



## کنترل فازی- PID مکانیزم‌هایی با عملگرهای متضاد از جنس آلیاژ حافظه‌دار

حسین چهاردولی<sup>۱\*</sup>، احسان شفیعی<sup>۲</sup>، محمد اقتصاد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آیت‌الله بروجردی، لرستان، ایران

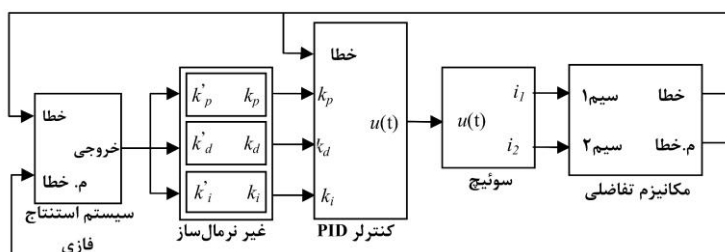
<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

### چکیده گرافیکی

### برجسته‌ها

- مدل برینسون به همراه شرایط تبدیل فاز الهی‌نیا برای توصیف معادلات انتقال فاز از مارتنزیت به آستنیت و بالعکس استفاده می‌شود.
- نتایج این تحقیق به هر دو صورت تئوری و عملی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.
- تحت کنترلر ارائه شده، خطای تعقیب نسبت به سیگنال مرجع به صورت نمایی به صفر میل می‌کند.



### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۴

ارائه برخط: ۱۴۰۰/۱۲/۹

\*نویسنده مسئول:

[h.chehardoli@abru.ac.ir](mailto:h.chehardoli@abru.ac.ir)

کلیدواژه‌ها:

آلیاژ حافظه‌دار

تبدیل فاز

ساختار متضاد

مدل برینسون

کنترل فازی- PID

### چکیده

آلیاژهای حافظه‌دار دسته‌ای از مواد هوشمند با خاصیت منحصر به فرد حافظه‌شکلی هستند. خاصیت حافظه‌شکلی این مواد قابلیت جالب برای کاربرد به عنوان عملگر در مکانیزم‌های مختلف ایجاد می‌نماید. این مواد قابلیت بازیابی طول اولیه با اعمال فرآیندهای حرارتی را دارا می‌باشند. در این مقاله، به کنترل فازی- PID یک ساختار متضاد با عملگرهایی از جنس سیم آلیاژ حافظه‌دار پرداخته می‌شود. مدل برینسون به همراه شرایط تبدیل فاز الهی‌نیا برای توصیف معادلات انتقال فاز از مارتنزیت به آستنیت و بالعکس استفاده می‌شود. با ترکیب قانون دوم نیوتن، مدل تبدیل فاز، مدل انتقال حرارت و مدل کرنش سیم، معادلات دیفرانسیلی حاکم بر رفتار مکانیزم مزبور استخراج می‌گردد. به واسطه دینامیک به شدت غیرخطی و پدیده هیستریزیس این مواد، کنترلر غیرمدل مبنای فازی- PID برای کنترل موقعیت مورد استفاده قرار خواهد گرفت. قوانین فازی به گونه‌ای تعریف می‌گردند که ضرایب تناسبی، مشتق‌گیر و انتگرالی متناسب با خروجی سیستم به روزرسانی شوند. نتایج این تحقیق به هر دو صورت تئوری و عملی مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. نشان داده خواهد شد که تحت کنترلر ارائه شده، خطای تعقیب نسبت به سیگنال مرجع به صورت نمایی به صفر میل خواهد کرد.

## ۱- مقدمه

می‌دهد. خاصیت فوق‌کشسانی آلیاژهای حافظه‌دار می‌تواند آن‌ها را در کاربردهایی که نیاز به کرنش‌های بزرگ در قبال نیروهای ثابت دارند بسیار مؤثر نماید [۱۴ و ۱۵]. خاصیت فوق‌کشسانی در کاربردهای متعددی همچون ساخت ابزارهای جراحی، قاب عینک، سیم‌های ارتودنسی و... نمود زیادی پیدا کرده است [۱، ۲، ۶ و ۱۶]. مروری کلی بر کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار در صنایع مختلف در [۱۷] ارائه شده است.

در دهه‌های اخیر، آلیاژهای حافظه‌دار به‌واسطه خاصیت حافظه‌شکلی در صنایع رباتیکی و ساخت مکانیزم‌ها کاربردهای گسترده‌ای یافته‌اند. در [۱۸] به کنترل ارتعاشات یک صفحه کامپوزیتی به کمک سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار پرداخته شده است. با کنترل میزان کرنش سیم‌ها، حرکت کلی صفحه نیز کنترل شده است. در [۱۰] روش کنترلی مد لغزشی برای کنترل یک ربات چندلینکی ساخته شده برای عمل آندوسکوپی ارائه شده است. در [۱۱] به کمک منطق فازی روشی برای کنترل نیروی اعمالی توسط یک عملگر از جنس آلیاژ حافظه‌دار ارائه شده است. در [۴] روشی بهبودیافته مبتنی بر مدل برای کنترل موقعیت عملگرهایی از سیم آلیاژ حافظه‌دار ارائه شده است. در [۱۹] یک کنترلر غیر مدل‌منا با استفاده از روش فازی-تطبیقی برای کنترل موقعیت یک ربات ارائه شده است. نشان داده شده است که روش کنترلی مزبور علیرغم رفتارهای غیرخطی و پیچیده سیم حافظه‌دار، پایداری مکانیزم را به‌خوبی تضمین کرده و خطای تعقیب به صفر میل می‌کند. به‌منظور کنترل اثر هیستریزیس، روشی مبتنی بر شبکه عصبی در [۲۰] ارائه شده که باعث بهبود عملکرد سیستم حلقه بسته می‌گردد. مسئله طراحی مسیر بهینه برای یک ربات جراح قلب که به کمک سیم‌های حافظه‌دار کنترل می‌شود در [۲۱] بررسی شده است. مسئله حذف ارتعاشات سازه‌های مرتفع به کمک آلیاژهای حافظه‌دار در [۲۲] بررسی شده است. در این مقاله، یک کنترلر مرتبه بالا بر مبنای روش مد لغزشی ارائه شده و نشان داده شده که دامنه ارتعاشات سازه به‌خوبی کنترل می‌گردد. روشی ترکیبی بر مبنای کنترل تطبیقی و الگوریتم تکامل تفاضلی به‌منظور کنترل بهینه موقعیت محرک‌های حافظه‌دار در [۲۳] ارائه شده است.

آلیاژهای حافظه‌دار دسته‌ای از مواد هوشمند با دو خاصیت ماکروسکوپی حافظه‌شکلی و فوق‌کشسانی می‌باشند [۱ و ۲]. خاصیت حافظه‌شکلی ناشی از تغییر ساختار کریستالی ماده بین دو فاز آستنیت و مارتنزیت می‌باشد. این تغییر فاز که در دماهای خاصی رخ می‌دهد به این مواد قابلیت می‌دهد تا شکل اولیه خود را بازیابی نمایند [۳ و ۴]. آلیاژهای حافظه‌دار یک‌طرفه فقط در فاز آستنیت قابلیت حافظه‌شکلی دارند اما نوع دوطرفه در هر دو فاز آستنیت و مارتنزیت این قابلیت را دارند [۳ و ۵]. آلیاژهای نوع یک‌طرفه مکانیزم ساده‌تری نسبت به نوع دوطرفه داشته و به همین دلیل کاربردهای بیشتری پیدا کرده‌اند [۳ و ۶].

