

## طراحی کنترل تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی برای سیستم‌های غیرخطی در حضور عدم قطعیت

حسین جانانلو<sup>۱</sup>، امیر هوشنگ مزینان<sup>۲</sup>، امین فرمانبردار<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران، [hossein.jananlu@yahoo.com](mailto:hossein.jananlu@yahoo.com)  
<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، [mazinan@azad.ac.ir](mailto:mazinan@azad.ac.ir)  
<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران، [a.farmanbordar@gmail.com](mailto:a.farmanbordar@gmail.com)

### چکیده:

در تحقیق حاضر با تمرکز بر بررسی عملکرد کنترل تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی برای سیستم‌های غیرخطی در حضور عدم قطعیت، یک کنترل کننده تطبیقی در تعامل با ابزار هوشمند و با هدف تنظیم پارامترهای سیستم‌های تحت کنترل طراحی شده است. برای ارایه ایده نوین در این حوزه در ابتدا یک بررسی دقیق در مورد کارهای مشابهی که تاکنون در طراحی کنترل سیستم‌های متناظر صورت گرفته است ارایه شده است و سپس کنترل کننده پیشنهادی مبتنی بر شبکه‌های عصبی طراحی گردیده است. با استفاده از تئوری لیاپانوف قوانین تطبیقی مناسبی برای همگرایی سیستم حلقه بسته تحقیق شده است و با استفاده از این تئوری اثبات می‌شود که تمامی سیگنال‌ها در سیستم حلقه بسته کراندار بوده و همچنین نشان داده شده است که سیگنال خطا به صورت مجانبی به سمت صفر همگرا می‌گردد. در پایان، نتایج تحقیق با شبیه‌سازی کامپیوتری توسط نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است و در ادامه با بررسی اطلاعات مستخرج از تحقیق کارآمدی کنترل کننده پیشنهادی اثبات گردیده است.

### کلیدواژه:

کنترل تطبیقی، سیستم‌های غیرخطی، شبکه عصبی، عدم قطعیت.

### مقدمه

به استفاده از روش کنترل تطبیقی دارند که در این میان روش کنترل تطبیقی مدل- مرجع یکی از پرکاربردترین روش‌ها می‌باشد [۹-۱].

کنترل کننده مذکور دارای کاربردهای فراوانی می‌باشد که از آن جمله می‌توان مقالاتی را نام برد که برای کنترل سیستم‌های رباتیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۰ و ۱۱]. با توجه به اینکه اکثر سیستم‌های ابعاد وسیع به صورت فیزیکی دارای دینامیک‌های پیچیده‌ای می‌باشند کنترل آنها بسیار دشوار بوده که به همین علت هنوز محققین زیادی بر روی کنترل این دسته از سیستم‌ها مطالعه می‌کنند. بسیاری از محققین بر روی دسته‌ای از سیستم‌های ابعاد وسیع مطالعه کرده‌اند که یا زیرسیستم‌ها به صورت خطی و البته ناشناخته می‌باشند و یا زیرسیستم‌ها به طور کامل ایزوله می‌باشند [۱۲-۱۵].

سیستم‌های ابعاد وسیع در عمل دارای توابع نامعلوم بوده و تداخلات بین زیرسیستم‌ها غیرخطی می‌باشد که نیاز به روش‌های خاصی برای تخمین زدن می‌باشد. روش‌هایی هم چون شبکه‌های عصبی و منطق فازی از جمله روش‌هایی هستند که برای تخمین توابع نامعلوم در این دسته از سیستم‌ها مورد

عملکرد بسیاری از سیستم‌های فیزیکی ذاتاً غیرخطی می‌باشد و باید توسط مدل‌های ریاضی غیرخطی توصیف شوند. از آنجایی که برخی از این نوع سیستم‌ها ساختار نامشخصی دارند و ارائه مدل ریاضی دقیقی برای آنها امکان پذیر نیست، برای کنترل این نوع سیستم‌ها نمی‌توان از روش‌های کنترل متعارف استفاده نمود. شبکه‌های عصبی در زمینه‌های تحقیقاتی مختلفی مانند محاسبات هوشمند، کنترل، شناسایی و غیره گسترش یافته‌اند. عوامل اصلی در به کارگیری این شبکه‌ها داشتن ویژگی‌هایی چون توانایی تعمیم پذیری و یادگیری، نگاشت غیرخطی و خاصیت تقریب زنی عمومی این شبکه‌ها می‌باشد. بنابراین از آنها در کنترل سیستم‌های غیرخطی با پارامترهای ناشناخته استفاده می‌شود. با توجه به تحقیقات صورت گرفته در زمینه سیستم‌های ابعاد وسیع می‌توان گفت که نتایج به دست آمده برای کنترل کننده نامتمرکز بهتر از کنترل کننده های متمرکز می‌باشد. به همین دلیل بیشتر محققین برای کنترل سیستم‌های ابعاد وسیع به استفاده از این نوع کنترل کننده روی آورده‌اند. به علت وجود نامعینی، اندازه گیری و تخمین پارامترها در سیستم‌های ابعاد وسیع دشوار بوده و به همین علت محققین تمایل زیادی

