

مدل سازی رفتار دینامیکی یک ربات نرم مجهز به محرک الکترومغناطیسی

رضا دهقانی*

دانشیار، گروه مهندسی طراحی و ساخت، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران،
r.dehghani@kgut.ac.ir

چکیده

با توجه به توانایی بالای حرکتی ربات های نرم، این ربات ها در کاربردهای مختلفی به کار گرفته می شوند. استفاده از محرک های غیر تماسی و کوچک، مانند محرک های الکترومغناطیسی، به کاهش اندازه این ربات ها کمک کرده و امکان استفاده از آن ها در کاربردهای خاص را فراهم می آورد. با وجود اهمیت تحقیق در زمینه این ربات ها، تحقیقاتی در زمینه مدل سازی دینامیکی ربات های نرم مجهز به محرک های الکترومغناطیسی وجود ندارد. در این مقاله، تحلیل سینماتیک و دینامیک یک ربات نرم که به محرک الکترومغناطیسی مجهز است، انجام شده است. این ربات شامل یک بخش نرم و انعطاف پذیر است که در انتهای آن یک آهن ربای دائمی قرار دارد. همچنین، برای حرکت دادن ربات نرم از یک میدان الکترومغناطیسی بهره برداری می شود. ابتدا مدل دینامیکی ربات نرم با استفاده از نظریه کاسرت استخراج شده و سپس مدل سازی نیرو و ممان الکترومغناطیسی محرک انجام می گیرد. پس از اعتبارسنجی مدل دینامیکی، حالت های مختلف ربات نرم شبیه سازی شده و نتایج آن ها ارائه می شود. نتایج نشان می دهد که مدل دینامیکی ارائه شده در این مقاله به خوبی رفتار ربات نرم را پیش بینی می کند.

واژه های کلیدی: ربات نرم، نظریه میله کاسرت، میدان الکترومغناطیس، تحلیل دینامیکی، تقریب مشتقات زمانی، رابطه دیفرانسیلی بازگشتی.

Modeling the dynamic behavior of a soft robot equipped with an electromagnetic actuator

R. Dehghani

Department of Design and Manufacturing Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Abstract

Soft robots exhibit high mobility due to their inherent flexibility. This characteristic makes them suitable for a wide range of applications. The use of non-contact and compact actuators, like electromagnetic ones, minimizes their size and provides their deployment in various environments. While research in soft robotics is actively progressing, there is no research on the dynamic modeling of soft robots equipped with electromagnetic actuators. In this paper, the kinematic and dynamic analysis of a soft robot equipped with an electromagnetic actuator is presented. This robot consists of a soft and flexible section with a permanent magnet at its end. Additionally, an electromagnetic field is used to move the soft robot. At first, the dynamic model of the soft robot is derived using Cosserat's theory and modeling of the forces and electromagnetic moments of the actuator. After validating the dynamic model, various states of the soft robot are simulated, and their results are presented. The results indicate that the dynamic model proposed in this paper accurately predicts the behavior of the soft robot.

Keywords: Soft robot, Cosserat rod theory, Electromagnetic Field, Dynamic analysis, Approximation of time derivatives, Backward differentiation formula.

۱- مقدمه

در سال های اخیر، کاربردهای ربات ها به طور مداوم افزایش یافته است و از کاربردهای ساده به کاربردهایی در محیط های عملیاتی نسبتاً پیچیده مانند نظامی، پزشکی و اکتشافی گسترش یافته است [۱]. ربات صلب که از تعداد زیادی قطعات صلب تشکیل شده است دارای ویژگی هایی از جمله ساختار پیچیده، سازگاری ضعیف با محیط، سر و صدای زیاد و سایش قطعات است که نیازهای واقعی را برآورده می کند [۲]. با توسعه سریع فناوری ربات های الهام گرفته شده از طبیعت، فناوری مواد، فناوری نمونه سازی سریع و فناوری کنترل هوشمند، ربات های نرم به یکی از کانون های تحقیقاتی در زمینه ربات ها تبدیل شده است. این ربات ها عمدتاً از مواد الاستیک نرم تشکیل شده اند که می توانند در برابر تغییر شکل های زیاد و مداوم با درجه آزادی بالا مقاومت کنند [۳]. تحقیقات در زمینه ربات های نرم دیرتر از

ربات های صلب شروع شدند، اما پس از توسعه سریع در سال های اخیر، فعالیت های تحقیقاتی زیادی برای طراحی و ساخت ربات های نرم در بخش های مختلفی از جمله پزشکی [۴-۸]، هوافضا [۹-۱۱]، خودرو [۱۲]، انرژی های تجدیدپذیر [۱۳، ۱۴] و اکتشاف در اقیانوس ها و عملیات فراساحلی [۱۵] رشد قابل توجهی داشته است.

محرک های مختلفی از جمله محرک های الاستومرهای سیالی، آلیاژهای حافظه دار، پلیمرهای حافظه دار، الاستومرهای دی الکتریک و محرک های مغناطیسی برای حرکت دادن ربات های نرم در کاربردهای مختلفی استفاده می شوند. هر کدام از این محرک ها بر اساس ویژگی هایی که دارد مورد استفاده قرار می گیرد. همه این محرک ها در مقایسه با سیستم های مبتنی بر موتورهای الکترومغناطیسی دارای محدودیت هایی در عملکرد و قابلیت کنترل هستند. در محرک های الاستومری معمولاً از دو ماده قابل کشسان و غیرقابل کشسان و یک سیال مانند هوا در داخل آن استفاده می شود که با تغییر در فشار سیال

* نویسنده گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: r.dehghani@kgut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

حرکت ربات تامین می‌شود [۱۶-۱۸]. با توجه به ساختار این محرک‌ها و تطبیق‌پذیری خوبی که با محیط دارند، از آنها در صنایع مختلف و پزشکی مانند تعاملات ربات و انسان استفاده می‌شود [۱۹]. از ویژگی‌های مهم این نوع محرک‌ها، وابستگی سختی سازه‌ای آنها به فشار سیال داخل آنها است که موجب بکارگیری خاص آنها می‌شود [۲۰]. ربات‌های نرم مجهز به محرک‌های آلیاژهای حافظه‌دار دارای وزن کمی هستند و برای کاربردهای حساس و پزشکی کاربرد دارند. در این ربات‌ها، با تغییر دمای محرک، که ممکن است سیم یا فنر آلیاژ حافظه‌دار باشد، تغییر فاز مارتنزیت و آستنیت در محرک اتفاق می‌افتد در نتیجه سختی محرک تغییر می‌کند و موجب حرکت ربات نرم می‌شود [۲۱-۲۳]. پلیمرهای حافظه‌دار موادی هستند که می‌توانند یک یا چند شکل موقت را از یک شکل دائمی به خاطر بسپارند و در اثر تغییر دما تغییر شکل انجام می‌شود. این پلیمرها دارای ویژگی‌هایی از جمله چگالی کم، تغییر شکل‌پذیری بالا، زیست سازگاری و زیست تخریب‌پذیری هستند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که در ربات‌های نرم برای عملیات تکراری مورد استفاده قرار گیرند [۲۴]. الاستومرهای دی‌الکتریک نوع دیگری از محرک‌های ربات‌های نرم هستند که توسط جریان الکتریکی بین الکترودهای انعطاف‌پذیر و پلیمرهای دی‌الکتریک حرکت در ربات نرم را ایجاد می‌کنند [۲۵]. با توجه به برخی چالش‌های این محرک‌ها از جمله سطوح نیروی محرک، طول عمر و سطح ولتاژ فعال‌سازی، هنوز از این محرک‌ها برای کاربردهای عملی در رباتیک پزشکی و صنعتی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند [۲۶].