فاز آستنیت یک ساختار مکعب شکل با تقارن مرکزی است. یک اتم در مرکز و سایر اتم‌ها در رئوس شش‌گانه قرار دارند. این فاز در دماهای بالا بین  $A_s$  و  $A_f$  ایجاد می‌گردد [۱ و ۷]. از سویی دیگر، فاز مارتنزیت در دماهای پایین‌تر و در محدوده دمایی  $M_s$  و  $M_f$  ظاهر می‌شود. باید توجه داشت که دماهای گذار  $A_s$ ،  $A_f$ ،  $M_s$  و  $M_f$  مقادیری ثابت نداشته و تابع تنشی که به ماده اعمال می‌گردد می‌باشند [۷-۹]. در فاز مارتنزیت ماده دارای استحکام کمی بوده و به‌راحتی دچار تغییر شکل می‌شود. پس از اعمال حرارت به جسم و رسیدن دما به محدوده تشکیل فاز آستنیت، جسم به‌تدریج به شکل اولیه خود بازگشته و کرنش خود را بازیابی می‌کند [۱۰]. در این حالت اگر ماده تحت بارگذاری قرار گیرد می‌تواند نیروهای بزرگی تولید کند. این خاصیت مکانیزمی منحصربه‌فرد برای عمل تحریک، ساخت عملگرها و سنسورهای مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار ایجاد می‌نماید [۴، ۱۱ و ۱۲].

خاصیت فوق‌کشسانی زمانی رخ می‌دهد که ماده در فاز آستنیت قرار داشته باشد و تحت یک تنش بزرگ قرار گیرد. در اثر این تنش، ماده وارد فاز مارتنزیت شده و کرنش بزرگی در آن ایجاد می‌گردد [۱ و ۱۳]. حال، اگر بار از روی جسم برداشته شود، ماده به شکل اولیه خود بازگشته و فاز ماده نیز به آستنیت تغییر خواهد کرد. در این تغییر فاز بازیابی کرنش‌های بزرگ در تنش‌های تقریباً ثابتی رخ

این روش، خطای تعقیب به صورت نمایی به سمت صفر میل خواهد کرد و سیستم حلقه بسته عملکرد مطلوبی از خود نشان خواهد داد.

ادامه مقاله به شرح زیر ساماندهی شده است. در قسمت ۲ به معرفی مکانیزم متضاد به همراه استخراج مدل دینامیکی آن پرداخته خواهد شد. در قسمت ۳، کنترلر فازی-PID برای کنترل موقعیت سیستم حلقه بسته طراحی خواهد شد. در قسمت ۴، به کمک نتایج تئوری و عملی به اعتبارسنجی روش ارائه شده پرداخته خواهد شد و در نهایت، مقاله در قسمت ۵ جمع‌بندی خواهد شد.

## ۲- توصیف و مدل‌سازی سیستم

در این قسمت به شرح مدل‌های رفتاری سیم حافظه‌دار پرداخته می‌شود سپس معادلات دینامیکی مکانیزم متضاد استخراج می‌گردند.

### ۲-۱- مدل ساختاری

مدل ساختاری سیم حافظه‌دار که بیانگر رابطه بین نرخ تنش ( $\dot{\sigma}$ )، نرخ کرنش ( $\dot{\epsilon}$ )، نرخ تغییرات دما ( $\dot{T}$ ) و نرخ تغییرات کسر مارتنزیتی ( $\dot{\xi}$ ) است به شرح زیر می‌باشد [۲۴]:

$$\dot{\sigma} = D\dot{\epsilon} + \theta_i \dot{T} + \Omega \dot{\xi} \quad (1)$$

که در آن  $D$  ضریب یانگ،  $\theta_i$  ضریب انبساط حرارتی و  $\Omega = -D\epsilon_0$  که  $\epsilon_0$  کرنش اولیه سیم می‌باشد. گرچه  $D$  تابعی پیچیده از دما، تنش و کسر مارتنزیتی است، اما می‌توان با تقریب قابل قبولی آن را به صورت میانگین مدول یانگ در فاز آستنیت ( $D_a$ ) و مدول یانگ در فاز مارتنزیت ( $D_m$ ) در نظر گرفت [۲۴]:  $D = (D_a + D_m) / 2$ .

### ۲-۲- مدل تبدیل فاز

کسر مارتنزیتی در بازه صفر و یک قرار دارد  $\xi \in [0, 1]$ . وقتی برابر صفر باشد به این معناست که ماده به طور کامل در فاز آستنیت قرار دارد و اگر برابر یک باشد یعنی ماده به طور کامل مارتنزیت است؛ بنابراین مشخص بودن رابطه کسر مارتنزیتی برای توصیف رفتار سیم حافظه‌دار کاملاً

در پژوهش‌های پیشین مکانیزم‌های با عملگرهای متضاد از جنس سیم حافظه‌دار مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. در این نوع مکانیزم، دو سیم حافظه‌دار به صورت مخالف جهت همدیگر بسته می‌شوند. به نحوی که نیروی کششی به یکدیگر اعمال می‌نمایند. سیمی که تحت اعمال جریان الکتریکی قرار دارد گرم شده و از فاز آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود. در نتیجه، طول آن کوتاه شده و نیرویی کششی به سیم دوم اعمال می‌کند. سیم دوم سرد و در فاز مارتنزیت قرار دارد که در اثر اعمال نیرو دچار افزایش طول می‌گردد. وقتی جهت جریان عوض شود و به سیم دوم اعمال گردد، عکس اتفاق فوق رخ می‌دهد. این عمل، مکانیزمی برای ایجاد حرکات متناوب خطی و دورانی ایجاد می‌نماید. مزیت یک مکانیزم متضاد در آن است که می‌توان با کنترل هم‌زمان هر یک از سیم‌ها به دقت بالاتری به کنترل موقعیت پرداخت. در این مقاله، ابتدا به استخراج معادلات دینامیکی حاکم بر مکانیزم پرداخته می‌شود. به این منظور، معادلات تبدیل فاز، انتقال حرارت، کرنش و قانون دوم نیوتن باید با یکدیگر ترکیب گردند. مدل‌های مختلف به همراه شرایط مرزی متعددی برای توصیف تبدیل فاز آلیاژهای حافظه‌دار ارائه شده است. در این مقاله، مدل تبدیل فاز برینسون به همراه شرایط مرزی الهی‌نیا که جامع‌ترین روش ارائه شده در مدل-سازی تبدیل فاز می‌باشد به کار برده شده است. با نوشتن قانون دوم نیوتن و ترکیب آن با سایر معادلات گفته شده، مدل دینامیکی سیستم استخراج خواهد شد.