هم‌چنین در این مقاله از روش خطای فیلترشده برای اثبات پایداری کنترل‌کننده مبتنی بر روش پایداری لیاپانف استفاده شده‌است. برای بیان کارآمدی کنترل‌کننده پیشنهادی در این مقاله، شبیه‌سازی بر روی یک سیستم که دارای دو متغیر معکوس که با یک فنر به هم متصل شده، صورت گرفته است و نتایج شبیه‌سازی بیان‌کننده کارآمدی مطلوب سیستم مورد نظر می‌باشند [۲۴].

در مقاله‌ای محققین به طراحی یک کنترل‌کننده تطبیقی-عصبی برای دسته‌ای از سیستم‌های غیرافاین پرداخته‌اند. در این مقاله برای جبران تداخلات غیرخطی بین زیرسیستم‌ها از یک شبکه عصبی پایه شعاعی استفاده شده‌است. در این مقاله [۲۵] نیز ابتدا مدل زیرسیستم‌ها به صورت دینامیک خطا بیان شده‌است و سپس کنترل‌کننده‌ای طراحی شده‌است که پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین می‌کند. کنترل‌کننده موجود ترکیبی از ترم‌های کلاسیک و هم‌چنین دو شبکه عصبی پایه‌ای شعاعی می‌باشد. اثبات پایداری و تنظیم پارامترهای ترم‌های کلاسیک و شبکه‌های عصبی به کمک تابع لیاپانفی صورت گرفته‌است.

### طراحی کنترل‌کننده و اثبات پایداری سیستم

#### ۱- روابط کنترل‌کننده و خطاهای دینامیکی سیستم

معادله دینامیکی یک سیستم غیرخطی را می‌توان به صورت رابطه (۱) در نظر گرفت:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(x) + g(x)u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

که در رابطه بالا  $X$  بردار حالت‌ها و هم‌چنین  $f(x)$  و  $g(x)$  توابع هموار نامعلوم می‌باشند (توابع همواره نامعلوم می‌باشند). در ابتدا باید فرض مسئله معرفی گردد که سیستم طراحی شده تنها تحت این شرایط پاسخگویی لازم را خواهد داشت. فرض مسئله: مسیر مطلوب به صورت مقابل می‌باشد،  $X_d = [x_d, \dot{x}_d, \dots, x_d^{n-1}]^T$  و هم‌چنین برای این بردار داریم  $\|X_d\| \leq m$  البته این نشان می‌دهد که مسیر مطلوب محدود می‌باشد. حال اگر خطای ردیابی سیستم<sup>۴</sup> به صورت رابطه (۲) تعریف شود،

$$e = x - x_d \quad (2)$$

لذا با توجه به رابطه بالا می‌توان برای سیستم مورد نظر خطای فیلترشده را جهت سهولت اثبات پایداری، به صورت رابطه (۳) تعریف نمود.

$$s(t) = k_1 e + k_2 \dot{e} + \dots + k_{n-1} e^{n-1} \quad (3)$$

که در این رابطه  $k_1, k_2, \dots, k_n$  به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که چندجمله‌ای  $s^n = k_n s^{n-1} + k_{n-1} s^{n-2} + \dots + k_1$

استفاده قرار گرفته‌اند. در سال ۲۰۰۷ آقای پارک<sup>۱</sup> و همکاران، یک کنترل‌کننده تطبیقی غیرمستقیم با استفاده از روش شبکه‌های موجک ارائه کرده‌اند [۱۶]. هم‌چنین در سال ۲۰۰۵ یک کنترل‌کننده تطبیقی-عصبی که تنها دارای یک مجموعه شبکه عصبی می‌باشد، پیشنهاد شده است که ورودی این سیستم به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده‌است [۱۷]. نویسندگان یک کنترل‌کننده تطبیقی مدل-مرجع ترکیبی برای تخمین توابع نامشخص ارائه کرده‌اند که از شبکه‌های عصبی و منطق فازی به طور هم‌زمان در ساختار کنترل‌کننده استفاده شده‌است [۱۸]. به همین ترتیب در سال ۲۰۰۷ از شبکه‌های موج بازگشتی برای طراحی کنترل‌کننده تطبیقی نامتمرکز استفاده شده‌است و در مقاله‌ای یک روش جدید برای تخمین پارامترهای نامعین ارائه شده است که در نوع خود یک روش کاملاً جدید بوده که از روش فازی تاگاکا-سوگونو برای تخمین پارامترها استفاده کرده و نیاز به اطلاعات بسیار کمی از پارامترهای نامعین می‌باشد [۱۹ و ۲۰]. هم‌چنین در سال ۲۰۰۸ یک کنترل‌کننده تطبیقی-فازی جدید برای کنترل سیستم‌های غیرخطی ارائه شده‌است اما کنترل‌کننده پیشنهادی تنها قابل استفاده برای سیستم‌های تک‌ورودی-تک‌خروجی می‌باشد [۲۱]. و نیز در مقاله‌ای محققین بر روی یک کنترل‌کننده تطبیقی-فازی برای دسته‌ای از سیستم‌های ابعاد وسیع مطالعه کرده‌اند که دارای سه دسته نامعینی می‌باشد: نامعینی‌های غیرخطی، دینامیک‌های مدل‌نشده و اغتشاشات دینامیکی [۲۲].