محرک‌های الکترومغناطیسی دسته دیگری از محرک‌ها هستند که برای حرکت دادن ربات‌های نرم مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجایی که محرک‌های مغناطیسی می‌توانند به صورت غیرتماسی توسط یک میدان مغناطیسی هدایت شوند، بهره‌برداری از مغناطیس برای تولید نیرو و گشتاور برای نسل جدید رباتیک پزشکی به عنوان یک روش کارآمد در نظر گرفته می‌شود. این محرک‌ها می‌توانند هم قدرت مورد نیاز و هم کنترل دقیق ربات را به ویژه در کاربردهای کوچک و ظریف فراهم کنند [۲۷، ۲۸]. مغناطیس در حال حاضر جایگاه ویژه خود را پیدا کرده و ثابت کرده است که روشی مؤثر و تأثیرگذار در بسیاری از کاربردهای مهندسی است [۲۹، ۳۰]. در حال حاضر، میکرو ربات‌ها و ربات‌های نرم به عنوان عاملی که از بیرون انرژی و ورودی‌های کنترل را دریافت می‌کنند از محرک‌های مغناطیسی استفاده می‌کنند. استفاده از مغناطیس برای کنترل چنین ربات‌هایی که می‌توانند از طریق یک سیستم سیم‌پیچ الکترومغناطیسی یا یک سیستم آهنرباهای دائمی کنترل شوند، محبوبیت پیدا کرده است [۳۱]. از ربات‌های نرم مجهز به محرک مغناطیسی برای تصویر برداری تشخیصی کم‌تهاجمی، تحویل دارو، آندوسکوپی کپسولی و آندوسکوپی رباتیکی در بسیاری از نواحی بدن از جمله شکم، قلب، مغز، چشم، گوش و سیستم عروقی می‌توان استفاده کرد. اندازه این ربات‌ها از زیر میلی‌متر تا ده‌ها سانتی‌متر متفاوت است و هر کدام چالش منحصر به فردی دارد اما تحریک آنها بر اساس اصول فیزیکی یکسانی عمل می‌کنند [۳۲].

یکی از مهم‌ترین چالش‌های ربات‌های نرم، مدل دینامیکی مناسب برای کنترل دقیق آنها است. روش‌های مختلفی برای مدل دینامیکی ربات‌های نرم توسط محققین ارائه شده است. از جمله این روش‌ها، روش المان محدود [۳۳، ۳۴]، روش انحنای ثابت [۳۵-۳۷] و روش

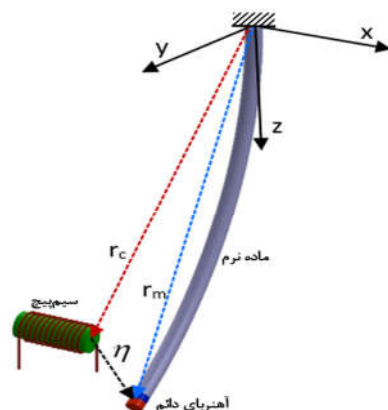
میله‌های کاسرت^۱ [۳۸-۴۰] است. هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایب منحصر به خود را دارد. در روش المان محدود، مدل‌سازی نسبتاً دقیق است اما حجم محاسبات به قدری زیاد است که قابل استفاده در فرایند کنترل برخط نمی‌باشد. همچنین در روش انحنای ثابت، با توجه به کاهش قابل توجه درجات آزادی ربات نرم، این مدل در زمان واقعی رفتار ربات را پیش‌بینی می‌کند اما با توجه به دقت آن در کاربردهای خاصی قابل استفاده است. در روش میله کاسرت، رفتار ربات نرم توسط معادلات دیفرانسیل جزئی بیان می‌شود که با حل‌های تقریبی می‌توان به حل نسبتاً دقیق و سریع رسید.

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه مدل‌سازی ربات‌های نرم، تحقیقاتی در زمینه مدل‌سازی دینامیکی ربات‌های نرم مجهز به محرک الکترومغناطیسی انجام نشده است. از این رو در این مقاله، تحلیل سینماتیک و دینامیک ربات نرم مجهز به محرک الکترومغناطیسی انجام شده است. برای استخراج مدل دینامیکی ربات نرم از نظریه میله کسرت استفاده شده است. پس از اعتبار سنجی مدل دینامیکی ربات نرم، نتایج شبیه‌سازی‌های متعددی ارائه شده است. به طور خلاصه، نوآوری این مقاله در مدل‌سازی دینامیکی ربات نرم مجهز به محرک الکترومغناطیسی است.

بقیه مطالب این مقاله به شرح زیر ارائه شده است: در بخش دوم مدل‌سازی ربات نرم، که شامل معادلات دینامیکی ربات نرم و مدل‌سازی نیروهای الکترومغناطیس است، بیان شده است. در بخش سوم روش حل معادلات حرکت توضیح داده شده است. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی رفتار دینامیکی ربات نرم مورد نظر ارائه شده است و در بخش پنجم نتایج این مقاله جمع‌بندی و ارائه شده است.

۲- مدل سازی ربات نرم

سیستم مورد نظر در این مقاله مطابق شکل ۱، یک ربات نرم مجهز به محرک مغناطیسی است.



شکل ۱- طرحواره سیستم ربات نرم مجهز به محرک الکترومغناطیس

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود این ربات شامل یک بدنه از ماده ترموپلاستیک پلی‌اورتان، که در انتهای آن یک آهنربای دائم

¹ Cosserat rods theory

u در دستگاه موضعی است.

مشابه معادله (۱)، که از مشتقات نسبت به پارامتر طول استفاده شد، از مشتقات نسبت به زمان می‌توان استفاده کرد و ارتباط بین سرعت‌ها را نوشت. از این رو، سرعت خطی مرکز مقطع و سرعت زاویه آن مطابق معادله (۲) در دستگاه موضعی محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} q(s, t) &= R^T p_t \\ \omega(s, t) &= (R^T R_{,t})^V \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن $\frac{\partial(*)}{\partial t}$ در معادله (۲)، p_t سرعت مرکز مقطع در دستگاه پایه {A} است که از طریق ترانزاده ماتریس چرخش R به بردار سرعت q در دستگاه موضعی مرتبط می‌شود. همچنین نتیجه $R^T R_{,t}$ ماتریس پادمتقارنی است که معادل بردار سرعت زاویه‌ی سطح مقطع ω در دستگاه موضعی است.

بدین ترتیب معادلات (۱) و (۲) روابط سینماتیکی حاکم بر رفتار سطح مقطع ربات نرم هستند که با استفاده از موقعیت مرکز مقطع $p(s, t)$ و ماتریس چرخش مقطع $R(s, t)$ بدست آمده‌اند. اکنون باید شرایطی استخراج شود که توابع حاکم بر بردار $p(s, t)$ و ماتریس چرخش $R(s, t)$ باید برحسب به دو پارامتر s و t پیوسته باشند که شرایط سازگاری نامیده می‌شوند. برای این منظور، شرایطی بدست می‌آید که ترتیب مشتق در مشتقات متوالی آنها نسبت به دو پارامتر s و t بدون تاثیر باشد. به عبارت دیگر شرایط سازگاری از روابط $p_{,ts} = p_{,st}$ و $R_{,ts} = R_{,st}$ بدست می‌آیند. بنابراین شرایط سازگاری مطابق معادله (۳) بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} v_t &= \hat{u}q - \hat{\omega}v + q_s \\ \hat{u}_t &= \hat{u}\hat{\omega} - \hat{\omega}\hat{u} + \hat{\omega}_s \end{aligned} \quad (3)$$

که عملگر (*) برای نگاشت از فضای R^3 به فضای $SO(3)$ استفاده شده است.

اکنون معادلات حرکت ربات با استفاده از روابط تعادل برای قطعه‌ای از ربات شکل ۲ به طول δ ، مطابق معادله (۴) بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} n(\bar{s}) + n(c) + \int_c^{\bar{s}} f ds &= \int_c^{\bar{s}} \rho A p_{,tt} ds \\ m(\bar{s}) + m(c) + \int_c^{\bar{s}} [l + p(s, t) \times f] ds &+ p(\bar{s}) \times n(\bar{s}) \\ &+ p(c) \times n(c) \\ &= \int_c^{\bar{s}} (RJ\omega + p(s, t) \times \rho A p_{,t})_t ds \end{aligned} \quad (4)$$

که اولین رابطه (۴) از تعادل نیروها برای قطعه ربات نرم بدست می‌آید و دومین رابطه (۴) از تعادل ممان حول نقطه ابتدایی قطعه ربات بدست می‌آید. همچنین f و l به ترتیب نیرو و ممان گسترده خارجی؛ J ماتریس ممان اینرسی هستند. n و m به ترتیب نیرو و ممان داخلی هستند که با توجه به مدل ماده بدنه ربات بدست می‌آیند. لازم به ذکر است که معادلات حرکت (۴) در فریم پایه نوشته شده‌اند.

با مشتق گیری از روابط ذکر شده در معادله (۴) نسبت به $\bar{s}$ و جایگذاری $s = \bar{s}$ ، معادلات حرکت به صورت معادله (۵) بدست می‌آیند.

