

طراحی و ساخت یک اسفنکتر مصنوعی با استفاده از آلیاژ حافظه دار نیکل تیتانیم - قسمت دوم

محمد رضا دیلمی^۱، سید خطیب الاسلام صدرنژاد^۲، علی مقداری^۲

دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

قطب علمی طراحی، رباتیک و اتوماسیون (CEDRA)

m_deilami@mech.sharif.edu

چکیده

در این مقاله به ادامه قسمت قبلی در طراحی و ساخت یک نمونه جدید از اسفنکترهای مصنوعی پرداخته شده است که عملگر آن، یک سیم ساخته شده از آلیاژ حافظه دار نیکل تیتانیم می باشد. در قسمت اول، ابتدا طرحی بهینه برای ساخت هندسه اسفنکتر ارائه شد و سپس روابط اصلاح شده استحاله لیانگ-راجرز که در آن تغییر خواص متالورژیکی آلیاژ حین استحاله مارتنزیتی و نیز تنشهای واقعی بحرانی لحاظ شده، معرفی گردید. در این قسمت، با استفاده از نتایج قسمت قبلی، عملگر طراحی و شبیه سازی شده است. در نهایت این شبیه سازی با نتایج تجربی مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: اسفنکتر - آلیاژ حافظه دار - سیستم دینامیکی غیر خطی - خواص متغیر.

مقدمه

همان گونه که در قسمت اول بیان شد، خواص استثنائی آلیاژهای حافظه دار باعث به کارگیری فراوان این دسته از مواد به عنوان عملگر در طیف وسیعی از زمینه های کاربردی شده است. از جمله این زمینه ها را می توان تجهیزات بیومکانیکی نام برد که سازگاری با بدن و بزرگ بودن نسبت توان خروجی به حجم آلیاژهای حافظه دار، باعث روی آوردن مهندسان پزشکی به این مواد شده است. در تحقیق انجام شده نیز از یک قطعه سیم ساخته شده از آلیاژ حفظه دار نیکل-تیتانیم به عنوان عملگر در یک

اسفنکتر مصنوعی جدید، استفاده شده است. این وسیله برای کنترل ادرار در انسانهای ناتوان و بیماران خاص، طراحی شده است.

همانند تمامی کاربردهای کنترلی، عملکرد صحیح و بهینه عملگر در اسفنکتر، مستلزم طراحی مناسب کنترلر برای آن می باشد. طراحی مناسب این کنترلر نیز به نوبه خود، بستگی به دقت مدل استخراج شده برای عملگر و استفاده صحیح از روشهای کنترلی می باشد. بدین منظور، در قسمت قبلی مدل اصلاح شده لیانگ-راجرز برای شبیه سازی سینتیک استحاله فازی در آلیاژهای حافظه دار، ارائه شد. حال با استفاده از این مدل به همراه مدل حرارتی

۱- کارشناس ارشد

۲- استاد

که با توجه به تعریف مدول الاستیسیته و تنسور استتاله اصلاح شده، مشتق زمانی این دو کمیت به صورت رابطه (۲) می باشد. این معادله صرفنظر از مستقیم یا معکوس بودن استتاله برقرار است.

$$\begin{aligned} \dot{D} &= (D_m - D_a) \dot{\zeta} \\ \dot{\Omega} &= -(D_m - D_a) \varepsilon_L \dot{\zeta} \end{aligned} \quad (2)$$

معادلات سینتیک استتاله نیز به صورت زیر خواهند بود؛ در استتاله معکوس (در حالتی که با برقرار کردن جریان الکتریکی، دمای آلیاژ را بالا می بریم) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{\zeta} &= -\frac{a_A}{2} \sin[a_A(T - A_s - \frac{\sigma}{C_A})](T - \frac{\sigma}{C_A}) \\ C_A(T - A_f) &< \sigma < C_A(T - A_s) \end{aligned} \quad (3)$$

ذکر این نکته لازم به نظر می رسد که با توجه به کامل بودن استتاله ها، کسر مارتنزیت در ابتدای شروع استتاله معکوس در رابطه (۳) برابر با یک قرار داده شده است. در استتاله مستقیم که با شروع به بسته شدن اسفنگتر آغاز می شود و با بسته شدن کامل اسفنگتر به اتمام می رسد، نیز داریم:

$$\begin{aligned} \dot{\zeta} &= -\frac{a_M}{2} \sin[a_M(T - M_f - \frac{\sigma}{C_M})](T - \frac{\sigma}{C_M}) \\ C_M(T - M_s) &< \sigma < C_M(T - M_f) \end{aligned} \quad (4)$$

در رابطه (۴) نیز کسر اولیه مارتنزیت در ابتدای استتاله مستقیم برابر صفر گرفته شده است.

معادله دینامیکی بعدی، معادله انتقال حرارت می باشد که برای بدست آوردن آن، از قانون اول ترمودینامیک (قانون بقاء انرژی) استفاده شده است. نکته اصلی برای استخراج این معادله، تعیین رابطه انتقال حرارت سیم با محیط اطراف خود شامل بدنه اسفنگتر و عضلات کناری می باشد. با توجه به عدم وجود منبع علمی معتبر در زمینه حل چنین مسئله ای و نیز جهت جلوگیری از انحراف تحقیق از مسیر خود، برای مدلسازی این مسئله از روشهای تقریبی استفاده شده است. به صورت تقریبی انتقال حرارت بین سیم با محیط اطراف آن در بدن را می توان با رسانش با یک محیط مادی با خواص نزدیک به آب به ضخامت ۰/۵ میلیمتر که اطراف سیم را گرفته تخمین زد [۸]. در اینجا به صورت تقریبی رابطه تبادل انرژی بین سیم و اطراف آن را به صورت معادله انتقال حرارت جابجائی آزاد در یک محیط آبکی مدل کرده و جهت همخوانی نتایج آن با نتایج تجربی، مقدار ضریب این انتقال حرارت را در آن تصحیح

سیستم تحریک، به طراحی کنترلر برای عملگر خواهیم پرداخت.