مقاله دو محقق به نام‌های جین<sup>۲</sup> و خرمی یکی از اولین مقالاتی می‌باشد که به طراحی کنترل‌کننده تطبیقی برای سیستم‌های ابعاد وسیع می‌پردازد. در این مقاله یک کنترل‌کننده تطبیقی نامتمرکز برای سیستم‌های ابعاد وسیع در نظر گرفته شده‌است که سیستم مورد نظر به صورت افاین در نظر گرفته شده که تداخلات غیرخطی بین زیرسیستم‌ها نیز به صورت یک تابع نامعلوم و به اندازه کافی هموار در نظر گرفته شده‌است. برای کنترل‌کننده مورد نظر تنها فیدبک خروجی  $\dot{y}$  در دسترس می‌باشد. در این مقاله اثبات پایداری سیستم مبتنی بر روش لیاپانف انجام شده‌است که در نتیجه آن همگرایی تمامی سیگنال‌ها در سیستم حلقه بسته و همگرایی سیگنال خطا به سمت صفر را نتیجه می‌دهد [۲۳]. نویسندگان در سال ۲۰۰۶ به طراحی یک کنترل‌کننده تطبیقی مدل مرجع مبتنی بر شبکه‌های عصبی پایه شعاعی<sup>۳</sup> پرداخته‌اند که در این پژوهش سیستم مورد بررسی یک سیستم افاین در نظر گرفته شده‌است.

<sup>۱</sup> Park

<sup>۲</sup> Jain

<sup>۳</sup> Radial Basis

<sup>۴</sup> Tracking error

با توجه به توضیحات بالا می توان قوانین تطبیقی را (برای اصلاح سیگنال کنترلی) طبق روابط (۱۱) و (۱۲) برای سیستم مورد نظر در نظر گرفت:

$$\dot{W} = -\Gamma_w \Psi(z)s \quad (11)$$

$$\dot{\xi} = \gamma_{\xi} |s| \quad (12)$$

که در روابط بالا  $\Gamma_w$  و  $\gamma_{\xi}$  اعداد ثابت و مثبت می باشند.

**قضیه:** معادله دینامیکی خطای (۲) که جهت بیان معادلات دینامیکی یک سیستم غیرخطی و دارای نامعینی جرمی معرفی شده است را در نظر بگیرید. با اعمال قانون کنترل (۹) و با در نظر گرفتن قوانین تطبیقی (۱۱) و (۱۲) اثبات می شود که کلیه خطاهای تعقیب در همه زیرسیستمها به صورت مجانبی به سمت صفر می رود و کلیه سیگنالها در سیستم حلقه بسته محدود باقی می ماندند.

### ۳- اثبات پایداری کنترل کننده تطبیقی - عصبی

جهت اثبات قضیه فوق از قضیه لیاپانوف استفاده می گردد. لذا در این سیستم بر مبنای استفاده از قضیه لیاپانوف ابتدا یک تابع مثبت معین که به تابع لیاپانوف معروف است تعریف می شود:

$$V = V_1 + V_2 \quad (13)$$

که در رابطه بالا داریم:

$$V_1 = \frac{s^2}{2g(X)} \quad (14)$$

$$V_2 = \frac{1}{2} \left[ \tilde{W}^T \Gamma^{-1} \tilde{W} + \frac{\xi^2}{\gamma_{\xi}} \right] \quad (15)$$

به طوری که در روابط بالا داریم:

$$\tilde{W} = W^* - \hat{W} \quad (16)$$

$$\xi = \varepsilon_M - \hat{\xi} \quad (17)$$

با توجه به قانون کنترل (۹) خطای فیلترشده  $\hat{y}$  (۵) به صورت رابطه (۱۸) در خواهد آمد [۲۹]:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= f(X) + g(X)[-ks - \tilde{W}^T \Psi(z) + u_d^* - u_d^* + u_c] + v \\ &= g(X) \left[ -ks + \frac{\partial X}{2g^2(X)} - \tilde{W}^T \Psi(z) + u_d^* + u_c \right] \\ &= g(X) \left[ -ks + \frac{\partial X}{2g^2(X)} - \tilde{W}^T \Psi(z) + \varepsilon + u_c \right] \end{aligned} \quad (18)$$