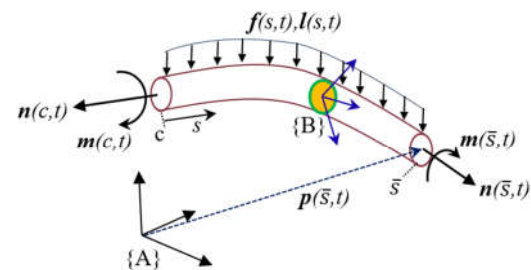
$$\begin{aligned} n_{,s} + f &= \rho A p_{,tt} \\ m_{,s} + l + p_s \times n &= (RJ\omega)_{,t} \end{aligned} \quad (5)$$

اکنون معادلات ساختاری حاکم بر رفتار ربات نرم باید مدل سازی شوند. از آنجایی که بدنه ربات از جنس ترموپلاستیک پلی‌اورتان در نظر گرفته شده است، رفتار آن به صورت ماده هاپر ویسکوالاستیک مدل می‌شود. بنابراین نیرو و ممان داخلی ربات به صورت الاستیک خطی و دمپینگ خطی مطابق معادله (۶) در نظر گرفته می‌شوند.

نصب شده است، و یک سیم‌پیچ با هسته آهنی خارج از ربات، که تولید میدان الکترومغناطیس را به عهده دارد، است. با تغییر دادن جریان عبوری از سیم‌پیچ، میدان مغناطیسی سیم‌پیچ تغییر کرده و در نتیجه موقعیت انتهای ربات نرم تغییر می‌کند. برای استخراج مدل دینامیکی ربات نرم از نظریه کسریت برای پیش‌بینی رفتار ربات نرم و از تحلیل میدان الکترومغناطیس برای محاسبه نیروی وارد بر ربات استفاده می‌شود.

۲-۱- معادلات دینامیکی ربات نرم

در این مقاله از نظریه میله کاسرت برای استخراج معادلات دینامیکی ربات استفاده می‌شود. نظریه میله‌های کاسرت روشی برای مدل سازی یک بعدی میله‌های باریک است که خمش، پیچش، کشش و برش را در نظر می‌گیرد و تمام حالت‌های ممکن تغییر شکل برای میله تحت طیف گسترده‌ای از شرایط مرزی در نظر گرفته می‌شود. در روش میله کاسرت، فرض می‌شود که سطح مقطع مدل در طول مدل ثابت است و نسبت طول به ابعاد سطح مقطع نیز بزرگ باشد. در این نظریه، میله باریک به عنوان یک منحنی تغییر شکل‌پذیر با بردارهای قابل تغییر متصل به آن برای مشخص کردن جهت آن مدل می‌شود و معادلات سیستم به صورت مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی مرتبه دوم کوپل شده بدست می‌آیند. در شکل ۲ قطعه‌ای از ربات نرم نشان داده شده است برای تحلیل سینماتیک و دینامیک آن از دو دستگاه مختصات ثابت {A} و موضعی {B} استفاده می‌شود. همچنین از s و t به ترتیب برای پارامترهای مستقل مربوط به موقعیت مرکز مقطع و زمان استفاده می‌شود. در حالت کلی، نظریه میله کاسرت با استفاده از بردار موقعیت مرکز مقطع $p(s, t) \in R^3$ و ماتریس چرخش مقطع $R(s, t) \in SO(3)$ مشخص می‌شود. همچنین نرخ تغییر موقعیت نسبت به پارامتر طول در دستگاه موضعی با $v(s, t)$ و انحنا در دستگاه موضعی با $u(s, t)$ نشان داده می‌شود و مطابق معادله ۱ محاسبه می‌شوند.



شکل ۲- قطعه‌ای از میله تحت بارگذاری گسترده از c تا $\bar{s}$

$$\begin{aligned} v(s, t) &= R^T p_{,s} \\ u(s, t) &= (R^T R_{,s})^V \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن $\frac{\partial(*)}{\partial s}$ و عملگر (*)^V برای نگاشت از فضای $SO(3)$ به فضای R^3 استفاده شده است [۳۸]. در معادله (۱)، $p_{,s}$ مشتق بردار موقعیت مرکز مقطع نسبت به پارامتر طول در دستگاه پایه {A} است که از طریق ترانزاده ماتریس چرخش R به بردار v در دستگاه موضعی مرتبط می‌شود. جزئیات ماتریس چرخش R در بخش ۳ ارائه شده است. همچنین نتیجه $R^T R_{,s}$ ماتریس پادمتقارنی است که معادل بردار انحنا

$$\begin{aligned} \mathbf{n} &= \mathbf{R}(\mathbf{K}_s(\mathbf{v} - \mathbf{v}_0) + \mathbf{B}_s \mathbf{v}_t) \\ \mathbf{m} &= \mathbf{R}(\mathbf{K}_b(\mathbf{u} - \mathbf{u}_0) + \mathbf{B}_b \mathbf{u}_t) \end{aligned} \quad (6)$$

که $\mathbf{v}_0$ و $\mathbf{u}_0$ به ترتیب بردار نرخ تغییر موقعیت نسبت به پارامتر طول و بردار انحنای اولیه ربات هستند که با توجه به امتداد ربات در جهت محور $\mathbf{v}_0 = [0, 0, 1]^T$ ، z ، z انحنای اولیه برابر $\mathbf{u}_0 = 0$ است. همچنین $\mathbf{K}_s$ و $\mathbf{B}_s$ به ترتیب ماتریس‌های سفتی و دمپینگ برای برش و کشش هستند؛ $\mathbf{K}_b$ و $\mathbf{B}_b$ به ترتیب ماتریس‌های سفتی و دمپینگ برای خمش و پیچش هستند. اگر محور z دستگاه موضعی مماس بر منحنی مرکز ربات باشد و محورهای x و y عمود بر منحنی مرکز ربات باشد، در این صورت سفتی کششی در جهت z به صورت EA و سفتی برشی در جهت‌های x و y به صورت GA خواهد بود. همچنین سفتی پیچشی حول محور z به صورت GI_{zz} و سفتی خمشی حول محورهای x و y به صورت EI_{xx} خواهد بود. به عبارت دیگر ماتریس‌های سفتی مطابق رابطه (۷) بیان می‌شوند.

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_s &= \text{diag}(GA, GA, EA) \\ \mathbf{K}_b &= \text{diag}(EI_{xx}, EI_{yy}, GI_{zz}) \end{aligned} \quad (7)$$

که E و G به ترتیب مدول یانگ و مدول برشی؛ A سطح مقطع و I_{xx} ، I_{yy} ، I_{zz} امان‌های ممان دوم سطح هستند.

بنابراین معادلات حرکت ربات شامل معادلات سینماتیکی (۱) و (۲)، معادلات سازگاری (۳)، معادلات دینامیکی (۵) و معادلات ساختاری (۶) هستند. این معادلات به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی بر حسب s و t هستند. با حل این معادلات به همراه شرایط مرزی آن در طول زمان، شکل ربات در حین حرکت بدست می‌آید. لازم به ذکر است برای نیروهای متمرکز، به عنوان نمونه نیروی F و ممان L در $s = \hat{s}$ ، باید شرایط زیر در حین حل در نظر گرفته شود.

$$\begin{aligned} \mathbf{n}(\hat{s}^-) &= \mathbf{n}(\hat{s}^+) + \mathbf{F}(\hat{s}) \\ \mathbf{m}(\hat{s}^-) &= \mathbf{m}(\hat{s}^+) + \mathbf{L}(\hat{s}) \end{aligned} \quad (8)$$

که بالانویس $(-)$ و $(+)$ به ترتیب برای نشان دادن قبل و بعد از محل بارگذاری نیروی متمرکز استفاده شده است.

۲-۲- مدل سازی نیروهای الکترومغناطیس

در انتهای ربات نرم یک آهن‌ربای دائمی نصب شده است که تحت تاثیر میدان الکترومغناطیس ناشی از سیم‌پیچ قرار می‌گیرد. این میدان الکترومغناطیس در اثر عبور جریان از سیم‌پیچ مطابق معادله (۹) بدست می‌آید [۴۱].

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{d\mathbf{l} \times \boldsymbol{\eta}}{\|\boldsymbol{\eta}\|^3} \quad (9)$$

انتگرال‌گیری روی مسیر سیم‌پیچ انجام می‌شود که در اینجا فرض می‌شود یک مسیر دایره‌ای تکرار شونده است. ضریب ثابت نفوذپذیری میدان مغناطیسی در فضای آزاد برابر با $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} (H/m)$ در نظر گرفته می‌شود. در معادله (۹)، $d\mathbf{l}$ بردار تغییرات جریان روی مسیر سیم‌پیچ است. همچنین با توجه به اینکه تخلیه اثر سلفی وابسته به مدار الکتریکی متصل به سیم‌پیچ است فرض بر این است که این مدار الکتریکی با ثابت زمانی الکتریکی مناسبی طراحی می‌شود که تغییرات ناگهانی در جریان سیم‌پیچ ایجاد نمی‌شود.

