مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۹، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۴، صفحه ۵۰-۳۷

کنترل آشوب مبتنی بر ترکیب کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند با یک سطح لغزشی جدید و سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی

صفا خاری[۱]، زهرا رحمانی[۲]، بهروز رضایی[۳]، سید جلیل ساداتی[۴]

[۱] دانشجوی دکترا مهندسی برق کنترل، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، s.khari@stu.nit.ac.ir

[۲] استادیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، zrahmani@nit.ac.ir

[۳] استادیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، brezaie@nit.ac.ir

[۴] استادیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، jsadati@nit.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۴/۳/۲۰، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۴/۷/۲۶)

چکیده: در این مقاله کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند با یک سطح لغزشی جدید مبتنی بر سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی، برای کنترل آشوب پیشنهاد می‌گردد. ابتدا برای یک کلاس از سیستم‌های دارای آشوب با نامعینی و اغتشاش یک کنترل‌کننده مبتنی بر کنترل مد لغزشی ترمینال بر اساس تئوری لیاپانوف با یک سطح لغزش جدید طراحی می‌گردد. سطح لغزش پیشنهادشده در این روش، ترکیبی از سطح لغزش مد لغزشی ترمینال متداول و انتگرال تابعی غیرخطی از حالات سیستم است و هدف از انتخاب آن، داشتن سرعت پاسخ مناسب و کاهش چترینگ در کنار مقاومت در برابر اغتشاشات خارجی است. سپس با فرض این‌که قسمتی از دینامیک سیستم نامعلوم باشد و فقط بخشی از اطلاعات ورودی- خروجی آن در دسترس است، از سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی برای تقریب دینامیک نامعلوم سیستم براساس داده‌های ورودی- خروجی استفاده می‌گردد. به‌منظور بهبود عملکرد روش پیشنهادی، از الگوریتم زنبور عسل جهت انتخاب ضرایب کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی استفاده می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده کارایی این کنترل‌کننده از لحاظ سرعت مناسب، حذف چترینگ، پاسخ گذرای مطلوب و عملکرد قابل قبول در مواجهه با عدم قطعیت‌های موجود در مدل سیستم می‌باشد.

کلمات کلیدی: آشوب، کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی، سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی، الگوریتم زنبور، چترینگ

Chaos Control based on Combination of Integral Terminal Sliding Mode with a New Sliding Surface and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

Safa Khari, Zahra Rahmani, Behrooz Rezaie, Jalil Sadati

Abstract: In this paper, an intelligent integral terminal sliding mode control method with a new sliding surface is proposed based on adaptive neural-fuzzy inference. First, a terminal sliding mode controllerusing a novel sliding surface is designed based on Lyapunov's stability theoremfor controlling a class of chaotic systems in presence of uncertainty and disturbance. The proposed sliding surface is a combination of the conventional terminal sliding surface andintegral of a nonlinear function of the states of the system. The purpose of choosing this surface includes achieving appropriate response speed, removing chattering and robustness against external disturbance. Then,we assume that a nonlinear part of the system is unknown and only input-output data is available. Therefore, an adaptive neuro-fuzzy inference system is used to approximatethe unknown part of the system dynamics.Finally, in order to enhance the performance of the proposed method, the honey bee algorithm is utilizd for selecting the coefficients of integral terminal sliding mode controller. The simulation results show the effectiveness of the controller due to the improved speed,removed chattering,appropriate transient response and satisfactoryperformance in the presence of uncertainties in the system model.

Keywords: Chaos, Terminal sliding mode controller, Adaptive neuro-fuzzy inference system, Honey bee algorithm, Chattering.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]

۱- مقدمه

کنترل پدیده آشوب، به‌علت رفتار پیچیده و ناپایدار آن و کاربردهای فراوان در بسیاری از سیستم‌های صنعتی و در علوم مختلف از جمله شبکه‌های عصبی[۱]، شبکه‌های غیرخطی[۲]، لیزر[۳]و موارد بسیار دیگر، مورد توجه محققان قرار گرفته است. مفهوم آشوب یکی از مفاهیم بنیادی علم نوین است که پدیده‌ای به ظاهر تصادفی و پیچیده است که در باطن طبیعتی قطعی دارد. به عبارت دیگر از یک معادله دیفرانسیل ساده می‌توان رفتارهای بسیار پیچیده‌ای را انتظار داشت. در سالهای اخیر انواع مختلفی از سیستم‌های آشوبناک به‌علت اهمیت زیاد این پدیده، معرفی و بررسی شده‌اند که می‌توان به سیستم‌های آشوب لورنز[۱]، چن[۲] و ... اشاره نمود[۴و۵]. معادلات دیفرانسیل مربوط به این سیستم‌ها به ظاهر ساده می‌نمایند. ولی طبق تجزیه و تحلیل مربوط به این سیستم‌ها در مراجع مربوطه، دارای رفتار آشوبی و پیچیده می‌باشند.

