

## کنترل عصبی - تطبیقی مقاوم روبات اسکارا سه محوره با وجود نامعینی جرمی

منصوره تسلیمی<sup>(۱)</sup> - عباس چترائی<sup>(۲)</sup> - مجتبی حسینی<sup>(۳)</sup>

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

(۲) استادیار - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

(۳) استادیار - دانشگاه جامع علمی - کاربردی تهران

تاریخ پذیرش: تابستان ۱۳۹۲

تاریخ دریافت: زمستان ۱۳۹۱

**خلاصه:** در این مقاله هدف طراحی کنترل کننده تطبیقی<sup>۱</sup> - عصبی<sup>۲</sup> برای یک بازوی مکانیکی SCARA می‌باشد. بازوی مکانیکی مورد نظر یک سیستم غیرخطی می‌باشد که کنترل کننده‌های کلاسیک قادر به کنترل آن نمی‌باشند. ابتدا شرح مختصری از کارهایی که تاکنون بر روی سیستم‌های مشابه انجام شده است ارائه خواهد شد و سپس در ادامه با استفاده از روش اولر - لاگرانژ که مبتنی بر انرژی پتانسیل و جنبشی سیستم می‌باشد، معادلات دینامیکی سیستم محاسبه خواهد شد. طراحی کنترل کننده با ارائه‌ی یک تابع لیاپانف<sup>۳</sup> مناسب بیان خواهد شد که قوانین تطبیقی و پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین خواهد کرد. در سیستم حلقه بسته تمامی سیگنالها محدود بوده و سیگنال خطا<sup>۴</sup> به صورت مجانبی به سمت صفر میل می‌کند. برای اثبات کارآمدی سیستم کنترل کننده طراحی شده بر روی یک روبات SCARA سه لینکی پیاده سازی خواهد شد که نتایج به دست آمده کارایی کنترل کننده را تضمین می‌کند.

**کلمات کلیدی:** بازوهای مکانیکی غیرخطی، کنترل تطبیقی، شبکه‌های عصبی، پایداری لیاپانف.

## A Robust Neuro-Adaptive Control of Three Link SCARA Robot with Mass Uncertainty

Mansoorh Taslimi<sup>(1)</sup> - Abbas Chatraei<sup>(2)</sup> - Mojtaba Hosseini<sup>(3)</sup>

(1) MSc - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch  
Mansoorh\_taslimi@yahoo.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch  
abbas.chatraei@gmail.com

(3) Assistant Professor - University of Applied Science and Technology of Tehran  
todeshki@ec.iut.ac.ir

The purpose of this paper is to design a neuro-adaptive control system for SCARA mechanical arm. To doing so, first, a brief review of the study that has been performed on similar systems is presented. Then, using Euler - Lagrange formulation which is based on kinetic and potential energy of the system, dynamical equations of the system are derived. In the proposed control system a Lyapunov function is used to guarantee the stability of the closed loop system and to show that all signals in the closed loop system are limited and the error signal tends asymptotically to origin. The proposed controller is applied on a three link SCARA robot to demonstrate the efficiency of its performance.

**Index terms:** Nonlinear system, mechanical arms, adaptive control, neural networks, lyapunov stability.

## ۱- مقدمه

بازوی مکانیکی سیستمی است الکترومکانیکی که برای انجام وظایف گوناگون طراحی و ساخته می‌شود و می‌توان آن را جهت کاربردهای گوناگون برنامه ریزی کرد. مصارف بازوها در همه ابعاد زندگی انسان به سرعت در حال گسترش است تا کارهای سخت و خطرناک را به جای انسان انجام دهند. برای مثال امروزه برای بررسی وضعیت داخلی رآکتورها از این بازوها استفاده می‌شود تا تشعشعات رادیواکتیو به انسان صدمه نزنند. ۹۰٪ بازوهای مکانیکی امروزی صنعتی هستند. با پیشرفت علوم در طی چند دهه اخیر و نیاز به انجام کارها در صنعت با سرعت و دقت بالاتر و خستگی کمتر، دانشمندان را به فکر ساختن ربات‌ها انداخت. اینگونه بود که کم‌کم اندیشه ساخت ربات و استفاده از آنها روز به روز قویتر شد و تلاش‌های بشری بنابر امکانات و مقتضیات پله پله به حقیقت نزدیک‌تر شد.

با توجه به افزایش روزافزون کاربرد ربات‌ها در انواع فرآیندهای صنعتی، علمی، پزشکی، تفریحی و همچنین نیاز فراوان به عکس‌العمل سریعتر و با دقت بیشتر در تعقیب مسیر مطلوب، محققین علم کنترل ربات تلاش‌های روزافزونی را در ارائه الگوریتم‌های ساده‌تر، انعطاف پذیرتر و مؤثرتر به کار بسته‌اند. در زیر مروری کلی بر روی کنترل کننده‌های مختلفی که برای کنترل بازوهای مکانیکی ارائه شده‌اند ارائه خواهد شد. در ربات‌های صنعتی عموماً از کنترل مفصل برای کنترل وضعیت آنها استفاده می‌شود [۱]. در عمل برای عملکرد مطلوب یک ربات و تعقیب یک مسیر خاص، ربات یک مسیر مطلوبی را دنبال می‌کند که توسط یک پروسه که به تکنیک آموزش و عمل معروف است انجام می‌شود. در روش کنترل بازوی مکانیکی تنها فیدبک‌های خود مفصل برای کنترل بازو استفاده می‌شوند. این بدان معنی است که ما با کمترین هزینه می‌توانیم به کنترل دلخواه خود برسیم. اگرچه دریافت فیدبک در فضای کاری مانند موقعیت مفصل کار آسانی نیست. موقعیت مفصل‌ها توسط انکدرهای نوری مناسبی اندازه‌گیری می‌شوند در حالی که موقعیت پنجه ربات توسط سیستم‌های بینایی ماشین تشخیص داده می‌شود [۲،۳].