از آنجایی که آلیاژهای حافظه‌دار دارای رفتارهای دینامیکی به شدت غیرخطی هستند که بیشتر از پدیده هیستریزس این مواد ناشی می‌شود، کنترلرهای غیرمدل مبنا کارایی بیشتری نسبت به کنترلرهای مدل مبنا دارند؛ لذا در این تحقیق، کنترلر فازی-PID به منظور کنترل موقعیت ساختار متضاد مورد استفاده قرار خواهد گرفت. قوانین فازی نه تنها به کمک پاسخ سیستم، بلکه بر اساس مدل تبدیل فاز سیم حافظه‌دار به گونه‌ای تدوین خواهند شد که ضرایب کنترلی به صورت لحظه‌ای و به منظور صفر کردن خطای تعقیب تغییر کنند. اثربخشی روش ارائه شده توسط شبیه‌سازی‌های عددی و نیز نتایج عملی بر روی یک مکانیزم متضاد مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. نشان داده خواهد شد که تحت

هوای محیطی می‌باشد. معادله انتقال حرارت سیم به صورت زیر می‌باشد:

$$mc_p \frac{dT}{dt} = Ri^2 - h_c A_c (T - T_\infty) \quad (5)$$

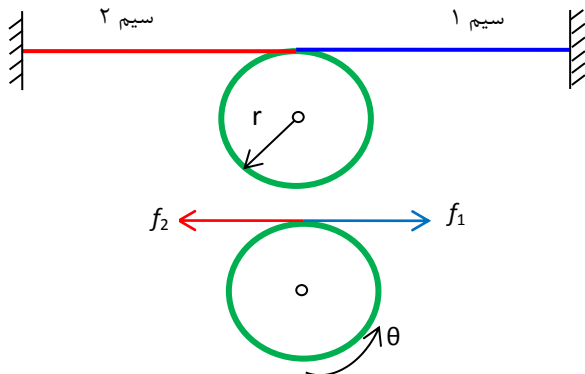
که در این رابطه،  $m$  جرم واحد طول سیم،  $A_c$  سطح مقطع سیم،  $c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه،  $i$  جریان الکتریکی اعمالی به سیم،  $R$  مقاومت بر واحد طول سیم،  $T$  دمای سیم،  $T_\infty$  دمای محیط و  $h_c$  ضریب انتقال حرارت همرفتی می‌باشد. با جایگذاری روابط ۵ و ۲ در معادله ساختاری ۱ خواهیم داشت:

$$\dot{\sigma} = \frac{\Omega \xi_T(T, \sigma) + \theta_t}{1 - \Omega \xi_\sigma(T, \sigma)} ai^2 + \frac{D}{1 - \Omega \xi_\sigma(T, \sigma)} \dot{\varepsilon} - \frac{\Omega \xi_T(T, \sigma) + \theta_t}{1 - \Omega \xi_\sigma(T, \sigma)} \beta (T - T_\infty) \quad (6)$$

که در آن  $\alpha = R / mc_p$  و  $\beta = h_c A_c / mc_p$ .

#### ۴-۲- ساختار متضاد یک جفت سیم حافظه‌دار

در شکل زیر ساختار متضاد یک جفت سیم حافظه‌دار نشان داده شده است.



شکل (۱): ساختار متضاد دو سیم حافظه‌دار

در این نوع مکانیزم، دو سیم حافظه‌دار به صورت مخالف جهت همدیگر بسته می‌شوند. سیمی که تحت اعمال جریان الکتریکی قرار دارد گرم شده و از فاز آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود. در نتیجه، طول آن کوتاه شده و نیرویی کششی به سیم دوم اعمال می‌کند. سیم دوم سرد و در فاز مارتنزیت قرار دارد که در اثر اعمال نیرو دچار افزایش طول می‌گردد. وقتی جهت جریان عوض شود و به سیم دوم اعمال گردد، عکس اتفاق فوق رخ می‌دهد. این عمل،

ضروری است. مدل‌های تبدیل فاز متفاوتی برای آلیاژهای حافظه‌دار ارائه شده‌اند که دقیق‌ترین و کاربردی‌ترین آن‌ها مدل برینسون به همراه شرایط مرزی الهی‌نیا می‌باشد. طبق این مدل خواهیم داشت [۲۴]:

$$\dot{\xi} = \xi_T(T, \sigma) \dot{T} + \xi_\sigma(T, \sigma) \dot{\sigma} \quad (2)$$

که در آن:

$$\xi_T(T, \sigma) = \begin{cases} -\frac{\xi_M}{2} \sin \left( a_A \left( T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right) a_A, & A_s < T - \frac{\sigma}{C_A} < A_f, \dot{T} - \frac{\dot{\sigma}}{C_A} > 0 \\ \frac{1 - \xi_A}{2} \sin \left( a_M \left( T - M_f - \frac{\sigma}{C_M} \right) \right) a_M, & M_f < T - \frac{\sigma}{C_M} < M_s, \dot{T} - \frac{\dot{\sigma}}{C_M} > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

و

$$\xi_\sigma(T, \sigma) = \begin{cases} -\frac{1}{C_A} \xi_T, & A_s < T - \frac{\sigma}{C_A} < A_f, \dot{T} - \frac{\dot{\sigma}}{C_A} > 0 \\ -\frac{1}{C_M} \xi_T, & M_f < T - \frac{\sigma}{C_M} < M_s, \dot{T} - \frac{\dot{\sigma}}{C_M} > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

که در عبارات فوق  $a_A = \pi / (A_f - A_s)$  و  $a_M = \pi / (M_s - M_f)$  است.  $M_s$  و  $M_f$  دمای آغاز و پایان فاز مارتنزیت هستند.  $\xi_A$  و  $\xi_M$  به ترتیب کسر مارتنزیتی قبل از گرم شدن و قبل از سرد شدن هستند. همچنین،  $C_A$  و  $C_M$  مقادیری ثابت هستند که نشان‌دهنده تأثیر تنش بر دماهای گذار می‌باشند.

#### ۳-۲- مدل انتقال حرارت

گرم کردن سیم حافظه‌دار به کمک اعمال جریان الکتریکی و خنک کردن آن به کمک انتقال حرارت همرفتی با جریان

$$d = A\beta_1 \frac{\Omega_{\xi_{1,T}}(T_1, \sigma_1) + \theta_t}{1 - \Omega_{\xi_{1,\sigma}}(T_1, \sigma_1)} (T_1 - T_\infty) + A\beta_2 \frac{\Omega_{\xi_{2,T}}(T_2, \sigma_2) + \theta_t}{1 - \Omega_{\xi_{2,\sigma}}(T_2, \sigma_2)} (T_2 - T_\infty) \quad (13)$$

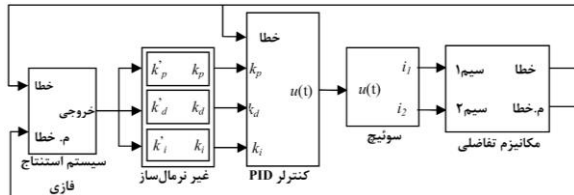
با انتخاب متغیرهای حالت به فرم  $\mathbf{X} = [\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}]^T$ ، معادلات فضای حالت سیستم به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = hu + gx_2 + d \end{cases} \quad (14)$$

در قسمت بعد به طراحی کنترلر مناسب به منظور پایداری و تضمین خطای تعقیب صفر برای سیستم دینامیکی (۱۴) پرداخته می‌شود.

