشی، فرض می‌شود که عملگر پیوسته از n تکه‌ی کوچک صلب متصل به هم تشکیل شده‌است و بین هر دو تکه، یک فنر پیچشی قرار دارد. برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی عملگر و بر اساس مشاهدات تجربی، فنرهای پیچشی به صورت فنرهای غیرخطی مرتبه دو با ضریب سختی k_1 و k_2 در نظر گرفته می‌شوند [16]. بدین ترتیب:

$$\boldsymbol{K_1\theta + K_2\theta^2 = M_p} \quad (۱)$$

که در آن M_p بردار گشتاور ورودی و $\boldsymbol{K_1} = diag(k_1)$ و $\boldsymbol{K_2} = diag(k_2)$ ماتریس‌های سختی فنر و θ بردار زاویه نسبی هر المان را نشان می‌دهند. همچنین با توجه به این که در شرایط آزاد (عدم حضور نیروی خارجی) گشتاور، حاصل اعمال فشار داخلی است:

$$\boldsymbol{M_p = K_P} P_{in} \quad (۲)$$

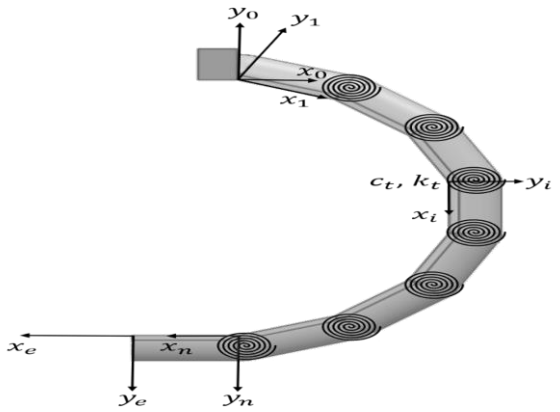
که $\boldsymbol{K_P} = [0,0,0,\dots,0,k_p]^T$ و P_{in} مقدار فشار ورودی است. با توجه با این که عملگری با n المان دارای $n-1$ فنر می‌باشد، فنر معادل این سیستم را می‌توان به شکل زیر معرفی کرد:

$$K_1 = (n-1)\,k_1 \\ K_2 = (n-1)^2\,k_2 \quad (۳)$$

در صورتی که زاویه خمش عملگر با ϑ معرفی شود داریم:

$$\vartheta = \sum_{i=1}^{n} \theta_i \quad (۴)$$
$$K_1\vartheta + K_2\vartheta^2 = k_p P_{in}$$

لازم به ذکر است که پارامتر k_p و ضرایب سختی فنرها، وابسته به جنس، هندسه و ساختار عملگر می‌باشند و پاسخ عملگر وابسته به این عوامل است. به عنوان مثال، سختی فنرها برای یک عملگر ساخته‌شده از سیلیکون با درجه‌ی سختی بالاتر، بیشتر است. علاوه بر این، برای عملگری که سطح مقطع آن شعاع بیشتری دارد، تاثیر افزایش فشار بیشتر خواهد بود؛ به این معنی که عملگر با فشار ورودی کمتر خم می‌شود. برای تعیین شکل عملگر به کمک مدل استاتیکی، روش تحلیل المان‌های صلب تکه‌ای باید بیشتر مورد بررسی قرارگیرد. با توجه به اینکه این فرض، عملگر را به یک ربات سری با لینک‌های صلب تبدیل می‌کند، می‌توان از قواعد حاکم بر سینماتیک ربات‌های سنتی کمک گرفت. برای تحلیل سینماتیک ربات، ابتدا باید مطابق شکل ۴ چارچوب‌های D-H رسم شوند.



شکل ۴) چارچوب‌گذاری ربات صلب تکه‌ای به روش دناویت-هارتنبرگ (Denavit Hartenberg)

بنابراین جدول پارامترهای D-H به صورت جدول ۱ است.

جدول ۱) پارامترهای D-H برای ربات نرم پیوسته تکه‌ای

i	d_i	θ_i	α_{i-1}	a_{i-1}
۱	۰	۰	۰	۰
۲	۰	θ_2	۰	dl
۳	۰	θ_3	۰	dl
i	۰	θ_i	۰	dl
$n-1$	۰	θ_{n-1}	۰	dl
$n \geq 2$	۰	θ_n	۰	dl
مجری نهایی	۰	۰	۰	dl

که dl طول هر لینک است. در این صورت ماتریس تبدیل سیستم بین هر دو چارچوب متوالی به صورت رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$ {}^{i-1}\boldsymbol{T_i} = \begin{bmatrix} cos\,(\theta_i) & -sin\,(\theta_i) & 0 & dl \\ sin\,(\theta_i) & cos\,(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۵) $$

که در آن $n \geq i \geq 2$ است و برای $i = 1$، ${}^{0}\boldsymbol{T_1} = \boldsymbol{I_{4\times4}}$. بنابراین ماتریس تبدیل هر چارچوب نسبت به مختصات پایه عبارت است از:

$$ {}^{0}\boldsymbol{T}_i = \begin{bmatrix} cos\,(\theta_i') & -sin\,(\theta_i') & 0 & \sum_{j=1}^{i} dl \times cos\,(\theta_j') \\ sin\,(\theta_i') & cos\,(\theta_i') & 0 & \sum_{j=1}^{i} dl \times sin\,(\theta_j') \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۶) $$

که در آن، $i = 1,2,\dots,n$ و $\theta_i' = \sum_{t=1}^{i} \theta_t$. با توجه به اینکه عملگر خمشی در یک صفحه حرکت می‌کند، برای ترسیم شکل عملگر یعنی محاسبه‌ی طول و عرض آن، کافی است ${}^{0}\boldsymbol{T_n}$ محاسبه شده، ستون چهارم از سطر اول برابر با طول عملگر (x) و ستون چهارم از سطر دوم برابر با عرض عملگر (y) در نظر گرفته‌شود.

برای تحلیل تاثیر نیروی خارجی بر روی شکل عملگر، باید تاثیر نیروی خارجی وارد بر مجری نهایی، بر روی مفاصل میانی بدست آید. برای این کار، نیاز به محاسبه‌ی ژاکوبین تبدیل فضای کارتزین به فضای مفصلی است. این ژاکوبین، از طریق محاسبه‌ی ماتریس‌های تبدیل بین چارچوب‌های متصل به مرکز سطح عملگر محاسبه می‌شود. «بنابراین برای محاسبه‌ی بردار تبدیل چارچوب متصل به مرکز سطح لینک iام نسبت به مختصات پایه، از رابطه (۷) استفاده می‌شود:

$$ {}^{0}\boldsymbol{T}_{c_i} = {}^{0}\boldsymbol{T_i} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{dl}{2} \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۷) $$