به طور کلی انواع روشهای کنترلی در آلیاژهای حافظه دار را می توان به سه دسته تقسیم بندی کرد: کنترل خطی، غیر خطی و کنترل به روش پالسهای مدولاریزه (PWM) [۱]. در روشهای کنترل خطی، کنترلر عمدتاً به صورت PID طراحی می شود [۲]. البته اشکال دیگری از کنترلرهای خطی مانند PID-P3 نیز برای کنترل عملگرهای ساخته شده از آلیاژهای حافظه دار، به کار رفته است [۳]. روشهای غیر خطی به کار رفته، بیشتر به صورتیهای پسخوراند خطی ساز [۴]، کنترلرهای فازی و نروفازی [۵]، روش کنترل ساختار متغیر (VSC) [۶] و نیز کنترل مودهای لغزشی [۷] می باشند.

در این تحقیق، ابتدا مدل دینامیکی غیر خطی سیستم شامل مدل حرارتی عملگر، سینتیک استتاله و فنر اسفنگتر استخراج شده است. سپس ابتدا با روش خطی سازی، سیستم دینامیکی را به صورت خطی شده در آورده و در مورد کنترل پذیری آن بحث شده است. با توجه به نتایج بدست آمده مبنی بر کنترل ناپذیر بودن این سیستم، به هدایت حلقه باز آن پرداخته شده است و نتایج آن بررسی شده است. در انتها با انجام آزمایش تجربی، نتایج بدست آمده با نتایج تجربی مقایسه شده است.

مدل سیستم

مدل دینامیکی سیستم، عبارت خواهد بود با سینتیک استتاله، مسئله انتقال حرارت و تعامل عملگر با مابقی قسمتها. همانگونه که در قسمت اول مقاله به آن اشاره شد، اندازه سیم حافظه دار، فنر مکانیکی و نیز دماهای کاری به گونه ای طراحی یا انتخاب شده اند که استتاله های مستقیم و معکوس در حالتیهای تمام باز و تمام بسته اسفنگتر به صورت کامل انجام گیرند و در نتیجه نیازی به دخیل دادن تنشهای بحرانی اصلاح شده (که در حالت استتاله ناقص باید آنها را تاثیر داد) نیست. بدین ترتیب، با مشتق گیری زمانی از رابطه ساختاری آلیاژ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \dot{D} \varepsilon + D \dot{\varepsilon} + \dot{\Omega} \zeta \\ &+ \Omega \dot{\zeta} + \Theta_T \dot{T} \end{aligned} \quad (1)$$

کرده ایم. در این صورت معادله دینامیکی دما به صورت رابطه (۵) در می آید [۹]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho_E J^2 - 2 \frac{h_L}{R} (T - T_\infty) = C_v \frac{\partial T}{\partial t} - H \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (5)$$

در این رابطه، K ، ρ_E ، J ، h_L ، R ، T_∞ ، C_v و H به ترتیب ضریب رسانش گرمایی در سیم، مقاومت الکتریکی مخصوص، چگالی جریان الکتریکی بر واحد سطح مقطع سیم، ضریب انتقال حرارت جابجائی، شعاع سیم، دمای محیط اطراف (که برابر با دمای بدن است)، ظرفیت حرارتی مخصوص حجمی آلیاژ و گرمای نهان استحاله می باشند. با توجه به یکسان بودن دما در طول سیم، گرادیان دمایی در طول سیم صفر می شود و در نتیجه ترم $\left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right)$ از معادله (۵) حذف می شود. در بسیاری از کاربردهای مهندسی از بیان ترم انرژی نهان استحاله صرف نظر می شود [۱]، لیکن با توجه به قابل توجه بودن آن در قیاس با بقیه ترمها، در تحقیق انجام شده این ترم نیز تاثیر داده شده است. به علاوه، در اینجا مقاومت الکتریکی مخصوص و ظرفیت حرارتی نیز به صورت توابعی از کسر مارتنزیت بیان شده اند. بدین ترتیب که:

$$\begin{aligned} \rho_E &= \rho_{Ea} + (\rho_{Em} - \rho_{Ea}) \zeta \\ C_v &= C_{va} + (C_{vm} - C_{va}) \zeta \end{aligned} \quad (6)$$