## ۵-۲- طراحی کنترلر فازی-PID

با توجه به دینامیک به شدت غیرخطی معادلات ۱۴ که عمدتاً ناشی از پدیده هیستریزیس می‌باشد، کاربرد روش‌های کنترلی مدل مبنا چندان مقرون به صرفه نیست. ساده‌ترین و پرکاربردترین کنترلر غیرمدل مبنا، کنترلر PID است. روش‌های مختلفی برای تنظیم ضرایب این کنترلر وجود دارد که روش طرح‌ریزی بهره کاراترین روش در بهبود مشخصات پاسخ گذرا می‌باشد. در این روش، بسته به پاسخ لحظه‌ای سیستم، ضرایب کنترلی به صورت آنی تنظیم می‌شوند. این کار باعث بهبود چشم‌گیر پاسخ سیستم حلقه بسته می‌گردد. یکی از روش‌های طرح‌ریزی بهره، استفاده از سیستم استنتاج می‌باشد که بر اساس قواعد فازی و نیز کیفیت پاسخ سیستم، ضرایب کنترلی به صورت لحظه‌ای تنظیم می‌گردند. شکل ۲ ساختار حلقه بسته مکانیزم متضاد تحت کنترلر فازی-PID را نشان می‌دهد.



شکل (۲): اعمال کنترلر فازی-PID بر مکانیزم متضاد

SMA

در این ساختار، سیستم استنتاج فازی با توجه به مقدار لحظه‌ای خطا و مشتق خطا و بر اساس قوانین فازی

مکانیزمی برای ایجاد حرکات متناوب خطی و دورانی ایجاد می‌نماید.

معادله دینامیکی دیسک به صورت زیر می‌باشد:

$$I\ddot{\theta} = (f_1 - f_2)r = (\sigma_1 - \sigma_2)Ar \Rightarrow I\ddot{\theta} = (\dot{\sigma}_1 - \dot{\sigma}_2)Ar \quad (7)$$

که در آن  $I$  ممان اینرسی،  $r$  شعاع و  $\theta$  جابجایی زاویه‌ای دیسک می‌باشند. با محاسبه  $\dot{\sigma}_1$  و  $\dot{\sigma}_2$  از رابطه ۶ و توجه به اینکه  $\dot{\varepsilon}_1 = \dot{\varepsilon}_2$  رابطه ۷ به صورت زیر بازنویسی خواهد شد:

$$\begin{aligned} \frac{I}{r}\ddot{\theta} = & A\alpha_1 \frac{\Omega_{\xi_{1,T}}(T_1, \sigma_1) + \theta_t}{1 - \Omega_{\xi_{1,\sigma}}(T_1, \sigma_1)} i_1^2 - \\ & - A\alpha_2 \frac{\Omega_{\xi_{2,T}}(T_2, \sigma_2) + \theta_t}{1 - \Omega_{\xi_{2,\sigma}}(T_2, \sigma_2)} i_2^2 + \\ & + A \left( \frac{D}{1 - \Omega_{\xi_{1,\sigma}}(T_1, \sigma_1)} + \frac{D}{1 - \Omega_{\xi_{2,\sigma}}(T_2, \sigma_2)} \right) \dot{\varepsilon}_1 - \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & - A\beta_1 \frac{\Omega_{\xi_{1,T}}(T_1, \sigma_1) + \theta_t}{1 - \Omega_{\xi_{1,\sigma}}(T_1, \sigma_1)} (T_1 - T_\infty) \\ & + A\beta_2 \frac{\Omega_{\xi_{2,T}}(T_2, \sigma_2) + \theta_t}{1 - \Omega_{\xi_{2,\sigma}}(T_2, \sigma_2)} (T_2 - T_\infty) \end{aligned}$$

که به صورت زیر قابل بیان است:

$$\ddot{\theta} = hu + g\dot{\theta} + d \quad (9)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} \text{if } u \geq 0 \Rightarrow i_1 = \sqrt{u}, i_2 = 0, \\ h = \frac{Ar\alpha_1}{I} \frac{\Omega_{\xi_{1,T}}(T_1, \sigma_1) + \theta_t}{1 - \Omega_{\xi_{1,\sigma}}(T_1, \sigma_1)} \end{aligned} \quad (10)$$

و

$$\begin{aligned} \text{if } u < 0 \Rightarrow i_2 = \sqrt{-u}, i_1 = 0, \\ h = \frac{Ar\alpha_2}{I} \frac{\Omega_{\xi_{2,T}}(T_2, \sigma_2) + \theta_t}{1 - \Omega_{\xi_{2,\sigma}}(T_2, \sigma_2)} \end{aligned} \quad (11)$$

همچنین،

$$g = \frac{Ar}{I} \left( \frac{D}{1 - \Omega_{\xi_{1,\sigma}}(T_1, \sigma_1)} + \frac{D}{1 - \Omega_{\xi_{2,\sigma}}(T_2, \sigma_2)} \right) \quad (12)$$

و

استفاده شده است.

$$\mu_{B^*}(y) = \max_{r=1}^q \left[ \sup_{x \in U} \left( \mu_{A^*}(x) \prod_{k=1}^p \mu_{A_k^r}(x_k) \mu_{B^r}(y) \right) \right] \quad (15)$$

$$r=1,2,\dots,q; x \in U$$

بدین معنی که با داشتن مجموعه فازی  $A^*$  در  $U$  موتور استنتاج حاصل ضرب مجموعه فازی  $B^*$  را می‌دهد.  $p$  برابر با تعداد ورودی‌ها و  $q$  برابر با تعداد قوانین فازی است (در این تحقیق  $p=2$  و  $q=25$ ).

