

مدل‌سازی میکروروبات نرم مجهز به محرک آلیاژ حافظه‌دار و بررسی تاثیر جریان الکتریکی و سرعت سیال خنک کننده بر رفتار دینامیکی آن

نرگس مسلمینی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی طراحی و ساخت، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، narges_moslemin@yahoo.com

رضا دهقانی*

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

محمد رضا کاراموز راوری

دانشیار، گروه مهندسی طراحی و ساخت، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، mrkaramoozravari@gmail.com

چکیده

در این مقاله، مدل‌سازی دینامیکی یک میکروروبات نرم مجهز به محرک‌های آلیاژ حافظه‌دار ارائه شده است. با توجه به ساختار و انطباق پذیری بالای ربات‌های نرم، این ربات‌ها کاربردهای متنوعی دارند. از آنجایی که محرک‌های از جنس آلیاژ حافظه‌دار دارای ویژگی‌هایی از جمله سازگاری زیستی، قدرت بالا، ابعاد کوچک، بدون صدا هستند گزینه مناسبی برای میکروروبات‌ها بشمار می‌روند. با توجه به عدم وجود مدل دینامیکی یکپارچه برای ربات‌های نرم مجهز به محرک آلیاژ حافظه‌دار، مدل‌سازی دینامیکی این ربات‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. برای این منظور، معادلات حاکم بر حرکت ربات نرم و معادلات ساختاری محرک استخراج شده است. برای مدل‌سازی دینامیکی میکروروبات نرم از نظریه کسرت و از مدل لیانگ و راجرز برای مدل‌سازی رفتار محرک آلیاژ حافظه‌دار استفاده شده است. همچنین مدل‌سازی انتقال گرمای همرفت آزاد و اجباری در فرایندهای گرمایش و سرمایش انجام شده است. پس از استخراج معادلات، شبیه‌سازی رفتار دینامیکی میکروروبات انجام شده است و اثر جریان الکتریکی و سرعت سیال بر رفتار دینامیکی ربات بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد مدل ارائه شده رفتار میکروروبات را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: میکروروبات نرم، محرک آلیاژ حافظه‌دار، نظریه کسرت، مدل لیانگ و راجرز، انتقال گرمای همرفتی.

Dynamic modeling of a soft micro robot equipped with SMA actuator and investigating the effect of electric current and fluid velocity on its dynamic behavior

N. Moslemini

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

R. Dehghani

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

M. R. Karamooz Ravari

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

Abstract

In this paper, dynamic modeling of a soft micro robot equipped with shape memory alloy (SMA) actuator is presented. Due to the structure of the soft micro robots, these robots have various applications. Since the shape memory alloys have features such that biocompatibility, high power, small dimensions and working silently, they are suitable for the micro robots. Because there is not a dynamic model for the soft robots equipped with shape memory alloy, here a dynamic model of a micro robot equipped with SMA is introduced. To this end, the motion equations of the robot and actuator's structural equations are extracted. In dynamic modeling of the soft robot, Cosserat theory is used and Liang and Roger's model is used for the SMA modeling. Also, modeling of free and forced convection heat transfer in the heating and cooling processes has been done. Then, the dynamic behavior of the micro robot is simulated and its electrical current effect and fluid velocity on the robot's dynamic behavior have been investigated. The simulation results show that the proposed model simulates correctly the behavior of the micro robot.

Keywords: Soft micro robot, Shape memory alloy actuator, Cosserat theory, Liang and Roger's model, Convection heat transfer.

تعامل با محیط اطراف از خود نشان می‌دهند. در مقایسه با ربات‌های صلب، ربات‌های نرم دارای اجسامی هستند که از مواد کاملاً نرم و یا قابل کشش ساخته شده‌اند (به عنوان مثال لاستیک‌های سیلیکونی) که می‌توانند بخش زیادی از انرژی ناشی از برخورد را در تغییر شکل جذب کنند. این ربات‌ها در مقایسه با هم‌تایان سخت خود دارای تعداد نسبتاً زیادی از درجه آزادی هستند. این ویژگی‌ها ربات‌های نرم را به خصوص برای تعامل با بافت‌های انسانی، به عنوان مثال اجرای دستگاه‌های

۱- مقدمه

ربات‌های نرم برخلاف ربات‌های متعارف که دارای لینک‌ها و اتصالات سفت و سخت هستند یک جایگزین بسیار خوب برای پرکردن شکاف بین انسان و ماشین بشمار می‌روند [۱]. نرمی و انطباق، ویژگی‌های برجسته‌ای هستند و اغلب توسط سیستم‌های بیولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند که تمایل به سادگی و کاهش پیچیدگی در

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

زیست‌پزشکی و عملکرد رباتیک در محیط‌های خشن یا نامشخص مثل کاوش در فضاهای محدود یا حرکت در زمین‌های ناهموار، مناسب می‌سازد [۲].

یکی از چالش‌های مهم ربات‌های نرم مدل‌سازی دینامیکی آنها است. مدل‌سازی دینامیکی ربات‌های نرم به سه دسته مدل گسرت پیوسته^۱ مدل قطعه‌ای انحنای ثابت^۲ و مدل المان محدود سه بعدی^۳ تقسیم بندی می‌شوند [۳ و ۴]. روش مدل‌سازی PCC روش بیشتر استفاده شده در رباتیک نرم است، این روش ربات نرم را به عنوان یک مجموعه محدود از قوس‌های دایره‌ای نشان می‌دهد که می‌تواند تنها با سه پارامتر (شعاع انحنای، زاویه قوس و صفحه خم) توصیف شود. این ساده‌سازی باعث کاهش چشمگیر متغیرهای مورد نیاز می‌شود. علیرغم این موفقیت فرض انحنای ثابت همیشه معتبر نیست، به ویژه هنگامی که ربات در معرض بارهای خارجی غیرقابل نداشته باشد. در مدل‌سازی گسرت باشد. روش اجزا محدود سه بعدی محدود به شرایط شبه استاتیکی است و نیاز به خطی سازی ساختاری دارد که ممکن است در بسیاری از هندسه‌های ربات نرم کاربردی نداشته باشد. در مدل‌سازی گسرت پیوسته، ربات پیوسته توسط میکرو ذرات جامدی که پشت سرهم قرار گرفته‌اند نشان داده می‌شود. این روش در درجه اول در زمینه ربات‌های با درجه آزادی اضافی^۴ مورد استفاده قرار گرفت و اخیراً در مورد حرکت ربات نرم در حالت استاتیکی و دینامیکی استفاده شده است. رویکرد کسرت شامل پیچش و برش به همراه خمیدگی و کشیدگی است. این روش از دقت و صحت بالایی در مکانیک پیوسته ربات نرم برخوردار است [۵].

اجزای ربات‌های نرم توسط نیروی محرک به حرکت درمی‌آیند. استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار به عنوان محرک در ربات‌ها اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته است و تحقیقات مربوط به کاربرد و کنترل محرک آلیاژ حافظه‌دار در سیستم‌های رباتیک در طول زمان ادامه و گسترش یافته است [۶]. این محرک می‌تواند مکانیزم را کوچک‌تر کند و نیروهای بزرگی را بصورت سریع تولید کند. آلیاژ حافظه‌دار ساختارهای کریستالی متفاوتی در فازهای مختلف (فاز آستنیت و مارتنزیت) دارند که خواص الکتریکی و مکانیکی آن‌ها متفاوت است. آلیاژ حافظه‌دار می‌تواند به عنوان محرک و حسگر عمل کند بنابراین برای مهندسی و زمینه‌های مختلف مناسب هستند [۱]. ویژگی‌های منحصر به فرد آلیاژهای حافظه‌دار که قبلاً مورد بحث قرار گرفته است، باعث شده که این مواد به عنوان سیستمی در برنامه‌های مختلف از جمله سنجش و کنترل، میرایی لرزش، زیست‌پزشکی، خودرو، هوافضا و رباتیک استفاده شوند [۷].