از بزرگترین چالشها در کنترل روباتها مقابله با عدم قطعیت‌ها، غیرخطی بودن و کوپلینگ‌های اجزای مختلف می‌باشد که در حوزه کنترل مقاوم بررسی می‌شوند [۴-۷]. کنترل مقاوم پایداری را تحت نامعینی‌ها با یک تعامل بین خطای ردیابی و محدوده نامعینی‌ها محاسبه می‌کند. این روش در کنترل مفصل روبات‌ها بسیار مورد استفاده قرار گرفته است در حالی که کنترل روبات در فضای کاری همچنان یک مسئله جدی در کنترل روبات می‌باشد. زمانی که با روش‌های کنترل با قوانین کنترل سوئیچینگ کار می‌کنیم وجود چترینگ امری اجتناب ناپذیر می‌باشد که این به علت وجود دینامیک‌های مدل نشده می‌باشد. در عمل برای کنترل سیگنال دارای چترینگ ناشی از تأخیر سوئیچینگ غیر صفر، از حل معادله دیفرانسیل حلقه بسته بر حسب خطای ردیابی استفاده می‌شود [۸]. تئوری

لیاپانف پایداری سیستم را با وجود نامعینی در سیستم تضمین می‌کند پس می‌توان از آن برای حذف چترینگ نیز استفاده نمود. اخیراً تعدادی رگولاتورهای کنترلی برای کنترل روبات‌های در فضای کاری برای غلبه بر نامعینی‌های پارامتری ارائه شده‌اند [۹]. کنترل کننده‌های تخمین ژاکوبین برای دمپینگ در کنترل روبات‌ها در فضای کاری برای کنترل نقطه تنظیم روبات‌ها با وجود نامعینی پیشنهاد شده‌اند [۱۰]. همچنین کنترل کننده ژاکوبین تطبیقی برای کنترل ردیابی مسیر توسط بازوهای مکانیکی با وجود نامعینی‌ها پیشنهاد شده است [۱۱] که کنترل کننده نیازی به دانستن کامل ماتریس ژاکوبین و پارامترهای دینامیکی ندارد. همچنین در روش کنترل تطبیقی با استفاده از اطلاعاتی که توسط بینایی ماشین در فضای کاری تهیه می‌شود می‌توان به عنوان فیدبک استفاده نمود [۳]. در [۱۲] یک روش لغزشی مقاوم برای بازوی مکانیکی با استفاده از روش گام به عقب و خطی سازی با فیدبک ارائه شده است. محدوده نامعینی‌های به کارگرفته شده در کنترل مود لغزشی با استفاده از روش خطی سازی با فیدبک کاهش یافته است که اینکار یک روش مقاوم با خطای کمتر را ایجاد کرده است. روش گام به عقب برای بیان سطح لغزشی استفاده شده است که یک محدوده یکدست برای پایداری را به وجود آورده است. برای شبیه سازی از یک موتور الکتریکی برای به حرکت در آوردن بازوی مکانیکی استفاده شده است. بنابراین کنترل تطبیقی روبات در فضای کاری به طور کاملاً موفق قادر به غلبه بر نامعینی‌های پارامتری می‌باشد.

یکی دیگر از روش‌ها که برای کنترل بازوی مکانیکی بسیار مورد توجه بوده است استفاده از تخمین زن‌های حالت بوده، که طراحی کنترل کننده تطبیقی با استفاده از تخمین زن حالت در [۱۸-۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۴] یک تخمین زن هموار غیرخطی و در [۱۳] یک تخمین زن لغزشی مورد استفاده قرار گرفته است اما به علت اینکه از سطح لغزشی استفاده شده چترینگ زیادی در خروجی سیستم مشاهده می‌شود. همچنین در [۱۵] یک تخمین زن غیرخطی برای کنترل یک بازوی مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته است که نسبتاً دارای پاسخ مطلوبی می‌باشد. در [۱۸] یک مفهوم بسیار کلی از روش تخمین حالت برای بازوهای مکانیکی در نظر گرفته شده است و دو روش خطی سازی با فیدبک و تخمین زن حالت برای کنترل سیستم استفاده شده‌اند. در این مقاله پایداری مجانبی سیستم تضمین شده است به این شرط که پارامترهای بازوی مکانیکی کاملاً معلوم باشند. کنترل تطبیقی مبتنی بر تخمین زن حالت، در بسیاری از مقالات در نظر گرفته شده‌اند [۱۹-۱۸]. در [۱۹] ترکیبی از کنترل کننده تطبیقی پس‌یو با یک کنترل کننده تخمین زن لغزشی ارائه شده است که پایداری مجانبی کنترل کننده پیشنهادی را تضمین می‌کند. در [۱۹] محاسبات on-line معادلات دینامیک معکوس سیستم مورد نیاز است که این محاسبات بسیار پیچیده می‌باشند. همچنین یک روش بسیار جالب برای کنترل کننده تطبیقی و تخمین سرعت برای سیستم‌های تعلیق مغناطیسی در [۲۰] آورده شده است. اما پایداری

است. همه این موارد ورودی معادلات هستند و  $q$  زوایای مفاصل می باشد که خروجی معادلات است).

## ۲-۱- بیان روابط کنترل کننده و خطاهای دینامیکی سیستم

با در نظر گرفتن بردار متغیرهای فضای حالت  $X(t) = \begin{bmatrix} x_1 = q(t) \\ x_2 = \dot{q}(t) \end{bmatrix}$ ، معادلات دینامیکی (۱) به معادلات حالت زیر تبدیل می شوند (در روابط بالا  $q$  زوایای مفاصل می باشد):

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2)$$

$$y = x_1$$

که در رابطه بالا  $X$  بردار حالتها و همچنین  $f(x)$  و  $g(x)$  توابع هموار نامعلوم می باشند (که شامل پارامترهای نامعلومی مانند جرم رابطهای ربات، ممان اینرسیهای ربات و ...).