**جدول (۱):** قوانین فازی مربوط به  $k'_p$

		$\dot{e}(t)$				
		NB	NS	Ze	PS	PB
$e(t)$	NB	B	B	M	S	S
	NS	NS	NS	NS	S	S
	Ze	NS	S	S	S	NS
	PS	S	S	NS	NS	NS
	PB	S	S	M	B	B

**جدول (۲):** قوانین فازی مربوط به  $k'_i$

		$\dot{e}(t)$				
		NB	NS	Ze	PS	PB
$e(t)$	NB	B	B	M	S	S
	NS	MS	MS	MS	S	S
	Ze	MS	S	S	S	MS
	PS	S	S	MS	MS	MS
	PB	S	S	M	B	B

**جدول (۳):** قوانین فازی مربوط به  $k'_d$

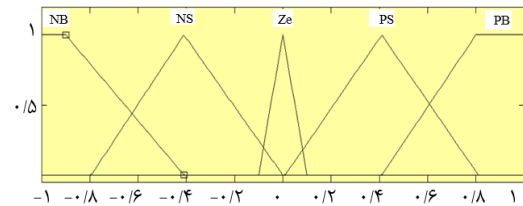
		$\dot{e}(t)$				
		NB	NS	Ze	PS	PB
$e(t)$	NB	S	S	S	NS	NS
	NS	M	M	M	M	M
	Ze	B	B	B	B	B
	PS	M	M	M	M	M
	PB	NS	NS	S	S	S

شایان ذکر است که در این مقاله از روش میانگین مراکز برای غیرفازی سازی استفاده می‌گردد. همان‌طور که قبلاً بیان شد، خروجی سیستم استنتاج فازی ضرایب نرمال شده PID هستند؛ بنابراین، قبل از اعمال این ضرایب در ساختار کنترلی باید غیر نرمال‌سازی شوند. ضریب نرمال شده تناسبی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

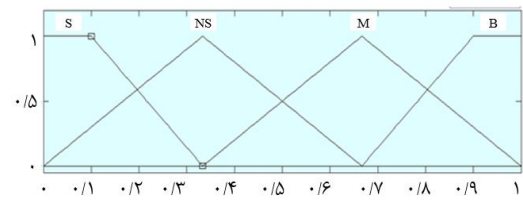
$$k'_p = \frac{k_p - k_{p,\min}}{k_{p,\max} - k_{p,\min}} \quad (16)$$

بنابراین، مقدار غیرنرمال شده ضریب تناسبی به صورت زیر

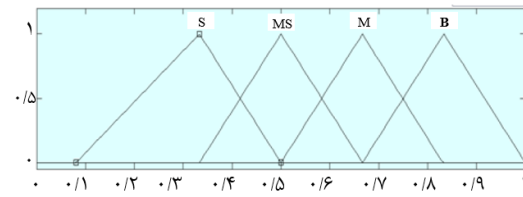
تعریف شده، ضرایب نرمال شده  $k'_d, k'_p$  و  $k'_i$  را تولید می‌کند. این ضرایب در محدوده [۰, ۱] قرار دارند. سپس مقادیر غیر نرمال شده ضرایب PID به روشی که در ادامه شرح داده خواهد شد توسط غیر نرمال‌ساز محاسبه می‌شوند. در ادامه، با استفاده از ضرایب غیرنرمال شده سیگنال کنترلی توسط کنترلر PID تولید شده که برحسب اینکه مثبت یا منفی باشد مطابق روابط ۱۰ و ۱۱ به یکی از دو سیم اعمال می‌گردد. شکل ۳ توابع عضویت تعریف شده به ترتیب برای خطا و مشتق خطا، ضرایب نرمال شده مشتقی، تناسبی و انتگرالی را نشان می‌دهد. در تعریف این توابع عضویت از نمادهای اختصاری زیر استفاده شده است: NB: منفی زیاد، NS: منفی کم، Ze: صفر، PS: مثبت کم، PB: مثبت زیاد، S: کم، M: متوسط، MS: کم متوسط و B: بزرگ.



الف) خطا، مشتق خطا



ب)  $k'_p, k'_d$



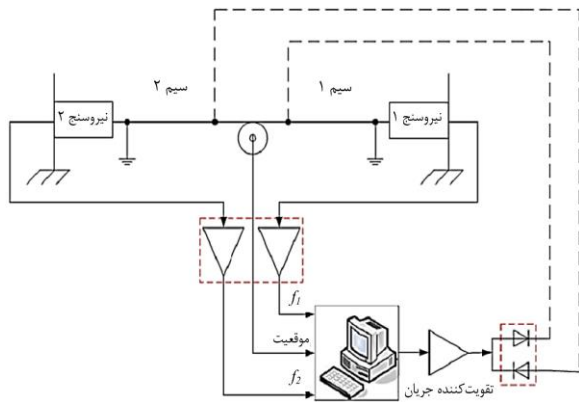
ج)  $k'_i$

**شکل (۳):** توابع عضویت

ساختار قوانین فازی به صورت زیر می‌باشند:

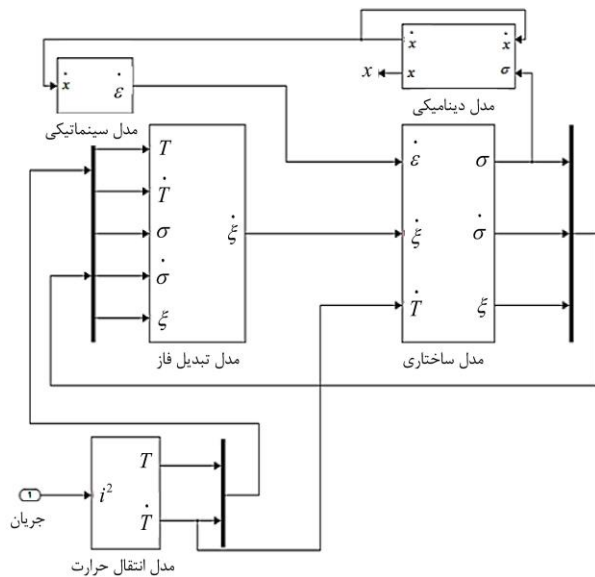
$\text{Ru}^{(r)}$ : اگر  $\theta(t)$ ,  $A_1^r$  و  $e(t)$ ,  $A_2^r$  باشد، آنگاه  $k'_p$  برابر  $B^r$ ،  $k'_d$  برابر  $C^r$  و  $k'_i$  برابر  $D^r$  خواهد بود.

جدول ۱ تا ۳ قوانین فازی به کاررفته در سیستم استنتاج فازی را نشان می‌دهند. شایان ذکر است که در استخراج قوانین فازی از موتور استنتاج حاصل ضرب به صورت زیر



شکل (۵): شماتیک دستگاه مورد آزمایش

شکل ۶ مدل رفتاری یک سیم حافظه‌دار که ترکیبی از مدل‌های ساختاری، تبدیل فاز، انتقال حرارت، سینماتیکی و دینامیکی است را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۷ بلوک دیاگرام حلقه باز ساختار متضاد را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، ساختار دینامیکی هر یک از بلوک‌های سیم حافظه‌دار شکل ۷ به صورت شکل ۶ می‌باشد.