بنابراین ستون i ام ژاکوبین تبدیل از مختصات n به پایه، به صورت زیر محاسبه شده‌است:

$$ {}^{0}\boldsymbol{j}_i = \begin{bmatrix} -dl\sum_{i=1}^{n} sin(\theta_i') - \frac{dl}{2} sin(\theta_n') + dl\sum_{i=1}^{i-1} sin(\theta_i') \\ +dl\sum_{i=1}^{n} cos\,(\theta_i') + \frac{dl}{2} cos(\theta_n') - dl\sum_{i=1}^{n} cos(\theta_i') \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (۸) $$

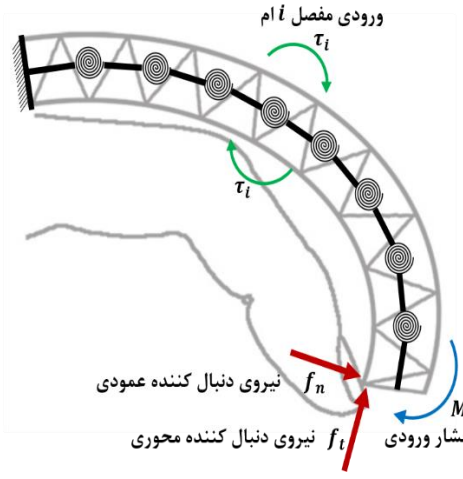
که در آن، $i = 1,2,\dots,n$ و $\theta_i' = \sum_{t=1}^{i} \theta_t$. با توجه به اینکه هدف این پژوهش بررسی عملگرهای مورد استفاده در ساخت دستکش توان‌بخشی دست است، نیروی وارد بر عملگر مشابه با نیروی وارد از سمت کاربر به عملگری که بر روی دست نصب شده‌است، در نظر گرفته‌می‌شود. این نیرو، به دلیل ماهیت خود که دنبال‌کننده‌ی حرکت انگشتان دست است، نیروی دنبال‌کننده نامیده می‌شود و می‌تواند دو مولفه‌ی عمودی یا افقی داشته باشد.

در شکل ۵ نمونه‌ی نیروی دنبال‌کننده وارد بر عملگر نرم خمشی، نشان داده شده‌است. مشخصه‌ی اصلی این نیرو، حفظ جهت خود نسبت به چارچوب متصل به مجری نهایی ربات (چارچوب جسم) در حین حرکت است. در حالت اعمال نیروی دنبال‌کننده به مجری نهایی عملگر، ژاکوبین به جای اینکه در دستگاه پایه نوشته شود، باید در دستگاه جسم بیان گردد:

$$ {}^{n}\boldsymbol{j}_i = \begin{bmatrix} {}^{n}\boldsymbol{R_0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & {}^{n}\boldsymbol{R_0} \end{bmatrix} {}^{0}\boldsymbol{j}_i \quad (۹) $$

$i = 1,2,\dots,n$

$$ {}^{n}\boldsymbol{R_0} = \begin{bmatrix} cos(\theta_n') & sin\,(\theta_n') & 0 \\ -sin(\theta_n') & cos(\theta_n') & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۰) $$



شکل ۵) نحوه‌ی اعمال نیروی دنبال‌کننده از دست به عملگر خمشی متصل به آن

هدف نهایی از حل مساله‌ی استاتیک، بدست آوردن زوایای مفصلی است. برای این کار باید مقدار ورودی هر مفصل تعیین شود. در ابتدا مشخص است که بردار نیروی وارد بر مجری نهایی عملگر می‌تواند به صورت $\boldsymbol{f} = [f_x, f_y, 0,0,0, M_p]^T$ بیان شود. بنابراین ورودی هر مفصل عبارت است از:

$$^{n}\tau_i = {}^{n}\boldsymbol{j}_i^{T}\,{}^{n}\boldsymbol{f} \quad (۱۱)$$

از سوی دیگر با در نظر گرفتن فنر پیچشی متصل به هر لینک و نوشتن معادله‌ی تعادل استاتیکی، رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$-\tau_i = k_1\theta_i + k_2\theta_i^2 \quad (۱۲)$$

بنابراین برای بدست آوردن زوایای مفصلی و حل مساله‌ی استاتیک، کافی است دو معادله‌ی (۱۱) و (۱۲) با یکدیگر مساوی قرار داده شود:

$$-{}^{n}\boldsymbol{j}_i^{T}\,{}^{n}\boldsymbol{f} = k_1\theta_i + k_2\theta_i^2 \quad (۱۳)$$

با توجه به اینکه سمت چپ معادله خود وابسته به مقدار زوایای مفصلی است، نمی‌توان این معادله را به صورت تحلیلی حل کرد. برای حل معادله، به سمت راست معادله یک ترم با مقدار صفر به صورت زیر اضافه شده‌است:

$$-{}^{n}\boldsymbol{j}_i^{T}\,{}^{n}\boldsymbol{f} = k_1\theta_i + k_2\theta_i^2 + e\dot{\theta}_i \quad (۱۴)$$

که در آن، e مقداری بسیار بسیار کوچک نزدیک به صفر دارد. در این صورت:

$$\dot{\theta}_i = e^{-1}(-{}^{n}j_i^{T}\,{}^{n}f - (k_1\theta_i + k_2\theta_i^2)) \quad (۱۵)$$

با هر مرحله انتگرال‌گیری از معادله‌ی (۱۵)، با شرط اولیه‌ی صفر، می‌توان مساله‌ی استاتیک را به صورت یک حلقه‌ی تکرارشونده در سیمولینک حل کرد. شکل عملگر نیز با کمک رابطه (۶) و با استفاده از مقدار زوایای حاصل برای مفاصل بدست می‌آید.

۴- مدل‌سازی دینامیکی

به طور کلی، معادله‌ی دینامیک حاکم بر هر سیستم رباتیکی را می‌توان به صورت

$$\boldsymbol{M_I(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta,\dot{\theta}) + G(\theta) = \tau} \quad (۱۶)$$

نوشت که در آن، $\boldsymbol{M_{I_{n\times n}}}$ بیانگر ماتریس اینرسی، $\boldsymbol{C_{n\times 1}}$ بردار ترم‌های کریولیس و جانب به مرکز، $\boldsymbol{G_{n\times 1}}$ بردار ترم‌های گرانشی، τ ورودی سیستم و $\boldsymbol{\theta_{n\times 1}}$ بردار زوایای مفصلی ربات است. برای عملگر مورد مطالعه، به علت وجود ترم‌های فنریت و میرایی، معادله دینامیک حاکم بر سیستم به صورت زیر درمی‌آید:

$$\boldsymbol{M_I\ddot{\theta} + C_t\dot{\theta} + K_1\theta + K_2\theta^2 + C(\theta,\dot{\theta}) + G(\theta) = \tau} \quad (۱۷)$$

که $\boldsymbol{C_t = diag(c_t)}$ و $\boldsymbol{K_{1,2} = diag(k_{1,2})}$ سختی سیستم یعنی $\boldsymbol{K_1}$ و $\boldsymbol{K_2}$ در قسمت استاتیک تعیین شده‌اند. تعیین ماتریس جرم به روش لاگرانژ صورت می‌گیرد؛مقدار جرم و اینرسی تمامی لینک‌ها با تقریب بسیار خوبی مساوی فرض شده‌است. تعیین ترم‌های $\boldsymbol{C(\theta,\dot{\theta}) + G(\theta)}$ به کمک روش نیوتن اویلر عددی انجام شده‌است و چون در تست‌های تجربی، عملگر روی سطح افقی حرکت کرده، در این روابط تاثیر جاذبه در شتاب خطی عملگر وارد نمی‌شود. بنابراین تنها پارامتری که در این معادله مجهول است، میرایی C_t است. برای تعیین این پارامتر از روش شناسایی استفاده می‌شود که در قسمت نتایج تجربی در مورد آن توضیح داده شده‌است. برای حل معادله دینامیک کافی است از رابطه زیر، دوبار انتگرال‌گیری شود و با کمک یک حلقه‌ی تکرارشونده، جواب معادله در یک بازه‌ی زمانی مشخص، تعیین گردد. مقادیر اولیه‌ی زوایای مفصلی و سرعت آنها در شروع حلقه صفر درنظر گرفته‌می‌شود.