با توجه به ویژگی‌های آلیاژهای حافظه‌دار، آنها به عنوان محرک در میکروروبات‌های نرم و پیوسته استفاده می‌شوند. تحقیقات متعددی در این زمینه وجود دارد که به برخی از آنها اشاره می‌شود. زید و همکاران [۸] به طراحی مینی ربات انگشتان نرم با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار پرداختند، نتایج نشان داد که این نوع ربات می‌تواند برای

گرفتن جسم تا ۹۰ گرم استفاده شود. وانگ و همکاران [۹] یک ماهی میکروروبات با استفاده از سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار طراحی کردند و توانستند این میکروروبات را با محرک‌های آلیاژ حافظه‌دار کنترل کنند. وانگ و آن [۱۰] با ترکیب آلیاژ حافظه‌دار و مکانیزم سختی متغیر به طراحی یک گیره پرداختند. نتایج نشان داد که قدرت این نوع گیره می‌تواند تا ۱۰ برابر با مکانیزم سختی متغیر افزایش یابد. رونگه و راتز [۱۱] یک چارچوب برای طراحی ربات نرم پیشنهاد کردند. همچنین برخی کارهای تحقیقاتی، مدل‌سازی دینامیکی ربات‌های نرم مجهز به محرک آلیاژ حافظه‌دار را به منظور یک عملیات خاص انجام داده‌اند. ژو و همکاران [۱۲] برخی مکانیزم‌های گرفتن را در ربات‌های نرم آنالیز کردند و نتیجه گرفتند بهترین نوع گیره، گیره ربات نرم با محرک کابل و آلیاژ حافظه‌دار است و بهترین قابلیت تحمل بار را دارد. چنگ و همکاران [۱۳] به مدل‌سازی یک ربات نرم جراحی تحریک شده با فنرهای آلیاژ حافظه‌دار پرداختند. دیلی دایموند و همکاران [۱۴] به تجزیه و تحلیل دینامیکی یک ربات کاترپیلا^۵ آلیاژ حافظه‌دار با الهام از طبیعت پرداختند. لیو و همکاران [۱۱] به تجزیه و تحلیل حرکت و بهینه‌سازی ربات اکتیو-نومورفیک^۶ با بازوی نرم و محرک سیم آلیاژ حافظه‌دار پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ربات اکتیو-نومورفیک دارای ۳ بازو بهترین عملکرد را دارد که به حداکثر طول گام ۷۵ میلی‌متر می‌رسد. مدبری‌فر و اسپنکو [۱۵] یک گیره مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار را با الهام از چسبندگی دست‌های مارمولک ارائه کردند. هوآنگ و همکاران [۱۶] برای حرکت سریع ربات نرم از محرک آلیاژ حافظه‌دار استفاده کردند. هادی و همکاران [۱۷] طراحی، ساخت و کنترل یک ربات پیوسته مجهز به فنر آلیاژ حافظه‌دار را انجام دادند. کواپنتانار-گازمن و همکاران [۱۸] طراحی، تحلیل و کنترل فضای کاری یک بازوی رباتیک نرم سبک وزن با محرک آلیاژ حافظه‌دار را انجام دادند. القمسان و همکاران [۱۹] یک کنترل قوی برای ربات‌های پیوسته با استفاده از نظریه میله کسرت ارائه کردند.

علی‌رغم کاربردهای زیاد ربات‌های نرم در صنایع مختلف، اما همچنان مدل‌سازی دینامیکی این ربات‌ها از مسائل به روز در این زمینه محسوب می‌شود. از این رو در این تحقیق به مدل‌سازی دینامیکی یک ربات نرم مجهز به محرک آلیاژ حافظه‌دار پرداخته می‌شود. برای این منظور مدل دینامیکی ربات نرم بر اساس مدل کسرت و مدل‌سازی رفتار محرک آلیاژ حافظه‌دار بر اساس مدل لیانگ و راجرز انجام شده است. همچنین مدل‌سازی انتقال گرمای همرفتی آزاد و اجباری در فرایندهای گرمایش و سرمایش انجام شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، این نحوه مدل‌سازی تاکنون در کارهای تحقیقاتی قبلی ارائه نشده است.

در ادامه این مقاله، در بخش دوم استخراج معادلات ربات نرم و استخراج معادلات ساختاری محرک آلیاژ حافظه‌دار انجام شده است. سپس در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی‌ها برای رفتار دینامیکی ربات نرم تحت جریان مشخص ارائه شده است. همچنین تاثیر جریان الکتریکی و سرعت سیال خنک کننده بر رفتار دینامیکی ربات نرم بررسی شده

⁵ Caterpillar

⁶ Actinomorphic

¹ Continuum Cosserat models

² Piece-wise Constant Curvature models

³ 3D Finite elements models

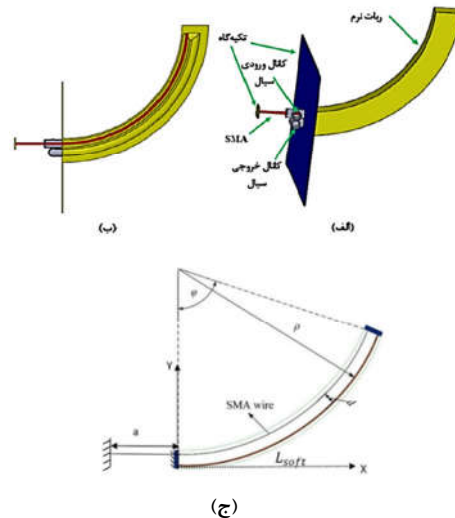
⁴ Hyper redundant

است. در بخش پایانی نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مقاله ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی میکرو ربات نرم

۲-۱- استخراج معادلات ربات نرم

در شکل (الف) طرحواره بازوی نرم رباتیکی مورد نظر نشان داده شده است. این ربات از یک بدنه نرم و یک سیم آلیاژ حافظه‌دار به عنوان محرک تشکیل شده است. ربات مورد نظر دارای دو دارای کانل عبور سیال است که یک کانال برای ورود سیال خنک کننده است و محرک (سیم آلیاژ حافظه‌دار) نیز از آن عبور می‌کند و کانال دوم برای خروج سیال از بدنه ربات تعبیه شده است. در شکل (ب) کانال‌ها عبور سیال و محرک مشاهده می‌شوند. در شکل (ج) طرحواره دوبعدی بازوی ربات نرم به همراه مختصات تعمیم یافته آن نشان داده شده است.



شکل ۱- طرحواره یک بازوی ربات نرم مجهز به محرک آلیاژ حافظه‌دار

روش کسرت یک روش مدل‌سازی دینامیکی ربات‌های نرم چندبخشی است که نه تنها نیروهای برشی و پیچشی در نظر گرفته می‌شوند بلکه ویژگی‌های هندسی و مکانیکی مدل پیوسته را هم حفظ می‌کند. استفاده از این روش در رباتیک نرم جایگزین مناسبی است که یک مدل مناسب برای شبیه‌سازی دینامیک مستقیم در زمان واقعی را ارائه می‌دهد [۲۰]. این روش به طور ضمنی مشتقات موجود در مدل‌سازی را تفکیک می‌کند و سپس معادله دیفرانسیل معمولی مسئله مقدار مرزی را در طول قوس در هر زمان حل می‌کند [۲۱]. در نظریه کسرت برای هر مقطع از ربات در طول، سه حرکت انتقالی و سه حرکت دورانی مستقل از هم در نظر گرفته می‌شود. از این رو برای پیکربندی یک میکرو ربات نرم در یک زمان خاص از ماتریس تبدیل همگن g استفاده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$g(s, t) = \begin{pmatrix} R(s, t) & P(s, t) \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

که R ماتریس چرخش متعامد صفحه‌ای در فاصله s از پایه ربات و P بردار موقعیت مرکز صفحه است.

سیر تکامل زمانی برای پیکربندی منحنی $g(s, t)$ با بردار پیچش به

وسیله پارامتر $\hat{\eta}(s, t) = g^{-1} \frac{\partial g}{\partial t} = g^{-1} \dot{g}$ توصیف می‌شود که مطابق رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$\hat{\eta} = \begin{pmatrix} \tilde{w} & v \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\eta = \begin{pmatrix} \tilde{w} \\ v \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^6$$

به طوری که $w(s, t) \in \mathbb{R}^3$ بردار سرعت زاویه‌ای و $v(s, t) \in \mathbb{R}^3$ بردار سرعت خطی مقطعی از ربات در زمان مشخصی هستند.

سهس کرنش بازوی نرم توسط میدان بردار در امتداد منحنی $g(s, t)$ با $g^{-1} \frac{\partial g}{\partial s} = g^{-1} g'$ توصیف می‌شود که مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود و علامت (') در اینجا نشان دهنده تغییرات نسبت به متغیر طول ربات (s) است.

$$\hat{\zeta} = \begin{pmatrix} \tilde{k} & q \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

که $k(s, t) \in \mathbb{R}^3$ نشان‌دهنده کرنش زاویه‌ای است و مقدار پیچش و خمش ربات را نشان می‌دهد و $q(s, t) \in \mathbb{R}^3$ نشان‌دهنده کرنش خطی می‌باشد و علامت (') تبدیل ایزومورفیسم^۱ بین نمایش برداری و نمایش ماتریسی جبرلی $se(3)$ است [۲۲].