در ابتدا باید فرضیات مسئله معرفی شوند که سیستم طراحی شده تنها تحت این شرایط پاسخگوی لازم را خواهد داشت.

فرض بردار حالت مطلوب به صورت زیر است،

$$x_d(t) = \begin{bmatrix} x_{1d} = q(t) \\ x_{2d} = \dot{q}(t) \end{bmatrix}$$

که کراندار بودن مسیر مطلوب را نشان می دهد.

حال خطای ردیابی سیستم<sup>۵</sup> را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$E = x - x_d \quad (3)$$

در این مقاله به جای بررسی معیار خطا، از معیار خطای فیلتر شده استفاده می کنیم که این معیار در رابطه زیر تعریف شده است. با توجه به رابطه (۳) می توانیم برای سیستم مورد نظر خطای فیلتر شده را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$s(t) = k_1 e + k_2 \dot{e} + \dots + k_n e^{n-1} \quad (4)$$

که در این رابطه  $k_1, k_2, \dots, k_n$  به گونه ای انتخاب می شوند که

چند جمله ای  $s^n = k_n s^{n-1} + k_{n-1} s^{n-2} + \dots + k_1$  هورویتز باشد. در این

مرحله یک شبه کنترل کننده<sup>۶</sup>  $v$  [۲۶] به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$v = -\dot{x}_d + k_1 \dot{e} + k_2 \ddot{e} + \dots + k_{n-1} e^{n-1} \quad (5)$$

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

$$\dot{s}(t) = f(x) + g(x)u + v \quad (6)$$

## ۲-۲ طراحی کنترل کننده تطبیقی - عصبی

در این قسمت به طراحی کنترل کننده غیرخطی برای زیر سیستم کند پرداخته می شود. 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 مقابل در نظر گرفته شود [۲۴]:

سیستم تنها در صورتی می تواند ثابت باقی بماند که ماتریس اینرسی سیستم تغییر نکند.

در [۲۱] یک روش کنترل فازی هیبرید برای روبات اسکارا ارائه شده است. کنترل کننده ترکیبی ارائه شده در این مقاله ترکیبی از یک کنترل کننده فازی مستقیم، غیر مستقیم و یک کنترل کننده ناظر می باشد. ویژگی منحصر به فرد کنترل کننده به کار رفته شده در این سیستم آن است که نیازی به مدل ریاضی سیستم نمی باشد و کنترل کننده قادر به تخمین پارامترهای سیستم می باشد.

در [۲۲] برای کنترل یک بازوی مکانیکی صلب از روش کنترل تطبیقی تکرارشونده استفاده شده است که برای کنترل آن نیازی به اندازه گیری سرعت بازو نمی باشد. در این روش کنترل بازو باید چندین بار در مسیر مطلوب حرکت کرده تا بتواند به طرز مطلوبی آموزش ببیند. در این کار فرض شده است که مدل دینامیک معکوس سیستم کاملاً ناشناخته است. در این روش کنترلی یک تخمین زن سرعت بر اساس رابطه ورودی/خروجی بازوی مکانیکی طراحی شده است.

در این مقاله یک کنترل کننده تطبیقی-عصبی برای کنترل بازوی مکانیکی غیر خطی SCARA پیشنهاد شده است که نتایج شبیه سازی بیان کننده کارآمدی مطلوب کنترل کننده پیشنهادی می باشد. همچنین برای کنترل بازوی مکانیکی مورد نظر موقعیت و سرعت مفاصل فیدبک شده اند. شبکه عصبی به کار رفته و در این مقاله تنها دارای یک مجموعه شبکه عصبی می باشد و تعداد کمی از قوانین تطبیقی استفاده شده که باعث شده حجم محاسباتی و زمان رسیدن به پاسخ نیز به شکل قابل توجهی کاهش یافته و باعث همگرا شدن سریع وزن ها شود. تابع لیاپانف به کار گرفته به راحتی قابل درک است و اثبات پایداری به وسیله آن ساده تر بیان شده و همچنین از کنترل کننده کمکی برای طراحی استفاده نشده است. نتایج شبیه سازی بیان کننده کارآمدی مطلوب کنترل کننده پیشنهادی می باشد.

این مقاله در چهار بخش سازماندهی شده است. در بخش دوم معادلات حرکت ربات آورده شده اند و پس از آن کنترل کننده پیشنهادی معرفی شده و پایداری آن اثبات می گردد. در بخش سوم برای بیان کارآمدی سیستم، کنترل کننده پیشنهادی بر روی سیستم مورد نظر به کار گرفته می شود و نتایج مقاله در بخش چهارم بیان خواهد شد.

## ۲-۲ مدل سیستم، کنترل کننده و اثبات پایداری

معادلات دینامیکی یک بازوی مکانیکی با  $n$  مفصل صلب در حالت کلی به صورت زیر می باشد [۲۶]:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

که در آن  $D$  ماتریس اینرسی بازوی مکانیکی با ابعاد  $n \times n$  و  $C(q, \dot{q})$  برداری  $n \times 1$  متشکل از جمله های گریز از مرکز، کوریولیس و  $g(q)$  برداری  $n \times 1$  که بیان گر نیروی گرانشی می باشد.  $\tau$  نیروی گرانش

$$V = V_1 + V_2 \quad (14)$$

که در رابطه بالا داریم:

$$V_1 = \frac{s^2}{2g(x)} \quad (15)$$

$$V_2 = \frac{1}{2} \left[ \tilde{W}^T \Gamma^{-1} \tilde{W} + \frac{\tilde{\zeta}^2}{\Upsilon_{\zeta}} \right] \quad (16)$$