اکنون با فرض قرار گیری سیم‌پیچ در جهت محور x ، این بردار جریان به صورت معادله (۱۰) خواهد شد.

$$d\mathbf{l} = i(rcos\theta\mathbf{k} - rsin\theta\mathbf{j})d\theta \quad (10)$$

که r شعاع هسته سیم‌پیچ و i جریان عبوری از سیم‌پیچ است و θ زاویه

پیچیدن سیم به دور هسته را نشان می‌دهد. در این صورت با در نظر گرفتن شکل ۱ بردار میدان الکترومغناطیس مطابق معادله (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 Ni}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(rcos\theta\mathbf{k} - rsin\theta\mathbf{j}) \times (\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_c)}{\|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_c\|^3} d\theta \quad (11)$$

که N تعداد دور سیم‌پیچ است و بردارهای $\mathbf{r}_m$ و $\mathbf{r}_c$ به ترتیب موقعیت آهنربای دائم و موقعیت مرکز سیم‌پیچ مطابق شکل ۱ را نشان می‌دهند.

اکنون با توجه به این میدان الکترومغناطیس، نیرو و ممان تولید شده به انتهای ربات محاسبه می‌شود. برای این منظور از معادله (۱۲) برای محاسبه آنها استفاده می‌شود [۴۲].

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_m &= \nabla(\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}) \\ \mathbf{M}_m &= \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B} \end{aligned} \quad (12)$$

که $\boldsymbol{\mu}$ ممان مغناطیسی^۱ آهن‌ربا است که جهت آن همانند جهت مغناطیس در آهن‌ربای دائم و اندازه آن به قدرت مغناطیسی^۲ و حجم آهن‌ربا بستگی دارد. لازم به ذکر است در تحلیل این نیروها، فرض شده است که ابعاد آهن‌ربای دائمی در نوک ربات کوچک است و آن را می‌توان به عنوان یک نقطه دو قطبی ایده‌آل^۳ در نظر گرفت که مقدار نیرو و گشتاور اعمالی به آن از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود [۴۲].

۳- روش حل معادلات حرکت

همانطور که در بخش قبل مشاهده شد، معادلات حرکت به صورت معادلات دیفرانسیلی پاره‌ای بر حسب s و t بدست آمدند. برای حل این معادلات فرض می‌شود شکل اولیه ربات مشخص است و از تقریب مشتقات زمانی با استفاده از رابطه دیفرانسیلی بازگشتی^۴ مرتبه α (BDF_α) استفاده می‌شود [۳۹]. بدین ترتیب معادلات حرکت به فرم معادلات دیفرانسیل معمولی بر حسب پارامتر طول s خواهند شد که به همراه شرایط مرزی حل می‌شوند.

برای این منظور، مشتق زمانی متغیر در هر لحظه بر حسب مقدار متغیر در همان لحظه و تاریخچه زمانی قبلی متغیر نوشته می‌شود. برای مثال برای مشتق زمانی متغیر y در مرحله Δt به صورت معادله (۱۳) نوشته می‌شود.

$$y_t^{(i)} = c_0 y^{(i)} + y_b^{(i)} \quad (13)$$

که $y^{(i)}(s) = y(t_i, s)$ و $y_b^{(i)}$ ترکیب خطی مقادیر متغیر در زمان‌های قبلی مطابق معادله (۱۴) در نظر گرفته می‌شود.

$$y_b^{(i)} = c_1 y^{(i-1)} + c_2 y^{(i-2)} + d_1 y_t^{(i-1)} \quad (14)$$

ضرایب ثابت این تقریب به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند [۳۹].

$$\begin{aligned} c_0 &= (1.5 + \alpha)/(\Delta t(1 + \alpha)) \\ c_1 &= -2/\Delta t \\ c_2 &= (0.5 + \alpha)/(\Delta t(1 + \alpha)) \\ d_1 &= \alpha/(1 + \alpha) \end{aligned} \quad (15)$$

که Δt گام زمانی و پارامتر $\alpha \in [-0.5, 0]$ است، برای روش دوزنقه‌ای $\alpha = -0.5$ و در روش BDF2 مقدار این پارامتر $\alpha = 0$ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با این تقریب حل معادلات دیفرانسیل معمولی بر

¹ Magnetic moment

² Magnetization

³ Point dipole

⁴ Backward Differentiation Formula

پایه ربات نرم است که در معادله (۲۱) ارائه شده‌اند.

$$\begin{aligned} q(t_0, 0) &= 0 \\ \omega(t_0, 0) &= 0 \\ p(t_0, 0) &= p_0 \\ e(t_0, 0) &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

همچنین با توجه به اعمال نیرو و ممان متمرکز در انتهای ربات توسط میدان الکترومغناطیس، شرایط انتهایی مطابق معادله (۲۲) در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} n(t, L) &= F_m \\ m(t, L) &= M_m \end{aligned} \quad (22)$$

بنابراین برخی شرایط مرزی روی پایه ربات و برخی روی انتهای ربات است، از این رو، معادلات (۱۸) و (۱۹) با شرایط مرزی (۲۱) و (۲۲) با استفاده از روش شوتینگ حل می‌شوند.

۴- شبیه‌سازی رفتار دینامیکی ربات نرم

در این قسمت پس از اعتبار سنجی مدل دینامیکی ربات نرم، نتایج شبیه‌سازی رفتار دینامیکی ربات نرم مجهز به محرک مغناطیسی شکل ۱ ارائه می‌شود. مشخصات فیزیکی ربات مورد نظر در جدول ۱ ارائه شده است که خواص ماده نرم ربات از مرجع [۴۴] استفاده شده است. همچنین برای شبیه‌سازی از روش BDF2 استفاده می‌شود که در آن مقدار پارامتر $\alpha = 0$ برای محاسبه ضرایب ذکر شده در معادله (۱۵) در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی ربات نرم

پارامتر (واحد)	نماد	مقدار
طول ربات نرم (mm)	L	۱۰
قطر خارجی (mm)	D _o	۵
قطر داخلی (mm)	D _i	۳
مدول یانگ (Kpa)	E	۶۰۰
ضریب پواسون	ν	۰/۴۹
ممان مغناطیسی آهنربای دائم (A.m ²)	μ	۰/۱۶۱
قطر سیم پیچ (mm)	D _c	۲۰
تعداد دور سیم پیچ	N	۱۰۰۰

۴-۱- اعتبار سنجی مدل ربات نرم

برای اعتبار سنجی مدل‌سازی ربات نرم، ابتدا نتایج شبیه‌سازی آن با نتایج نظریه حرکت صفحه‌ای یک تیر یکسر گیردار مجهز به آهن‌ربا در انتهای آن مقایسه می‌شوند و سپس نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مرجع [۴۴] مقایسه می‌شوند. در حالت اول، زمانی که انتهای تیر یکسر گیردار تحت میدان مغناطیسی یکنواخت باشد یک گشتاور ثابت به انتهای تیر وارد می‌شود و تغییر شکل آن به صورت تحلیلی قابل محاسبه است [۴۴ و ۴۵]. در این حالت شیب انتهای تیر از رابطه (۲۳) قابل محاسبه است.

$$\alpha_{tip} = \frac{\mu B_f z_L \sin(\alpha_{field} - \alpha_{tip})}{EI} \quad (23)$$

که در آن α_{tip} و α_{field} به ترتیب زاویه شیب انتهای تیر و زاویه میدان مغناطیسی؛ B_f اندازه میدان مغناطیسی یکنواخت و z_L موقعیت انتهای تیر است. لازم به ذکر است، با توجه به شکل ۱، تیر در جهت محور z

حسب پارامتر طول s در لحظه t_i تنها به حل معادلات در لحظات t_{i-1} و t_{i-2} وابسته است.