از طرفی رابطه سازگاری با استفاده از $\frac{d}{ds}(g) = \frac{d}{dt}(g)$ مطابق رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$\dot{\eta} = \zeta + \hat{\eta}\zeta - \hat{\zeta}\eta = \zeta - ad_{\zeta}\eta \quad (4)$$

که ماتریس $ad_{\zeta} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$ad_{\zeta} = \begin{bmatrix} \tilde{k} & 0 \\ \tilde{q} & \tilde{k} \end{bmatrix} \quad (5)$$

فرض می‌شود طول ربات به n قسمت تقسیم شده است و میدان کرنش ζ در لحظه t در طول هر قسمت ثابت باشد. در این صورت با انتگرالگیری از رابطه $g' = g\zeta(s)$ نسبت به مکان s تابعیت g به دست می‌آید و همچنین می‌توان از طرفین رابطه (۴) نسبت به طول انتگرال گرفت و رابطه (۶) را بدست آورد [۲۳].

$$\eta(x) = e^{-(x-l_{n-1})ad_{\zeta}}(\eta(l_{n-1})) + \int_{l_{n-1}}^x e^{-(s-l_{n-1})ad_{\zeta}} ds \zeta \quad (6)$$

که l_i طول قسمت i ام است. اکنون می‌توان معادلات دینامیکی ربات را با استفاده از روش لاگرانژ استخراج کرد لاگرانژین سیستم به صورت $L = T - U$ تعریف می‌شود که T و U به ترتیب مجموع انرژی جنبشی کل سیستم و مجموع انرژی پتانسیل کل سیستم هستند. با فرض اینکه طول ربات به n قسمت تقسیم شود، لاگرانژین مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_{l_{i-1}}^{l_i} \zeta_i^T M_i \zeta_i ds - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_{l_{i-1}}^{l_i} (\zeta_i - \zeta_0)^T K_i (\zeta_i - \zeta_0) ds \quad (7)$$

که در رابطه فوق معادلات سازگاری در نظر گرفته شده است. در معادله (۷)، که M_i ماتریس جاکوبی مقطع i ام است، K_i و M_i به ترتیب ماتریس جرم و سختی مقطع i ام هستند که از معادلات (۸) و (۹) محاسبه می‌شوند و در پیکربندی مرجع فرض می‌شود فضای پیچش قبل از تغییر شکل ثابت و برابر با $\zeta_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)^T$ است.

¹ Isomorphism

² Lie algebra

$$M = \begin{pmatrix} J_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A \end{pmatrix} \rho \quad (8)$$

$$K = \begin{pmatrix} EJ_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & EJ_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & EJ_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & EA & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & GA & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & GA \end{pmatrix} \quad (9)$$

که J_x, J_y, J_z و I_z ممان‌های دوم خمشی و ممان دوم پیچشی مقطع ربات به ترتیب حول محورهای x, y و z هستند؛ G مدول برشی، E مدول الاستیسیته، ρ چگالی ربات و A مساحت سطح مقطع ربات است. از طرفی معادلات لاگرانژ مطابق رابطه (۱۰) نوشته می‌شوند.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\zeta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \zeta} + \frac{\partial F}{\partial \zeta} = Q \quad (10)$$

که Q بردار نیروی تعمیم یافته است و از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$Q = \sum_{i=1}^n \int_{L_{i-1}}^{L_i} J_i^T f_{g_i} ds - J_S^T F_{SMA} \quad (11)$$

که J_S ماتریس جاکوبی در محل اعمال نیروی F_{SMA} است و F_{SMA} بردار نیروی خارجی اعمال شده به ربات توسط محرک سیم آلیاژ حافظه‌دار است. تابع ریلی استفاده شده در (۱۰) از رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$F = \frac{1}{2} \zeta^T \Upsilon \zeta \quad (12)$$

که

$$\Upsilon = \text{diag}(\Upsilon_1 \quad \Upsilon_2 \quad \dots \quad \Upsilon_n) \quad (13)$$

$$\Upsilon_i = \text{diag}(J_x \quad 3J_y \quad 3J_z \quad 3A \quad A \quad A) v \quad (14)$$

است و v مدول برشی است.

با جایگذاری توابع لاگرانژی و ریلی در رابطه (۱۰)، فرم کلی معادلات حرکت مطابق معادله (۱۵) به دست می‌آید.

$$\bar{M} \ddot{\zeta} + \bar{M} \dot{\zeta} + h + K(\zeta - \zeta_0) + \Upsilon \zeta = Q \quad (15)$$

که ماتریس \bar{M} از رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^n \int_{L_{i-1}}^{L_i} J_i^T M_i J_i ds \quad (16)$$

ماتریس K به صورت ماتریس قطری مطابق رابطه (۱۷) تعریف می‌شود.

$$K = \text{diag} \left(\int_{L_1}^{L_2} K_1 ds \quad \int_{L_2}^{L_3} K_2 ds \quad \dots \quad \int_{L_{n-1}}^{L_n} K_n ds \right) \quad (17)$$

همچنین المان‌های بردار h طبق رابطه (۱۸) محاسبه می‌شوند.

$$h_j = -\frac{1}{2} \sum_{i=j}^n \int_{L_{i-1}}^{L_i} \begin{pmatrix} \zeta^T \frac{\partial}{\partial \zeta_{j1}} (J_i^T M_i J_i) \zeta \\ \zeta^T \frac{\partial}{\partial \zeta_{j2}} (J_i^T M_i J_i) \zeta \\ \vdots \\ \zeta^T \frac{\partial}{\partial \zeta_{je}} (J_i^T M_i J_i) \zeta \end{pmatrix} ds \quad (18)$$

$$j = 0, 1, \dots, n$$

جزئیات بیشتر روابط فوق در مرجع [۲۴] بیان شده است.

۲-۲- استخراج معادلات ساختاری محرک آلیاژ حافظه‌دار

معادلات حاکم بر رفتار محرک سیم آلیاژ حافظه‌دار با استفاده از مدل ساختاری لیانگ و راجرز استخراج می‌شوند. این مدل ساختاری به صورت رابطه (۱۹) بیان می‌شود [۱].

$$\sigma_{SMA} = E(\xi) \varepsilon_{SMA} + \theta \dot{T} + \Omega(\xi) \dot{\xi} \quad (19)$$

که در معادله فوق σ_{SMA} تنش ایجاد شده در سیم آلیاژ حافظه‌دار،

ε_{SMA} کرنش ایجاد شده در سیم آلیاژ حافظه‌دار، $E(\xi)$ مدول یانگ سیم آلیاژ حافظه‌دار، θ ضریب ترموالاستیک سیم آلیاژ حافظه‌دار است که معمولاً بسیار ناچیز است، T دمای سیم آلیاژ حافظه‌دار، $\Omega(\xi)$ ضریب تبدیل فاز و ξ کسر حجمی مارتنزیت است. وقتی سیم آلیاژ حافظه‌دار گرم می‌شود و ساختار آن از مارتنزیت به آستنیت تبدیل می‌شود مدول یانگ آن تغییر می‌کند. در این مدل‌سازی، مدول یانگ به صورت خطی برحسب کسر حجمی مارتنزیت در نظر گرفته می‌شود و طبق معادله (۲۰) به دست می‌آید [۱].

$$E(\xi) = E_A + \xi(E_M - E_A) \quad (20)$$

در معادله فوق E_A و E_M به ترتیب مدول یانگ در فاز آستنیت و مارتنزیت هستند. همچنین $\Omega(\xi)$ به $E(\xi)$ وابسته است و از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$\Omega(\xi) = -\varepsilon_L E(\xi) \quad (21)$$

که ε_L حداکثر کرنش باقی مانده در سیم آلیاژ حافظه‌دار است [۱].