به طوری که در روابط بالا داریم:

$$\tilde{W} = W^* - \hat{W} \quad (17)$$

$$\tilde{\zeta} = \varepsilon_M - \hat{\zeta} \quad (18)$$

با توجه به ورودی کنترل در رابطه (۱۰) خطای فیلتر شده<sup>۸</sup> در رابطه (۶) به صورت زیر در خواهد آمد [۲۵]:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= f(x) + g(x)[-ks - \hat{W}^T \Psi(z) + u_d^* - u_d^* + u_c] + v \\ &= g(x) \left[ -ks + \frac{\dot{g}(x)}{2g^2(x)} - \hat{W}^T \Psi(z) + u_d^* + u_c \right] \\ &= g(x) \left[ -ks + \frac{\dot{g}(x)}{2g^2(x)} + \tilde{W}^T \Psi(z) + \varepsilon + u_c \right] \end{aligned} \quad (19)$$

حال باید مشتق اول تابع لیاپانوف را برای بررسی پایداری محاسبه کنیم که به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \left[ \frac{\dot{s}}{g(x)} - \frac{\dot{g}(x)}{2g^2(x)} \right] s = -ks^2 + \tilde{W}^T \Psi(z)s + \varepsilon s + u_c s \\ &\leq -ks^2 + \tilde{W}^T \Psi(z)s + \varepsilon_M |s| + u_c s \end{aligned} \quad (20)$$

با توجه به رابطه (۱۱) می‌توانیم رابطه بالا را ساده کرده و بازنویسی کنیم که به صورت مقابل در خواهد آمد:

$$\dot{V}_1 \leq -ks^2 + \tilde{W}^T \Psi(z)s + \varepsilon_M |s| - \hat{\zeta} |s| \quad (21)$$

می‌توانیم رابطه (۲۱) را به صورت زیر بازنویسی کنیم:

$$\dot{V}_1 \leq -ks^2 + \tilde{W}^T \Psi(z)s + |s|(\varepsilon_M - \hat{\zeta}) \quad (22)$$

اکنون با توجه به رابطه‌های (۱۷) و (۱۸) می‌توانیم رابطه (۲۲) را به صورت زیر بازنویسی کنیم:

$$\dot{V}_1 \leq -ks^2 + \tilde{W}^T \Psi(z)s + \tilde{\zeta} |s| \quad (23)$$

تا این مرحله  $\dot{V}_1$  محاسبه شد و در مرحله بعد نیاز داریم تا محاسبه شود که به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \leq -ks^2 + \tilde{W}^T \Psi(z)s \\ &\quad + \tilde{\zeta} |s| - [\tilde{W}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{W}} + \frac{1}{\Upsilon_{\zeta}} \dot{\tilde{\zeta}}] \end{aligned} \quad (24)$$

حال می‌توان رابطه (۲۴) را به صورت مقابل بازنویسی کرد:

$$\dot{V} \leq -ks^2 + \tilde{W}^T [\Psi(z)s - \Gamma^{-1} \dot{\tilde{W}}] + \tilde{\zeta} |s| - \frac{1}{\Upsilon_{\zeta}} \dot{\tilde{\zeta}} \quad (25)$$

(۱۴)

$$u_d^* = \frac{f(x)+v}{g(x)} - \frac{\dot{g}(x)}{2g^2(x)} s = W^{*T} \Psi(z) + \varepsilon \quad (7)$$

$$Z = [x^T, v, s]$$

به طوری که  $\Psi(z) = [\Psi_1(z), \Psi_2(z), \dots, \Psi_q(z)]$  بردار شبکه عصبی و

$W^{*T}$  بردار وزنه‌های ایده آل شبکه عصبی مورد نظر می‌باشد. همچنین در رابطه (۷)  $\varepsilon$  خطای شبکه عصبی می‌باشد به طوری که در رابطه زیر صدق می‌کند:

$$|\varepsilon| \leq \varepsilon_M, \varepsilon_M > 0 \quad (8)$$

بردار وزنه‌های ایده آل شبکه عصبی  $W^{*T}$  نامعلوم است، بنابراین نیاز به تخمین زدن دارد که در اینجا  $\hat{W}$  را تخمینی از  $W^*$  در نظر می‌گیریم. در این صورت خطای تخمین بردار وزنها به صورت زیر می‌باشد:

$$\tilde{W} = W^* - \hat{W} \quad (9)$$

با به کار بردن روش کنترل تطبیقی-عصبی می‌توانیم سیستم پیچیده بازوی مکانیکی روبات را کنترل کنیم به طوری که با اعمال گشتاورهای مطلوب به مفصل‌های روبات، مجری نهایی بازوی مکانیکی در مسیر مطلوب هدایت شود. قانون کنترل به صورت زیر پیشنهاد می‌شود [۲۴]:

$$u = -ks - \hat{W}^T \Psi(z) + u_c \quad (10)$$

که در رابطه (۱۰) داریم:

$$u_c = -\hat{\zeta} \operatorname{sgn}(s) \quad (11)$$

در رابطه (۱۰)،  $\hat{W}^T \Psi(z)$  نشان‌دهنده شبکه عصبی RBNN<sup>۹</sup> به کار گرفته شده برای تخمین در کنترل کننده مورد نظر می‌باشد و  $\hat{\zeta} \operatorname{sgn}(s)$  تخمین اثر کوپلینگ در سیستم می‌باشد.

با توجه به توضیحات بالا می‌توانیم قوانین تطبیقی زیر را برای سیستم مورد نظر در نظر بگیریم:

$$\dot{\tilde{W}} = \Gamma_W \Psi(z)s \quad (12)$$

$$\dot{\tilde{\zeta}} = \Upsilon_{\zeta} |s| \quad (13)$$

که در روابط بالا  $\Gamma_W$  و  $\Upsilon_{\zeta}$  اعداد ثابت و مثبت می‌باشند.