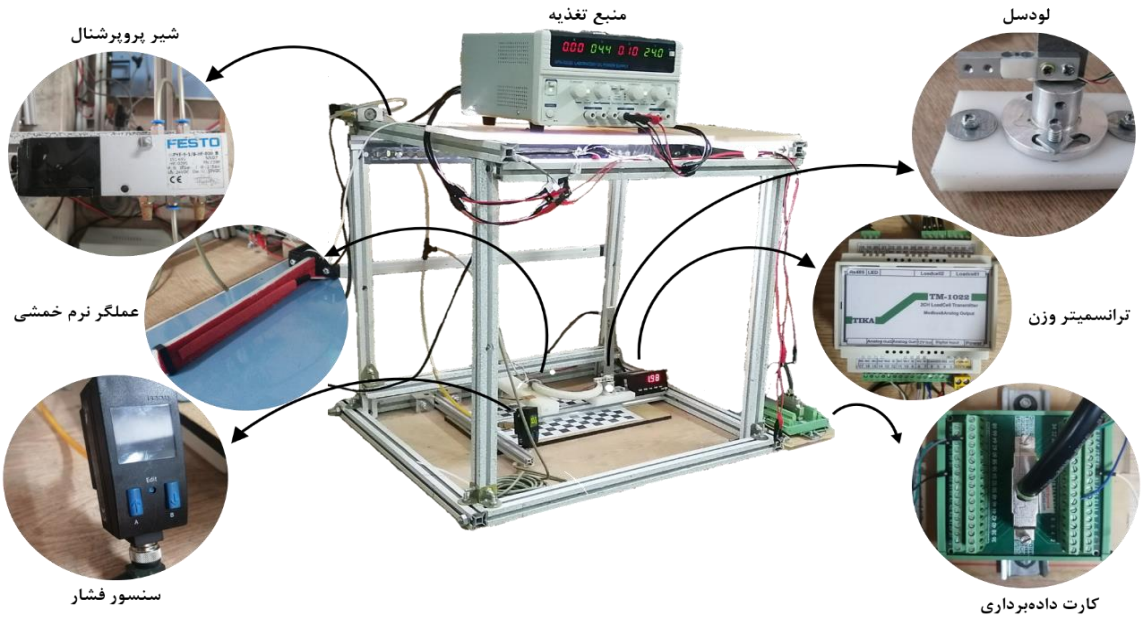
$$\boldsymbol{\ddot{\theta} = M_I^{-1}(-{}^{n}j^{T}\,{}^{n}f - (K_1\theta + K_2\theta^2) - C - G - C_t\dot{\theta})} \quad (۱۸)$$

۵- نتایج آزمون‌های تجربی

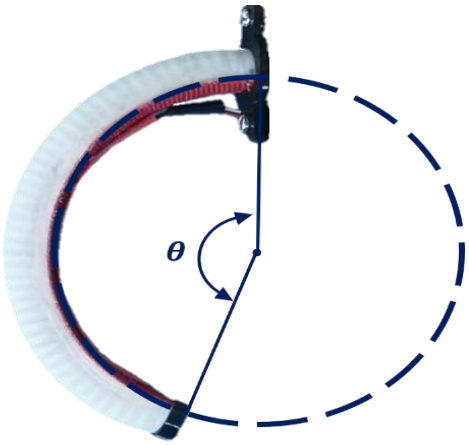
برای آزمایش مدل ارائه‌شده و بررسی میزان دقت آن، از یک چارچوب آزمایشگاهی شامل یک عملگر نرم خمشی تقویت‌شده با فیبر استفاده گردیده که در قسمت ۲ نحوه کارکرد و ساخت آن توضیح داده شده‌است. این چارچوب اجزای متفاوتی مطابق با شکل ۶ دارد.

در این چارچوب از یک شیر برقی نسبی مدل MPYE فستو (Festo Proportional Solenoid Valve) استفاده شده‌است و فشار ورودی به عملگر از طریق اعمال فرمان ولتاژ به آن، کنترل می‌شود. برای اندازه‌گیری مقدار فشار و ارسال پسخوراند فشار به مدار کنترل فشار، یک سنسور فشار دیجیتال SDE1 با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ بار به کار رفته‌است. همچنین برای ارسال فرمان از کامپیوتر به شیر، از یک کارت داده‌برداری National-Instrument PCI-6052E و برای تامین فشار هوای ورودی به عملگر از یک کمپرسور هوای ۱۶ بار استفاده گردیده‌است. برای تعیین زاویه خمش عملگر در تست‌های استاتیکی حالت آزاد (بدون تماس با نیروی خارجی)، مانند شکل ۷ از پردازش تصاویر گرفته‌شده توسط دوربین و در حالت عدم دسترسی به تصویر عملگر مانند تست‌های دینامیکی، یک سنسور خمشی به زیر عملگر متصل و ولتاژ خروجی آن پس از کالیبره‌شدن متناسب با زاویه مرتبط، به کار برده شده‌است.

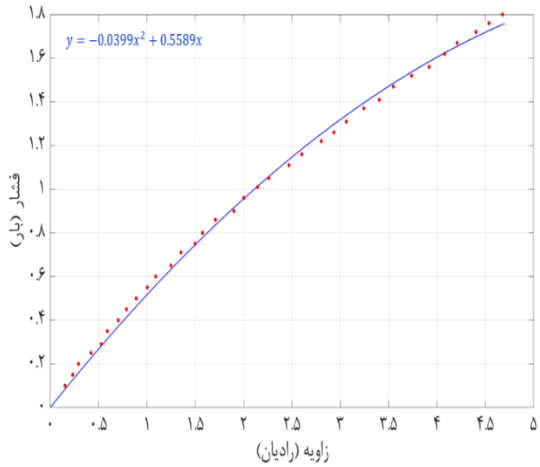
در حالتی که عملگر در تماس با نیروی خارجی در انتهای آن بود، برای تعیین مقدار نیروی واردشده، از یک لودسل با دقت ۰/۰۱ نیوتن استفاده شد و برای خواندن مقدار این نیرو توسط کامپیوتر، از یک ترانسمیتر وزن TM-1022 محصول شرکت ایرانی تیکا استفاده گردید. آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش، به طور کلی دو دسته هستند: استاتیکی و دینامیکی. آزمایش‌های استاتیکی خود شامل دو دسته آزمایش هستند: آزمایش‌های حالت آزاد، آزمایش‌های تماسی در حالت تماس عملگر با نیروی دنبال‌کننده‌ی عمودی و یا نیروی دنبال‌کننده‌ی محوری. آزمایش‌های دینامیکی نیز شامل دو دسته هستند: دسته‌ی اول آزمایش عملگر با ورودی چندفرکانسی و دسته‌ی دوم با ورودی تک‌فرکانسی. هر کدام از این آزمایش‌ها به صورت جداگانه توضیح داده خواهندشد.