آخرین معادله، به تعامل بین عملگر و بدنه اسفنکتر بر می گردد. در این مقاله با توجه به روانکاوی قسمتهای مختلف توسط ترشحات داخلی بدن از نیروهای اصطکاکی صرف نظر شده است. همچنین شکل هندسی خاص اسفنکتر طراحی شده از اعمال نیرو بر لغزنده توسط بافتهای جانبی جلوگیری می کند [۱۰]. نیروی آبنندی Urethra هم در مقایسه با نیروهای لازم برای استحاله بسیار ناچیز است [۱۱]. در نهایت با توجه به سرعت نسبتا کم لغزنده و نیز جرمهای منفی ایجاد شده در بدنه آن جهت سبک کردن هر چه بیشتر اسفنکتر، از نیروهای اینرسی ناشی از حرکت چرخشی لغزنده صرف نظر شده است. بنابراین تنها نیرویی که عملگر باید به آن غلبه کند، نیروی بازگردان فتر می باشد. با توجه به هندسه اسفنکتر و رابطه بین تنش و نیرو، رابطه (۷) بدست خواهد آمد:

$$\sigma = 68.341 - 524.932 \varepsilon \quad (7)$$

در این رابطه تنش برحسب مگا پاسکال می باشد. لازم به ذکر است که این رابطه فقط در نقاط میانی حرکت لغزنده برقرار است و در دو انتهای کورس که لغزنده بر لبه ها تکیه می دهد، اعتباری ندارد. از سوی دیگر، در طول مسیر لغزنده که این رابطه برقرار است، از آنجا که معادله مذکور، یک معادله استاتیکی بین دو متغیر موجود در معادله (۱) می باشد، باعث از بین رفتن یکی از این متغیرهای حالت می شود. در نتیجه بردار متغیرهای حالت را می توان به صورت زیر معرفی کرد:

$$\bar{X} = \begin{Bmatrix} \zeta \\ T \\ \varepsilon \end{Bmatrix} \quad (8)$$

بنابر این، فضای حالت سیستم کنترلی، یک فضای سه بعدی غیر خطی از معادلات دیفرانسیل (۱)، (۳) یا (۴) و (۵) می باشد.

ورودی کنترلی در معادلات J است که البته در سیستم فیزیکی بایستی به ولتاژ تبدیل شود. برای این کار داریم:

$$V = IR_E \quad (9)$$

مقاومت الکتریکی به طول سیم، سطح مقطع آن و نیز مقاومت الکتریکی مخصوص آلیاژ بستگی دارد. مقاومت الکتریکی مخصوص از رابطه (۶) به صورت تابعی از کسر مارتنزیت تعریف شد و طول سیم هم در هر لحظه به مقدار کرنش و طول اولیه بستگی دارد. در نتیجه با جایگذاری این پارامترها در رابطه (۹)، رابطه بین ورودی سیستم فیزیکی (V) و ورودی کنترلی (J) عبارت است از:

$$V = \rho_E L_0 (1 + \varepsilon) J \quad (10)$$

هدف از سیستم کنترلی، این است که زاویه چرخش لغزنده اسفنکتر را کنترل کند. این زاویه در حالت تمام باز اسفنکتر برابر صفر و در حالت تمام بسته آن، برابر $\frac{\pi}{6}$ می باشد. با توجه به اینکه بسته شدن اسفنکتر با قطع ورودی انجام می شود، کنترلی بر روی آن انجام نمی گیرد (ورودی فقط می تواند سیم را گرم کند)، پس سیستم کنترلی یک رگولاتور است که زاویه θ را از $\frac{\pi}{6}$ به مبدا باز می گرداند. رابطه بین این زاویه و کرنش به شکل معادله (۱۱) می باشد [۱۰]:

$$\theta = 15.1855(\varepsilon - 5.2e^{-4}) \quad (11)$$

جدول ۱: مقدار عددی پارامترهای به کار رفته

| پارامتر | مقدار | آحاد | مرجع |
|--------------|------------------------|------------------|------|
| A_s | 307 | $^{\circ}K$ | [۱۳] |
| A_f | 331 | $^{\circ}K$ | [۱۳] |
| M_s | 321 | $^{\circ}K$ | [۱۳] |
| M_f | 298 | $^{\circ}K$ | [۱۳] |
| ρ_{Ea} | 8.87×10^{-4} | $\Omega.mm$ | [۱۳] |
| ρ_{Em} | 9.98×10^{-4} | $\Omega.mm$ | [۱۳] |
| D_a | 75×10^3 | MPa | [۱] |
| D_m | 28×10^3 | MPa | [۱] |
| C_A | 4.1635 | $MPaK^{-1}$ | [۱۳] |
| C_M | 4.1635 | $MPaK^{-1}$ | [۱۳] |
| C_{va} | 5.401×10^{-3} | $Jmm^{-3}K^{-1}$ | [۱۴] |
| C_{vm} | 4.861×10^{-3} | $Jmm^{-3}K^{-1}$ | [۱۴] |
| H | 0.156 | Jmm^{-3} | [۱۴] |
| h_L | 50×10^{-6} | $Wmm^{-2}K^{-1}$ | - |
| T_{∞} | 37 | $^{\circ}C$ | - |
| R | 0.25 | mm | - |

کاری اسفنکتر را به دو کورس باز شدن و کورس بسته شدن تقسیم کرده ایم. در کورس بسته شدن اسفنکتر، از آنجا که ولتاژ ورودی قطع می شود هیچ ورودی کنترلی نداریم و سیستم خود به خود و با توجه به تبادل حرارت با محیط اطراف حرکت می کند. پارامترهای حاکم بر سیستم در این کورس (شامل سختی و پیچش اولیه فنر، دما در ابتدای کورس و نیز دمای نهایی در انتهای آن که برابر با دمای بدن است)، به گونه ای تنظیم شده اند که سیستم به نقطه دلخواه $\theta = \pi/6$ برود، ضمن اینکه در این نقطه به حالت تمام مارتنزیت نیز برسد. این مطلب در شبیه سازی رفتار اسفنکتر در کورس بازگشت (بسته شدن) نشان داده شده و با انجام آزمایشات تجربی نیز به اثبات رسیده است. هر یک از دو کورس باز و بسته شدن نیز به نوبه خود به چند قسمت تقسیم می شوند که در هر یک از این قسمتها، معادلات حالت با هم متفاوت می باشد. بدین ترتیب باز شدن اسفنکتر در چهار مرحله و بسته شدن آن نیز در سه مرحل به انجام می پذیرند.