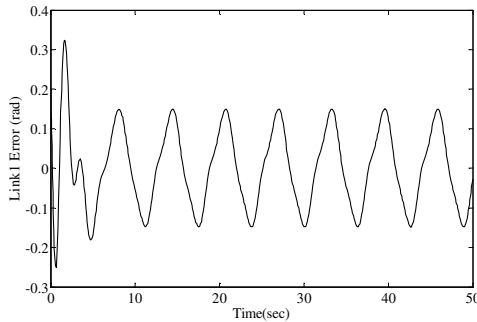
**قضیه:** معادله دینامیکی خطای (۳) که جهت بیان معادلات بازوی مکانیکی با مفصل صلب و دارای نامعینی جرمی معرفی شده است را در نظر بگیرید. با اعمال قانون کنترل (۱۰) و با در نظر گرفتن قوانین تطبیقی (۱۲) و (۱۳) اثبات می‌شود که کلیه خطاهای تعقیب در همه زیر سیستم‌ها به صورت مجانبی به سمت صفر می‌رود و کلیه سیگنالها در سیستم حلقه بسته محدود باقی می‌مانند.

### ۲-۳- اثبات پایداری کنترل کننده تطبیقی-عصبی

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

$$u_t = 5000 + 5 \int_0^t edt + 500 \frac{de}{dt} \quad (31)$$

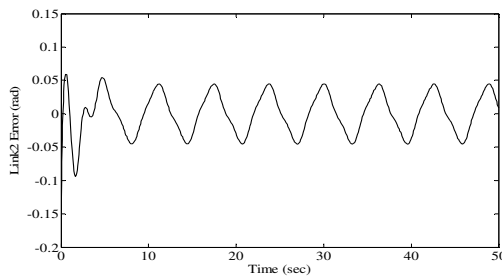
در شبیه سازی های زیر شرایط اولیه برای لینکها  $[-0.1, 0.1, 0.2]$  و بر حسب رادیان می باشد. نتایج شبیه سازی برای کنترل کننده کلاسیک در شکل های زیر نشان داده شده است.



شکل ۱- خطای بازوی اول با استفاده از کنترل کننده PID

Fig. (1): Error of link 1 using PID controller

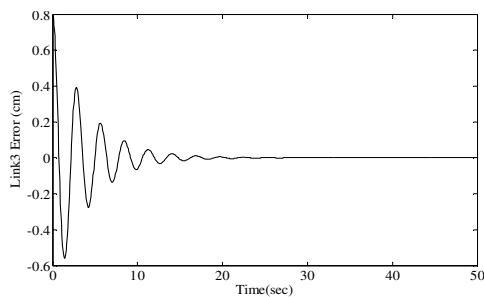
همان طور که دیده می شود کنترل کننده PID می تواند سیستم را کنترل کند اما خطای ردیابی به صفر نمی رسد و به طور مداوم حول نقطه صفر نوسان می کند.



شکل (۲): خطای بازوی دوم با استفاده از کنترل کننده PID

Fig. (2): Error of link 2 using PID controller

همانند شکل مربوط به بازوی اول کنترل کننده PID می تواند سیستم را کنترل کند اما خطای ردیابی به صفر نمی رسد و به طور مداوم حول نقطه صفر نوسان می کند.



شکل (۳): خطای بازوی سوم با استفاده از کنترل کننده PID

Fig. (3): Error of link 3 using PID controller

حال با توجه به قوانین تطبیقی، رابطه (۲۲) را می توان به صورت مقابل نوشت:

$$\dot{V} \leq -ks^2 \quad (26)$$

حال اگر پارامتر  $k$  مثبت در نظر گرفته شود مشتق تابع لیپانف منفی نیمه معین خواهد بود. بنابراین طبق لم باربالات [۲۸] تمامی سیگنالها  $(\hat{W}, S, \xi)$  در سیستم حلقه بسته محدود می باشند و سیگنال خطا به صورت مجانبی به سمت صفر میل می کند و به این ترتیب اثبات قضیه به پایان می رسد.

### ۳- شبیه سازی

در این قسمت هدف پیاده سازی کنترل کننده پیشنهادی بر روی روبات سه محوره SCARA می باشد که در ادامه آورده شده است و مسیر مطلوب برای بازوی مکانیکی نیز به شرح زیر می باشد:

$$x_{d1} = x_{d2} = \sin(2\pi t), x_{d3} = u(t) \quad (27)$$

معادله سیستم به صورت زیر می باشد [۲۶]:

$$\tau_1 = \left[ \left( \frac{m_1}{3} + m_2 + m_3 \right) a_1^2 + (m_2 + 2m_3) a_1 a_2 C_2 + \left( \frac{m_2}{3} + m_3 \right) a_1^2 \ddot{q}_1 - \left( \frac{m_2}{2} + m_3 \right) a_1 a_2 C_2 + \left( \frac{m_2}{3} + m_3 \right) a_2^2 \ddot{q}_2 - a_1 a_2 S_2 [(m_2 + 2m_3) \dot{q}_1 \dot{q}_2 - \left( \frac{m_2}{2} + m_3 \right) \dot{q}_2^2] \right] \ddot{q}_1 \quad (28)$$

$$\tau_2 = - \left[ \left( \frac{m_2}{2} + m_3 \right) a_1 a_2 C_2 + \left( \frac{m_2}{3} + m_3 \right) a_2^2 \right] \ddot{q}_1 + \left( \frac{m_2}{3} + m_3 \right) a_2^2 \ddot{q}_2 + \left( \frac{m_2}{3} + m_3 \right) a_1 a_2 S_2 \dot{q}_1^2 \quad (29)$$

$$\tau_3 = m_3 \ddot{q}_3 - gm_3 \quad (30)$$

در شبیه سازیهای انجام شده مقادیر پارامترهای مربوط به بازوی های مکانیکی به صورت زیر می باشند.

- جرم هر یک از بازوها به شرح زیر می باشد:

$$m_1 = m_2 = m_3 = 0.1 \text{ kg}$$

- اینرسی حرکتی بازوها نیز به شرح زیر هستند:

$$I_{zz1} = 0.017 \text{ kg/m}^2, I_{zz2} = 0.00314 \text{ kg/m}^2,$$

$$I_{zz3} = 0.00011 \text{ kg/m}^2$$

- شتاب گرانش جاذبه نیز برابر با  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  است.