سیستم‌های آشوبی دارای ویژگی‌های مختلفی هستند که یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آشوب حساسیت زیاد به شرایط اولیه است. در سیستم‌های آشوبناک، تفاوت بسیار کوچکی در شرایط اولیه باعث تفاوت بسیار در وضعیت آن در لحظات بعد خواهد شد. لذا کنترل آن از اهمیت زیادی برخوردار است. روش‌های زیادی برای کنترل پدیده آشوب معرفی گردیده است که با توجه به اهداف کنترلی مورد نظر می‌توان از آن‌ها بهره جست. روش‌هایی مانند کنترل مد لغزشی، کنترل فازی، کنترل عصبی و .... از جمله کنترل‌کننده‌هایی می‌باشند که کاربردهای زیادی در این حوزه دارند.

روش کنترل مد لغزشی[۳] یک روش ساده برای کنترل مقاوم سیستم‌های غیرخطی می‌باشد که روشی مناسب برای مسئله حفظ پایداری و عملکرد یکنواخت در رویارویی با عدم قطعیت در مدل‌سازی است. کنترل مد لغزشی ویژگی‌های قابل توجهی در کنترل سیستم‌ها از جمله سادگی طراحی، پیاده‌سازی آسان و کم‌هزینه و مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت غیرساختاریافته دارد [۶].

در سال‌های اخیر روش مد لغزشی به شاخه‌های زیادی تقسیم گشته است. ایده کنترل مد لغزشی با تعریف یک سطح لغزش همراه است که با کنترل مناسب بتوان سیستم را به روی آن همگرا نمود و پایداری سیستم را تضمین کرد. جهت بهبود این روش از نظر کاهش پدیده چترینگ و نیز افزایش پایداری زمان محدود، روش‌های مشابه دیگری از این شاخه پدید آمده است. از روش‌های شاخه مد لغزشی می‌توان به مد لغزشی ترمینال[۴]، مد لغزشی انتگرالی[۵] و یا ترکیب‌های دیگری از این قبیل اشاره نمود که هرکدام از آن‌ها با تعریف سطح لغزشی خاص خود، کنترل سیستم را میسر می‌سازند.

همانطور که گفته شد، مد لغزشی ترمینال روشی برای کنترل سیستم بر پایه تعریف سطح لغزش خاص خود است که در این روش برخلاف روش مد لغزشی، سطح لغزش به‌صورت غیرخطی و نمایی تعریف می‌شود و به همین علت، سرعت بیشتری در همگرایی حالات سیستم به روی سطح لغزش دارد[۷]. همچنین این روش خود به شاخه‌های مختلفی تقسیم‌بندی شده است که هرکدام از این شاخه‌ها با یک هدف کنترلی مشخص ارائه شده است[۸]. با گسترش روش کنترلی مد لغزشی ترمینال، زیرشاخه‌های مختلفی از آن پدید آمد که هر کدام اهداف متفاوتی را دنبال می‌کردند. برای مثال در مرجع [۹] مد لغزشی ترمینال مرتبه اول بر روی سیستم های غیرخطی مرتبه دوم اعمال گردید. همچنین در [۱۰] یو و مان روش مد لغزشی ترمینال را به سیستم‌های تک ورودی- تک خروجی خطی و مرتبه بالا تعمیم دادند. سپس مد لغزشی ترمینال کلی برای سیستم های چند ورودی- چند خروجی خطی معرفی شد. سپس یو و مان مد لغزشی ترمینال سریع[۶] را معرفی کردند که توانایی همگرایی سریع حالات را بر روی سطح لغزش داشت[۱۲، ۱۱]. در[۱۴، ۱۳] مد لغزشی ترمینال نامنفرد[۷] معرفی شد که باعث اجتناب از رخ دادن تکینی می‌شود. همچنین در سال‌های بعد مد لغزشی ترمینال با ترکیب مفاهیم قبلی بدست آمده معرفی شد که می‌توان به مد لغزشی ترمینال سریع-نامنفرد[۸] برای سیستم‌های مرتبه دوم اشاره کرد که هردو ویژگی گفته شده در این کنترل‌کننده وجود دارد[۸]. همچنین در سالهای بعد و در[۷] روش مد لغزشی ترمینال نامنفرد با همگرایی زمان محدود برای دو کلاس از سیستم های غیرخطی و غیرخودگردان مرتبه بالا ارائه شد.