برای اعمال روش تقریبی فوق بر سیستم معادلات حرکت ربات نرم، مشتقات متغیرها مطابق معادله (۱۶) در نظر گرفته می‌شوند.

$$\begin{aligned} v_t &= c_0 v + v_b \\ u_t &= c_0 u + u_b \\ q_t &= c_0 q + q_b \\ \omega_t &= c_0 \omega + \omega_b \end{aligned} \quad (16)$$

که پایین‌نویس b مقادیر قبلی متغیر را مانند رابطه (۱۴) نشان می‌دهد. با استفاده از روابط فوق و معادلات ساختاری (۶)، متغیرهای u و v مطابق معادله (۱۷) بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} v &= (K_s + c_0 B_s)^{-1} (R^T n + K_s v_0 - B_s v_b) \\ u &= (K_b + c_0 B_b)^{-1} (R^T m + K_b u_0 - B_b u_b) \end{aligned} \quad (17)$$

همچنین معادلات سینماتیک (۱)، معادلات ساختاری (۳) و معادلات حرکت (۵) به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$\begin{aligned} p_s &= R v \\ R_{,s} &= R \hat{u} \\ q_{,s} &= c_0 v + v_b - \hat{u} q + \hat{\omega} v \\ \hat{\omega}_{,s} &= c_0 u + u_b - \hat{u} \hat{\omega} + \hat{\omega} \hat{u} \\ n_{,s} &= \rho AR(\hat{\omega} q + c_0 q + q_b) - f \\ m_{,s} &= R(\hat{\omega} j \omega + J(c_0 \omega + \omega_b)) - p_{,s} \times n - l \end{aligned} \quad (18)$$

معادلات (۱۸) در هر لحظه از زمان تشکیل یک دستگاه معادلات دیفرانسیلی معمولی می‌دهند که با توجه به شرایط مرزی در طول ربات نرم حل می‌شوند و شکل ربات در هر لحظه بدست می‌آید.

نکته‌ی دیگری که برای حل دستگاه معادلات (۱۸) باید مد نظر قرار داد، انتگرال‌گیری عددی معادله $R_s = R \hat{u}$ است که عدم دقت انتگرال‌گیری می‌تواند منجر به این شود که $R(s) \notin SO(3)$ البته این مسئله ممکن است به دلیل انتگرال‌گیری صرفاً در طول قوس قابل چشم‌پوشی باشد، اما می‌توان بجای انتگرال‌گیری از ماتریس چرخش از بردار کوانترنیون^۱ معادل آن چرخش استفاده کرد و از مشکل عدم تعادل ماتریس چرخش بدست آمده جلوگیری نمود [۴۳]. به همین منظور، معادله دیفرانسیلی ماتریس چرخش با معادله‌ی معادل آن برای یک کوانترنیون^۱ $e \in \mathbb{H}$ جایگزین شده است و به صورت $e = e_1 + e_2 i + e_3 j + e_4 k$ بیان می‌شود. مشتق طولی آن مطابق معادله (۱۹) نوشته می‌شود.

$$e_{,s} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -u_1 & -u_2 & -u_3 \\ u_1 & 0 & u_3 & -u_2 \\ u_2 & -u_3 & 0 & u_1 \\ u_3 & u_2 & -u_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} \quad (19)$$

بر اساس این بردار چهار عضوی e ، ماتریس چرخش به صورت معادله (۲۰) تعریف می‌شود.

$$R(e) = I + \frac{2}{e^T e} \begin{bmatrix} -e_3^2 - e_4^2 & e_2 e_3 - e_4 e_1 & e_2 e_4 + e_3 e_1 \\ e_2 e_3 + e_4 e_1 & -e_2^2 - e_4^2 & e_3 e_4 - e_2 e_1 \\ e_2 e_4 - e_3 e_1 & e_3 e_4 + e_2 e_1 & -e_2^2 - e_3^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

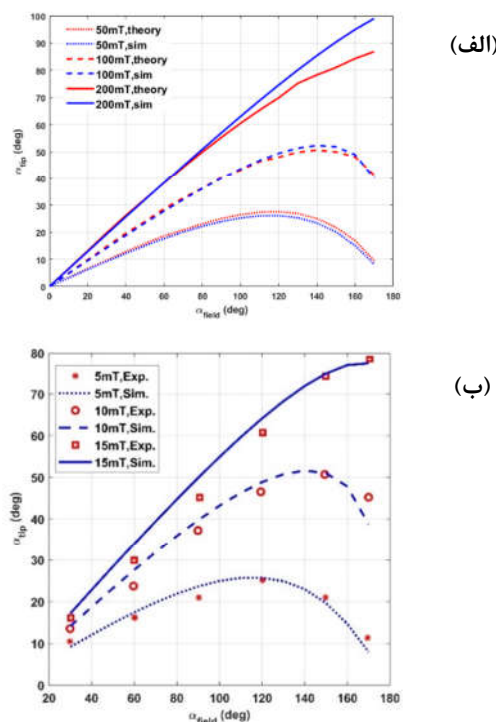
لازم به ذکر است که لازم نیست محدودیت نرم بردار کوانترنیون برابر یک در نظر گرفته شود. چون این نرمال‌سازی در (۲۰) لحاظ شده است، و معادله (۱۹) با معادله (۲۰) سازگار است [۴۳].

برای حل معادلات (۱۸) و (۱۹)، شرایط مرزی مختلفی با توجه به شرایط ربات اعمال می‌شود. در این مقاله تعدادی از شرایط مربوط به

¹ Quaternion

در نظر گرفته شده است.

اکنون برای اعتبار سنجی مدل سازی ربات نرم، زاویه شیب انتهایی ربات نرم برحسب زاویه میدان مغناطیسی، که از شبیه سازی ربات نرم و حل نظریه معادله (۲۳) بدست می آیند، مقایسه می شوند. در شبیه سازی ها تعداد تقسیمات طولی برابر ۴۰ و گام های زمانی ۰/۰۱ استفاده شده است. در شکل ۳(الف) نتایج شبیه سازی و نظریه به ازای میدان مغناطیسی های مختلف ترسیم شده است.

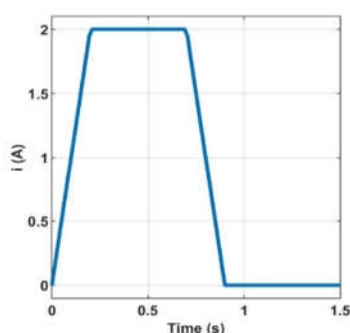


شکل ۳- اعتبار سنجی زاویه انتهایی ربات نرم بر حسب زاویه میدان مغناطیسی، (الف) مقایسه نتایج شبیه سازی و نظریه، (ب) مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی مرجع [۴۴]

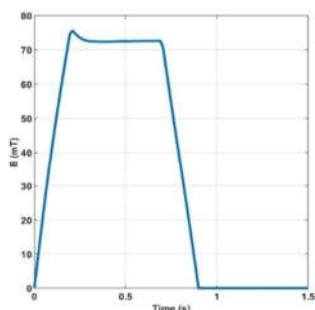
همانطور که شکل ۳(الف) نشان می دهد نتایج شبیه سازی ربات نرم انطباق خوبی با نتایج نظریه دارند. با افزایش مقدار و زاویه میدان مغناطیسی اختلاف نتایج بیشتر می شود و این به دلیل تفاوت ماهیت حل دو روش می باشد که در شبیه سازی تغییر شکل های بزرگ در نظر گرفته می شوند ولی در حل نظریه رابطه (۲۳) تغییر شکل های کوچک مد نظر هستند. در حالت بعدی اعتبار سنجی مدل دینامیکی، نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی مرجع [۴۴] مقایسه شده است. در این حالت با توجه به اینکه ربات مورد نظر در مرجع [۴۴] از مواد نرم و فنر تشکیل شده است از یک مدل الاستیک تقریبی دو مگا پاسکال استفاده می شود. مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی در شکل ۳(ب) نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است نتایج شبیه سازی ربات نرم انطباق نسبتاً خوبی با نتایج تجربی مرجع [۴۴] دارد.

۲-۴- نتایج شبیه سازی رفتار ربات نرم

در این قسمت نتایج شبیه سازی حرکت ربات نرم در اثر جریان ورودی سیم پیچ مطابق شکل ۴ ارائه می شود. وضعیت اولیه ربات به صورت مستقیم در صفحه قائم در نظر گرفته می شود و شرایط اولیه صفر برای سرعت های خطی و زاویه ای در نظر گرفته می شود. سیم پیچ محرک در موقعیت (۰، ۵، ۱۰) - میلی متر و در جهت x قرار دارد. جریان ورودی ابتدا در ۰/۲ ثانیه به ۲ آمپر می رسد و به مدت ۰/۵ ثانیه ثابت است و سپس در مدت ۰/۲ ثانیه به صفر میرسد. این جریان ورودی، یک میدان الکترومغناطیس مانند شکل ۵ در موقعیت آهنربای دائم انتهایی ربات نرم تولید می کند که باعث حرکت ربات نرم می شود. همانطور که این شکل نشان می دهد مقدار میدان مغناطیسی در حین افزایش جریان، افزایش می یابد و در حین ثابت بودن و کاهشی شدن جریان، مقدار میدان نیز ثابت و کاهشی می شود.