- در روابط بالا  $a_1 = a_2 = 0.5 \text{ m}$  طول بازوها می باشند،

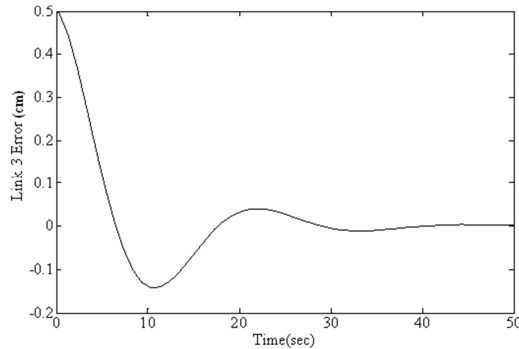
$$(S = \sin, C = \cos)$$

- در شبیه سازی های زیر شرایط اولیه برای همه لینکها  $[0, 0, 0]$  و بر حسب رادیان می باشد.

### ۳-۱- شبیه سازی با کنترل کننده کلاسیک

برای بیان کارآمدی سیستم ابتدا از یک کنترل کننده کلاسیک برای کنترل روبات مورد نظر استفاده می شود که معادله کنترل کننده آن به صورت زیر می باشد:

با توجه به شکل بالا می‌توان گفت که سیستم پس از مدت زمان ۳۳ ثانیه پایدار می‌شود اما میزان فرجهش آن زیاد می‌باشد.



شکل (۶): خطای بازوی سوم با استفاده از کنترل کننده تطبیقی - موجک  
Fig. (6): Error of link 3 using the Adaptive-wavelet controller

با توجه به شکل بالا می‌توان گفت که عیب اصلی زمان نشست سیستم می‌باشد که پس از تقریباً ۴۸ ثانیه پایدار می‌شود. برای مقایسه بهتر می‌توان جدول زیر را بررسی نمود:

Table (2): Comparing output of system using Adaptive-wavelet controller

جدول (۲): مقایسه خروجی سیستم با استفاده از کنترل کننده تطبیقی - موجک

زمان اوج (ثانیه)	زمان نشست (ثانیه)	ماکزیمم فرجهش (زاویه)	بازوی اول
2	19	0.0529	بازوی اول
3.5	33	0.0225	بازوی دوم
0	48	0.16	بازوی سوم

### ۳-۳- به کارگیری کنترل کننده تطبیقی - عصبی پیشنهادی

در این قسمت کنترل کننده پیشنهادی در بخش قبل برای کنترل بازوی مکانیکی SCARA سه محوره مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در روابط ۱۲ و ۱۳ ضرایب طراحی را با مقادیر  $k=1$  و  $\Gamma_c = \Gamma_w = 500$  در نظر می‌گیریم و تابع فعالیت شبکه عصبی یک تابع گوسین و به صورت زیر است:

$$\phi_{w_j} = \exp(-\|z - c_{w_j}\|^2 / \sigma_{w_j}^2) \quad (32)$$

که در رابطه بالا  $c$  مرکزهای تابع فعالیت و  $\sigma$  انحراف های معیار و همچنین داریم:

$$c_{w_j} = [c_{w_j1}; c_{w_j2}; c_{w_j3}; c_{w_j4}]^T \quad (33)$$

که به صورت یکسان در بازه‌های  $[-1,1]$ ,  $[-5,5]$ ,  $[-35,35]$ ,  $[-5,5]$  می‌باشد. در شبیه سازی‌های زیر شرایط اولیه برای لینک‌ها  $[0, -0.5, 0]$  و بر حسب رادیان می‌باشد و همچنین تعداد نوروں‌های شبکه عصبی 40 می‌باشد.

نتایج شبیه سازی در شکل‌های زیر آمده است.

در شکل سوم می‌توان دید که کنترل کننده PID دارای فرجهش بالایی می‌باشد که می‌تواند به سیستم آسیب بزند.

با توجه به شکل‌های بالا دیده می‌شود کنترل کننده کلاسیک به خوبی قادر به کنترل سیستم مورد نظر نمی‌باشد و اگرچه سیستم پایدار است اما خطای حالت ماندگار آن زیاد می‌باشد. برای مقایسه بهتر می‌توان جدول زیر را بررسی کرد:

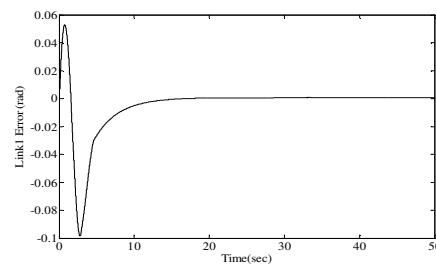
Table (2): Comparing output of system using PID controller  
جدول (۱): مقایسه خروجی سیستم با استفاده از کنترل کننده PID

زمان اوج (ثانیه)	زمان خیزش (ثانیه)	زمان نشست (ثانیه)	ماکزیمم فرجهش (زاویه)	بازوی اول
1.6	Inf	Inf	0.3239	بازوی اول
1.6	Inf	Inf	0.0590	بازوی دوم
2.4	1.8	26.5	1.0876	بازوی سوم

در مرحله بعد یک کنترل کننده هوشمند برای کنترل سیستم مورد نظر استفاده خواهد شد.

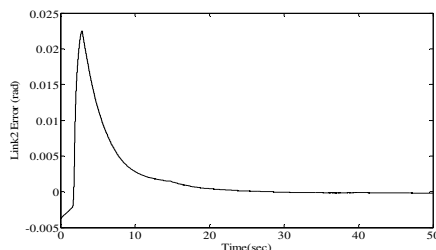
### ۳-۲- به کارگیری کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر موجک

برای بیان کارکرد مطلوب کنترل کننده پیشنهادی در این قسمت کنترل کننده تطبیقی - موجک [۲۷] برای کنترل سیستم مشابه به کار گرفته می‌شود. همچنین در شبیه سازی‌های زیر شرایط اولیه برای لینک‌ها  $[0, -0.05, 0.5]$  و بر حسب رادیان می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل کننده موردنظر در زیر آمده است:



شکل (۴): خطای بازوی اول با استفاده از کنترل کننده تطبیقی - موجک  
Fig. (4): Error of link 1 using the Adaptive-wavelet controller

همان طور که در شکل بالا دیده می‌شود سیستم پس از مدت زمان نسبتاً کوتاهی پایدار می‌شود اما دارای فرجهش و فروجهش زیادی می‌باشد که یکی از معایب آن می‌باشد.