به عنوان جمع‌بندی مزایا و معایب روش‌های مد لغزشی ترمینال، می‌توان گفت روش‌های نامنفرد، از ویژگی همگرایی زمان محدود برخوردار نیستند و سرعت همگرایی کمی در مقایسه با روش‌های مد لغزشی ترمینال سریع دارند. همچنین روش مد لغزشی ترمینال سریع دارایک عیب مهم می‌باشد که همان احتمال وقوع تکینی در کنترل سیستم است. همچنین روش‌های کنترل مد لغزشی ترمینال سریع-نامنفرد نیز اغلب برای سیستم‌های مرتبه دوم معرفی گردیده است و برای سیستم‌های مرتبه بالا، روش کنترلی در این شاخه معرفی نشده است. همچنین در روش ارائه‌شده در [۷]، علیرغم معرفی روش کنترلی نامنفرد و زمان محدود برای سیستم‌های مرتبه بالا، اثر نامعینی و اغتشاش غیرساختاریافته جمعی سازگار در نظر گرفته نشده است که در مرجع [۱۵] این مشکل نیز برطرف گردیده است. اما با وجود تمام مزایایی که روش‌کنترل مد لغزشی ترمینال معرفی‌شده در[۱۵] از آن برخوردار است، که از مهمترین آنها می‌توان به همگرایی زمان محدود، در نظر گرفتن اثر نامعینی و اغتشاش غیرساختاریافته و عمومی بودن روش برای سیستم‌های مراتب بالا اشاره نمود، از عیب‌های عمده این روش وجود پدیده چترینگ در این روش کنترلی می‌باشد که این پدیده در تمام روش‌های مد لغزشی و مد

[1] Lorenz system
[2] Chen system
[3] Sliding mode control
[4] Terminal sliding mode control
[5] Integral sliding mode control
[6] Fast terminal sliding mode control
[7] Nonsingular terminal sliding mode control
[8] Nonsingular fast terminal sliding mode control

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]

لغزشی ترمینال نیز دیده می‌شود و ناشی از وجود قسمت ناپیوسته در کنترل سیستم و سوئیچینگ‌های فرکانس بالای سیگنال کنترل می‌باشد که رفع این پدیده در سیستم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۶]. بنابراین با به‌کارگیری روش‌های مد لغزشی ترمینال و با استفاده از ویژگی‌های مثبتی که در این روش‌ها وجود دارد در کنار رفع عیب مهم آن که همان پدیده چترینگ است، می‌توان سیستم کنترلی مناسبی را در اختیار گرفت.

در این مقاله به‌منظور کنترل پایدارسازی مطلوب حالات سیستم، در حضور عواملی همچون عدم قطعیت غیرساختاریافته، اغتشاش خارجی و همچنین کاهش پدیده چترینگ در کنار برخورداری از سرعت پاسخ مناسب، کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند[1] طراحی می‌شود که سطح لغزش آن در این روش برای اولین بار در این مقاله پیشنهاد گردیده است.ابتدا به‌منظور پایدارسازی سیستم، بر اساس تئوری لیاپانوف یک کنترل‌کننده مبتنی بر کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی پیشنهاد می‌گردد که سطح لغزش پیشنهادشده در این روش، ترکیبی از سطح لغزش مد لغزشی ترمینال و انتگرال تابعی غیرخطی از حالات سیستم در نظر گرفته می‌شود که برای اولین بار در این مقاله پیشنهاد شده است و هدف از انتخاب آن،داشتن سرعت پاسخ مناسب، کاهش چترینگ در کنار مقاومت در برابر اغتشاشات خارجی است.به علاوه به منظور بهبود در حالتی که بخشی از دینامیک سیستم نامعلوم است و فقط به اطلاعات ورودی-خروجی آن دسترسی داریم،این کنترل‌کننده با سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی[2](ANFIS) برای اولین بار در این مقاله ترکیب می‌گردد.سیستم استنتاج شبکه فازی- عصبی تطبیقی به‌منظور تقریب بخشی از دینامیک سیستم که نامعلوم است، به‌کار برده می‌شود و با تقریب آن، کنترل‌کننده مناسب جهت پایدارسازی در سیستم آشوب کولِت که می‌تواند بیانگر یک کلاس خاص از سیستم‌های غیرخطی و در عین حال دارای آشوب باشد، ارائه می‌گردد. به‌منظور بهبود عملکرد کنترلی و صرفه جویی در زمان طراحی، از الگوریتم زنبور عسل جهت انتخاب ضرایب کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی استفاده خواهد شد. در این الگوریتم امکان جستجوی سراسری در هر تکرار وجود دارد و این مزیت باعث می‌شود که علاوه بر نقاط بهینه که در هر تکرار بدست می‌آید، الگوریتم به‌طور مجدد نقاط جدیدی در کل فضای جستجو را تولید نماید و همواره در کل فضا به‌دنبال پاسخ مطلوب باشد. بنابراین امکان گرفتار شدن آن در حداقل‌های محلی بسیار کم می‌باشد که از نقاط قوت این الگوریتم می‌باشد.