شکل (۶): بلوک دیاگرام یک سیم حافظه‌دار

### ۳-۱- نتایج شبیه‌سازی تئوری

در این قسمت به تحلیل تئوری ساختار متضاد آلیاژ حافظه‌دار پرداخته می‌شود. جدول ۴ مشخصات سیم‌های حافظه‌دار بکار رفته در دستگاه شکل ۴ را نشان می‌دهد. شکل ۸ رفتار سیستم در تعقیب یک سیگنال سینوسی را نشان می‌دهد. سیگنال سینوسی به این دلیل انتخاب شده

خواهد بود:

$$k_p = k'_p (k_{p,max} - k_{p,min}) + k_{p,min} \quad (17)$$

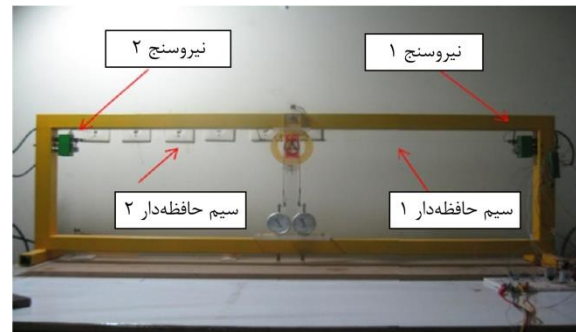
که در آن  $k_{p,max}$  و  $k_{p,min}$  مقادیری تجربی هستند. مقادیر غیر نرمال شده ضرایب انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر نیز مشابه رابطه فوق محاسبه خواهند شد. در این مقاله در غیر نرمال‌سازی ضرایب کنترلی، مقادیر زیر انتخاب شده‌اند:

$$k_{p,min} = 10, k_{p,max} = 45, k_{i,min} = 5, k_{i,max} = 28,$$

$$k_{d,min} = 0.1, k_{d,max} = 4$$

### ۳- شبیه‌سازی تئوری و عملی

در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی و عملی به منظور اعتبارسنجی روش‌های ارائه شده در قسمت‌های ۲ و ۳ ارائه خواهند شد. شکل زیر سیستم عملی آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل (۴): دستگاه متشکل از دو سیم حافظه‌دار متضاد

دستگاه فوق از اجزای زیر تشکیل شده است:

- (۱) پتانسیومتر دورانی با ظرفیت ۵ کیلو اهم برای اندازه‌گیری جابجایی زاویه‌ای دیسک
- (۲) دو عدد لودسل برای اندازه‌گیری نیروی تولیدی توسط هر سیم. هر لودسل متشکل از یک پل وتستون بوده که در حالت بی‌باری مقاومتی برابر ۰/۹ کیلو اهم دارد.

- (۳) دو ساعت اندیکاتور مشابه با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر

برای تبدیل حرکت دورانی به خطی

شکل ۵ شماتیک دستگاه مورد نظر را نشان می‌دهد. طبق این شکل، وظیفه اصلی دیوده‌های بکار رفته ممانعت از ارسال هم‌زمان جریان به دو سیم می‌باشد. طبق روابط ۱۰ و ۱۱ در هر لحظه فقط باید به یک سیم جریان اعمال گردد.

جدول (۴): مشخصات سیم‌های بکار رفته

جرم واحد طول	$m = 9/241 \times 10^{-6} \text{ (Kg/m)}$
قطر سیم	$d = 10^{-4} \text{ (m)}$
کرنش اولیه	$\varepsilon = 0/04$
دمای آغاز و پایان مارتنزیت	$M_s = 52, M_f = 42$
دمای آغاز و پایان آستنیت	$A_s = 68, A_f = 58$
مدول یانگ فاز آستنیت	$D_a = 75, D_m = 28 \text{ (GPa)}$
ضریب ثابت فاز آستنیت	$C_A = 1 \text{ (MPa}^\circ\text{C)}$
ضریب ثابت فاز مارتنزیت	$C_M = 1 \text{ (MPa}^\circ\text{C)}$
ضریب انتقال حرارت سیم	$\theta_f = 6 \text{ (}\mu\text{Pa}^\circ\text{C)}$
ظرفیت ویژه حرارتی	$c_p = 320 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}$
مقاومت بر واحد طول	$R = 27 \text{ (}\Omega\text{/m)}$
ضریب انتقال حرارت همرفتی:	$h = 250 \text{ (W/m}^2\text{C)}$

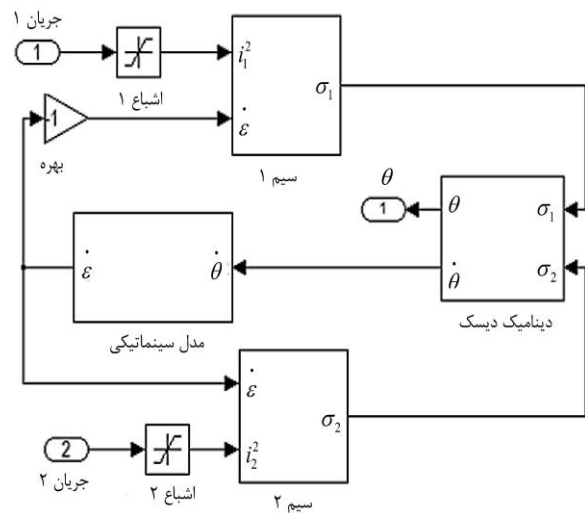
همان‌طور که مشاهده می‌شود تحت کنترلر فازی-PID عمل تعقیب به‌خوبی انجام می‌پذیرد. در لحظاتی که زاویه خروجی از مثبت به منفی یا بالعکس تغییر می‌کند، انحرافی در تعقیب مسیر مطلوب مشاهده می‌شود که به دلیل سوئیچ جریان بین سیم‌های ۱ و ۲ می‌باشد. وقتی جریان به سیمی وارد می‌شود مدتی طول می‌کشد تا سیم گرم شده و فرآیند تبدیل فاز آغاز گردد؛ که در این مدت، نیرویی به از طرف این سیم به دیسک اعمال نخواهد شد. پس از آغاز تبدیل فاز و اعمال نیرو، زاویه دورانی دیسک به تعقیب سیگنال سینوسی ادامه می‌دهد.

شکل ۹ ورودی کنترلی هر یک از سیم‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست، در هر لحظه فقط به یکی از سیم‌ها جریان اعمال شده و به دلیل تبدیل فاز سریع، سوئیچ جریان بین دو سیم با سرعت بالا رخ می‌دهد.

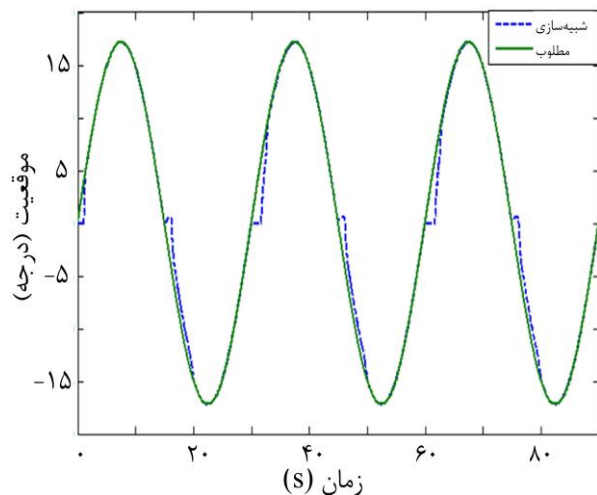
### ۲-۳- نتایج پیاده‌سازی عملی

در این قسمت به مقایسه نتایج پیاده‌سازی عملی و شبیه‌سازی عددی پرداخته می‌شود. هدف این است که رفتار سیستم در حضور سیگنال مرجعی که تغییرات ناگهانی زیادی دارد مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور، یک تابع پله که ترکیبی از ۸ تابع پله با دامنه و زمان اعمال متفاوت می‌باشد به سیستم اعمال شده است. هدف مقایسه نتایج تئوری و عملی سیستم مورد نظر می‌باشد.