شکل (۵): خطای بازوی دوم با استفاده از کنترل کننده تطبیقی - موجک  
Fig. (5): Error of link 2 using the Adaptive-wavelet controller

عدم حضور فراجاهش یکی از بزرگترین مزایای سیستم می‌باشد و همچنین زیر سیستم پس از ۱۱ ثانیه به حالت تعادل می‌رسد که این نیز یکی دیگر از مزایای سیستم می‌باشد. همان طور که دیده می‌شود کنترل کننده پیشنهادی در بخش قبل دارای عملکرد مطلوبی می‌باشد و خطا بسیار سریعتر از کنترل کننده کلاسیک به صفر همگرا می‌شود.

#### ۴- نتیجه گیری

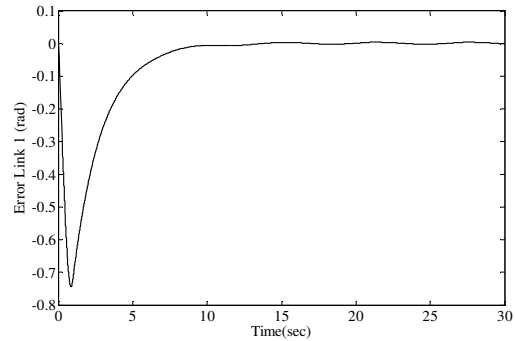
در این مقاله یک کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر شبکه‌های عصبی پایه شعاعی، که برتری آن به کارهای مشابه صورت گرفته این است که در آن فقط از یک شبکه عصبی برای طراحی کنترل کننده استفاده شده، همچنین از تعداد قوانین تطبیقی کمتری نسبت به کارهای مشابه استفاده شده (که خود این موضوع باعث شده حجم محاسبات به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کند و زمان رسیدن به پاسخ سریعتر باشد که باعث می‌شود همگرایی سریع کنترل کننده صورت گیرد) برای کنترل یک بازوی مکانیکی سه محوره SCARA ارائه شده است. از جمله نوآوری‌ها و برتری این پایان نامه نسبت به کارهای مشابه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- کنترل کننده طراحی شده در این مقاله قابل استفاده برای برای روبات های صنعتی دیگر با هر تعداد بازو می‌باشد.
- ۲- در این مقاله کنترل کننده پیشنهادی دارای تعداد قوانین تطبیقی کمتری نسبت به موارد مشابه در مقالات دیگر می‌باشد که باعث کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت پاسخ زمانی می‌شود.
- ۳- در نظر گرفتن ترم نامعینی در کنترل کننده برای غلبه بر عدم قطعیت‌های موجود.

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. همچنین اثبات پایداری با توجه به تابع لیاپانف ارائه شده بسیار ساده‌تر می‌باشد. در ضمن از کنترل کننده کمکی نیز برای کنترل سیستم استفاده نشده است. نتایج شبیه‌سازی بیان کننده کارآمدی کنترل کننده پیشنهادی می‌باشد.

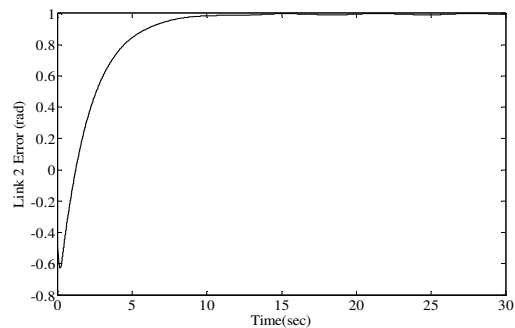
#### پی نوشت:

- 1- Adaptive
- 2- Neural Network
- 3- Lyapunov
- 4- Tracking Error
- 5- Pseudo Controller
- 6- Radial Basis Neural network (RBNN)
- 7- Filtered error



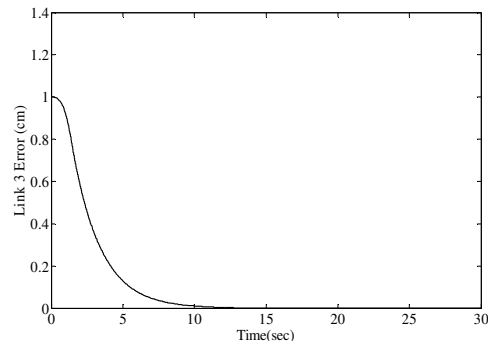
شکل (۷): خطای بازوی اول با استفاده از کنترل کننده تطبیقی - عصبی  
Fig. (7): Error of link 1 using the Neuro- Adaptive Control

با توجه به شکل بالا می‌توان گفت که خروجی بازوی اول بسیار مطلوب می‌باشد زیرا سیستم پس از تقریباً ۱۵ ثانیه با پایداری رسیده و همچنین دارای هیچ گونه فراجهشی نمی‌باشد.



شکل (۸): خطای بازوی دوم با استفاده از کنترل کننده تطبیقی - عصبی  
Fig. (8): Error of link 2 using the Neuro- Adaptive Control

در این شکل نیز به وضوح دیده می‌شود که سیستم بسیار سریعتر از دو کنترل کننده دیگر پایدار می‌شود و خروجی آن دارای هیچ گونه فراجهشی نمی‌باشد.