از مزایای این روش می‌توان به سرعت بالای همگرایی و پاسخ بدون چترینگ آن اشاره نمود که به علت انتخاب سطح لغزش جدید میسر گردیده است. همچنین به علت اعمال شبکه استنتاج فازی- عصبی تطبیقی به‌منظور تقریب دینامیک نامعلوم، روش پیشنهادی قادر به پایدارسازی در حضور عدم قطعیت‌های موجود در مدل سیستم و اغتشاشات ناگهانی است و پاسخی مناسب با نوسانات بسیار کم تولید می‌نماید.در حقیقت با طراحی این کنترل‌کننده ترکیبی هوشمند، سعی بر این است که تمام اهداف کنترلی مطلوب از جمله زمان نشست حالات سیستم، پاسخ گذرا، مسئله چترینگ و پاسخ سیستم در حضور عدم قطعیت‌های موجود، بهبود یابد. به‌منظور مقایسه‌ای میان روش کنترلی مطرح‌شده در این مقاله و روش‌های کنترل کلاسیک پیشین نظیر مد لغزشی ترمینال، نتایج شبیه‌سازی مربوط به اعمال روش کنترلی مد لغزشی ترمینال بر روی سیستم کولِت نیز آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی روش‌های کنترلی ذکرشده بر روی سیستم کولِت، نشان‌دهنده کارایی و عملکرد مناسب کنترل‌کننده طراحی‌شده در این مقاله خواهد بود.

ساختار مقاله به این صورت می‌باشد که در بخش ۲ سیستم تحت مطالعه توصیف می‌گردد. در بخش ۳ توضیحات مربوط به کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند پیشنهادی آورده می‌شود. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد و همچنین بخش ۵ شامل نتیجه‌گیری نهایی از روش تحت مطالعه است.

۲- توصیف سیستم

سیستم کولِت الگویی از یک سیستم آشوبگونه ارائه می‌دهد که در فضای حالت شامل سه معادله دیفرانسیلی غیرخطی وابسته به چهار متغیر مثبت می‌باشد که توسط کولِت و آرندو[3]معرفی شده است [۱۷]. معادله دینامیکی آرندو- کولِت رابطه (۱) را در نظر بگیرید[۱۸].

$$\dddot{X} + b_3\ddot{X} + b_2\dot{X} + b_1X + b_4X^3 = 0 \qquad (۱)$$

بر اساس پژوهش کاملی که توسط کولِت و آرندو انجام شد، این سیستم در برخی از محدوده‌های پارامتری حالات آشوبگونه از خود بروز می‌دهد [۱۷و۱۸]. با در نظر گرفتن مقادیر پارامترها بصورت رابطه (۲) عملکرد آشوبگونه در سیستم به‌وجود خواهد آمد که یکی از مجموعه مقادیر پارامترها به صورت زیر است:

$$b_1 = -0.8, b_2 = 1.1, b_3 = 0.45, b_4 = 1 \qquad (۲)$$

با توجه به رابطه (۱) و با در نظر گرفتن حالات سیستم به‌صورت $X = X_1, \dot{X} = X_2, \ddot{X} = X_3$ ، معادلات دینامیکی این سیستم را می‌توان به‌صورت رابطه (۳) و به‌فرم فضای حالت بازنویسی کرد. همچنین پرتره فاز سیستم در شکل ۱ آورده شده است.