شکل ۶) چارچوب آزمایشگاهی استفاده‌شده در این پژوهش



شکل ۷) نحوه محاسبه زاویه خمش عملگر به کمک پردازش تصویر



شکل ۸) نمودار شناسایی فشار- زاویه

۵-۱- آزمون استاتیکی حالت آزاد

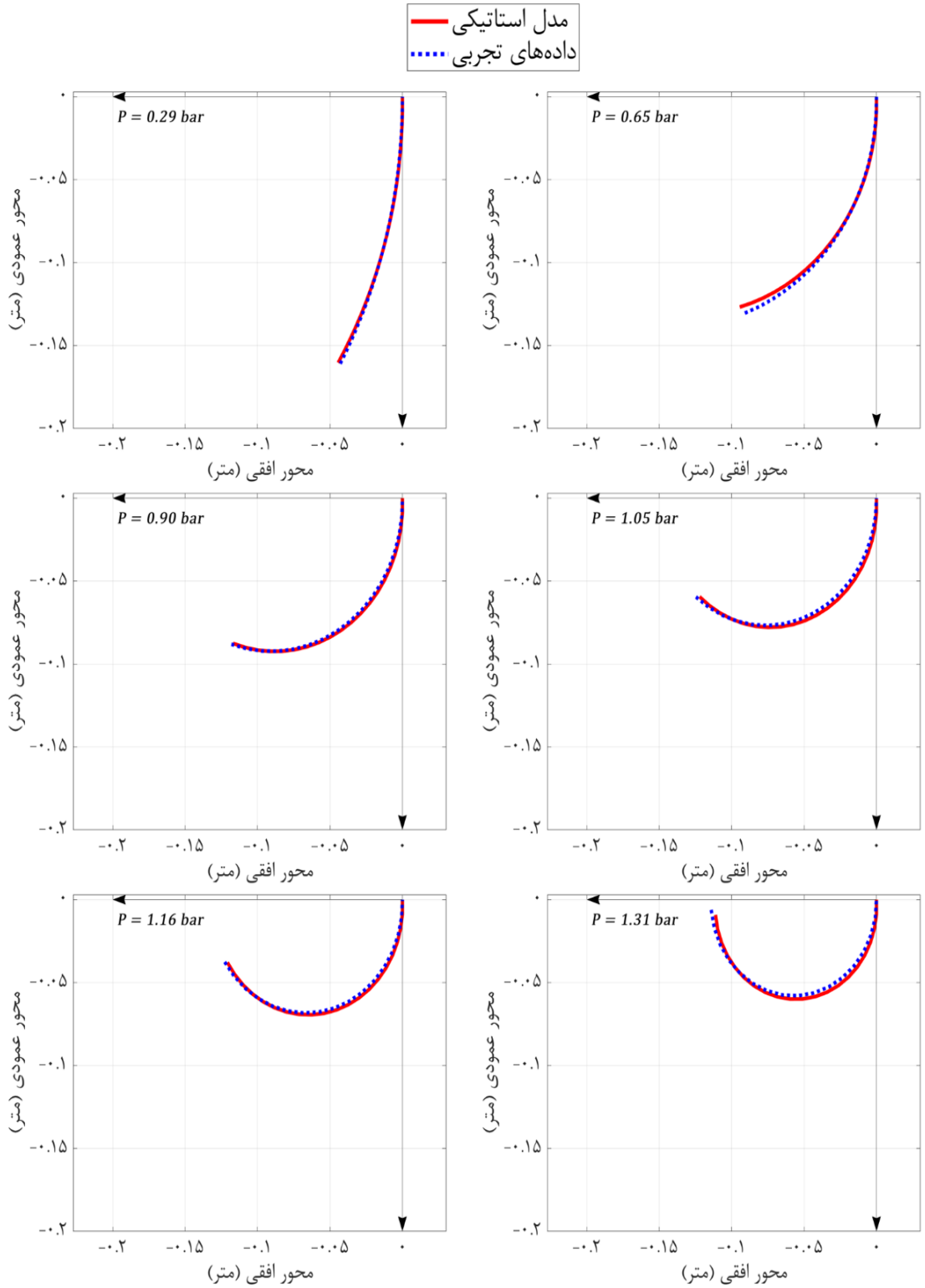
در این حالت ابتدا عملگر به صورت استاتیکی به فشارهای مختلف برده می‌شود و در فشار موردنظر، از عملگر عکس‌برداری می‌شود. سپس با استفاده از پردازش تصویر و به کمک زبان پایتون و نرم‌افزار سالیدورکس، مقدار زاویه خمش عملگر مانند شکل ۷ محاسبه شده، و نموداری مطابق شکل ۸ حاصل می‌شود. این نمودار نشان می‌دهد که رابطه‌ی بین فشار و زاویه غیرخطی است. طبق نمودار شکل ۸، مقادیر c_1 و c_2 به ترتیب برابر با ۵۵۸۹۰ پاسکال بر رادیان و ۳۹۹۰ پاسکال بر رادیان به توان دو بدست می‌آیند. به این ترتیب مقادیر زوایای مفصلی عملگر به کمک رابطه (۱۸) و حل یک معادله درجه دوم بدست می‌آیند.

۵-۲- آزمون استاتیکی تماسی

در این آزمایش‌ها، در چند حالت که عملگر در تماس با یک نیروی خارجی قرار گرفته‌است، شکل عملگر حاصل از انجام تست تجربی، به کمک پردازش تصویر رسم می‌شود و با شکل حاصل از مدل استاتیکی مقایسه می‌گردد. با منطبق کردن این دو شکل بر روی هم، برای انواع نیروهای خارجی، مقدار k_p با روش شناسایی دست می‌آید.

برای رسم عملگر در حالت تئوری نیز نیاز به مشخص کردن مقدار فشار ورودی، تعداد المان‌های مورد نظر و نیروهای خارجی وارد بر عملگر می‌باشد. سپس از رابطه (۶) برای تعیین مختصات نقاط روی عملگر استفاده می‌شود.