کسر حجمی مارتنزیت در طول استحاله رفت یعنی در حالت سرمایه‌ش و تغییر از حالت آستنیت به مارتنزیت ($A \rightarrow M$) از رابطه (۲۲) و در طول فاز استحاله برگشت یعنی در حالت گرمایش و تغییر از حالت مارتنزیت به آستنیت ($M \rightarrow A$) از رابطه (۲۳) به دست می‌آید [۱].

$$\xi_{A \rightarrow M} = \frac{1 - \xi_A}{2} \cos\{a_M(T - M_f) + b_M \sigma_{SMA}\} + \frac{1 + \xi_A}{2} \quad (22)$$

For $M_f + \frac{\sigma_{SMA}}{C_M} \leq T \leq M_s + \frac{\sigma_{SMA}}{C_M}$

$$\xi_{M \rightarrow A} = \frac{\xi_M}{2} \cos\{a_A(T - A_s) + b_A \sigma_{SMA}\} + \frac{\xi_M}{2} \quad (23)$$

For $A_s + \frac{\sigma_{SMA}}{C_A} \leq T \leq A_f + \frac{\sigma_{SMA}}{C_A}$

که در معادلات بالا a_A, a_M, b_M, b_A از روابط (۲۴) و (۲۵) به دست می‌آیند.

$$\begin{cases} a_M = \frac{\pi}{M_s - M_f} \\ a_A = \frac{\pi}{A_f - A_s} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} b_M = \frac{-a_M}{C_M} \\ b_A = \frac{-a_A}{C_A} \end{cases} \quad (25)$$

ξ_A کسر حجمی مارتنزیت اولیه قبل از شروع فرآیند $A \rightarrow M$ است، ξ_M کسر حجمی مارتنزیت اولیه قبل از شروع فرآیند $M \rightarrow A$ است. ضریب C_A ثابت است و نشان‌دهنده اثر تنش بر دمای آستنیت سیم آلیاژ حافظه‌دار است. همچنین ضریب ثابت C_M نشان‌دهنده اثر تنش بر دمای مارتنزیت سیم آلیاژ حافظه‌دار است. M_s دمای شروع مارتنزیت، M_f دمای پایان مارتنزیت، A_s دمای شروع آستنیت و A_f دمای پایان آستنیت هستند [۱]. از مهم‌ترین محدودیت‌های مدل لیانگ-راجرز می‌توان به عدم تفکیک کسر حجمی مارتنزیت حاصل از تنش و دما و عدم توانایی در پیش‌بینی رفتار حافظه‌داری ماده در یک سیکل کامل بارگذاری-بربرداری در دماهای کمتر از M_f اشاره کرد. اما از آنجایی که در محرک سیم آلیاژ حافظه‌دار در ربات نرم مورد نظر، رنج تغییر دما از فاز مارتنزیت تا آستنیت را شامل می‌شود این مدل می‌تواند رفتار محرک سیم آلیاژ حافظه‌دار را در طول حرکت ربات نرم پیش‌بینی کند. با عبور جریان از سیم آلیاژ حافظه‌دار دما در سیم تغییر می‌کند و باعث تغییر فاز، تغییر طول و کرنش در سیم محرک می‌شود. نیروی

عدد ناسلت از رابطه (۳۳) به دست می‌آید [۲۵].

$$Nu = \left[0.6 + 0.387 \left(\frac{Ra}{1 + (0.56/Pr)^{9/16}} \right)^{1/6} \right]^2 \quad (33)$$

که

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (34)$$

$$Gr = \lambda(T - T_f) \frac{g D_h^3}{\nu_f^2} \quad (35)$$

$$Pr = \frac{\mu_f C_f}{k_f} \quad (36)$$

Gr عدد گراشف^۲، Pr عدد پرانتل^۳، ν_f لزجت سینماتیکی آب، μ_f لزجت دینامیکی آب و C_f گرمایی ویژه سیال است. همچنین ضرایب λ و ν_f مطابق زیر محاسبه می‌شوند.

$$\lambda = \frac{1}{T_{avg}} \quad T_{avg} = \frac{T + T_f}{2} \quad (37)$$

$$\nu_f = \frac{\mu_f}{\rho_f} \quad (38)$$

که β_f چگالی سیال می‌باشد [۲۵].

اگر جریان اجباری با سرعت u_f جهت خنک سازی محرک استفاده شود. در حالت همرفتی اجباری برای خنک کردن سیم آلیاژ حافظه‌دار، ابتدا با توجه به سرعت سیال عدد رینولدز^۴ محاسبه می‌شود.

$$Re = \frac{u_f D_h}{\nu_f} \quad (39)$$

که Re عدد رینولدز و u_f سرعت جریان آب است. در جریان‌های متلاطم در لوله‌های دایره‌ای برای اعداد رینولدز بزرگ (بیشتر از ۳۰۰۰) رابطه (۴۰) که به رابطه گنیلینسکی^۵ معروف است برقرار است [۲۵].

$$Nu = - \left(\frac{F}{8} \right) (Re - 1000) \left(\frac{F}{8} \right)^{0.5} \left(Pr^{2/3} - 1 \right) \quad (40)$$

که

$$F = (0.79 \log(Re) - 1.64)^{-2} \quad (41)$$

در غیر اینصورت جریان لایه‌ای^۶ است. جریان لایه‌ای یعنی وقتی سیال با سرعت یکنواخت وارد لوله می‌شود. هنگام تماس سیال با لوله آثار لزج چشمگیر می‌شود و لایه‌ی مرزی در امتداد لوله رشد می‌کند. در نتیجه ناحیه‌ی جریان غیرلزج کوچک می‌شود تا جایی که کاملاً جریان لزج تمام مقطع عرضی لوله را فرا می‌گیرد. پس از آن منحنی سرعت جریان در امتداد لوله تغییر نخواهد کرد. در این حالت عدد ناسلت از رابطه (۲۲) به دست می‌آید [۲۵].

$$Nu = 1.86 \left(Re \frac{Pr}{L/D_h} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (42)$$

در مدل‌سازی این حالت تمامی پارامترهای ν_f ، C_f ، μ_f ، k_f ، Pr و μ_{fs} از درون‌یابی مقادیر جدول A.6 در مرجع [۲۶] به دست آمده است.

۳- نتایج

در این بخش رفتار دینامیکی میکروربات نرم با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ شبیه‌سازی می‌شود. همچنین در جدول ۲ مشخصات

این محرک مطابق شکل ۱ به انتهای ربات نرم وارد می‌شود و موجب خمش ربات نرم می‌شود. شکل خمش ربات نرم به صورت قوس دایره‌ای تقریب زده می‌شود. در نتیجه برای نرخ کرنش محرک خواهیم داشت:

$$\dot{\epsilon}_{SMA} = -d \frac{d}{dt} [y''(L, t)] \quad (26)$$

با جایگذاری معادله (۲۶) در معادله (۱۹) معادله (۲۷) بدست می‌آید.

$$\ddot{\sigma}_{SMA} = -d E(\xi) \dot{y}''(L, t) + \theta \dot{T} + \Omega(\xi) \dot{\xi} \quad (27)$$

برای کسر جرمی مارتنزیت تعریف شده در (۲۲) و (۲۳) نیز معادله (۲۸) حاکم است [۱].

$$\dot{\xi} = \eta_T \dot{T} + \eta_\sigma \dot{\sigma} \quad (28)$$

که:

$$\eta_T = \begin{cases} -a_A \frac{\xi_M}{2} \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma_{SMA}] & M \rightarrow A \\ -a_M \frac{1 - \xi_A}{2} \sin[a_M(T - M_f) + b_M \sigma_{SMA}] & A \rightarrow M \end{cases} \quad (29)$$

$$\eta_\sigma = \begin{cases} -b_A \frac{\xi_M}{2} \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma_{SMA}] & M \rightarrow A \\ -b_M \frac{1 - \xi_A}{2} \sin[a_M(T - M_f) + b_M \sigma_{SMA}] & A \rightarrow M \end{cases} \quad (30)$$

هنگامی که سیم آلیاژ حافظه‌دار از طریق جریان الکتریکی گرم می‌شود مدل گرمایی آن می‌تواند به صورت رابطه (۳۱) تعریف شود [۱].

$$\rho_{SMA} C_{SMA} V_{SMA} \dot{T} = i^2 R_{SMA} - h S_{SMA} (T - T_{amb}) + \rho_{SMA} V_{SMA} H \dot{\xi} \quad (31)$$

که ρ_{SMA} چگالی سیم آلیاژ حافظه‌دار، C_{SMA} ظرفیت گرمایی ویژه سیم آلیاژ حافظه‌دار، V_{SMA} حجم سیم آلیاژ حافظه‌دار، i جریان الکتریکی، R_{SMA} مقاومت سیم آلیاژ حافظه‌دار، h ضریب انتقال گرما، S_{SMA} مساحت سطح سیم آلیاژ حافظه‌دار، T_{amb} دمای محیط و H گرمای نهان تحول سیم آلیاژ حافظه‌دار است.