است که در فرآیند تعقیب، در زوایای مثبت و منفی به هر دو سیم جریان اعمال شده و هر دو سیم دچار تبدیل فاز می‌شوند. به عبارت دیگر، لازمه گذر بین زوایای مثبت و منفی تغییر جهت اعمال جریان بین سیم‌هاست. سیمی که تحت جریان قرار می‌گیرد گرم شده و در آن تبدیل فاز از مارتنزیت به آستنیت رخ می‌دهد. در نتیجه طول آن کاسته شده و نیرویی کششی به دیسک اعمال می‌کند. در نتیجه این امر، سیم مقابل که سرد بوده و در فاز مارتنزیت است دچار افزایش طول خواهد شد. معکوس کردن جهت جریان، عکس این حالت را باعث خواهد شد. در نتیجه تکرار این کار، زاویه دوران دیسک سیگنال مرجع سینوسی را تعقیب خواهد کرد.

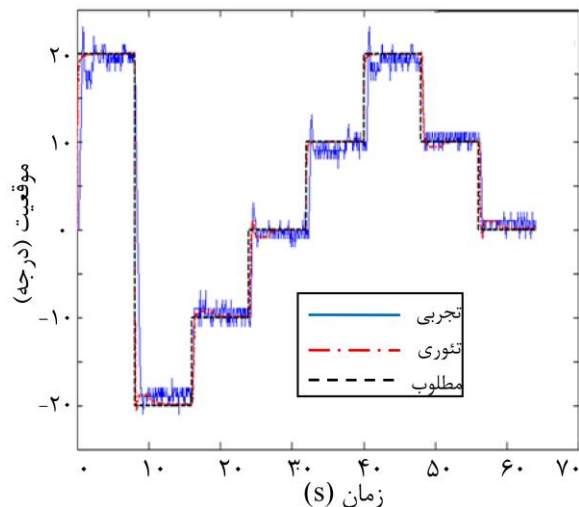


شکل (۷): بلوک دیاگرام حلقه بسته سیم‌های متضاد



شکل (۸): تعقیب مسیر مطلوب

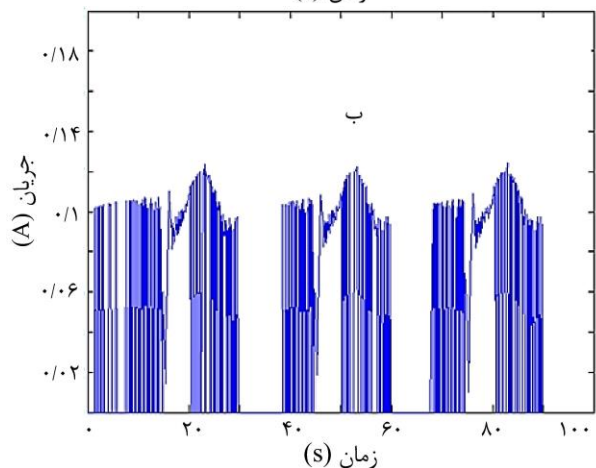
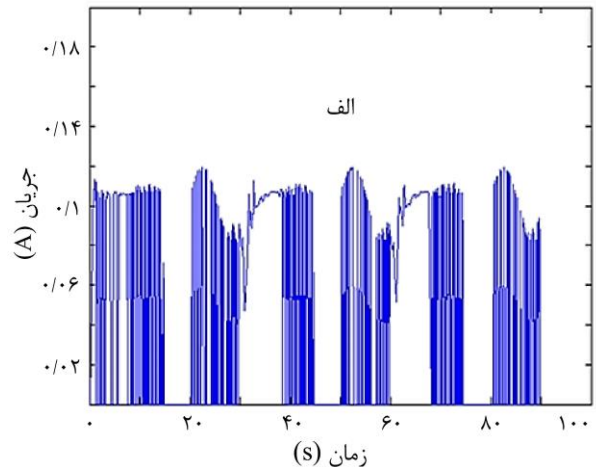




شکل (۱۰): مقایسه نتایج تئوری و تجربی کنترلر

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به کنترل فازی- PID مکانیزم‌های با ساختار متضاد با عملگرهای از جنس آلیاژ حافظه‌دار پرداخته شد. در ساختارهای متضاد، دو سیم در سمت مقابل یکدیگر و به صورت مخالف نصب شده‌اند و نیرویی که وارد می‌کنند خلاف جهت یکدیگر می‌باشد. سیمی که تحت جریان قرار می‌گیرد گرم شده و با تغییر فاز از آستنیت به مارتنزیت طولش کوتاه شده و متعاقباً نیرویی کششی به سیم دوم اعمال می‌نماید؛ بنابراین، سیم دوم که در فاز مارتنزیت قرار دارد دچار افزایش طول می‌شود. با تغییر جهت اعمال جریان به سیم دوم فرآیند فوق به صورت برعکس تکرار می‌شود. در این تحقیق، با لحاظ تمامی مدل‌های تبدیل فاز، سینتیکی و انتقال حرارت، دینامیک حلقه باز ساختار متضاد استخراج گردید. در ادامه، با توجه به دینامیک به شدت غیرخطی آلیاژهای حافظه‌دار و نیز پدیده هیستریزس این مواد که مدل‌سازی دشواری دارد، کنترلر غیرمدل‌مبنای فازی- PID برای کنترل موقعیت دورانی دیسک طراحی گردید. مجموعه قوانین فازی بر اساس رفتار سیم‌های حافظه‌دار به گونه‌ای تدوین شدند که ضرایب کنترل PID به صورت لحظه‌ای به‌روزرسانی گردند. نتایج شبیه‌سازی تئوری و نیز پیاده‌سازی عملی نشان دادند که کنترلر مزبور به خوبی پایداری سیستم حلقه بسته را در حضور رفتار غیرخطی این مواد تضمین می‌نماید.



شکل (۹): جریان در الف: سیم ۱، ب: سیم ۲

شکل ۱۰ مقایسه‌ای بین عملکرد کنترلر فازی- PID در دو حالت تئوری و تجربی را نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل ترسیم می‌کند، علیرغم تغییرات زیاد و متوالی سیگنال مرجع، خروجی سیستم با دقت بالایی آن را تعقیب می‌کند. در پاسخ سیستم عملی، مقداری نویز مشاهده می‌شود که این نویزها ناشی از عوامل زیر می‌باشند:

- (۱) وجود منابع خارجی انتقال حرارت با سیم‌ها، انتظار می‌رود که گرمایش سیم‌ها فقط ناشی از اعمال جریان الکتریکی باشد اما عوامل محیطی همچون وجود سیستم‌های گرمایش و سرمایش در محل انجام آزمایش می‌تواند بر این امر اثرگذار باشد.
- (۲) وجود عدم قطعیت‌های مدل نشده در دینامیک سیستم (همچون اصطکاک و غیره)
- (۳) وجود خطا و نویز در سنسورهای اندازه‌گیری.