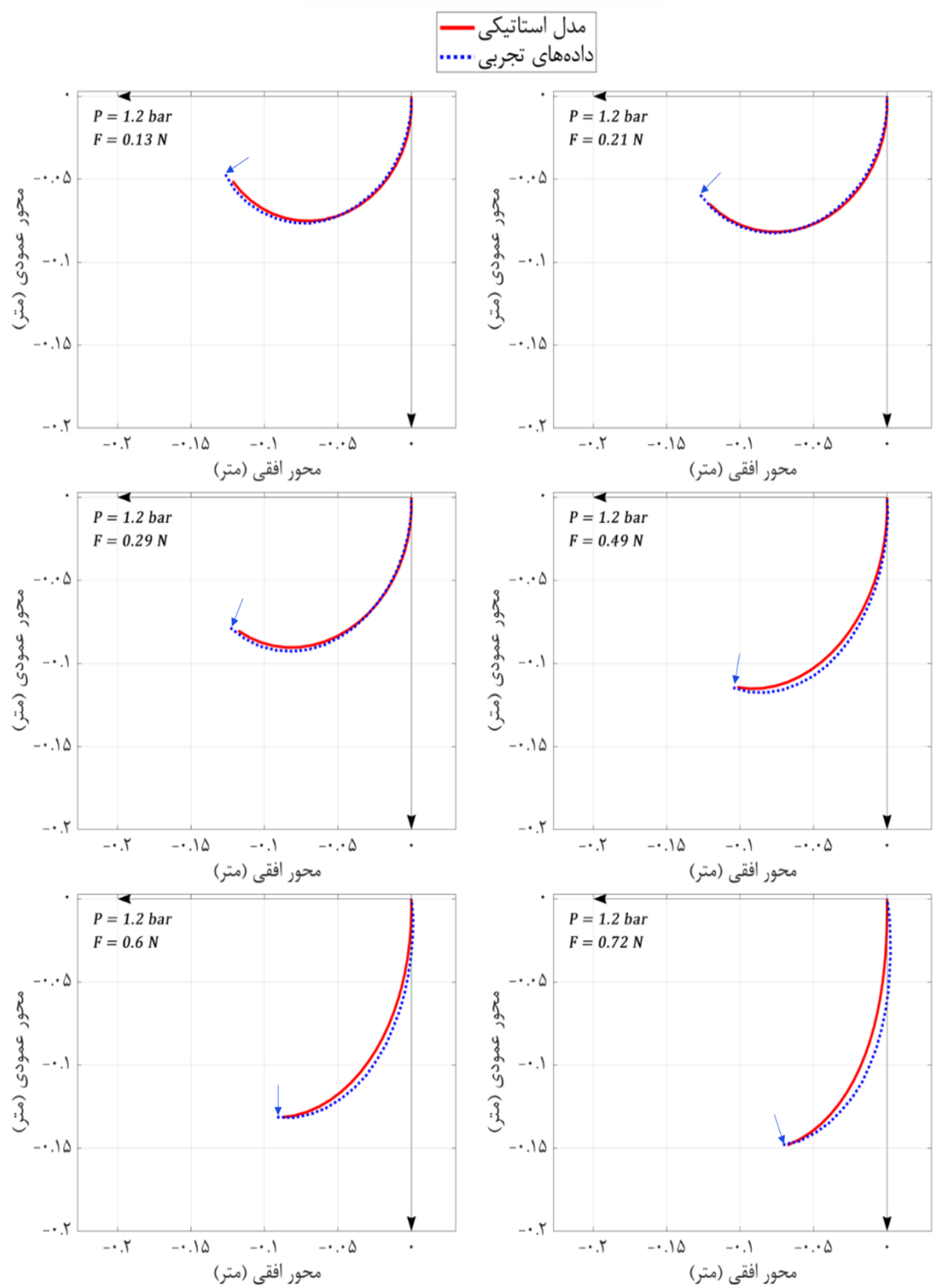
شکل ۹، مقایسه‌ی نتیجه‌ی حاصل از مدل استاتیکی با تست تجربی را برای عملگر مورد آزمایش بدون تماس با نیروی خارجی (شرایط آزاد) برای چند فشار مختلف نشان می‌دهد.



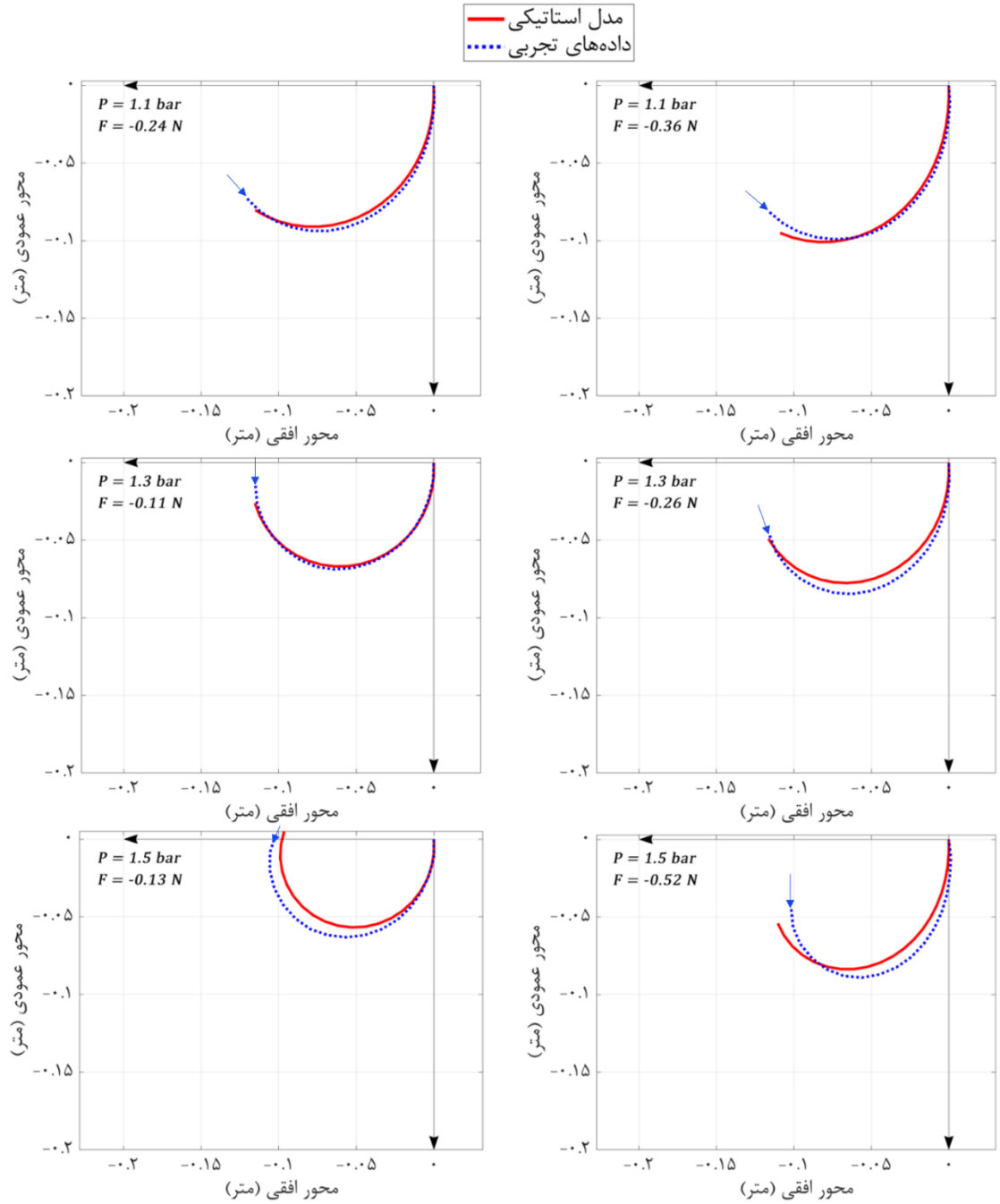
شکل ۹) مقایسه‌ی نتیجه‌ی مدل استاتیکی و تست‌های تجربی در چند فشار مختلف در شرایط آزاد