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= X_3 \\ \dot{X}_3 &= -b_1X_1 - b_2X_2 - b_3X_3 - b_4X_1^3 \end{aligned} \qquad (۳)$$

[1] Intelligent integral terminal sliding mode control
[2] Adaptive neuro-fuzzy inference system
[3] Arneodo and Coullet

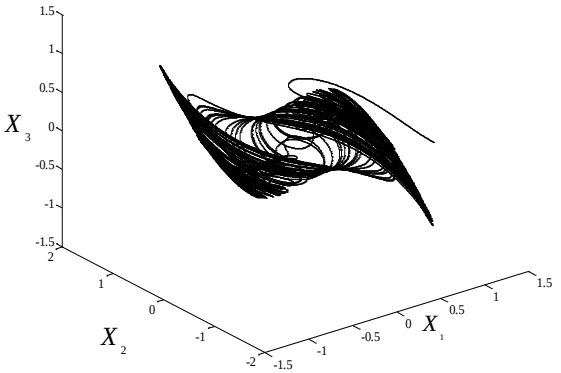
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]

مولفه‌های بردار حالت سیستم، $\underline{X} = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \end{bmatrix}^T$ می‌باشند. نقاط تعادل سیستم توصیف‌شده، به‌صورت $[0 \quad 0 \quad 0]^T$ و $[\pm\sqrt{-\frac{b_1}{b_4}} \quad 0 \quad 0]^T$ و یا در حالت کلی $[X_{1e} \quad 0 \quad 0]^T$ است.

با تشکیل ماتریس ژاکوبین سیستم بصورت $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -b_1 - 3b_4 X_{1e}^2 & -b_2 & -b_3 \end{bmatrix}$ و با در نظر گرفتن پارامترهای معادله (۲)، معادله مشخصه سیستم را به‌صورت رابطه (۴) است.

$$\lambda^3 + 0.45\lambda^2 + 1.1\lambda - 0.8 + 3X_{1e}^2 = 0 \qquad (۴)$$

با تشکیل جدول راث هرویتس می‌توان مشاهده کرد که نقطه تعادل صفر سیستم ناپایدار است. با اضافه شدن سیگنال کنترل جهت کنترل آشوب و پایدارسازی سیستم، به سومین جمله معادلات حالت سیستم و همچنین با در نظر گرفتن مقادیر پارامترهای رابطه (۲)، سیستم (۵) بدست خواهد آمد.



شکل ۱: پرتره فاز سیستم آشوبناک کولِت

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= X_3 \\ \dot{X}_3 &= 0.8X_1 - 1.1X_2 - 0.45X_3 - X_1^3 + u(t) \end{aligned} \qquad (۵)$$

به‌منظور طراحی کنترل‌کننده، سیگنال کنترل $u(t)$، به شکل معادله (۶) در نظر گرفته می‌شود. این انتخاب باعث جدا شدن بخش خطی و غیرخطی سیستم کولت می‌شود.

$$\begin{aligned} u(t) &= u_1(t) + u_2(t) \\ u_1(t) &= X_1^3 \end{aligned} \qquad (۶)$$

بنابراین سیستم می‌تواند به‌صورت رابطه (۷) بازنویسی شود.

$$\dot{\underline{X}} = f(\underline{X}) + b(\underline{X})(u_2(t)) \qquad (۷)$$

که در آن:

$$\underline{X} = [X_1 \; X_2 \; X_3]^T \quad b(\underline{X}) = [0\,0\,1]^T$$
$$f(\underline{X}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.8 & -1.1 & -0.45 \end{bmatrix} \underline{X} \qquad (۸)$$

۳- کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند

روش کنترل مد لغزشی ترمینال روشی قوی از لحاظ مطلوب بودن زمان نشست، پاسخ مناسب به عدم قطعیت و اغتشاش خارجی و سادگی طراحی و اجرا در سیستم است. اما مشکل عمده آن مسئله چترینگ می‌باشد که در سیستم‌های کنترلی ویژگی نامطلوبی است و باید برای کاهش اثرات آن روشی مناسب به‌کار گرفته شود.به علاوه این روش کنترلی، به مدل نسبتاً دقیق از سیستم نیاز دارد، در واقع و در مواردی که سیستم مورد مطالعه دارای دینامیک نامعلوم است، می‌باشد باید از سیستمی جهت تقریب بخش نامعلوم استفاده شود.در این بخش، ابتدا درباره روش مد لغزشی ترمینال بطور مختصر توضیح داده می‌شود. سپس به بررسی روش مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند پرداخته می‌شود.