حال باید مشتق اول تابع لیاپانوف را برای بررسی پایداری محاسبه کرده که مشتق اول آن به صورت رابطه (۱۹) به دست می آید:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \left[ \frac{\dot{s}}{g(X)} - \frac{\partial X}{2g^2(X)} \right] s \\ &= -ks^2 + \tilde{W}^T \Psi(z)s + \varepsilon s + u_c s \\ &\leq -ks^2 + \tilde{W}^T \Psi(z)s + \varepsilon_M |s| + u_c s \end{aligned} \quad (19)$$

با توجه به رابطه (۱۷) می توان رابطه بالا را ساده کرده و بازنویسی نمود که رابطه بالا به صورت رابطه (۲۰) در خواهد آمد:

هورویتز باشد. در این مرحله یک شبه کنترل کننده<sup>۵</sup> که به صورت رابطه (۴) می باشد تعریف می شود:

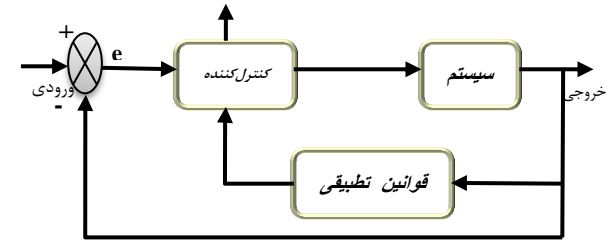
$$v = -\dot{x}_d + k_1 \dot{e} + k_2 \ddot{e} + \dots + k_{n-1} e^{n-1} \quad (4)$$

حال با توجه به این رابطه، مشتق  $s(t)$  به صورت رابطه (۵) خواهد بود:

$$\dot{s}(t) = f(x) + g(x)u + V \quad (5)$$

### ۲- طراحی کنترل کننده تطبیقی - عصبی

در این بخش از تحقیق به طراحی کنترل کننده غیرخطی برای سیستم مورد نظر مطابق شکل ۱ پرداخته می شود.



شکل ۱- شمای کلی کنترل کننده تطبیقی - عصبی

همان طور که می دانیم  $f(x)$  و  $g(x)$  توابعی نامعلوم می باشند. حال برای تخمین زدن این توابع از شبکه های عصبی استفاده می شود. برای این کار سیگنال کنترلی ایده آل می تواند به صورت رابطه (۶) در نظر گرفته شود [۲۸]:

$$\begin{cases} u_d^* = \frac{f(X)+V}{g(X)} - \frac{\dot{g}(X)}{2g^2(X)} s = W^{*T} \Psi(z) + \varepsilon \\ Z = [X^T, V, s] \end{cases} \quad (6)$$

به طوری که  $\Psi(z) = [\Psi_1(z), \Psi_2(z), \dots, \Psi_q(z)]$  بردار شبکه عصبی و  $W^{*T}$  بردار وزن های ایده آل شبکه عصبی مورد نظر می باشد. همچنین در رابطه (۶)،  $\varepsilon$  خطای شبکه عصبی می باشد به طوری که در رابطه (۷) صدق نماید:

$$\varepsilon_M > 0, |\varepsilon| \leq \varepsilon_M \quad (7)$$

بردار وزن های ایده آل شبکه عصبی  $W^{*T}$  نامعلوم است، بنابراین نیاز به تخمین زدن دارد که در اینجا  $\tilde{W}$  را تخمینی از  $W^*$  در نظر گرفته می شود که در این حالت خطای تخمین بردار وزن ها به صورت رابطه (۸) می باشد:

$$\tilde{W} = W^* - \hat{W} \quad (8)$$

با به کار بردن روش کنترل تطبیقی - عصبی یک سیستم غیرخطی پیچیده را می توان کنترل کرد. قانون کنترل بر حسب شبکه عصبی به صورت رابطه (۹) پیشنهاد می شود [۲۸]:

$$u = -ks - \tilde{W}^T \Psi(z) + u_c \quad (9)$$

که در رابطه (۹) داریم:

$$u_c = -\xi sgn(s) \quad (10)$$

در رابطه (۹)،  $\tilde{W}^T \Psi(z)$  نشان دهنده شبکه عصبی پایه شعاعی<sup>۶</sup> به کار گرفته شده برای تخمین در کنترل کننده مورد نظر و  $\xi sgn(s)$  برای تخمین تداخل در سیستم می باشد.

<sup>۶</sup> Radial Basis Neural network (RBNN)  
<sup>۷</sup> Filtered error

<sup>۵</sup> Pseudo

و اثبات قضیه به پایان می‌رسد.