## ۵- مراجع

- [12] Williams EA, Shaw G, Elahinia M. Control of an automotive shape memory alloy mirror actuator. *Mechatronics*. 2010;20(5):527-34.
- [13] Gómez-Cortés J, Fuster V, Pérez-Cerrato M, Lorenzo P, Ruiz-Larrea I, Brezewski T, et al. Superelastic damping at nanoscale in ternary and quaternary Cu-based shape memory alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;883:714-22.
- [14] Elahinia MH. *Shape memory alloy actuators: design, fabrication, and experimental evaluation*: John Wiley & Sons; 2016.
- [15] Abuzied H, Abbas A, Awad M, Senbel H. Usage of shape memory alloy actuators for large force active disassembly applications. *Heliyon*. 2020;6(8):388-96.
- [16] Lipscomb IP, Nokes LD. *The application of shape memory alloys in medicine*: Wiley-Blackwell; 1996.
- [17] Malik V, Srivastava S, Gupta S, Sharma V, Vishnoi M, Mamatha T. A novel review on shape memory alloy and their applications in extraterrestrial roving missions. *Materials Today: Proceedings*. 2021;44(6):4961-5.
- [18] Abdullah E, Gaikwad P, Azid N, Majid DA, Rafie AM. Temperature and strain feedback control for shape memory alloy actuated composite plate. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018;283:134-40.
- [19] Liu M, Zhao Z, Hao L. Prescribed performance model-free adaptive sliding mode control of a shape memory alloy actuated system. *ISA transactions*. 2021.
- [20] Yu Y, Zhang C, Wang Y, Zhou M. Neural network-based iterative learning control for hysteresis in magnetic shape memory alloy actuator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2021.
- [21] Wiest JH, Buckner GD. Path optimization and control of a shape memory alloy actuated catheter for endocardial radiofrequency ablation. *Robotics and autonomous systems*. 2015;65:88-97.
- [22] Sunjai NS, Josephine SRD, Dhanalakshmi K. Design and experimental evaluation of higher order sliding mode control for vibration suppression of shape memory alloy actuated structure. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014;47(1):1061-6.
- [23] Son NN, Anh HPH. Adaptive displacement online control of shape memory alloys actuator based on neural networks and hybrid differential
- [1] Lecce L. *Shape memory alloy engineering: for aerospace, structural and biomedical applications*: Elsevier; 2014.
- [2] Sun Q, Matsui R, Takeda K, Pieczyska EA. *Advances in shape memory materials* 2017.
- [3] Cismasiu C. *Shape memory alloys: BoD-Books on Demand*; 2010.
- [4] Lee S-H, Kim S-W. Improved position control of shape memory alloy actuator using the self-sensing model. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019;297:184-93.
- [5] de Sousa VC, Junior CDM, Elahinia M. Aeroelastic behavior of a typical section with shape memory alloy springs: Modeling nonhomogeneous distribution of state variables. *Applied Mathematical Modelling*. 2017;52:404-16.
- [6] Kumari S, Abhishek K. Study of machinability aspects of shape memory alloys: A critical review. *Materials Today: Proceedings*. 2020;44(1):1336-43.
- [7] Hamilton RF, Bimber BA, Andani MT, Elahinia M. Multi-scale shape memory effect recovery in NiTi alloys additive manufactured by selective laser melting and laser directed energy deposition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;250(3):55-64.
- [8] Nematollahi M, Safaei K, Bayati P, Elahinia M. Functionally graded NiTi shape memory alloy: Selective laser melting fabrication and multi-scale characterization. *Materials Letters*. 2021;292(4):263-71.
- [9] Shirani M, Andani MT, Kadkhodaei M, Elahinia M. Effect of loading history on phase transition and martensitic detwinning in shape memory alloys: limitations of current approaches and development of a 1D constitutive model. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;729:390-406.
- [10] Cortez-Vega R, Chairez I, Luviano-Juarez A, Lozada-Castillo N, Feliu-Battle V. Multi-link endoscopic manipulator robot actuated by shape memory alloys spring actuators controlled by a sliding mode. *ISA transactions*. 2020.
- [11] Hu R, Gao F, Zhang Y, Deng H, editors. *Force tracking Fuzzy Control of a shape memory alloy actuator*. 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC); 2016: IEEE.

evolution algorithm. Neurocomputing. 2015;166:464-74.

[24] Brinson L, Huang M. Simplifications and comparisons of shape memory alloy constitutive models. Journal of intelligent material systems and structures. 1996;7(1):108-14.





## Fuzzy-PID Control of Mechanisms with Contrary Shape Memory Alloy Actuators

Hossein Chehardoli<sup>1\*</sup>, Ehsan Shafie<sup>2</sup>, Mohammad Eghtesad<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Lorestan, Iran

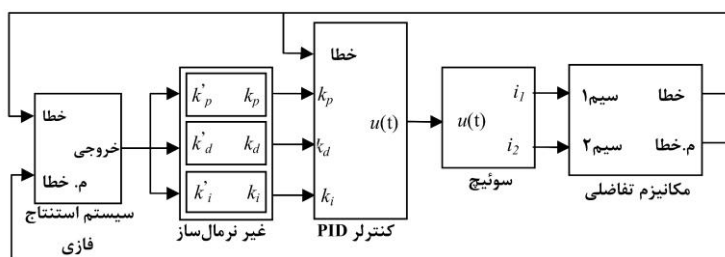
<sup>2</sup> MSc, Faculty of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

<sup>3</sup> Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

### HIGHLIGHTS

- The Brinson model combined with Elahinia's conditions is employed to describe the phase transformation models.
- Both numerical and experimental results are provided to illustrate the effectiveness of the proposed approach.
- It is shown that under the proposed method, the tracking error converges to zero asymptotically.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 12 December 2021

Received in revised form: 9 January 2022

Accepted: 3 February 2022

Available online: 28 February 2022

\*Correspondence:

h.chehardoli@abru.ac.ir

How to cite this article:

H. Chehardoli, E. Shafie, M. Eghtesad. Fuzzy-PID control of mechanisms with contrary shape memory alloy actuators. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 18(2):97-108.

Keywords:

Model Predictive Control

Actuator Rate Saturation

Robust Control

Describing Function

### ABSTRACT

Shape memory alloys (SMAs) are a special kind of smart materials with an intrinsic shape memory effect. This characteristic brings up SMAs as an actuator in dynamic mechanisms. These materials can recover their initial length under special thermal operations. This paper deals with fuzzy-PID control of contrary mechanisms actuating with a pair of SMA wires. The Brinson model combined with Elahinia's conditions is employed to describe the phase transformation models. By combining Newton's second law, transformation models, heat transfer, and strain relations, the governing equations of the contrary mechanism are derived. Due to the nonlinear behavior of SMA actuators, the non-model-based controllers are preferred compared to the model-based ones. Therefore, the fuzzy-PID control method is employed to control the position of the closed-loop system. The fuzzy rules are defined such that the coefficients of the PID controller are tuned according to the system response. Both numerical and experimental results are provided to illustrate the effectiveness of the proposed approach. It will be shown that under the proposed method, the tracking error will converge to zero asymptotically.