شکل ۱۰ و شکل ۱۱ مقایسه‌ی نتیجه‌ی حاصل از مدل استاتیکی با تست تجربی را برای عملگر مورد آزمایش در تماس با نیروی دنبال‌کننده‌ی عمودی و محوری برای چند حالت مختلف تماس نشان می‌دهد.

تطبیق نمودارهای تئوری و تجربی در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ به ازای مقدار ۹×۱۰^{-۷} متر به توان سه برای k_p حاصل شده‌است. بنابراین مقدار k_p به این صورت از راه شناسایی بدست آمده، مدل‌سازی استاتیکی تکمیل می‌شود



شکل ۱۰) مقایسه‌ی نمودارهای مدل استاتیکی و تست‌های تجربی در تماس با چند نیروی دنبال‌کننده‌ی عمودی متفاوت

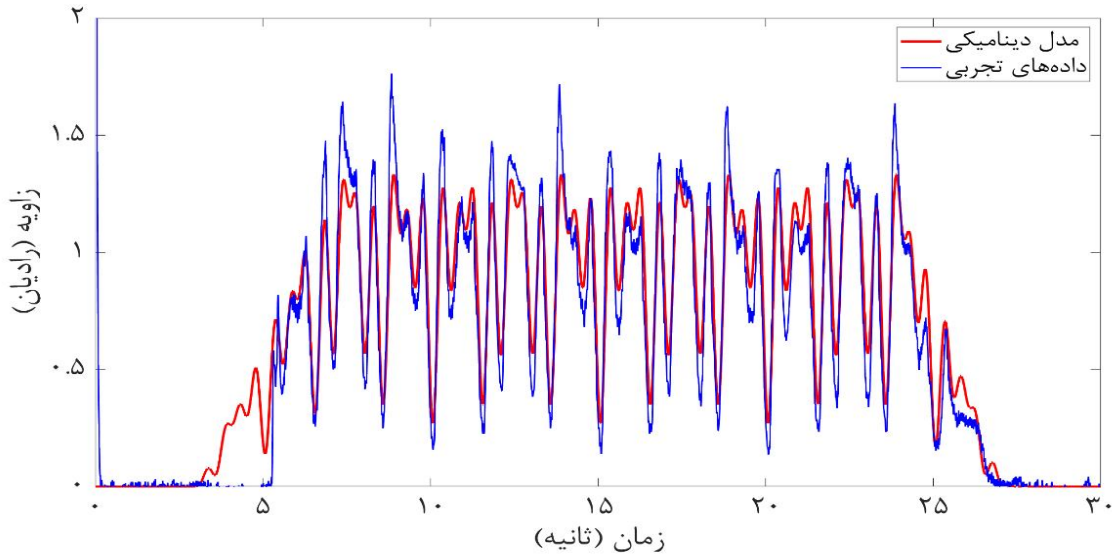


شکل ۱۱) مقایسه‌ی نمودارهای مدل استاتیکی و تست‌های تجربی در تماس با چند نیروی دنبال‌کننده‌ی محوری متفاوت (فشار بر حسب بار و نیرو بر حسب نیوتن است.)

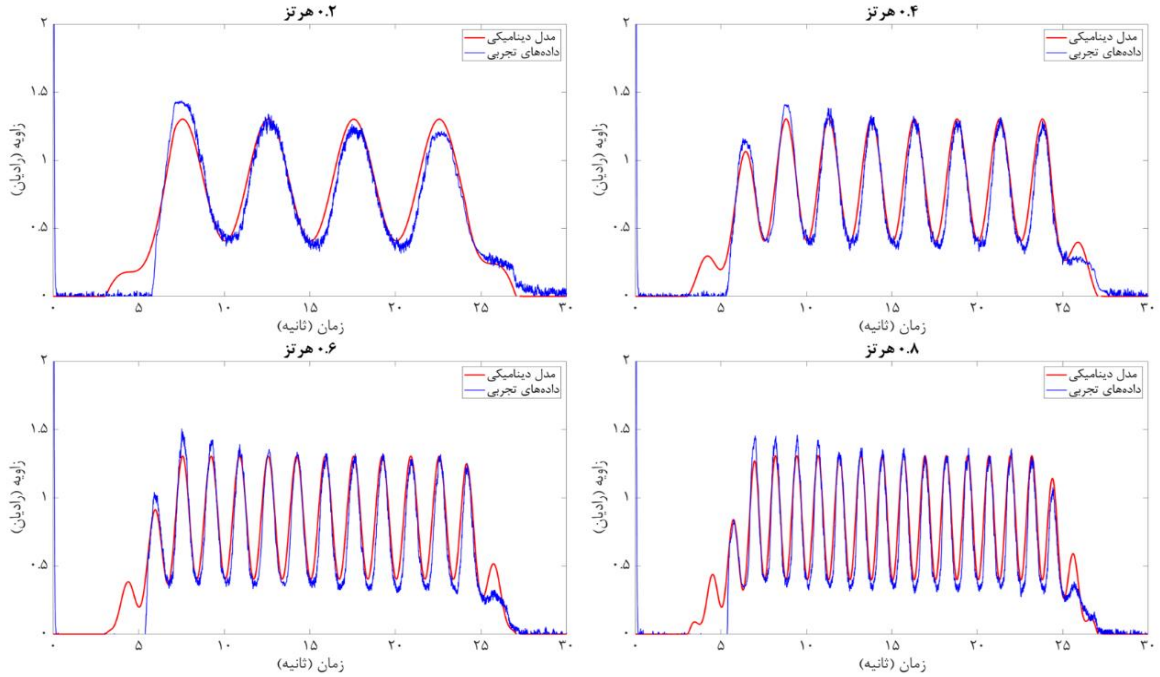
۵-۳- آزمون‌های دینامیکی

در این آزمون‌ها، ابتدا در شرایط واقعی یک ورودی سینوسی چندفرکانسی به عملگر داده می‌شود. سپس نمودار ولتاژ خروجی حاصل از سنسور خمشی متصل به عملگر، در مدت زمان اجرای برنامه ذخیره می‌گردد. با استفاده از تابع تبدیل ولتاژ به زاویه (رادیان) که با کالیبراسیون بدست می‌آید، این ولتاژ به زاویه تبدیل می‌شود. نمودار حاصل، با نمودار پاسخ دینامیکی حاصل از اعمال همان ورودی چندفرکانسی به مدل دینامیکی پیاده‌سازی‌شده توسط معادله (۱۸)، مقایسه می‌شود.