#### ۴- شبیه سازی

در این قسمت هدف به کارگیری کنترل کننده برای کنترل یک سیستم غیرخطی ابعاد وسیع می‌باشد. معادلات دینامیکی سیستم غیرخطی به صورت رابطه (۲۸) می‌باشد [۲۸]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \sin(x_1) - e^{2t}x_2 + b_1u_1 + c_1\|x_2\|^3e^{a_2\|x_2\|} \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = -x_4 \cos(x_3) + b_2u_2 + c_2\|x_1\|^3e^{a_1\|x_1\|} \end{cases} \quad (28)$$

در سیستم مذکور مسیر مطلوب  $y = 0$  می‌باشد و باید حالت های سیستم توسط کنترل کننده به سمت صفر میل نمایند. در ادامه کنترل کننده های مختلف برای کنترل سیستم موردنظر به کار گرفته می‌شوند. هم چنین مقادیر پارامترها نیز به شرح ذیل می‌باشند:

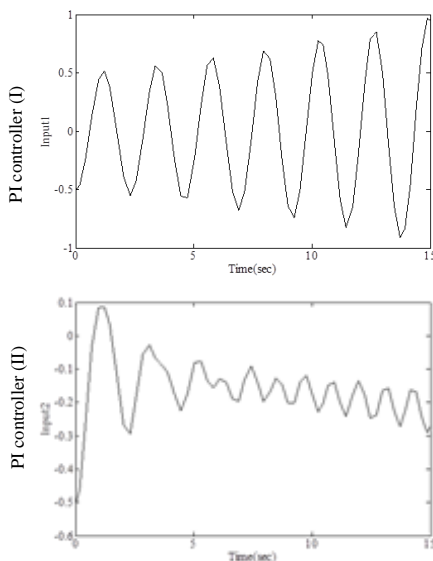
$$\begin{cases} a_1 = 0.2, & b_1 = 1.7, & c_1 = 1.2 \\ a_2 = 0.4, & b_2 = 1.8, & c_2 = 1 \end{cases}$$

#### کنترل سیستم غیرخطی با استفاده از کنترل کننده PI

در این بخش کنترل کننده PI با استفاده از  $U = k_p e + k_i \int e dt$  برای کنترل سیستم غیرخطی مذکور به کار گرفته شده است که ضرایب کنترل کننده به صورت ذیل در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} k_p = 5 \\ k_i = 1 \end{cases}$$

نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار MATLAB در زیر آورده شده است:



شکل ۲- ورودی متغیر اول و دوم با استفاده از کنترل کننده PI

$$\dot{v}_1 \leq -ks^2 + \bar{W}^T \Psi(z)s + \varepsilon_M |s| - \xi |s| \quad (20)$$

و نیز می‌توان رابطه (۲۰) را به صورت رابطه (۲۱) بازنویسی کرد:

$$\dot{v}_1 \leq -ks^2 + \bar{W}^T \Psi(z)s + |s|(\varepsilon_M - \xi) \quad (21)$$

اکنون با توجه به رابطه‌های (۱۶) و (۱۷) می‌توان رابطه (۲۱) را به صورت رابطه (۲۲) بازنویسی کرد:

$$\dot{v}_1 \leq -ks^2 + \bar{W}^T \Psi(z)s + \xi |s| \quad (22)$$

تا این مرحله  $\dot{v}_1$  محاسبه شد و در مرحله بعد نیاز هست تا  $\dot{v}$  محاسبه شود که به صورت رابطه (۲۳) خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \dot{v}_1 + \dot{v}_2 \\ &\leq -ks^2 + \bar{W}^T \Psi(z)s + \xi |s| - \left[ \bar{W}^T \Gamma^{-1} \dot{\bar{W}} + \frac{1}{\gamma_c} \xi \dot{\xi} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

حال می‌توان رابطه (۲۳) را به صورت مقابل بازنویسی کرد:

$$\dot{v} \leq -ks^2 + \bar{W}^T [\Psi(z)s - \Gamma^{-1} \dot{\bar{W}}] + \xi \left[ |s| - \frac{1}{\gamma_c} \dot{\xi} \right] \quad (24)$$

با توجه به قوانین تطبیقی (روابط (۱۱) و (۱۲)) رابطه بالا را به صورت رابطه (۲۵) در خواهد آمد:

$$\dot{v} \leq -ks^2 \quad (25)$$

بنابراین  $\dot{v}, s, \xi, \bar{W}$  همگی محدود می‌باشند. از آنجایی که همه سیگنال‌ها در رابطه (۹) محدود هستند، بنابراین  $\dot{s}$  نیز محدود می‌باشد.