در حالت سرمایش محرک با هوا، مقدار جریان الکتریکی (i) در معادله (۳۱) را برابر با صفر قرار داده به طوری که در سیستم جریان قطع شده و با خنک شدن آلیاژ حافظه‌دار سیم به حالت اولیه بازگشته و ربات به حالت اولیه بازگردد. در حالت سرمایش، سیال خنک کننده توسط پمپ به داخل کانال ورودی ارسال می‌شود و گرمای محرک را جذب کرده و از کانال خروجی خارج می‌گردد. در این حالت ضریب انتقال گرمای همرفتی h از رابطه (۳۲) به دست می‌آید [۲۵].

$$h = \frac{k_f Nu}{D_h} \quad (32)$$

که قطر هیدرولیکی D_h را می‌توان به صورت نوشت $D_h = d_t - d_{SMA}$ که d_t قطر داخلی لوله سیلیکون، d_{SMA} قطر سیم آلیاژ حافظه‌دار، k_f رسانایی حرارتی محیط اطراف و Nu عدد ناسلت^۱ است که با توجه به نوع جریان به دست می‌آید [۲۵].

لازم به ذکر است در هنگام تغییر حالت از گرمایش به سرمایش محرک، جریان آب متوقف می‌شود و آب در لوله نگه داشته می‌شود بنابراین سیم آلیاژ حافظه‌دار در طول گرمایش همرفتی آزاد و در طول سرمایش همرفتی اجباری را تجربه می‌کند. در طول خنک کردن جریان الکتریکی متوقف می‌شود از این رو $i=0$ خواهد شد. برای همرفتی آزاد

¹ Nusselt number

2 Grashof number
3 Prandtl number
4 Reynolds number
5 Gnielinski
6 laminar flow

محرک آلیاژ حافظه دار نشان داده شده است. ابتدا نتایج شبیه سازی رفتار ربات نرم تحت جریان ورودی مشخص ارائه می شود و سپس تاثیر جریان الکتریکی بر رفتار ربات و تاثیر سرعت سیال در مرحله سرمایش بر رفتار دینامیکی ربات ارائه می شود.

جدول ۱- مشخصات ربات نرم

پارامتر	مقدار	واحد
طول (L)	۸۰	mm
عرض سطح مقطع (W)	۲۰	mm
ارتفاع سطح مقطع (h_p)	۵/۴	mm
مدول یانگ (E)	۱/۸۴	Mpa
مدول لزجت برشی (ν)	۵۰۰	Pa.sec
چگالی (ρ)	۹۶۵	Kg/m^3

جدول ۲- مشخصات محرک سیم آلیاژ حافظه دار

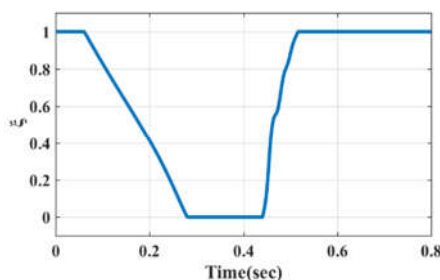
پارامتر	مقدار	واحد
فاصله بین ربات نرم و محرک سیم آلیاژ حافظه دار (d)	۱/۷	mm
قطر (d_{SMA})	۰/۱	mm
طول (L_{SMA})	۸۰	mm
مقاومت بر واحد طول (R)	۱۷/۶	Ω/m
چگالی (ρ_{SMA})	۶۴۵۰	Kg/m^3
گرمای ویژه در حالت گرمایش (C)	۸۳۷	$J/Kg^{\circ}C$
گرمای ویژه در حالت سرمایش (C)	-۲۶۰	$J/Kg^{\circ}C$
دمای شروع آستنیت (A_S)	۴۵/۸۷	$^{\circ}C$
دمای پایان آستنیت (A_f)	۴۹/۱۲	$^{\circ}C$
مدول یانگ در حالت آستنیت کامل (E_A)	۱۵	Gpa
مدول یانگ در حالت آستنیت کامل (E_M)	۷	Gpa
حداکثر کرنش باقی مانده (ϵ_L)	۶/۶٪	-
ثابت آستنیت (C_A)	۱۲/۸۱	$Mpa/^{\circ}C$
ثابت مارتنزیت (C_M)	۲۳/۷۹	$Mpa/^{\circ}C$
ضریب انتقال گرما در حالت گرمایش (h)	۱۵۰	$J/m^2.^{\circ}C.sec$
ضریب انتقال گرما در حالت سرمایش (h)	-۱۰۰۰	$J/m^2.^{\circ}C.sec$
دمای محیط (T_{amb})	۲۷	$^{\circ}C$
گرمای نهان تحول در حالت گرمایش (H)	۲۴۲۰۰	J/Kg
گرمای نهان تحول در حالت سرمایش (H)	-۴۱۳۷/۶	J/Kg

۳-۱- رفتار ربات نرم در اثر عبور جریان ۰/۵ آمپر

در این حالت شبیه سازی حرکت ربات نرم مجهز به محرک آلیاژ حافظه دار با مشخصات ذکر شده در جداول ۱ و ۲ تحت جریان $A/5.0$ انجام می شود و شرایط اولیه به صورت تنش اولیه صفر، دمای $27^{\circ}C$ درجه سلسیوس و کسر حجمی مارتنزیت یک در نظر گرفته می شود. پس از کامل شدن استحاله جریان قطع شده و محرک سیم آلیاژ حافظه دار به وسیله آب سرد می شود. لازم به توضیح است سرد کردن توسط هوا

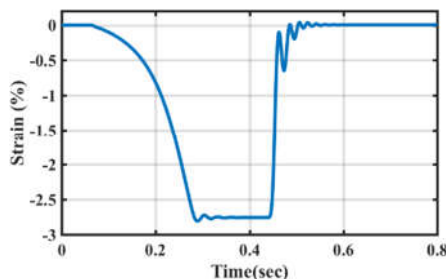
بسیار طولانی بوده و از نظر کاربردی برای ربات ها عملیاتی نمی باشد [۲۵].

در شکل ۲ مشاهده می شود که کسر حجمی مارتنزیت در حالت مارتنزیت کامل یک بوده، و تا زمان 0.06 ثانیه در فاز مارتنزیت قرار دارد. از این زمان به بعد فاز مارتنزیت کم کم به فاز آستنیت تبدیل می شود و از زمان 0.28 ثانیه در فاز آستنیت قرار می گیرد. در طول تغییر فاز به آستنیت، این پارامتر به صفر رسیده، یعنی استحاله کامل شده و فاز مارتنزیت کاملاً به آستنیت تبدیل می شود. اعمال جریان را تا زمان 0.4 ثانیه ادامه داده و پس از آن جریان قطع می شود. مشاهده می شود در زمان 0.44 ثانیه تبدیل فاز از آستنیت به مارتنزیت شروع شده و تا زمان 0.52 ثانیه این فاز کاملاً به مارتنزیت برمی گردد و کسر حجمی مارتنزیت یک می شود.



شکل ۲- کسر حجمی مارتنزیت محرک آلیاژ حافظه دار

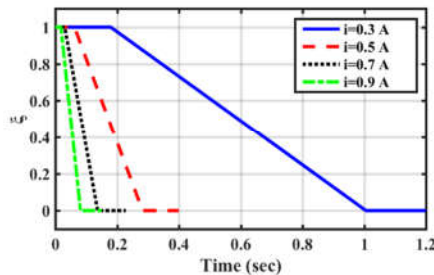
در شکل ۳ مشاهده می شود کرنش در محرک آلیاژ حافظه دار پس از تغییر فاز از مارتنزیت به آستنیت تا حداکثر حدود $2/8$ افزایش می یابد که بر اساس مقدار حداکثر کرنش باقی مانده محرک آلیاژ حافظه دار که مقدار $6/6$ ٪ بود مقدار کرنش مطلوبی است. پس از قطع جریان و تبدیل فاز از آستنیت به مارتنزیت ربات به حالت اولیه باز می گردد و کرنش محرک آلیاژ حافظه دار صفر می شود.