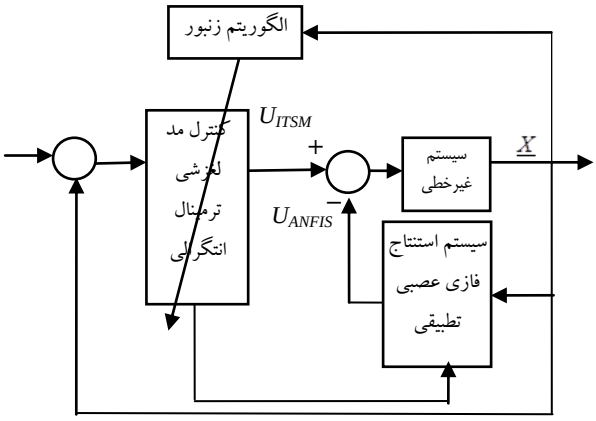
در روش مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند ارائه شده، یک رابطه جدید برای سطح لغزش پیشنهاد شده است که ترکیبی از سطح لغزش مد لغزشی ترمینال و انتگرال تابعی غیرخطی از حالات سیستم است که پارامترهای این رابطه با الگوریتم زنبور محاسبه می‌شود. به‌منظور حفظ تمام اهداف کنترلی ذکرشده مانند زمان نشست مطلوب حالات و حذف چترینگ در کنار بهبود پاسخ گذرای سیستم و پاسخ مناسب در حضور نامعینی‌های موجود در سیستم، ایده ترکیب کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی و سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی مطرح می‌گردد. سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی با هدف تقریب بخش نامعلوم سیستم و حذف برخی از ترم‌های نامعلوم سیستم در مشتق تابع لیاپانوف و غلبه بر نامعینی و اغتشاش طراحی خواهد شد. همچنین دینامیک باقی‌مانده توسط کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی همگرا به نقطه تعادل می‌گردد. شکل ۲ دیاگرام بلوکی مربوط به این کنترل‌کننده ترکیبی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۳-۱ کنترل مد لغزشی ترمینال

در سال‌های اخیر انواع مختلفی از روش‌های کنترل مد لغزشی معرفی شده است که هرکدام مزیت‌هایی نسبت به دیگر روش‌ها دارند. در مقاله [۱۵] برای کنترل آشوب از روشی مبتنی بر کنترل مد لغزشی ترمینال برای کلاسی از سیستم‌های غیرخطی مرتبه سه نامتغیر با زمان در حضور نامعینی و اغتشاش خارجی بهره برده شده است. در این روش سطح لغزش، تابعی نمایی از حالت‌های سیستم می‌باشد که توان‌ها کسری و صورت و مخرج کسرها اعدادی فرد می‌باشند. در روش ارائه-

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]

شده در[۱۵] ، برای سیستم غیرخطی رابطه (۹)، سطح لغزش مطابق معادله (۱۰) تعریف می‌شود.



شکل ۲: دیاگرام بلوکی کنترل‌کننده مد لغزشی تزمینال انتگرالی هوشمند

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= f_1(\underline{X}) \\ &\vdots \\ \dot{X}_{n-1} &= f_{n-1}(\underline{X}) \\ \dot{X}_n &= f_n(\underline{X}) + d(t) + \Delta f + u \end{aligned} \qquad (۹)$$

$$|d(t)| \le \gamma, |\Delta f| \le \alpha$$

$$S(\underline{X}) = X_n - h(X_1, \ldots X_{n-1}) \qquad X(\underline{0}) = 0 \qquad (۱۰)$$

که $h(X_1, \ldots X_{n-1})$ تابعی پیوسته است که شرط نامساوی (۱۱) را برآورده می‌سازد.

$$|h(X_1, \ldots X_{n-1})| < K_0 + L_0 \sum_{i=1}^{n-1} |X_i| \qquad (۱۱)$$

که در آن K_0, L_0 ثابت‌های مثبت هستند.