با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی، مقداری از C_t که به ازای آن کمترین خطا در مقایسه‌ی دو نمودار ذکرشده حاصل شود، به عنوان مقدار شناسایی‌شده برای C_t انتخاب می‌گردد. این الگوریتم از مقایسه‌ی مساحت زیر دو نمودار استفاده می‌کند و کمترین خطای نرمالیزه‌شده در طول نمودار (۱/۸۴ درجه) به ازای میرایی ۰/۰۲۴ نیوتن در ثانیه بر متر اتفاق می‌افتد. شکل ۱۰ مقایسه‌ی این دو نمودار به ازای ورودی چندفرکانسی ذکرشده و مقدار شناسایی‌شده برای C_t را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲) شناسایی مقدار پارامتر میرایی به ازای ورودی $0.1\left(sin\left(0.3\times 2\pi t-\frac{\pi}{2}\right)+sin\left(1.4\times 2\pi t-\frac{\pi}{2}\right)+sin\left(2\times 2\pi t-\frac{\pi}{2}\right)\right)+0.45$



شکل ۱۳) مقایسه‌ی پاسخ دینامیکی مدل با اعمال ورودی تک فرکانس یکسان به عملگر واقعی

برای آزمودن مدل دینامیکی، پاسخ دینامیکی با پاسخ واقعی عملگر به ازای چند ورودی تک‌فرکانسی در شکل ۱۱ مقایسه شده‌است.

۵-۴- خطای مدل‌سازی استاتیکی

نتیجه‌ی مقایسه‌ی مدلسازی استاتیکی و خروجی تست‌های تجربی در این قسمت آورده شده‌است. برای تعیین درصد خطا، نمودار مدل با استفاده از ۱۶ المان (تعداد المان‌های نمودارهای تست‌های تجربی) رسم شده، طول و عرض نقاط متناظر روی این دو نمودار با هم مقایسه می‌شود. خطای گزارش‌شده، بیشترین خطای مربوط به اختلاف موقعیت نقاط روی طول عملگر را نشان می‌دهد

$$\%\ error = \frac{max\left\{\left(x_{i_{model}}-x_{i_{experimental}}\right)^2+\left(y_{i_{model}}-y_{i_{experimental}}\right)^2\right\}}{L'} \quad (۱۹)$$

در این رابطه، i شماره‌ی المان، x_{model} مختصات طولی نقاط حاصل از مدل‌سازی استاتیکی، $x_{experimental}$ مختصات طولی نقاط حاصل از تست‌های تجربی، y_{model} مختصات عرضی نقاط حاصل از مدل‌سازی استاتیکی، $y_{experimental}$ مختصات عرضی نقاط حاصل از تست‌های تجربی و L' طول ثانویه عملگر است.

لازم به ذکر است که با وجود استفاده از لایه‌ی مقیدکننده‌ی افزایش طول در ساخت عملگر، طول عملگر افزایش می‌یابد و باید این

افزایش طول هم در مدل سازی مورد نظر قرار گیرد. در این پژوهش، تاثیر طول نهایی عملگر، با استفاده از یک رابطه‌ی ساده کننده‌ی خطی بین فشار و افزایش طول در نظر گرفته شده‌است. طول اولیه‌ی عملگر ۱۶۷ میلی‌متر است. طول ثانویه‌ی عملگر و میزان خطای مدل‌سازی، برای حالت آزاد، در جدول ۲ گزارش شده‌است.

جدول ۲) خطای مدل‌سازی استاتیکی در حالت آزاد

فشار (بار)	طول ثانویه عملگر (میلی‌متر)	بیشترین خطا (درصد)
۰/۲۹	۱۶۸/۵	۳/۳۲
۰/۶۵	۱۶۹/۸	۸/۱۲
۰/۹	۱۷۲	۷/۴۱
۱/۰۵	۱۷۲/۵	۸/۳۹
۱/۱۶	۱۷۳	۸/۴۴
۱/۳۱	۱۷۴/۸	۸/۵۱

طول ثانویه‌ی عملگر و میزان خطای مدل‌سازی، برای حالت تماس با نیروی دنبال‌کننده‌ی عمودی، در جدول ۳ گزارش شده‌است.

جدول ۳) خطای مدل‌سازی استاتیکی در حالت تماس با نیروی دنبال‌کننده‌ی عمودی

فشار (بار)	نیروی خارجی (نیوتن)	طول ثانویه عملگر (میلی‌متر)	بیشترین خطا (درصد)
۱/۲	۰/۱۳	۱۸۱/۳	۴/۱۶
۱/۲	۰/۲۱	۱۸۱/۸	۵/۳۷
۱/۲	۰/۲۹	۱۸۱/۴	۳/۶۸
۱/۲	۰/۴۹	۱۸۱/۲	۲/۷۴
۱/۲	۰/۶	۱۸۱/۶	۳/۲۷
۱/۲	۰/۷۲	۱۸۱/۵	۲/۲۲

طول ثانویه‌ی عملگر و میزان خطای مدل‌سازی، برای حالت تماس با نیروی دنبال‌کننده‌ی محوری، در جدول ٤ گزارش شده‌است.

جدول ۴) خطای مدل‌سازی استاتیکی در حالت تماس با نیروی دنبال‌کننده‌ی محوری

فشار (بار)	نیروی خارجی (نیوتن)	طول ثانویه عملگر (میلی‌متر)	بیشترین خطا (درصد)
۱/۱	-۰/۲۴	۱۸۶/۲	۴/۱۳
۱/۱	-۰/۳۶	۱۸۵/۷	۶/۸۷
۱/۳	-۰/۱۱	۱۸۷/۱	۵/۷۶
۱/۳	-۰/۲۶	۱۸۷/۳	۱/۵۷
۱/۵	-۰/۱۳	۱۸۹/۶	۴/۷۱
۱/۵	-۰/۵۲	۱۸۸/۷	۴/۸۳

افزایش طول مذکور یکی از علل خطای قابل توجه در مدل‌سازی است. همچنین شایان ذکر است خطاهای رخ داده در حین رسم خم عملگر در تصاویر تجربی، نقطه‌گذاری‌ها و خم موجود در تصاویر گرفته‌شده از دوربین که بر تمامی نتایج تجربی که مبنای مقایسه هستند، اثر قابل ملاحظه می‌گذارند. با وجود این منابع خطا، خطاهای بدست آمده از مدل‌سازی، قابل قبول به نظر می‌رسد.