شکل ۳- کرنش ایجاد شده در محرک آلیاژ حافظه دار

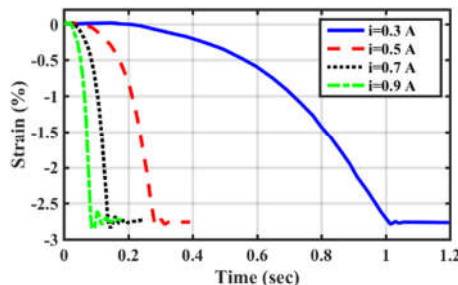
با توجه به شکل ۴ دمای محرک سیم آلیاژ حافظه دار از دمای $27^{\circ}C$ درجه سلسیوس که معادل با دمای محیط است، پس از کامل شدن استحاله و تغییر فاز از مارتنزیت به آستنیت تا $109^{\circ}C$ درجه سلسیوس بالا می رود. پس از قطع جریان و تبدیل فاز از آستنیت به مارتنزیت ربات به حالت اولیه بازمی گردد و دمای سیم آلیاژ حافظه دار هم دما با محیط می شود.

وارد کرده و رفتار دینامیکی ربات شبیه سازی می‌شود. در شکل ۷ مشاهده می‌شود برای جریان‌های $0.3A$ ، $0.5A$ ، $0.7A$ و $0.9A$ به ترتیب شروع تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت در 0.06 ، 0.18 و 0.3 و 0.18 ثانیه اتفاق می‌افتد و در زمان 1 ، 0.28 ، 0.13 و 0.08 ثانیه استحاله کامل شده و فاز مارتنزیت کاملاً به آستنیت تبدیل می‌شود. بنابراین استحاله با افزایش جریان، سریعتر اتفاق می‌افتد.



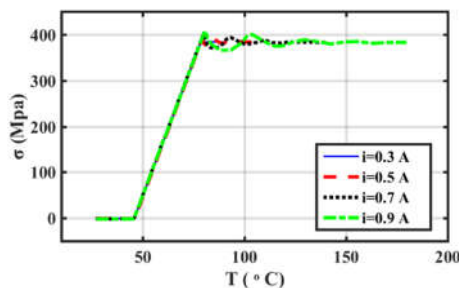
شکل ۷- کسر حجمی مارتنزیت آلیاژ حافظه دار در جریان‌های مختلف

در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش جریان، استحاله سریع‌تر اتفاق می‌افتد و ربات سریعتر به حالت پایدار می‌رسد و کرنش سیم آلیاژ حافظه‌دار از $2/8\%$ بیشتر نمی‌شود.



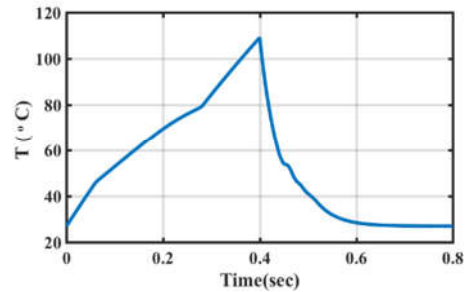
شکل ۸- کرنش ایجاد شده در محرک آلیاژ حافظه دار در جریان‌های مختلف

در شکل ۹ نمودار تنش برحسب دما برای جریان‌های مختلف ترسیم شده است که نشان می‌دهد در فاز استحاله برای تمامی جریان‌ها مسیر یکسانی طی می‌شود و مقدار نهایی تنش برای تمامی جریان‌ها یکسان است.



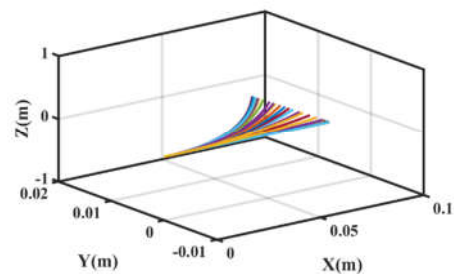
شکل ۹- تنش بر حسب دمای محرک آلیاژ حافظه دار در جریان‌های مختلف

در شکل ۱۰ موقعیت انتهایی ربات در طول حرکت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش جریان، استحاله سریع‌تر اتفاق می‌افتد



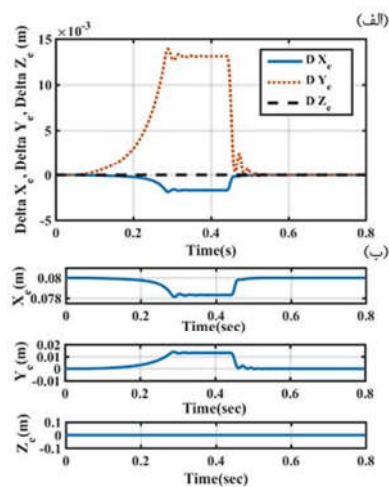
شکل ۴- دمای محرک آلیاژ حافظه دار

در شکل ۵ نمایش سه بعدی حرکت ربات مشاهده می‌شود. پنجه‌ی ربات به میزان $1/39$ سانتی‌متر از حالت اولیه جابجا شده و پس از سرد شدن دوباره به حالت اولیه برمی‌گردد.



شکل ۵- نمایش سه بعدی حرکت ربات

با توجه به شکل ۶ تغییرات شکل نهایی ربات پس از کامل شدن استحاله در زمان تقریبی $0/4$ ثانیه، در راستای محور x $1/69$ میلی‌متر و در راستای محور Y ، $1/311$ سانتی‌متر است. پس از قطع جریان و تبدیل فاز از آستنیت به مارتنزیت ربات به حالت اولیه بازمی‌گردد.



شکل ۶- (الف) تغییرات انتهایی ربات در جهت محورهای X و Y و Z

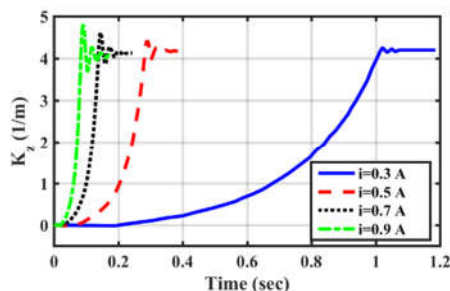
(ب) موقعیت انتهایی ربات در جهت محورهای X و Y و Z

۳-۲- بررسی تأثیر جریان بر رفتار دینامیکی ربات

به منظور بررسی اثر جریان الکتریکی عبوری از محرک ربات، جریان‌های $0.3A$ ، $0.5A$ ، $0.7A$ و $0.9A$ را به محرک آلیاژ حافظه‌دار

و ربات سریعتر به حالت پایدار می‌رسد. همچنین موقعیت X و Y انتهای ربات با افزایش جریان ارتعاشات بیشتری خواهد داشت تا به حالت پایدار برسد. در راستای محور Z به دلیل عدم وجود نیرو حرکتی ایجاد نمی‌شود که در اینجا رسم نشده است.

توجه به حرکت در صفحه XY فقط در راستای محور Z کرنش زاویه‌ای مشاهده می‌شود با افزایش جریان ارتعاش بیشتری خواهد داشت و همچنین سریعتر به حالت پایدار می‌رسد.



شکل ۱۲- کرنش زاویه‌ای حول محور Z در جریان‌های مختلف

باتوجه به رابطه (۲۷) و از آنجایی که مقدار θ صفر است، تغییرات تنش وابسته به تغییرات ξ است، بنابراین مادامی که محرک در فاز استحاله است، ξ تغییر می‌کند و در نتیجه تنش تغییر می‌کند و تغییرات دما مستقیماً روی تغییرات تنش اثر نمی‌گذارد. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود چون مقدار تنش نهایی برای تمامی جریان‌ها برابر است بنابراین مقدار جابجایی ربات نرم برای تمامی جریان‌ها تقریباً با هم برابر است (شکل ۱۰).

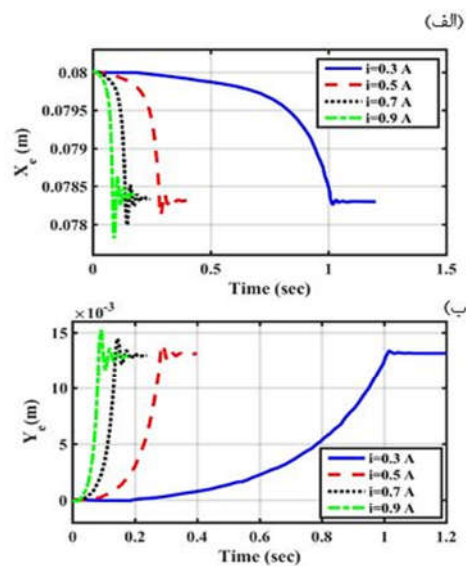
۳-۳- بررسی تاثیر سرعت سیال بر رفتار دینامیکی ربات

به منظور بررسی اثر سرعت سیال روی رفتار ربات، سرعت‌های سیال آب را $0.1 m/s$ ، $0.101 m/s$ ، $0.1001 m/s$ ، $0.10001 m/s$ و $0.1 m/s$ در نظر گرفته و رفتار دینامیکی ربات شبیه سازی می‌شود. در این شبیه‌سازی مقدار جریان محرک 0.5 آمپر و ضرایب جدول ۳ مورد استفاده قرار گرفته می‌شود و h از رابطه (۳۲) به دست می‌آید.