اولین مرحله از کورس باز شدن بین نقطه کلید زدن اسفنکتر تا زمانی است که استتاله معکوس شروع می شود. در طول این مرحله، آلیاژ به حالت تمام مارتنزیت است و نیز حرکتی وجود نخواهد داشت. گرم کردن آلیاژ باعث افزایش طول آن به علت انبساط حرارتی می شود که البته با وجود قیود حرکتی، کرنش تغییر نمی کند. از سوی دیگر، این افزایش دما تنش بحرانی شروع استتاله عکس را نیز زیاد می کند و زمانیکه تنش موجود در سیم با این مقدار بحرانی تنش برابر شد، استتاله عکس شروع می شود. با توجه به اینکه کرنش موجود در سیم در این مرحله برابر با کرنش استتاله است، از رابطه ساختاری، تنش موجود در سیم برابر خواهد بود با:

$$\sigma = 0.55(127.845 - T) \quad (14)$$

تنش بحرانی شروع استتاله عکس نیز بر حسب دما برابر است با:

$$\sigma_{cr} = 4.1635(T - 34) \quad (15)$$

که از دو معادله اخیر نتیجه می شود که زمانی که دما به مقدار $T = 44.95^{\circ}$ این مرحله به اتمام می رسد. تنها معادله دینامیکی در این مرحله، معادله انتقال حرارت است که به شکل معادله (۱۶) است:

شکل استاندارد یک سیستم فضای حالت با پارامترهای مستقل از زمان به صورت رابطه (۱۲) است [۱۲]:

$$\dot{\vec{X}} = A(\vec{X}) + B(\vec{X}, u) \quad (12)$$

که در این رابطه، u ورودی کنترلی (در اینجا برابر با J) و $A(\vec{X})$ و $B(\vec{X}, u)$ توابع غیر خطی از متغیرهای حالت و ورودی می باشند که در اینجا از روابط (۱)، (۳) و (۵) بدست می آیند. با توجه به اینکه معادلات حالت به صورت کویله می باشند، بدست آوردن تابع صریح برای $A(\vec{X})$ و $B(\vec{X}, u)$ اندکی مشکل می باشد و نیاز به انجام یک سری عملیات جبری گسترده بر روی معادلت حالت می باشد. مقدار عددی پارامترهای به کار رفته در جدول (۱) داده شده است. جهت ساده تر کردن کار، می توان متغیر ε را با θ جایگزین می کنیم. بدین ترتیب بردار حالت به صورت زیر در می آید:

$$\vec{X} = \begin{Bmatrix} \zeta \\ T \\ \theta \end{Bmatrix} \quad (13)$$

بررسی رفتار سیستم در یک کورس کامل

در تحقیق انجام شده، حرکت لغزنده در یک سیکل کامل

از سوی دیگر، به دلیل محدودیتهای تکنولوژیکی، برای کاربردهای بیومکانیکی، بیشترین مقدار ولتاژ می تواند ۶ ولت باشد. بدین منظور در برنامه شبیه ساز، این مقدار برابر با مقدار اشباع ورودی در نظر گرفته شده است. لذا ولتاژ مورد نیاز به شکل شکسته نشان داده شده در شکل (۱) درخواست خواهد آمد. از تحلیل انجام شده، پس از گذشت ۰/۲ ثانیه از شروع این مرحله، دما به مقدار بحرانی ۴۴/۹۵ درجه سانتیگراد می رسد. در تمام این زمان، ورودی برابر با ولتاژ اشباع خواهد بود.

با رسیدن دما به مقدار ۴۴/۹۵، تنش موجود در سیم نیز به مقدار بحرانی شروع استحاله عکس می رسد. بدین ترتیب مرحله دوم از کورس باز شدن شروع می شود و تا زمانیکه تنش موجود در سیم به مقدار مورد نیاز برای غلبه بر فنر رسید ادامه می یابد. در این مرحله نیز کرنش ثابت می ماند و معادلات حالت شامل معادله انتقال حرارت، معادله ساختاری و نیز معادله استحاله عکس می باشند. با قرار دادن مقادیر عددی در این معادلات خواهیم داشت:

$$\dot{\sigma} + (4270 - 3290\zeta)\dot{\zeta} + 0.55\dot{T} = 0 \quad (19)$$

و نیز:

$$(54.01 - 5.4\zeta)\dot{T} - 1560\dot{\zeta} = \quad (20)$$

$$(8.87 - 1.11\zeta)J^2 - 4T + 148$$

معادله استحاله نیز به همان شکل معادله (۳) باقی می ماند. با انجام یک سری عملیات جبری گسترده، از حل معادلات (۳)، (۱۹) و (۲۰) خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \dot{\sigma} \\ \dot{\zeta} \\ \dot{T} \end{cases} = \begin{cases} f_1(\sigma, \zeta, T, u) \\ f_2(\sigma, \zeta, T, u) \\ f_3(\sigma, \zeta, T, u) \end{cases} \quad (21)$$