۵-۵- خطای مدل‌سازی دینامیکی

برای محاسبه‌ی این خطا از مقایسه مساحت زیر دو نمودار استفاده می‌شود، سپس اختلاف این مساحت‌ها بر طول بازه زمانی تقسیم می‌شود تا خطای نرمال‌شده در طول نمودار بدست آید. در این مدل‌سازی، تعداد المان‌ها برابر با ۱۰ بوده‌است(جدول ۵).

جدول ۵) خطای مدل‌سازی دینامیکی

فرکانس ورودی (هرتز)	خطای نرمال‌شده (رادیان)	خطای نرمال‌شده (درجه)
۰/۲	۰/۰۳	۱/۹۶
۰/۴	۰/۰۵	۲/۹۶
۰/۶	۰/۰۸	۴/۵۳
۰/۸	۰/۰۸	۴/۵۱
۰/۳ – ۱/۴ – ۲	۰/۰۳	۱/۸۴

با توجه به خطاهای موجود در استفاده و داده‌برداری از سنسور خمشی و کالیبره‌ی آن، همچنین تقریبی بودن فرآیند شناسایی ضرایب دینامیکی، خطاهای حاصل قابل قبول می‌باشند. لازم به ذکر است که دقت نتایج به تعداد المان‌ها بستگی دارد، اما در عین حال افزایش تعداد المان منجر به هزینه محاسباتی بالاتر می‌شود. بنابراین بین دقت، هزینه‌ی محاسبات یا سرعت محاسبه، یک مبادله وجود خواهد داشت.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

ربات‌های نرم که موردتوجه‌ترین ربات‌ها در حوزه‌ی تجهیزات پزشکی در سال‌های اخیر بوده‌اند، در حوزه‌ی مدل‌سازی دینامیکی، سامانه‌های حسگری و کنترل، همچنان با چالش‌های فراوانی روبه‌رو هستند. در این مقاله، مدل‌سازی استاتیکی و دینامیکی یک عملگر نرم خمشی تقویت شده با نخ که مورد استفاده در دستکش‌های توان‌بخشی دست است، مورد بررسی قرار گرفت. روش مدل‌سازی با فرض تبدیل خمش عملگر پیوسته، به خمش یک ربات با تعداد زیادی لینک صلب سری است و برای تحلیل حرکت آن، از قواعد رباتیکی بهره گرفته‌شد. این روش علاوه بر سادگی و سرعت تحلیل بالا، تطبیق بیش از ۹۱ درصد با آزمایش‌های تجربی در حالت استاتیکی و دینامیکی نشان داده‌است. این روش می‌تواند برای کنترل عملگرهای دستکش توان‌بخشی دست و همچنین در حالت حضور نیروهای دیگری مانند نیروی وزن انجام شود که مطالعات آتی نویسنده‌ی مقاله می‌باشند.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته‌اند.

منابع مالی: تمامی آزمایش‌های عملی مذکور در مقاله، در "آزمایشگاه حسگرها و عملگرها مبتنی بر مواد هوشمند، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه امیرکبیر" انجام شده‌است.

منابع

1- Rus D, Tolley MT. Design, fabrication and control of soft robots. Nature. 2015;521(7553):467-75.
2- Laschi C, Rossiter J, Iida F, Cianchetti M, Margheri L. Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges. Springer.; 2017.
3- Majidi C. Soft robotics: a perspective—current trends and prospects for the future. Soft robotics. 2014;1(1):5-11.
4- Polygerinos P, Wang Z, Galloway KC, Wood RJ, Walsh CJ. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation. Robotics and Autonomous Systems. 2015 ;73:135-43.
5- O'Neill CT, Phipps NS, Cappello L, Paganoni S, Walsh CJ. A soft wearable robot for the shoulder: Design, characterization, and preliminary testing. In2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR) 2017 (pp. 1672-1678). IEEE.
6- Yap HK, Ng HY, Yeow CH. Soft printable pneumatics for wrist rehabilitation. InConverging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation II: Proceedings of the 3rd International Conference on NeuroRehabilitation (ICNR2016),, 2016, Segovia, Spain 2017 (pp. 545-550). Springer International Publishing.
7- Zhong G, Dou W, Zhang X, Yi H. Bending analysis and contact force modeling of soft pneumatic actuators with pleated structures. International Journal of Mechanical Sciences. 2021 ;193:106150.
8- Gupta U, Qin L, Wang Y, Godaba H, Zhu J. Soft robots based on dielectric elastomer actuators: A review. Smart Materials and Structures. 2019;28(10):103002.
9- Jolaei M, Hooshiar A, Dargahi J, Packirisamy M. Toward task autonomy in robotic cardiac ablation: Learning-based kinematic control of soft tendon-driven catheters. Soft Robotics. 2021;8(3):340-51.
10- Geer R, Li S. Examining the coiling motion of soft actuators reinforced with tilted helix fibers. InSmart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems 2018 (Vol. 51951, p. V002T06A005). American Society of Mechanical Engineers.
11- Guan Q, Sun J, Liu Y, Wereley NM, Leng J. Novel bending and helical extensile/contractile pneumatic artificial muscles inspired by elephant trunk. Soft robotics. 2020 ;7(5):597-614.
12- Hao Y, Gong Z, Xie Z, Guan S, Yang X, Ren Z, Wang T, Wen L. Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length. In2016 35th Chinese control conference (CCC) 2016 (pp. 6109-6114). IEEE.
13-Polygerinos P, Lyne S, Wang Z, Nicolini LF, Mosadegh B, Whitesides GM, Walsh CJ. Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation. In2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2013 (pp. 1512-1517). IEEE.
14- Polygerinos P, Wang Z, Overvelde JT, Galloway KC, Wood RJ, Bertoldi K, Walsh CJ. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators. IEEE Transactions on Robotics. 2015;31(3):778-89.
15- Wang T, Zhang Y, Zhu Y, Zhu S. A computationally efficient dynamical model of fluidic soft actuators and its experimental verification. Mechatronics. 2019; 58:1-8.
16- Namdar Ghalati MH, Ghafarirad H, Suratgar AA, Zareinejad M, Ahmadi-Pajouh MA. Static modeling of soft reinforced bending actuator considering external force constraints. Soft Robotics. 2022 ;9(4):776-87.
17- Renda F, Cacucciolo V, Dias J, Seneviratne L. Discrete Cosserat approach for soft robot dynamics: A new piece-wise constant strain model with torsion and shears. In2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 2016 (pp. 5495-5502). IEEE.
18- Gharavi L, Zareinejad M, Ohadi A. Continuum analysis of a soft bending actuator dynamics. Mechatronics. 2022 ;83:102739.
19- Gharavi L, Zareinejad M, Ohadi A. Dynamic Finite-Element analysis of a soft bending actuator. Mechatronics. 2022 ;81:102690.
20- Zhao Q, Lai J, Huang K, Hu X, Chu HK. Shape estimation and control of a soft continuum robot under external payloads. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2021;27(5):2511-22.
21- Aslinezhad M, Malekijavan A, Abbasi P. Adaptive neuro-fuzzy modeling of a soft finger-like actuator for cyber-physical industrial systems. The Journal of Supercomputing. 2021;77:2624-44.