طبق این روابط، سیستم (۹) طبق قانون کنترل تعریف‌شده در رابطه (۱۲)، در زمانی محدود به سطح لغزش رابطه (۱۰) خواهد رسید.

$$u(t) = -f_n(\underline{X}) + v(t) \qquad (۱۲)$$

که در آن:

$$v(t) = -K_{TSM}\left(1 + \sum_{i=1}^{n-1} |f_i(\underline{X})|\right) \operatorname{sgn}(S) \qquad (۱۳)$$

$$K > \max\{L_0, 1\} \qquad S \ne 0$$

برای سیستم (۹) و $n = 3$، می‌توان توابع $h(\underline{X})$ و $S(\underline{X})$ را به‌صورت روابط (۱۴) و (۱۵) در نظر گرفت.

$$h(X_1, X_2) = -aX_1^{\frac{p_1}{q_1}} - bX_2^{\frac{p_2}{q_2}} \qquad (۱۴)$$

$$S(\underline{X}) = X_3^3 + aX_1^{\frac{p_1}{q_1}} + bX_2^{\frac{p_2}{q_2}} \qquad (۱۵)$$

p_i و q_i اعدادی مثبت و فرد می‌باشند و $p_i < q_i$. همچنین a, b ثابت‌های حقیقی هستند.

در صورتی‌که قانون کنترل به‌صورت رابطه (۱۲) در نظر گرفته شود، سیستم در برابر نامعینی و اغتشاشات وارده پایدار مقاوم خواهد بود[۱۵].

۳-۲ کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند

طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی شامل دو گام اساسی شامل انتخاب سطح لغزش مناسب و تعریف قانون کنترل است.سطح لغزش پیشنهادی در این روش که انتخاب جدیدی نیز می‌باشد، برای سیستم رابطه (۱۶)، به‌صورت رابطه (۱۷) معرفی می‌گردد.

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= X_3 \\ \dot{X}_3 &= f_3(\underline{X}) + u_{IITSMC}(t) \end{aligned} \qquad (۱۶)$$

$$\begin{aligned} S(t) &= X_3(t) + aX_1^{\frac{p_1}{q_1}} + bX_2^{\frac{p_2}{q2}} \\ &+ \int (c_1 X_1 + c_2 X_1^{\beta}) dt \end{aligned} \qquad (۱۷)$$

در رابطه (۱۶)، $f_3(\underline{X})$ تابعی نامعلوم می‌باشد. در رابطه(۱۷) توان‌های p_1, q_1, p_2, q_2 اعداد مثبت فرد باشرط $p_1 < q_1, p_2 < q_2$ می‌باشند. همچنین ضرایب a, b, c_1, c_2, β، پارامترهای طراحی می‌باشند که به کمک الگوریتم زنبور تعیین می‌گردند.

سطح لغزش معرفی شده رابطه (۱۷)، ترکیبی از سطح لغزش کنترل مد لغزشی ترمینال بحث‌شده در بخش قبل و انتگرال تابعی از حالات سیستم در نظر گرفته شده است که در آن $1 < \beta < 2$ در نظر گرفته شده است. قانون کنترل این روش، ترکیبی از قانون کنترل ناشی از ANFIS و کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی خواهد بود که از تابع لیاپانوف سیستم بدست می‌آید.

با در نظر گرفتن سطح لغزش رابطه (۱۷)، مشتق آن بصورت رابطه (۱۸) می‌باشد.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]

$$\dot{S}(t) = f_3(\underline{X}) + \frac{ap_1}{q_1} X_1^{\frac{p_1}{q_1}-1} X_2 + \frac{bp_2}{q_2} X_2^{\frac{p_2}{q_2}-1} X_3 + c_1 X_1 + c_2 X_1^{\beta} + u_{IITSMC}(t) \quad (۱۸)$$

که در آن سیگنال کنترل $u_{IITSMC}(t)$، مجموع سیگنال ناشی از ANFIS و کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی می‌باشد که به‌صورت رابطه (۱۹) نشان داده شده است.

$$u_{IITSMC} = u_{ANFIS} + u_{ITSM} \quad (۱۹)$$

بنا بر خاصیت تقریب‌گر بودن عمومی سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی[۱۹]، این سیستم قادر به تخمین یک تابع پیوسته دلخواه f تعریف‌شده بر روی یک مجموعه فشرده، با دقت مطلوب می‌باشد که $\hat{f}$ تقریب دینامیک نامعلوم فرض می‌شود. درحقیقت این مطلب نشان‌دهنده این است که با انتخاب تعداد کافی توابع عضویت برای فضای ورودی، حدی بر روی خطای تخمین e، توسط سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی وجود خواهد داشت که این حد با نماد $\varepsilon(\varepsilon \to 0)$ تعریف می‌شود [۲۰]. بطوریکه:

$$|e| = \left| f - \hat{f} \right| \le \varepsilon \quad (۲۰)$$

طبق ویژگی‌های سیستم که در این مقاله در نظر گرفته شده است، $f_3(\underline{X})$ نامعلوم است. در طراحی کنترل‌کننده اگر تابع f که باید تقریب زده شود، بهصورت رابطه (۲۱) در نظر گرفته شود.