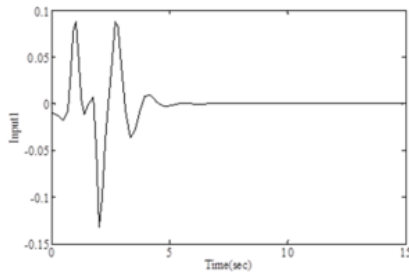
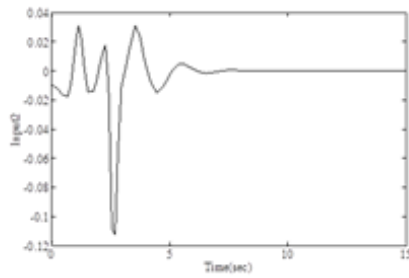
در این قسمت با استفاده از لم باربالت<sup>۸</sup> همگرایی خطاها به سمت صفر بررسی می‌گردد. از آنجا که  $V(0)$  تابع مثبت معین است و  $\dot{V}(0)$  نیز منفی نیم معین است، پس  $V(0)$  دارای کران پائین صفر و کران بالا در فاصله زمانی  $[0, +\infty)$  می‌باشد. لذا می‌توان نوشت:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V = V_{\infty} \quad (26)$$

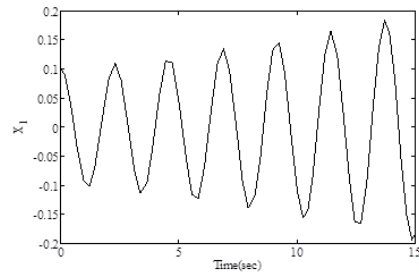
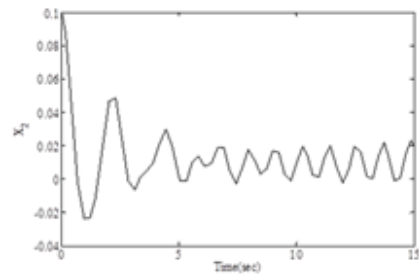
که  $V_{\infty}$  یک مقدار ثابت مثبت است. با توجه به اینکه در رابطه (۱۴)،  $s$  یک سیگنال محدود می‌باشد و همچنین  $k$  یک عدد ثابت و مثبت می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت که  $\dot{V}$  هم کراندار از پایین می‌باشد. حال با توجه به اینکه  $\dot{V}$  نیز وابسته به عوامل  $e, \dot{e}$  می‌باشد که آنها نیز کراندار هستند، پس  $\dot{V}$  نیز کراندار است:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = 0 \quad (27)$$

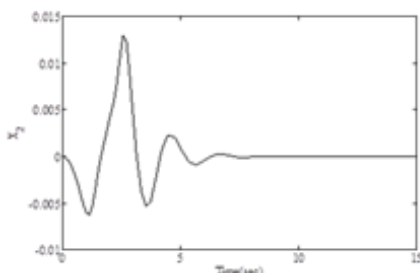
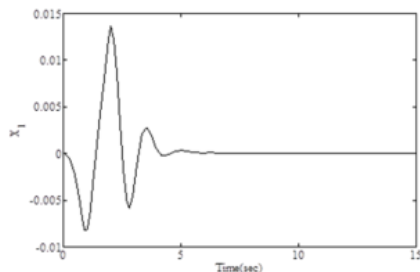
<sup>۸</sup> Barbalat lemma



شکل ۴- ورودی متغیر اول و دوم با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی



شکل ۳- خروجی متغیر اول و دوم با استفاده از کنترل کننده PI



شکل ۵- خروجی متغیر اول و دوم با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی

خروجی متغیرهای حالت سیستم غیرخطی موردنظر در شکل ۵ آمده است. با توجه به شکل‌ها می‌توان دید که کنترل کننده موردنظر به خوبی قادر به پایدارسازی کنترل کننده مذکور می‌باشد و پس از مدت زمان نسبتاً کوتاهی سیستم غیرخطی پایدار می‌شود. سیگنال ورودی کنترل در شکل ۴ آمده است که با توجه به نتایج آن نیز پایداری سیستم با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی اثبات می‌شود. در این قسمت برای بررسی کارآمدی کنترل کننده مذکور نویز سفید با دامنه ۰/۱ در قسمت فیدبک به سیستم اضافه شده است و شبیه‌سازی مجدداً انجام شده است که نتایج آن در زیر آمده است