که در آن $u = J^2$ و f_1 ، f_2 و f_3 توابعی غیر خطی از متغیرهای حالت و ورودی می باشد. در این قسمت، در ابتدا برای طراحی کنترلر از روش خطی سازی استفاده شده است. برای این کار توابع غیر خطی در رابطه (۲۱) را با مشتق گیری حول نقطه اولیه (شروع مرحله دوم) با توابعی خطی شده تقریب می زنیم. اگر اندیس e نمایانگر نقطه اولیه و اندیس دوم به معنی مشتق جزئی نسبت به متغیر مشخص شده باشد، سیستم خطی شده به صورت رابطه (۲۲) در خواهد آمد که این رابطه نیز با یک تعریف جدید در متغیرها، به صورت مقدار آنها منهای مقدار اولیه آنها، به

$$C_{vm}\dot{T} = \rho_{Em}J^2 - \frac{2h_L}{R}(T - T_\infty) \quad (16)$$

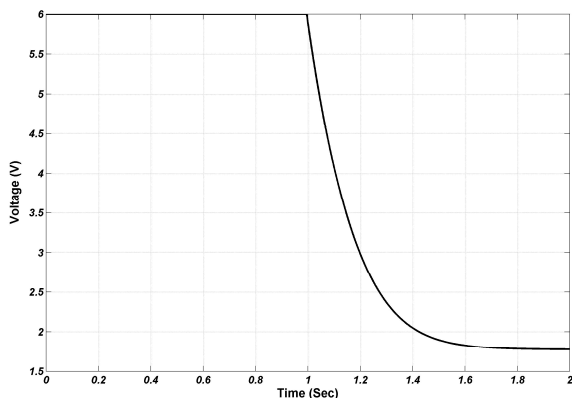
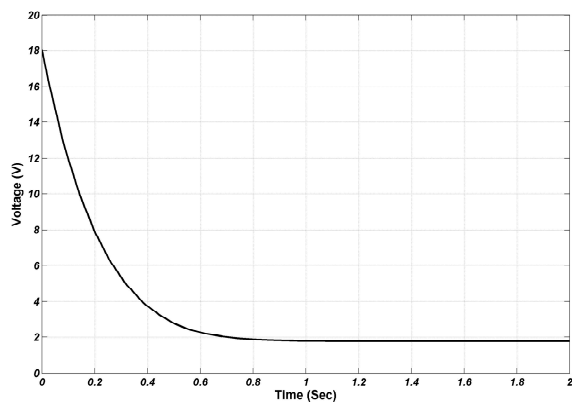
از آنجا که دمای نهایی سیم در کورس باز شدن برابر با ۷۵ درجه سانتیگراد است، سیستم کنترلی در این مرحله را به گونه ای طراحی می کنیم که در کمتر از ۱ ثانیه به این دما برسیم. بدین منظور، ورودی کنترلی را به شکل زیر تعریف می کنیم:

$$U = \frac{\rho_{Em}J^2 + \frac{2h_L}{R}T_\infty}{C_{vm}} = KT_d - (K - \frac{2h_L}{RC_{vm}})T \quad (17)$$

که در این رابطه، T_d دمای مطلوب است که برابر با ۷۵ درجه سانتیگراد می باشد. با قرار دادن این ورودی در رابطه (۱۶) خواهیم داشت:

$$\dot{e} - Ke = 0 \quad (18)$$

که همان دینامیک خطا می باشد که دارای مقدار اولیه خطای ۳۸ درجه سانتیگراد می باشد. با اختیار مقدار ۱۰ برای ضریب K در زمانی کمتر از ۱ ثانیه به مقدار نهایی می رسیم. در این صورت، نمودار ولتاژ مورد نیاز به شکل (۱) در می آید:



شکل ۱: ولتاژ مورد نیاز در مرحله اول باز شدن

سه معادله، دینامیک دما و سینتیک استحالته همانند روابط (۲) و (۳) می مانند و معادله ساختاری به صورت رابطه (۲۳) در می آید:

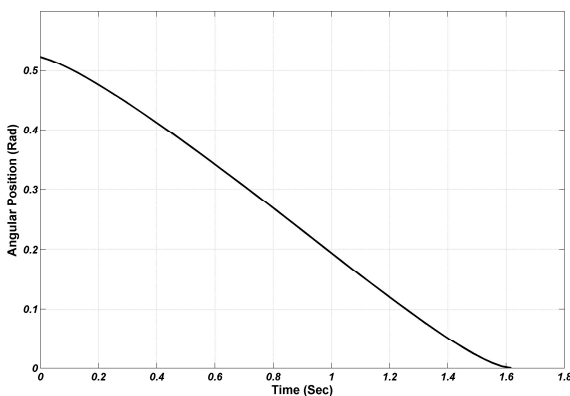
$$\dot{\sigma} + (-75000 + 47000\zeta)\dot{\varepsilon} + (47000\varepsilon - 3290\zeta + 2625)\dot{\zeta} + 0.55\dot{T} = 0 \quad (23)$$

و رابطه قیدی (۷) نیز به فرم دینامیکی، به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{\sigma} + 524.932\dot{\varepsilon} = 0 \quad (23)$$