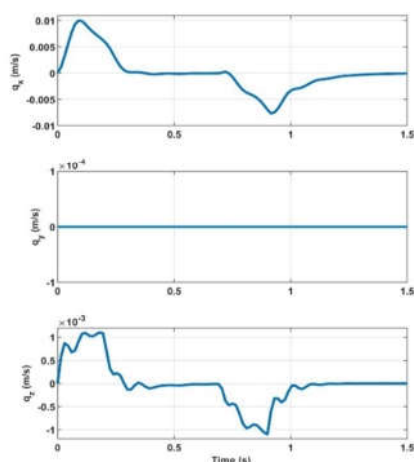


شکل ۴- جریان ورودی به سیم پیچ

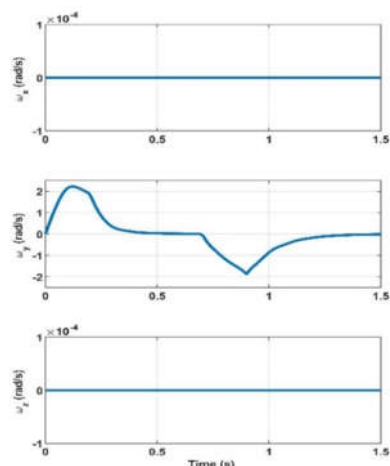


شکل ۵- مقدار میدان الکترومغناطیس روی انتهایی ربات

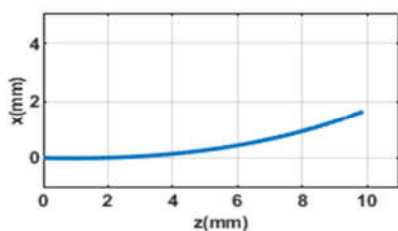
در شکل ۶ موقعیت انتهایی ربات در حین حرکت نشان داده شده است. لازم به توضیح است که با توجه به موقعیت و وضعیت سیم پیچ، حرکت ربات نرم در صفحه x-z خواهد بود. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود موقعیت افقی انتهایی ربات نرم (x_e) در اثر افزایش و کاهش جریان ورودی به ترتیب افزایش و کاهش می یابد و پس از اینکه دوباره جریان صفر شود موقعیت افقی نیز صفر می شود. همچنین در جهت عمودی، موقعیت عمودی انتهایی ربات (z_e) تغییرات کمی دارد و در جهت y هیچ جابه جایی از خود نشان نمی دهد. در شکل ۷ شیب انتهایی ربات نرم در حین حرکت نشان داده شده است. لازم به ذکر است α_{tip} زاویه شیب انتهایی ربات با محور z می باشد. همانطور که این شکل نشان می دهد در حین افزایش و کاهش جریان ورودی مقدار شیب افزایش و کاهش پیدا می کند و پس از صفر شدن جریان مقدار



شکل ۸- سرعت انتهای ربات در حین حرکت



شکل ۹- سرعت زاویه آهنربای دائم در حین حرکت

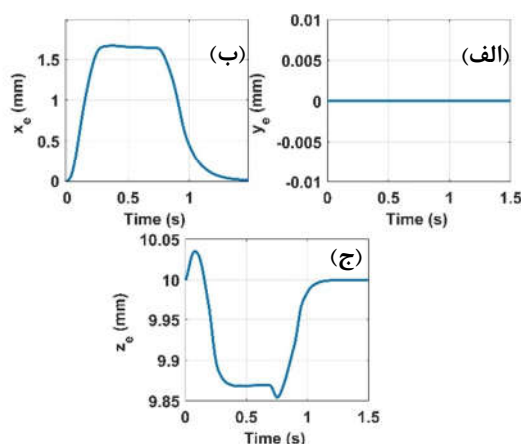


شکل ۱۰- شکل ربات نرم در لحظه ۰/۵ ثانیه

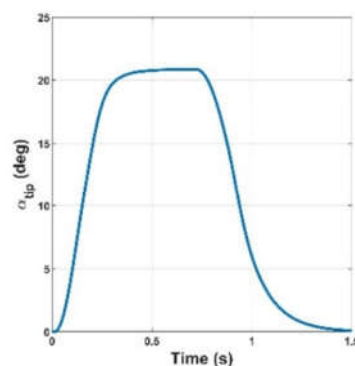
۳-۴- تاثیر جریان سیم پیچ بر رفتار ربات

در این قسمت تاثیر جریان عبوری از سیم پیچ برای تولید میدان مغناطیسی بر رفتار ربات نرم بررسی می شود. برای این منظور جریان الکتریکی در بازه $[-2 \quad 2]$ آمپر در نظر گرفته می شود و سپس جریان به مدت ۱/۵ ثانیه اعمال می شود. لازم به توضیح است که وضعیت ربات نرم در انتهای این مدت زمان ثابت شده است و شکل ربات تغییری نمی کند. بنابراین، در این شبیه سازی ها جریان الکتریکی از منفی دو آمپر با گام های ۰/۲ آمپر افزایش می یابد و نتایج آنها ارائه می شود. در شکل ۱۱ تاثیر جریان ورودی بر موقعیت افقی انتهای ربات نرم نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش جریان،

شیب انتهای ربات نیز صفر می شود.



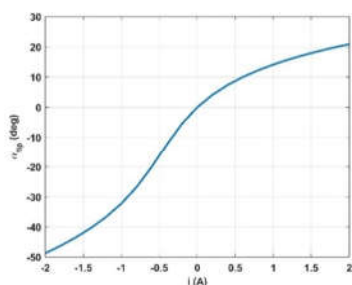
شکل ۶- موقعیت انتهای ربات نرم در حین حرکت، (الف) موقعیت در جهت x، (ب) موقعیت در جهت y، (ج) موقعیت در جهت z



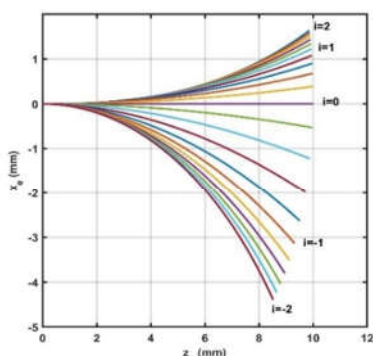
شکل ۷- شیب انتهای ربات نرم در حین حرکت

در شکل ۸ سرعت انتهای ربات نرم در حین حرکت ترسیم داده شده است که نشان می دهد در حین تغییر جریان ورودی تغییر سرعت وجود دارد و در جایی که جریان ورودی ثابت است انتهای ربات نیز به سرعت صفر می رسد. همچنین در دو جهت x و z تغییر سرعت وجود دارد و در جهت y تغییر سرعتی مشاهده نمی شود.

در شکل ۹ سرعت زاویه آهنربای دائم انتهای ربات نرم ترسیم شده است که نشان می دهد حول محور y سرعت زاویه در حین تغییر جریان ورودی تغییر می کند و پس از ثابت شدن جریان ورودی به صفر می رسد. برای نشان دادن شکل ربات نرم، در شکل ۱۰ وضعیت ربات نرم در لحظه ۰/۵ ثانیه نشان داده شده است که در این لحظه، جریان در بیشترین مقدار خود قرار دارد. این شکل نشان می دهد که ابتدای ربات نرم بدون تغییر شکل است و انتهای آن با توجه به وجود نیروهای الکترومغناطیس تغییر شکل بیشتری دارد.



شکل ۱۳- تاثیر جریان سیم‌پیچ بر شیب انتهایی ربات نرم



شکل ۱۴- تاثیر جریان سیم‌پیچ بر شکل ربات نرم

۴-۴- تاثیر فاصله سیم‌پیچ بر رفتار ربات

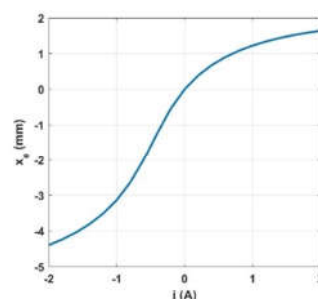
در این قسمت تاثیر فاصله مرکز سیم‌پیچ از انتهایی ربات بر رفتار ربات بررسی می‌شود. برای این منظور موقعیت افقی سیم‌پیچ در جهت محور x - از صفر تا ۱۰ میلی‌متر با گام‌های دو میلی‌متر تغییر داده می‌شود و شبیه‌سازی‌ها انجام می‌شود و نتایج آن‌ها ارائه می‌شود. لازم به ذکر است در این حالت جریان عبوری از سیم‌پیچ دو آمپر در نظر گرفته می‌شود.