جدول ۳- مشخصات محرک و سیال خنک کننده

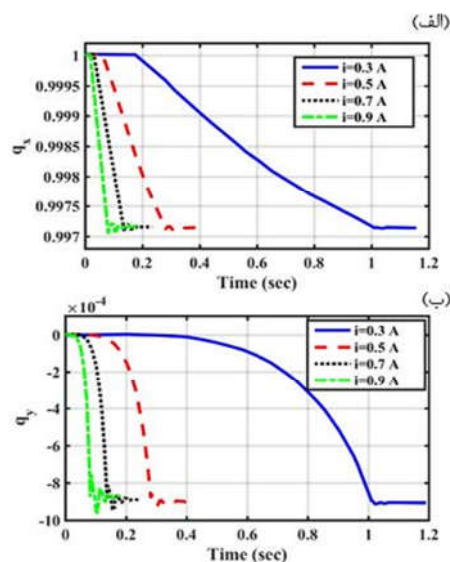
واحد	مقدار	پارامتر
mm	۵	قطر داخلی لوله سیلیکون (d_t)
Ω/m	۵۶	مقاومت بر واحد طول (R)
$J/Kg \cdot ^\circ C$	۴۶۶	گرمای ویژه در حالت گرمایش (C)
$^\circ C$	۲۷	دمای سیال (T_f)
J/Kg	۱۲۱۸۸/۱	گرمای نهان تحول در حالت گرمایش (H)

باتوجه به شکل ۱۳ در سرعت‌های مختلف شروع تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت برای تمامی حالت‌ها یکی بوده و در یک زمان به فاز آستنیت تبدیل می‌شوند، زیرا سرعت جریان برای حالت همرفتی اجباری در سرمایش تأثیرگذار است. تبدیل از فاز آستنیت به مارتنزیت برای سرعت‌های ذکر شده به ترتیب در 0.161 ، 0.152 ، 0.148 و 0.146 ثانیه شروع و در زمان‌های 0.177 ، 0.177 ، 0.177 و 0.177 ثانیه کاملاً به فاز مارتنزیت تبدیل می‌شود. بنابراین استحاله با افزایش سرعت جریان سریعتر اتفاق می‌افتد و تغییر از فاز آستنیت به مارتنزیت در زمان کوتاه‌تری انجام می‌شود. در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود استحاله‌ی آستنیت به مارتنزیت با افزایش سرعت سیال سریع‌تر اتفاق می‌افتد و



شکل ۱۰- (الف) موقعیت انتهای ربات در جهت محور X ، (ب) موقعیت انتهای ربات در جهت محور Y

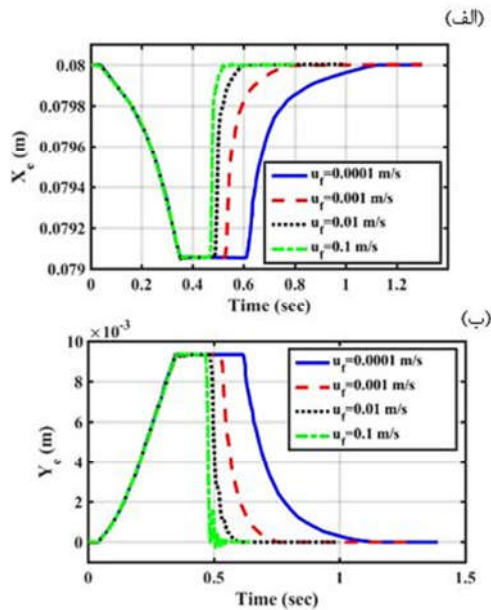
در شکل ۱۱ مشخصات تعمیم یافته ربات طی حرکت نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود کرنش خطی در راستای X و Y با افزایش جریان سریعتر به حالت پایدار رسیده و سرعت عمل ربات افزایش می‌یابد. در راستای Z کرنش خطی به دلیل عدم حضور نیرو صفر می‌باشد.



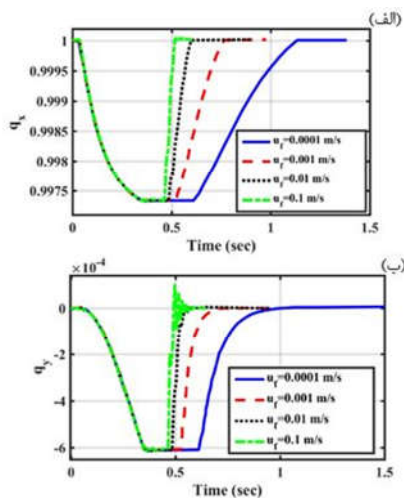
شکل ۱۱- (الف) کرنش خطی در جهت محور X ، (ب) کرنش خطی ربات در جهت محور Y

در شکل ۱۲ کرنش زاویه‌ای ربات نرم نشان داده شده است که با

حالت اولیه برمی‌گردد و سرعت عمل ربات افزایش می‌یابد. در راستای Z کرنش خطی به دلیل عدم حضور نیرو صفر می‌باشد که در اینجا رسم نشده است.



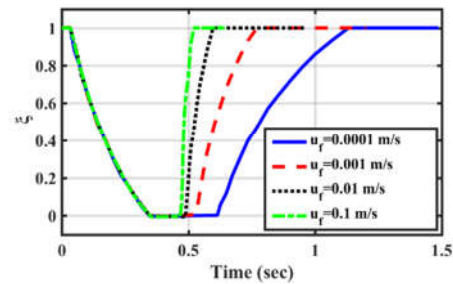
شکل ۱۶- (الف) موقعیت انتهایی ربات در جهت محور X، (ب) موقعیت انتهایی ربات در جهت محور Y



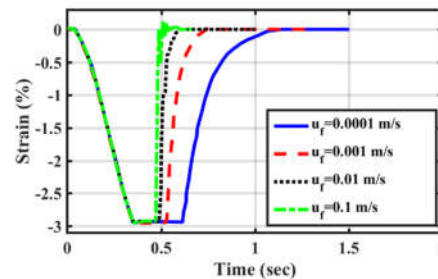
شکل ۱۷- (الف) کرنش خطی در جهت محور X، (ب) کرنش خطی ربات در جهت محور Y

در شکل ۱۸ کرنش زاویه‌ای ربات نرم نشان داده شده است که با توجه به حرکت در صفحه XY فقط در راستای محور Z کرنش زاویه‌ای مشاهده می‌شود با افزایش سرعت سیال ارتعاش بیشتری خواهد داشت و همچنین سریعتر به حالت اولیه باز می‌گردد.

ربات سریع‌تر به حالت پایدار می‌رسد و کرنش سیم آلیاژ حافظه‌دار از ۳٪ بیشتر نمی‌شود. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش سرعت سیال، نوسانات قسمت انتهایی نمودار پدیدار می‌شوند که ناشی از حرکت شتابدار ربات نرم در این حالت می‌باشد.

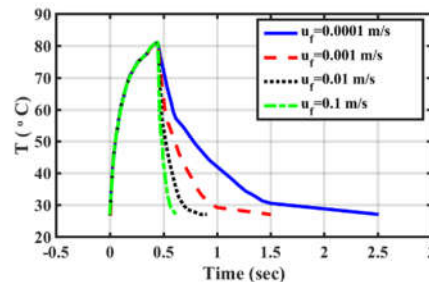


شکل ۱۳- کسر حجمی مارتنیزیت محرک آلیاژ حافظه دار در سرعت‌های مختلف سیال



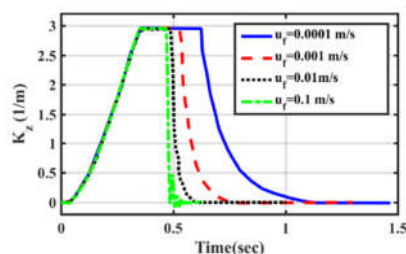
شکل ۱۴- کرنش ایجاد شده در محرک آلیاژ حافظه دار در سرعت‌های مختلف سیال

در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت سیال خنک کننده، محرک آلیاژ حافظه‌دار سریعتر خنک شده و به دمای محیط می‌رسد.