با خطی سازی این سیستم حول نقطه اولیه خود، به نتیجه ای مشابه با مرحله دوم (سیستم پایدار ولی کنترل ناپذیر) خواهیم رسید. در اینجا این نکته را متذکر می شویم که پارامترهای حاکم بر سیستم فوق (سختی و پیچش اولیه، دماهای کاری و مقدار باز شونده نهایی) به گونه ای انتخاب شده اند که سیستم از حالت مطلوب ما (که در آن ضمن رسیدن به انتهای کورس دما به مقدار ۷۵ درجه و کسر مارتنزیت به صفر برسد و تنش نیز به مقدار مورد نیاز برای نگه داشتن لغزنده در موقعیت تمام باز دست یابد) بگذرد. در این مرحله نیز با اعمال ورودی اشباع به سیستم، به نقطه مطلوب می رسیم. در حقیقت، به لطف طراحی مناسب پارامترهای دخیل در سیستم، حالت نهایی این سیستم همان حالت مطلوب طراحی می باشد. در انتهای این مرحله زاویه لغزنده، دما و کسر مارتنزیت به ترتیب به مقادیر صفر، ۷۴/۱۲۵۲ درجه سانتیگراد و صفر می رسند. مدت زمان مورد نیاز در این مرحله نیز برابر با ۱/۶ ثانیه خواهد بود.

چهارمین و آخرین مرحله از کورس باز شدن، مربوط به نگه داشتن لغزنده در حالت تمام باز اسفنکتر است. در این حالت ماده تماما آستنیت است و کرنش نیز تغییرات ندارد.



شکل ۳: زاویه لغزنده در مرحله سوم از کورس باز شدن

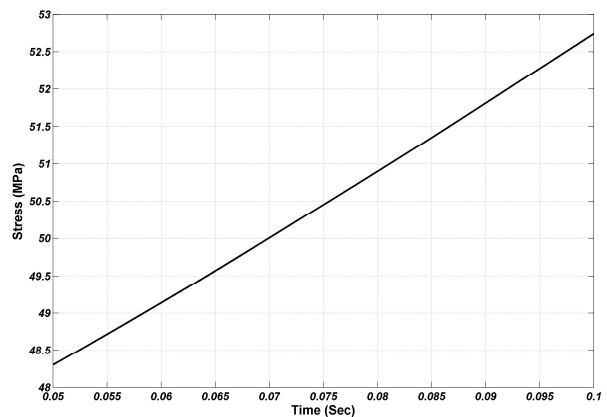
شکل یک سیستم استاندارد خطی در می آید:

$$\dot{\bar{X}} - \dot{\bar{X}}_e = \begin{bmatrix} f_{1,\zeta} & f_{2,\zeta} & f_{3,\zeta} \\ f_{1,T} & f_{2,T} & f_{3,T} \\ f_{1,\theta} & f_{2,\theta} & f_{3,\theta} \end{bmatrix} (\bar{X} - \bar{X}_e) + \begin{bmatrix} f_{1,u} \\ f_{2,u} \\ f_{3,u} \end{bmatrix} (u - u_e) \quad (22)$$

نکته قابل توجه در این قسمت این است که ماتریسهای حالت و ورودی که در این مرحله بدست می آیند، ساختاری پایدار لیکن کنترل ناپذیر را تشکیل می دهند و لذا نمی توان از روشهای کلاسیک برای این سیستم خطی یک کنترلر طراحی نمود. از سوی دیگر، با توجه به شکل (۱)، مدت زمان زیادی بعد از شروع مرحله اول، ولتاژ مورد نیاز بیشتر از حد قابل تامین است و لذا ورودی به صورت اشباع می باشد. لذا در این مرحله نیز، با توجه به پایداری سیستم، از مقدار اشباع ولتاژ (یعنی ۶ ولت) به عنوان ورودی استفاده می کنیم. در این صورت، نمودار تنش به وجود آمده در سیم در این حالت به شکل (۲) در خواهد آمد.

این مرحله تا زمانی ادامه می یابد که تنش به مقدار ۴۹/۹۶۵ مگاپاسکال برسد. مدت زمان مورد نیاز برای این مرحله زیر برابر با ۰/۰۷ ثانیه می باشد. مقادیر دما و کسر مارتنزیت نیز در انتهای این مرحله به ترتیب ۴۷/۱۸۸۷ درجه سانتیگراد و ۰/۹۹۴ خواهد بود.

در مرحله سوم از کورس باز شدن، همزمان با انجام استحالته عکس، لغزنده نیز شروع به حرکت می کند. در نتیجه کرنش نیز در این مرحله دارای دینامیک خواهد بود. مجدداً معادلات حالت عبارت خواهند بود از معادله ساختاری، معادله انتقال حرارت و نیز سینتیک استحالته عکس. از این



شکل ۲: تنش موجود در سیم در مرحله دوم کورس باز شدن

خواهد بود:

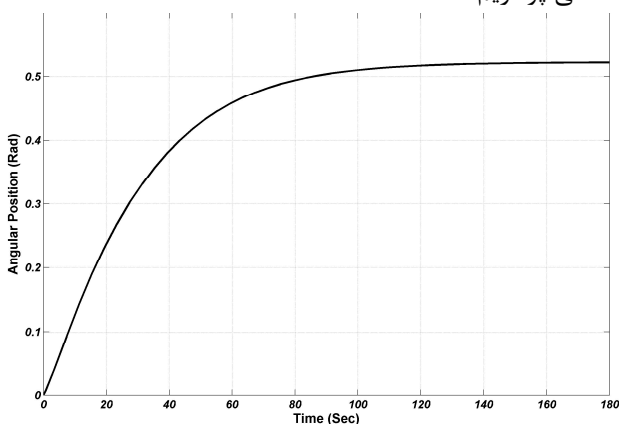
$$\sigma = (109.31 - T) \quad (25)$$

زمانی که دما به ۶۱/۵۹۱ درجه سانتیگراد رسید، تنش برابر با تنش بحرانی می شود. مدت زمان لازم برای این مرحله ۵/۸۷ ثانیه می باشد.