در شکل ۱۵ تاثیر فاصله سیم‌پیچ بر موقعیت افقی انتهایی ربات ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد با افزایش فاصله میزان جابه‌جایی انتهایی ربات به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد و این به دلیل کاهش اندازه میدان مغناطیسی ناشی از افزایش فاصله می‌باشد. شکل ۱۶ نشان می‌دهد که تغییر دادن فاصله، تغییر کمی بر روی جابه‌جایی عمودی دارد. از مقایسه نتایج شکل ۱۵ و شکل ۱۶ مشخص است که جابه‌جایی افقی در مقایسه با جابه‌جایی عمودی انتهایی ربات بیشتر است و این به دلیل وضعیت سیم‌پیچ محرک است که در امتداد محور افقی x و نزدیک انتهایی ربات قرار دارد.

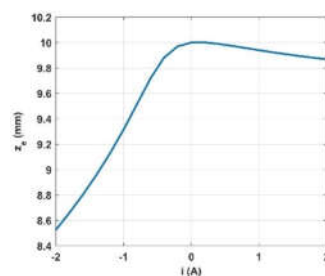
جابه‌جایی افقی انتهایی ربات افزایش می‌یابد. همچنین نشان می‌دهد موقعیت انتهایی ربات تابع جهت جریان ورودی است بطوری که مثلاً اگر جریان یک آمپر به منفی یک آمپر تغییر داده شود اندازه جابه‌جایی افقی انتهایی ربات تقریباً دو برابر می‌شود. لازم به ذکر است که در حالتی که جریان منفی است انتهایی ربات نرم به مرکز حلقه سیم‌پیچ نزدیک می‌شود بنابراین میدان مغناطیس قوی‌تری نسبت به حالت جریان مثبت تولید می‌شود و در نتیجه تغییر شکل ربات بیشتر شده و جابه‌جایی افقی انتهایی بیشتر می‌شود. در شکل ۱۲ تاثیر جریان ورودی بر موقعیت عمودی انتهایی ربات نرم نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۱۱ و شکل ۱۲ مشاهده می‌شود جریان ورودی تاثیر بیشتری روی جابه‌جایی افقی انتهایی ربات به نسبت جابه‌جایی عمودی آن دارد و این به دلیل وضعیت قرار گیری حلقه سیم‌پیچ برای تولید میدان مغناطیسی است. لازم به ذکر است سیم‌پیچ در جهت محور افقی x قرار دارد.

در شکل ۱۳ شیب انتهایی ربات نرم در جریان‌های مختلف ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش جریان ورودی، شیب انتهایی ربات به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد. همچنین نشان می‌دهد این شیب تابع جهت جریان ورودی است بطوری که مثلاً اگر جریان یک آمپر به منفی یک آمپر تغییر داده شود شیب انتهایی ربات تقریباً دو برابر می‌شود زیرا در حالتی که جریان منفی است انتهایی ربات نرم به مرکز حلقه سیم‌پیچ نزدیک می‌شود و میدان مغناطیس قوی‌تری نسبت به حالت جریان مثبت تولید می‌شود و در نتیجه تغییر شکل ربات بیشتر شده و شیب انتهایی بیشتر می‌شود.

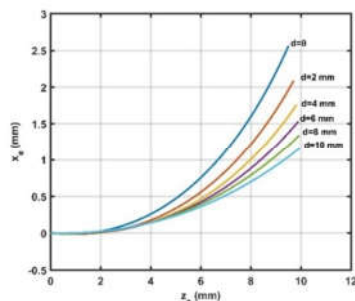
در شکل ۱۴ تاثیر جریان الکتریکی بر شکل ربات نرم نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است با اعمال جریان‌های منفی انتهایی ربات به حلقه سیم‌پیچ نزدیک می‌شود و میدان قوی‌تری ایجاد می‌شود و در نتیجه تغییر شکل در جریان‌های منفی بیشتر خواهد بود.



شکل ۱۱- تاثیر جریان سیم‌پیچ بر موقعیت افقی انتهایی ربات نرم



شکل ۱۲- تاثیر جریان سیم‌پیچ بر موقعیت عمودی انتهایی ربات نرم



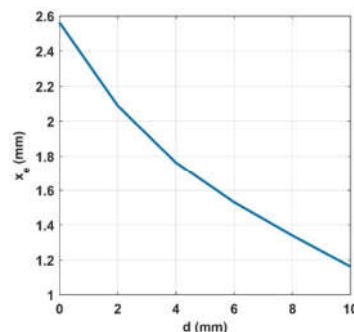
شکل ۱۸- تاثیر فاصله سیم پیچ بر شکل ربات نرم

۵- نتیجه گیری

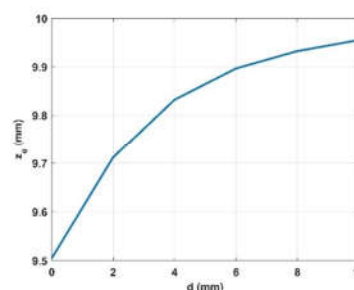
در این مقاله، مدل سازی دینامیکی یک ربات نرم مجهز به محرک الکترومغناطیسی ارائه شد. برای این منظور، معادلات سینماتیکی و دینامیکی ربات نرم توسط روش کاستر استخراج شده و سپس مدل سازی نیروهای الکترومغناطیس انجام شد. بدین ترتیب معادلات حاکم بر حرکت ربات نرم مورد نظر استخراج گردید. سپس اعتبار سنجی معادلات حرکت انجام شد. نتایج اعتبار سنجی نشان داد که نتایج روش ارائه شده در این مقاله به خوبی بر نتایج نظریه در حالت تغییر شکل های کوچک منطبق است. سپس شبیه سازی های مختلفی برای بررسی رفتار ربات نرم انجام شد و تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار ربات نرم بررسی شد. نتایج نشان داد مدل سازی دینامیکی ربات نرم ارائه شده در این مقاله، به خوبی رفتار ربات نرم مجهز به محرک الکترومغناطیس را پیش بینی می کند و از این مدل دینامیکی می توان در طراحی کنترلر برای ربات های نرم مجهز به محرک های الکترومغناطیس استفاده کرد.

۶- مراجع

- [1] Rich SI, Wood RJ, Majidi C. Untethered soft robotics. Nature Electronics. 2018;1(2):102-12.
- [2] Zhao W, Zhang Y, Wang N. Soft robotics: Research, challenges, and prospects. Journal of Robotics and Mechatronics. 2021;33(1):45-68.
- [3] Schmitt F, Piccin O, Barbe L, Bayle B. Soft Robots Manufacturing: A Review. Front Robot AI. 2018;5:84.
- [4] Dehghani H, Pourghodrat A, Terry BS, Nelson CA, Oleynikov D, Dasgupta P. Semi-Autonomous Locomotion for Diagnostic Endoscopy Device1. Journal of Medical Devices. 2015;9(3).
- [5] Kuang X, Roach DJ, Wu J, Hamel CM, Ding Z, Wang T, et al. Advances in 4D printing: materials and applications. Advanced Functional Materials. 2019;29(2):1805290.
- [6] Park Y-L. Soft wearable robotics technologies for body motion sensing. Human Modelling for Bio-Inspired Robotics: Elsevier; 2017. p. 161-84.
- [7] Runciman M, Darzi A, Mylonas GP. Soft Robotics in Minimally Invasive Surgery. Soft Robot. 2019;6(4):423-43.
- [8] Zhu Y, Guo Q, Zhang Y, Zhu J, Zhang P, Gao M, et al. A walking soft robot driven by electromagnetism inside the body. Engineering Research Express. 2024;6(1):015203.
- [9] Gong X, Yang K, Xie J, Wang Y, Kulkarni P, Hobbs AS, et al. Rotary actuators based on pneumatically driven elastomeric structures. Advanced Materials. 2016;28(34):7533-8.
- [10] Palmieri P, Gaidano M, Troise M, Salamina L, Ruggeri A, Mauro S, editors. A deployable and inflatable robotic arm concept for aerospace applications. 2021 IEEE 8th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace); 2021: IEEE.