شکل (۹): خطای بازوی سوم با استفاده از کنترل کننده تطبیقی - عصبی  
Fig. (9): Error of link 3 using the Neuro- Adaptive Control

با توجه به شکل می‌توان دید که ورودی به سیستم اعمال می‌شود و سیستم بدون وجود فراجاهش به سمت پایدار شدن حرکت می‌کند که

## References

- [1] A. Visioli, G. Legnani, "On the trajectory tracking control of industrial SCARA robot manipulators", *IEEE Trans. Ind. Elec.*, Vol. 49, No. 1, pp. 224-232, 2002
- [2] W. Yu, M.A. Moreno-Armendariz, "Robust visual serving of robot manipulators with neuro compensation", *Jou. Franklin Institute*, Vol. 342, pp. 824-838, 2005
- [3] C. Liu, C.C. Cheah, J.J.E. Slotine, "Adaptive Jacobian tracking control of rigid-link electrically driven robots based on visual task space information", *Jou. of Automatica*, 42: 1491-1501, 2006
- [4] C. Abdallah, D. Dawson, P. Dorato, M. Jamshidi, "Survey of robust control for rigid robots", *IEEE Trans. on Con. Sys. Mag.*, Vol. 11, No. 2, pp. 24-30, 1991.
- [5] M.J. Corless, "Control of uncertain nonlinear systems. *Trans. of Asme. Journal of Dynamic Systems*", *Measurement and Con.*, Vol. 115, No. 2B, pp. 362-372, 1993
- [6] Z. Qu, D.M. Dawson, "Robust tracking control of robot manipulators", *IEEE Press, Inc.*, New York, USA 1996.
- [7] H.G. Sage, M.F. De Mathelin, E. Ostertag, "Robust control of robot manipulators A survey", *International Journal of Control*, 72 (6): 1498-1522, 1999
- [8] M.W. Spong, M. Hutchinson, "Vidyasagar, robot modeling and control", *JohnWiley and Sons Inc.*, USA, 2006.
- [9] W.E. Dixon, "Adaptive regulation of amplitude limited robot manipulators with uncertain kinematics and dynamics", *Proceedings of American Control Conference*. Boston, MA, pp: 3844-3939, 2004
- [10] C.C. Cheah, M. Hirano, S. Kawamura, S. Arimoto, "Approximate Jacobian control with task-space damping for robot manipulators", *Journal of IEEE Trans. on Automatic Control*, 49 (5): 752-757, 2004..
- [11] C.C. Cheah, M. Hirano, S. Kawamura, S. Arimoto, "Approximate Jacobian control for robots with uncertain kinematics and dynamics", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2003.
- [12] M.R. Soltanpour, M.M. Fateh, "Sliding mode robust control of robot manipulator in the task space by support of Feedback Linearization and Back Stepping Control" *World Applied Sciences Journal* 6 (1): 70-76, 2009.
- [13] C. Canudas de Wit, J.J. Slotine, "Sliding observers for robot manipulators", in *IFAC Symp. Nonlinear Contr. Syst. Design*, Capri, Italy, 1989.
- [14] C. Canudas de Wit, K.J. Astrom, N. Fixot, "Trajectory tracking in robot manipulators via nonlinear state estimate feedback", in *MTNS Conf.*, Amsterdam, The Netherlands, 1989.
- [15] Y.C. Chang, H.M. Yen., "Design of a robust position feedback tracking controller for flexible-joint robots ", *IEEE Journals & Magazines, Control Theory & Applications*, Vol. 5, pp. 351 - 363, 2011.
- [16] S. Nicosia, A. Tornambe, P. Valigi, "Observers in control of rigid robots", in *Advanced Robot Control—Proc. Int. Workshop Nonlinear and Adaptive Control: Issues in Robotics*, Grenoble, France, 1990, pp. 273–284.
- [17] H. Berghuis, Nijmeijer, "A passivity approach to controller observer design for robots", *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 10, pp. 740–754, 1994.
- [18] H. Berghuis, "Model-based robot control: From theory to practice", *Ph.D. dissertation*, *Elect. Eng. Dep.*, *Univ. Twente*, The Netherlands, 1993.
- [19] Y. Sung Jin, J. Bae Park, Yoon Ho Choi, "Adaptive output feedback control of flexible-joint robots using neural networks: Dynamic surface design approach", *IEEE Trans. on Neural Net.*, Vol. 19, pp. 1712 – 1726, 2008
- [20] M. Tsuda, Y. Nakamura, T. Higuchi, "Adaptive control for magnetic servo levitation without velocity measurement", in *Proc. Japan-USA Symp. Flexible Aut.*, Kyoto, Japan, vol. 2, pp. 625–630, 1990.
- [21] M.C. Popescu, I. Borcosi, O. Olaru, "The Simulation hybrid fuzzy Control of Robot", *wseas Trans. on systems and Control*, 2008.
- [22] K. Kaneko, R. Horowitz, "Repetitive and adaptive control of robot manipulators with velocity estimation", *IEEE Trans. on Robotics and Aut.*, Vol. 13, No. 2, APRIL 1997.
- [23] J.T. Spooner, K.M. Passino, "Decentralized adaptive control of nonlinear systems using radial basis neural networks", *IEEE Trans. on Aut. Con.*, Vol. 44, No. 11, Nov. 1999.
- [24] S. Huang, K.K. Tan, T.H. Lee, "Decentralized control design for large-scale systems with strong interconnections using neural networks", *IEEE Trans. on Aut. Con.*, Vol. 48, pp. 805-810, May 2003.
- [25] B. Karimi, M. Bagher Menhaj, "Non-affine nonlinear adaptive control of decentralized large-scale systems using neural networks", *Information Sciences* 180, pp. 3335–3347, 2010.
- [26] R. Shiling, "Study and control robotic rinciples", Mansor Abasi, Naghshe Chalipa publication 1379.
- [27] Sh. Tabrizi, "Adaptive control of flexible 2 linked mechanical robots with indefinite grime and single disarray path, using wavelet networks", *MA Thesis* 1391.
- [28] Z. Sloutin, W. Li, "Applied nonlinear control" *Prentice Hall*, 1991.