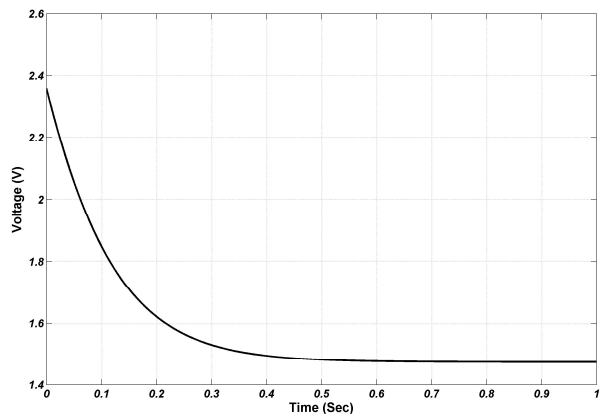
در مرحله دوم، معادله استحالته نیز به معادلات حالت اضافه می شود. در این مرحله، تنش کاهش می یابد تا در نهایت، نیروی فنر بر کشش سیم غلبه کند و لغزنده به حرکت درآید. در این مرحله نیز کرنش ثابت می ماند و تغییرات آن برابر با صفر خواهد بود. با حل عددی معادلات حالت، دما، تنش و کسر مارتنزیت در انتهای این مرحله به ترتیب برابر با ۵۸/۵۱۱ درجه سانتیگراد، ۴۹/۹۶۵ مگاپاسکال و ۱/۰۴ درصد می باشد. مدت زمان لازم برای این مرحله نیز برابر با ۴ ثانیه خواهد بود.

در آخرین مرحله از کورس بسته شدن اسفنکتر، حرکت لغزنده نیز به معادلات دینامیکی اضافه خواهد شد. معادلات حاکم بر این مرحله، همانند معادلات مرحله سوم از کورس باز شدن می باشد؛ با این تفاوت که معادله استحالته از رابطه (۴) پیروی می کند و ورودی نیز در کلیه معادلات برابر با صفر است. همانگونه که قبلاً به آن اشاره شد، طراحی پارامترهای تشکیل دهنده سیستم به گونه ای است که لغزنده در انتهای این مرحله در حالت تمام بسته قرار می گیرد و همزمان دما به مقدار تعادلی بدن (۳۷ درجه سانتیگراد) و کسر مارتنزیت به مقدار یک می رسد. زمان مورد نیاز این نزدیک به ۱۶۰ ثانیه می باشد.

در انتهای این بحث، به معرفی مجموعه آزمایشگاهی که برای تایید عملی شبیه سازی انجام گرفته ساخته شده است می پردازیم.



شکل ۶: نمودار موقعیت زاویه ای لغزنده در کورس بسته شدن



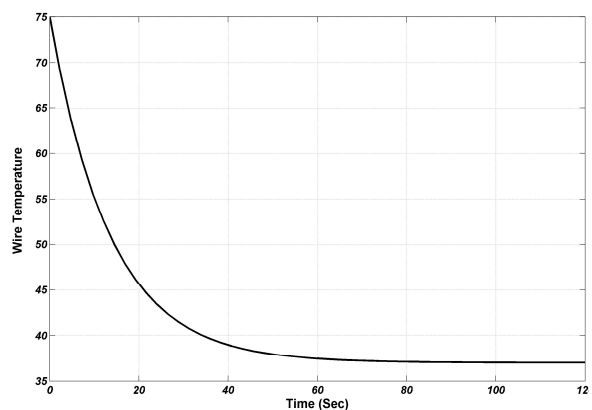
شکل ۴: ولتاژ ورودی در مرحله چهارم از کورس باز شدن

ورودی مورد نیاز در این مرحله که با روش طراحی کنترلر انتگرالگیر بدست آمده در شکل (۴) به نمایش درآمده است.

کورس بسته شدن اسفنکتر با قطع ولتاژ به عنوان ورودی آغاز می شود و با قرار گرفتن لغزنده در حالت تمام بسته به اتمام می رسد. این کورس نیز در سه قسمت شبیه سازی شده است؛ در اولین مرحله از این قسمت، سرد کردن سیم حافظه داری که به حالت تمام آستنیت است، باعث بازیافت کرنش انبساطی می شود؛ لیکن قیود مکانیکی مانع از باز شدن هرچه بیشتر اسفنکتر می شود و در عوض، تنش موجود در سیم بالا می رود. پایین آمدن دما تنش بحرانی استحالته مستقیم را می کاهد و زمانی که تنش موجود در سیم به این مقدار بحرانی رسید، استحالته آغاز و مرحله اول کورس بسته شدن نیز به اتمام می رسد. تنها معادل دینامیکی حاکم در این مرحله، معادله انتقال حرارت به فرم زیر می باشد:

$$C_{va} \dot{T} = \frac{2h_L}{R} (T - T_{\infty}) \quad (24)$$

معادله ساختاری نیز در این مرحله به شکل رابطه (۲۵)