شکل ۳ نشان دهنده خروجی متغیرهای  $X_1$  و  $X_2$  با استفاده از کنترل کننده PI می‌باشند. همان‌گونه که در شکل‌ها دیده می‌شود کنترل کننده قادر به کنترل سیستم موردنظر نمی‌باشد و متغیرهای حالت سیستم کاملاً ناپایدار و نوسانی می‌باشند. بنابراین نیاز به کنترل کننده‌ای داریم که بتواند سیستم موردنظر را کاملاً کنترل نماید و متغیرهای حالت سیستم به سمت پایداری بروند در مرحله بعد، کنترل کننده پیشنهادی برای سیستم موردنظر به کار گرفته می‌شود. کنترل کننده پیشنهادی به صورت رابطه (۹) می‌باشد:

$$u = -ks - \hat{W}^T \Psi(z) - \xi \operatorname{sgn}(s) \quad (9)$$

و همچنین قوانین تطبیقی به صورت رابطه (۱۱) و (۱۲) می‌باشند:

$$\dot{\hat{W}} = -\Gamma_w \Psi(z)s \quad (11)$$

$$\dot{\xi} = \gamma_\xi |s| \quad (12)$$

ضرایب تطبیقی در کنترل کننده پیشنهادی نیز به شرح ذیل می‌باشند:

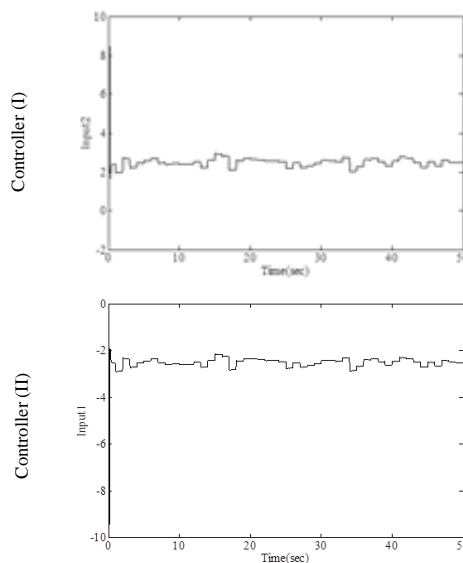
$$\Gamma_w = \gamma_\xi = 15$$

نتایج شبیه‌سازی با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی در شکل‌های زیر آمده است.

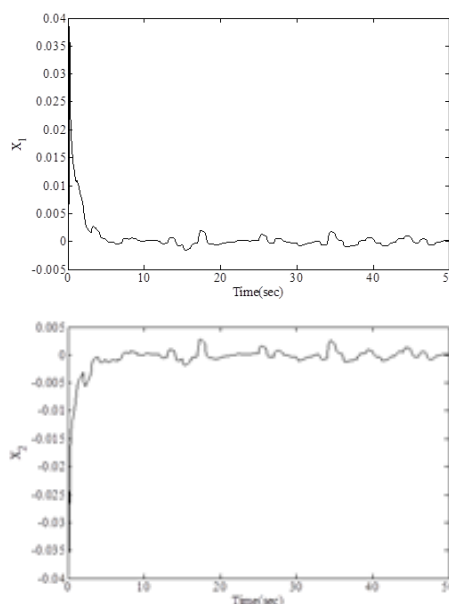
غیرخطی ارائه شده است. اثبات پایداری کنترل کننده پیشنهادی بر مبنای تابع لیپانف و لم باربالت می‌باشد و قوانین تطبیقی محاسبه شده توسط این روش تضمین می‌کند که تمامی سیگنال‌ها در سیستم حلقه بسته محدود بوده و سیگنال خطای ردیابی به صورت مجانبی به سمت صفر میل می‌کند. نتایج شبیه‌سازی بیان کننده کارآمدی کنترل کننده پیشنهادی می‌باشد.

## References

- [1] J.J. Slotine, W.P. Li, "Applied Nonlinear Control" Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [2] K. Homik, M. Stinchcombe, H. White, "Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators", Journal of Neural Networks, vol. 2, 1989.
- [3] M. Wlas, Z. Krzeminski, H. Tolivat, "Neural Network Based Parameters Estimation of Induction Motors" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, 2008.
- [4] S. Jang, C. Sun, E. Mizutani, "Neuro- Fuzzy and Soft Computing" Prentice Hall, 1997.
- [5] H. Li, H. Deng, "An Approximate Internal Model Based Neural Control for Unknown Nonlinear Discrete Process" IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 17, 2006.
- [6] O. Omidvar, D. Elliot, "Neural Systems for Control", Academic Press, 1997.
- [7] D. D. Siljak, Decentralized Control of Complex Systems. Mathematics in Science and Engineering, vol. 184, Academic Press, San Diego, 1991.
- [8] C. Wen, Y. C. Soh, Decentralized Adaptive Control Using Integrator Backstepping, Automatica, vol. 33, no. 9, 1719-1724, 1997.
- [9] M. C. Han, Y. H. Chen, Decentralized control design: uncertain systems with strong interconnections, Int. J. Control, vol. 61, no. 6, 1363-1385, 1995.
- [10] L.-C. Fu, Robust adaptive decentralized control of robot manipulators, IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 37, pp. 106-110, Jan. 1992.
- [11] H. Seraji, Decentralized adaptive control of manipulators: Theory, simulation, and experimentation, IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 5, pp. 183-201, 1989.
- [12] C. Wen, Decentralized adaptive regulation, IEEE Trans. Automatic Contr., vol. 39, pp. 2163-2166, Oct. 1994. 1106-1118, Aug. 1992.
- [13] Y. Guo, Z. P. Jiang, and D. J. Hill, "Decentralized robust disturbance attenuation for a class of large-scale