شکل ۱۵- دمای محرک آلیاژ حافظه دار در سرعت‌های مختلف سیال

در شکل ۱۶ موقعیت انتهایی ربات در طول حرکت نشان داده شده است که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت سیال، ربات سریعتر به حالت اولیه برمی‌گردد و موقعیت X و Y انتهایی ربات با افزایش سرعت ارتعاشات بیشتری خواهد داشت تا به حالت اولیه بازگردد. در راستای محور Z به دلیل عدم وجود نیرو حرکتی ایجاد نمی‌شود که در اینجا ترسیم نشده است. موقعیت ربات در ابتدای فاز سرعتهای در تمامی حالات یکسان بوده و ربات تا مقدار ۹/۳ میلی‌متر جابجا شده و پس از قطع جریان و همرفتی اجباری به حالت اولیه برمی‌گردد. در شکل ۱۷ مختصات تعمیم یافته ربات در طی حرکت ربات نشان داده شده است. کرنش خطی در راستاهای X و Y با افزایش سرعت سیال، سریعتر به



شکل ۱۸- کرنش زاویه‌ای حول محور Z در سرعت‌های مختلف سیال

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل‌سازی دینامیکی ربات نرم مجهز به محرک آلیاژ حافظه‌دار انجام شد. شبیه‌سازی‌های متعددی برای اعتبار سنجی مدل پیشنهادی انجام شد بطوریکه با اعمال ورودی به محرک سیم آلیاژ حافظه‌دار در طی یک چرخه کامل (گرمایش و سرمایش)، ربات یک رفتار قابل انتظاری را از خود نشان داد و محرک نیز در حین عبور از فاز استحاله در مسیر رفت و برگشت رفتار قابل پیش‌بینی را ارائه کرد. همچنین تاثیر جریان الکتریکی و سرعت سیال خنک‌کننده روی رفتار دینامیکی ربات نشان داد با افزایش مقدار جریان الکتریکی، فاز استحاله سریع‌تر اتفاق می‌افتد و ربات سریع‌تر به حالت پایدار می‌رسد البته چون مقدار تنش نهایی برای تمامی جریان‌ها تقریباً یکسان است بنابراین مقدار جابجایی ربات نرم برای تمامی جریان‌ها تقریباً با هم برابر است. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد استحاله با افزایش سرعت جریان سیال خنک‌کننده سریع‌تر اتفاق می‌افتد و تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت در زمان کوتاه‌تری انجام می‌شود. بنابراین مدلی پیشنهادی در این مقاله می‌تواند رفتار دینامیکی ربات نرم مجهز به محرک آلیاژ حافظه‌دار را به خوبی شبیه‌سازی کند و برای طراحی کنترلر در کاربردهای عملی مورد استفاده قرار گیرد.

۵- مراجع

- [1] Liu C., Dong E., Xu M., Alici G. and Yang J., Locomotion analysis and optimization of actinomorphic robots with soft arms actuated by shape memory alloy wires, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 15, N.4, pp.1-14, 2018.
- [2] Wallin T.J., Pikul J. and Shepherd R.F., 3D printing of soft robotic systems, *Nature Reviews Materials*, Vol. 3, No.6, pp.84-100, 2018.
- [3] توکلی س، دهقانی ر، کارآموز راوری م ر، کنترل مقاوم مبتنی بر شبکه عصبی شعاعی و تابع تصویر یک ربات پیوسته مجهز به محرک‌های کابلی، مهندسی مکانیک تبریز، ۵۱(۱)، ۱۴۰۰
- [4] صاحب‌سراف، تقوایی پور، غفاری‌راد ح، مدل‌سازی سینماتیکی بازوی ربات پیوسته الهام گرفته از اورینگامی با المان‌های انحنای ثابت، مهندسی مکانیک مدرس، ۱۹(۱۱)، ۱۳۹۸
- [5] Federico R., Cacucciolo V., Dias J., and Seneviratne L., Discrete Cosserat approach for soft robot dynamics: A new piece-wise constant strain model with torsion and shears, In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 5495-5502. IEEE, 2016.
- [6] Mavroidis C., Pfeiffer C. and Mosley M, 5.1 conventional actuators, shape memory alloys, and electrorheological fluids, *Automation, miniature robotics, and sensors for non-destructive testing and evaluation*, 2000.
- [7] Rao A., Srinivasa A. R., Reddy J. N., *Design of shape memory alloy (SMA) actuators*, Springer, 2015.
- [8] Mohd Zaid A., Xian T. W., and Jalani J., Mini Robot Fingers using Shape Memory Alloy, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 11, No. 18, 2016.
- [9] Wang Zh., Hang G., Li J., Wang Y., and Xiao K., A micro-robot fish with embedded SMA wire actuated flexible biomimetic fin, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 144, No. 2, pp.354-360, 2008.
- [10] Wei W., and Ahn S. H., Shape memory alloy-based soft gripper with variable stiffness for compliant and effective grasping, *Soft robotics*, Vol. 4, No. 4, pp.379-389, 2017.
- [11] Runge G., and Raatz A., A framework for the automated design and modelling of soft robotic systems, *CIRP Annals*, Vol. 66, No. 1, pp. 9-12, 2017.
- [12] Zhou X., Majidi C., and O'Reilly O. M., Soft hands: An analysis of some gripping mechanisms in soft robot design, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 64, pp.155-165, 2015.
- [13] Cheng SS, Kim Y, Desai JP., Modeling and characterization of shape memory alloy springs with water cooling strategy in a neurosurgical robot, *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 28, No. 16, pp.2167-2183, 2017.
- [14] Daily-Diamond Ch. A., Novelia A., and O'Reilly O. M., Dynamical analysis and development of a biologically inspired SMA caterpillar robot, *Bioinspiration & biomimetics*, Vol. 12, No. 5, A. N. 056005, 2017.
- [15] Modabberifar M., and Spenko M., A shape memory alloy-actuated gecko-inspired robotic gripper, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 276, pp.76-82, 2018.
- [16] Huang X., Kumar K., Jawed M. K., Mohammadi Nasab A., Ye Z., Shan W., and Majidi C., Highly dynamic shape memory alloy actuator for fast moving soft robots, *Advanced Materials Technologies*, Vol. 4, No. 4, A. N. 1800540, 2019.
- [17] هادی ع، اکبری ح، عالی پور خ، طراحی، ساخت و کنترل یک ماژول رباتیکی پیوسته با محرک‌های فنر آلیاژ حافظه‌دار، مهندسی مکانیک مدرس، ۱۶(۲)، ۱۳۹۵
- [18] Quintanar-Guzmán S., Kannan S., Aguilera-González A., Olivares-Mendez MA., Voos H., Operational space control of a lightweight robotic arm actuated by shape memory alloy wires: A comparative study, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.30, No. 9, pp.1368-1384, 2019.
- [19] Abu Alqumsan A., Khoo S., Norton M., Robust control of continuum robots using Cosserat rod theory, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 131, pp.48-61, 2019.
- [20] Huang W. M., Ding Z., Wang C. C., Wei J., Zhao Y., and Purnawali H., Shape memory materials, *Materials today*, Vol. 13, No. 7-8, pp.54-61, 2010.
- [21] Van Humbeeck J., Shape memory alloys: a material and a technology, *Advanced engineering materials*, Vol. 3, No. 11 pp. 837-850, 2001.
- [22] Renda F., Cacucciolo V., Dias J. and Seneviratne L., Discrete Cosserat approach for soft robot dynamics: A new piece-wise constant strain model with torsion and shears In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 5495-5502, 2016.
- [23] Renda F., Giorelli M., Calisti M., Cianchetti M. and Laschi C., Dynamic model of a multibending soft robot arm driven by cables, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 30, No. 5, pp. 1109-1122, 2014.
- [24] راکی م، تحلیل دینامیک و کنترل ربات پیوسته با محرک‌های مغناطیسی. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، ۱۳۹۸.
- [25] Cheng S. S. and Desai J. P., Towards high frequency actuation of SMA spring for the neurosurgical robot-MINIR-II, In 2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), pp. 2580-2585, 2015.
- [26] Bergman T. L., Incropera F. P., DeWitt D. P., Lavine A. S. *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: John Wiley & Sons, 2017.