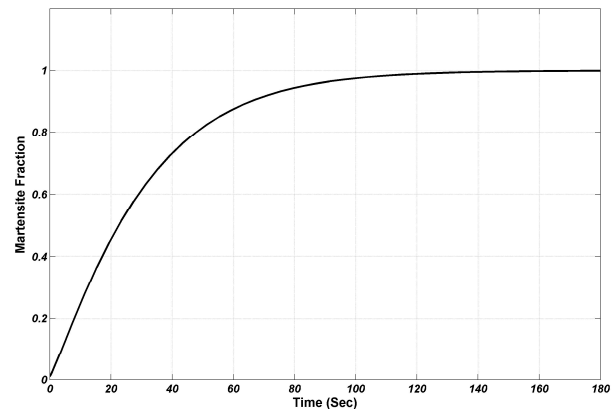


شکل ۵: تغییرات دما در مرحله اول کورس باز شدن

حافظه دار به کار می رود، اصلاح شد. در این مقاله با استفاده از این مدل اصلاح شده، اسفنکتر مصنوعی شبیه سازی و با نتایج تجربی مقایسه شد. آزمایشات از همخوانی خوب نتایج تجربی با شبیه سازی انجام گرفته حکایت دارند.

مراجع

1. M. A. Gharaybeh, G. C. Burdea, "Investigation of a Shape Memory Alloy Actuator Force-Feedback Masters," *Advanced Robotics*, Vol. 9, No. 3, 1995, pp. 317-329.
2. M. W. M. van der Wijst, P. J. G. Schreurs, F. E. Veldpaus, "Application of Computed Phase Transformation Power to Control Shape Memory Alloy Actuators," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 6, No. 2, 1997, pp. 190-198.
3. E. Shamel, A. Alast, H. Salaarie, "Stability analysis and nonlinear control of a miniature shape memory alloy actuator for precise applications", *J Mechatronics*, Vol. 15, 2005, pp. 471-486.
4. S. Arai, K. Aramaki, Y. Yanagisawa. "Feedback Linearization of SMA (Shape Memory Alloy)", *Proceedings of the 34th SICE Annual Conference*, 1995, pp. 519-522.
5. P. Kumagai, A. Hozian, M. Kirkland, "Neuro-Fuzzy Model Based Feed-Back Controller for Shape Memory Alloy Actuators," *Proc. SPIE 3984*, 2000, pp. 291-299.
6. Y. Stepanenko, C. Y. Su, "Variable Structure Control of Robot Manipulators With Nonlinear Sliding Manifolds," *Int. J. Control*, Vol. 58, No. 2, 1992, pp. 285-300.
7. Elahinia M. H., "Nonlinear control of a shape memory alloy actuated manipulator". *Jornal of Vibration and Acoustics*, Vol. 124, 2002, pp 566-575.
8. Amalraj J. J., Bhattacharyya A., "Finite element modeling of phase transformation in shape memory alloy wires with variable material properties", *Smart Mater. Struct.* 9, 2000, pp 622-631.
9. F. R. Oberaigner, K. Tanaka, F. D. Fischer, "Investigation of the damping behaviour of a vibrating shape memory alloy rod using a micromechanical model", *Smart Mater. Strauct.* Vol. 3, 1996, pp. 456-463.
- ۱۰- م دیلمی. "طراحی و ساخت یک نمونه اسفنکتر مصنوعی با استفاده از آلیاژ حافظه دار نیکل تیتانیوم". پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، پاییز ۱۳۸۴.
11. K. Nishi, T. Kamiyama, et al, "Development of an implantable artificial anal sphincter using a shape memory alloy", *Journal of pediatric surgery*, Vol. 39, No. 1, 2004, pp 69-72.



شکل ۶: تغییرات کسر مارتنزیت در کورس بسته شدن

برای شبیه سازی محیط درونی بدن، اسفنکتر ساخته شده را در یک حمام آبی (یک استوانه شیشه ای به قطر ۶۵ و عمق ۱۲۵ میلیمتر) قرار داده و دمای آنرا به کمک یک گرمکن مجهز به ترموکوپل و کنترلر دما، در ۳۷ درجه تثبیت کرده ایم. ورودی، جریان الکتریکی است که به وسیله یک منبع جریان، به طور دستی مشابه با الگوی داده شده در بخش شبیه سازی به اسفنکتر اعمال می شود. دستگاه تخلیه ادرار در این آزمایش با یک مجموعه سرم پزشکی شبیه سازی شده که در ارتفاع ۷۴۰ میلیمتری نسبت به اسفنکتر قرار داده شده و لوله آن از شکاف اسفنکتر عبور می کند. آزمایشات انجام گرفته، حاکی از پیروی رفتار اسفنکتر از مدل ارائه شده می باشد.

نتیجه گیری

در مقاله قبلی، همانگونه که مشاهده شد به طراحی یک اسفنکتر مصنوعی بهینه با عملکرد آلیاژ حافظه دار یک طرفه پرداخته شد و نیز معادلات لیانگ که برای بیان رفتار آلیاژ



شکل ۷: مجموعه حمام آب، هیتر و ترموکوپل