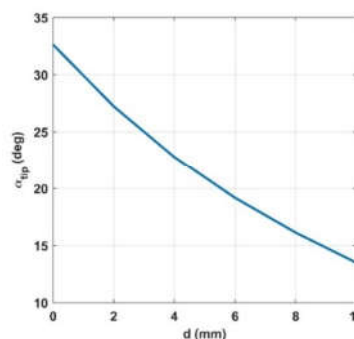


شکل ۱۵- تاثیر فاصله سیم پیچ بر موقعیت افقی انتهای ربات نرم



شکل ۱۶- تاثیر فاصله سیم پیچ بر موقعیت عمودی انتهای ربات نرم

در شکل ۱۷ تاثیر فاصله سیم پیچ بر شیب انتهای ربات ترسیم شده است. این شکل نشان می دهد با افزایش فاصله شیب انتهای ربات به صورت غیر خطی کاهش می یابد و این ناشی از کاهش اندازه میدان مغناطیسی است. در شکل ۱۸ تاثیر فاصله سیم پیچ بر شکل ربات نشان داده شده است. همچنین در این شکل مشاهده می شود که به علت کاهش اندازه میدان مغناطیسی، با افزایش فاصله تغییر شکل ربات کاهش می یابد. لازم به ذکر است وقتی که میدان الکترومغناطیس باعث تغییر زاویه انتهای ربات و در نتیجه تغییر زاویه جهت آهنربای دائم می شود، نیروی محوری در ربات نرم ایجاد می شود. این نیروی محوری باعث کرنش های طولی و در نتیجه افزایش طول ربات نرم می شود.



شکل ۱۷- تاثیر فاصله سیم پیچ بر شیب انتهای ربات نرم

- [31] Xu T, Yu J, Yan X, Choi H, Zhang L. Magnetic actuation based motion control for microrobots: An overview. *Micromachines*. 2015;6(9):1346-64.
- [32] Sliker L, Ciuti G, Rentschler M, Menciassi A. Magnetically driven medical devices: a review. *Expert review of medical devices*. 2015;12(6):737-52.
- [33] Gerboni G, Ranzani T, Diodato A, Ciuti G, Cianchetti M, Menciassi A. Modular soft mechatronic manipulator for minimally invasive surgery (MIS): overall architecture and development of a fully integrated soft module. *Meccanica*. 2015;50:2865-78.
- [34] Grazioso S, Di Gironimo G, Siciliano B. A geometrically exact model for soft continuum robots: The finite element deformation space formulation. *Soft robotics*. 2019;6(6):790-811.
- [35] Chen Y, Li W, Gong Y. Static modeling and analysis of soft manipulator considering environment contact based on segmented constant curvature method. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*. 2020;48(2):233-46.
- [36] Falkenhahn V, Mahl T, Hildebrandt A, Neumann R, Sawodny O. Dynamic modeling of bellows-actuated continuum robots using the Euler-Lagrange formalism. *IEEE Transactions on Robotics*. 2015;31(6):1483-96.
- [۳۷] توکلی س، دهقانی ر، کارآموز راوری مر. کنترل مقاوم مبتنی بر شبکه عصبی شعاعی و تابع تصویر یک ربات پیوسته مجهز به محرک‌های کابلی. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۲۱؛ ۵۱(۳):۱۷۴-۲۴۴.
- [38] Janabi-Sharifi F, Jalali A, Walker ID. Cosserat rod-based dynamic modeling of tendon-driven continuum robots: A tutorial. *IEEE Access*. 2021;9:68703-19.
- [39] Till J, Aloï V, Rucker C. Real-time dynamics of soft and continuum robots based on Cosserat rod models. *The International Journal of Robotics Research*. 2019;38(6):723-46.
- [40] Till J, Aloï V, Riojas KE, Anderson PL, Webster III RJ, Rucker C. A dynamic model for concentric tube robots. *IEEE Transactions on Robotics*. 2020;36(6):1704-18.
- [41] Jackson JD. *Classical electrodynamics*: John Wiley & Sons; 2021.
- [42] Jeon S, Hoshier AK, Kim K, Lee S, Kim E, Lee S, et al. A magnetically Controlled Soft Microrobot Steering a Guidewire in a Three-Dimensional Phantom Vascular Network. *Soft Robot*. 2019;6(1):54-68.
- [43] Rucker C. Integrating rotations using nonunit quaternions. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018;3(4):2979-86.
- [44] Jeon S, Hoshier AK, Kim S, Lee S, Kim E, Lee S, et al. Improving guidewire-mediated steerability of a magnetically actuated flexible microrobot. *Micro and Nano Systems Letters*. 2018;6:1-10.
- [45] Niu H, Feng R, Xie Y, Jiang B, Sheng Y, Yu Y, et al. Magworm: A biomimetic magnet embedded worm-like soft robot. *Soft robotics*. 2021;8(5):507-18.
- [11] Zhang Y, Li P, Quan J, Li L, Zhang G, Zhou D. Progress, challenges, and prospects of soft robotics for space applications. *Advanced Intelligent Systems*. 2023;5(3):2200071.
- [12] Hines L, Petersen K, Lum GZ, Sitti M. Soft actuators for small-scale robotics. *Advanced materials*. 2017;29(13):1603483.
- [13] Abolhosen AMR, Lee S, Fukuda K, Someya T, González LH, Shintake J. Functional soft robotic composites based on organic photovoltaic and dielectric elastomer actuator. *Scientific Reports*. 2024;14(1):9953.
- [14] Svetozarevic B, Nagy Z, Hofer J, Jacob D, Begle M, Chatzi E, et al., editors. *SoRo-Track: A two-axis soft robotic platform for solar tracking and building-integrated photovoltaic applications*. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA); 2016: IEEE.
- [15] Aracri S, Giorgio-Serchi F, Suaria G, Sayed ME, Nemitz MP, Mahon S, et al. Soft robots for ocean exploration and offshore operations: A perspective. *Soft Robotics*. 2021;8(6):625-39.
- [16] Elsayed Y, Lekakou C, Geng T, Saaj CM, editors. *Design optimisation of soft silicone pneumatic actuators using finite element analysis*. 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics; 2014: IEEE.
- [17] Polygerinos P, Wang Z, Overvelde JT, Galloway KC, Wood RJ, Bertoldi K, et al. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators. *IEEE Transactions on Robotics*. 2015;31(3):778-89.
- [18] Shepherd RF, Ilievski F, Choi W, Morin SA, Stokes AA, Mazzeo AD, et al. Multigait soft robot. *Proceedings of the national academy of sciences*. 2011;108(51):20400-3.
- [19] Moseley P, Florez JM, Sonar HA, Agarwal G, Curtin W, Paik J. Modeling, design, and development of soft pneumatic actuators with finite element method. *Advanced engineering materials*. 2016;18(6):978-88.
- [20] Boyraz P, Runge G, Raatz A, editors. *An overview of novel actuators for soft robotics*. Actuators; 2018: MDPI.
- [21] An S-M, Ryu J, Cho M, Cho K-J. Engineering design framework for a shape memory alloy coil spring actuator using a static two-state model. *Smart Materials and Structures*. 2012;21(5):055009.
- [22] Sofla AYN, Elzey DM, Wadley HNG. Two-way Antagonistic Shape Actuation Based on the One-way Shape Memory Effect. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2008;19(9):1017-27.
- [۲۳] مسلمینی ن، دهقانی ر، کارآموز راوری مر. مدلسازی میکروروبات نرم مجهز به محرک آلیاژ حافظه‌دار و بررسی تاثیر جریان الکتریکی و سرعت سیال خنک کننده بر رفتار دینامیکی آن. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۲۰۲۲؛ ۵۲(۲):۱۵۳-۶۲.
- [24] Scalet G, editor *Two-way and multiple-way shape memory polymers for soft robotics: An overview*. Actuators; 2020: MDPI.
- [25] Youn J-H, Jeong SM, Hwang G, Kim H, Hyeon K, Park J, et al. Dielectric elastomer actuator for soft robotics applications and challenges. *Applied Sciences*. 2020;10(2):640.
- [26] Bar-Cohen Y, Cardoso V, Ribeiro C, Lanceros-Méndez S. Electroactive polymers as actuators. *Advanced piezoelectric materials*. 2017:319-52.
- [27] Moura V, editor *Magnetically Actuated Multiscale Medical Robots*. IROS 2012 Full-day Workshop; 2012: Citeseer.
- [28] Schmitt F, Piccin O, Bayle B, Renaud P, Barbé L. Inverted honeycomb cell as a reinforcement structure for building soft pneumatic linear actuators. *Journal of mechanisms and robotics*. 2021;13(1):011020.
- [29] Ebrahimi N, Bi C, Cappelleri DJ, Ciuti G, Conn AT, Faivre D, et al. Magnetic actuation methods in bio/soft robotics. *Advanced Functional Materials*. 2021;31(11):2005137.
- [30] Li J, Barjuei ES, Ciuti G, Hao Y, Zhang P, Menciassi A, et al. Magnetically-driven medical robots: An analytical magnetic model for endoscopic capsules design. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018;452:278-87.