شکل ۶- ورودی متغیر اول و دوم با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی با وجود نویز



شکل ۷- خروجی متغیر اول و دوم با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی با وجود نویز

در بالا شکل ۷ نشان دهنده خروجی هریک از متغیرها می‌باشد و همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود با وجود نویز در سیستم هم‌چنان خطا بسیار نزدیک به صفر می‌باشد که این نشان دهنده کارآمدی کنترل کننده مورد نظر می‌باشد. هم‌چنین شکل ۶ نیز نشان دهنده سیگنال ورودی‌های کنترل سیستم مورد نظر می‌باشند.

## نتیجه گیری

در این مقاله یک کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر شبکه‌های عصبی پایه شعاعی برای کنترل سیستم‌های ابعاد وسیع

- IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E90-A, No. 10, pp. 2239-2248, October 2007.
- [26] Karimi, B., Menhaj, M. B., Karimi-Ghartemani, M., and Saboori, I., "Decentralized adaptive control of large-scale affine and non-affine nonlinear systems". *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 8, pp. 2459-2467, 2009.
- [27] Jeffrey T. Spooner and Kevin M. Passino, Decentralized Adaptive Control of Nonlinear Systems Using Radial Basis Neural Networks, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 44, No. 11, 999.
- [28] Sunan Huang, Kok Kiong Tan, and Tong Heng Lee, Decentralized Control Design for Large-Scale Systems with Strong Interconnections Using Neural Networks, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 48, No. 5, 2003.
- [29] B. Karimi, M. B. Menhaj, Non-affine nonlinear adaptive control of decentralized large-scale systems using neural networks, *Information Sciences* 180 (2010) 3335–3347
- nonlinear systems," *Syst. Control Lett.*, vol. 37, pp. 71–85, 1999.
- [14] Y. Tang, M. Tomizuka, G. Guerrero, and G. Montemayor, Decentralized robust control of mechanical systems, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 45, pp. 771–776, Apr. 2000.
- [15] P. Krishmanurthy, and F. Khorrami, "Decentralized control of large-scale nonlinear systems in generalized output-feedback canonical form," In *Proceedings of the 40<sup>th</sup> IEEE conference on decision and control*, Orlando, pp. 1322–1327, 2001.
- [16] S.J. Yoo, J.B. Park, Y.H. Choi, Indirect adaptive control of nonlinear dynamic systems using self recurrent wavelet neural networks via adaptive learning rates, *Inform. Sci.* 177 (2007) 3074–3098.
- [17] W.D. Chang, Robust adaptive single neural control for a class of uncertain nonlinear systems with input nonlinearity, *Inform. Sci.* 171 (2005) 261–271.
- [18] P. Melin, O. Castillo, Intelligent control of aircraft dynamic systems with a new hybrid neuro-fuzzy-fractal approach, *Inform. Sci.* 142 (2002) 161–175.
- [19] C.K. Lin, Robust adaptive critic control of nonlinear systems using fuzzy basis function networks: an LMI approach, *Inform. Sci.* 177 (2007) 4934–4946
- [20] C.W. Park, M. Park, Adaptive parameter estimator based on T–S fuzzy models and its applications to indirect adaptive fuzzy control design, *Inform. Sci.* 159 (2004) 125–139.
- [21] M. Wang, B. Chen, K. Liu, X. Liu, S. Zhang, Adaptive fuzzy tracking control of nonlinear time-delay systems with unknown virtual control coefficients, *Inform. Sci.* 178 (2008) 4326–4340.
- [22] S. Tong, Y. Li, P. Shi, Fuzzy adaptive backstepping robust control for SISO nonlinear system with dynamic uncertainties, *Inform. Sci.* 179 (2009) 1319–1332.
- [23] Jain S., and Khorrami F., "Decentralized adaptive Output feedback design for large-scale nonlinear systems". *IEEE Trans. Automat. Cont.* vol. 42, pp. 729-735, 1997.
- [24] Huang S. N., Tan K. K., and Lee T. H., "Nonlinear adaptive control of interconnected systems using neural networks". *IEEE Trans. Neural networks*, vol. 17, no. 1, pp. 243-246, 2006.
- [25] Karimi, B., Menhaj, M. B., and Saboori, I. "Decentralized Adaptive Control of Large-Scale Nonaffine Nonlinear Systems Using Radial Basis Function Neural Networks".