$$f = f_3(\underline{X}) + \frac{ap_1}{q_1} X_1^{\frac{p_1}{q_1}-1} X_2 + \frac{bp_2}{q_2} X_2^{\frac{p_2}{q_2}-1} X_3 + c_1 X_1 + c_2 X_1^{\beta} \quad (۲۱)$$

اگر سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی تابع رابطه (۲۱) را تخمین بزند و u_{ANFIS}، سیگنال کنترلی در نظر گرفته شود که منفی این تابع تقریب زده شده را به سیستم اعمال نماید، می‌توان دینامیک باقی‌مانده را هم با استفاده از u_{ITSM} پایدار نمود. در حقیقت مجموعه‌ای از ورودی و خروجی‌ها برای تابع نامعلوم سیستم وجود دارد که سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی، ابتدا با این مجموعه ورودی- خروجی‌ها آموزش داده می‌شود. آموزش اولیه برای جلوگیری از افزایش زمان تخمین و زمان همگرایی حالات در سیستم جلقه بسته کنترلی انجام می‌شود. سپس شبکه آموزش داده شده در سیستم حلقه بسته کنترلی قرار می‌گیرد و هم‌زمان کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی، وزنهای آن به‌روز می‌شود. بنابراین u_{ANFIS} سیگنال تخمین‌زده شده‌ای است که توسط سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی به طور آنلاین تخمین زده می‌شود.

$$u_{ANFIS} = -\hat{f} \quad (۲۲)$$

در رابطه (۲۲)، $\hat{f}$ همان سیگنال تخمین‌زده شده به‌طور آنلاین در سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی می‌باشد. حال با استفاده از روابط (۱۸) تا (۲۲) رابطه (۲۳) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned}\dot{S}(t) &= f_3(\underline{X}) + \frac{ap_1}{q_1} X_1^{\frac{p_1}{q_1}-1} X_2 + \frac{bp_2}{q_2} X_2^{\frac{p_2}{q_2}-1} X_3 \\ &+ c_1 X_1 + c_2 X_1^{\beta} + u_{IITSMC} = f + u_{IITSMC} \\ &= f + u_{ANFIS} + u_{ITSM} = f - \hat{f} + u_{IITSM} \\ &= e + u_{ITSM}\end{aligned} \quad (۲۳)$$

بنابراین با توجه به روابط (۲۰) و (۲۳) می‌توان رابطه (۲۴) را نتیجه گرفت.

$$\dot{S}(t) \le \varepsilon + u_{ITSM} \quad (۲۴)$$

حال دینامیک باقی‌مانده در کنترل‌کننده ترکیبی هوشمند، باید توسط سیگنال کنترل مد لغزشی ترمینال پایدار گردد. اگر u_{ITSM} به‌صورت رابطه (۲۵) در نظر گرفته شود، همگرایی سیستم به روی سطح لغزش $S(t) = 0$ همان طور که در قضیه (۱) آورده می‌شود، تضمین خواهد شد.

$$u_{ITSM} = -K_{ITSM}\,\mathrm{sgn}(s) \qquad K_{ITSM} > 0 \quad (۲۵)$$

بنابراین سیگنال کنترل کلی برای رساندن سیستم به روی سطح لغزش و نگه‌داشتن آن بر روی آن به‌صورت رابطه (۲۶) بدست خواهد آمد.

$$u_{IITSMC} = u_{ANFIS} + u_{ITSM} = -\hat{f} - K_{ITSM}\,\mathrm{sgn}(S) \quad (۲۶)$$

اثبات پایداری مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند

بر اساس قضیه ۱ که در زیر آورده شده است، نشان داده‌ایم که سیگنال کنترل (۲۵) قابلیت رساندن مسیرهای سیستم‌های آشوبگونه، رابطه (۱۶)، را به سطح لغزش $S(X(t)) = 0$، رابطه (۱۷)، دارد.

قضیه ۱- در صورتی‌که معادلات سیستم به صورت رابطه (۱۶)، قانون کنترل مطابق یا رابطه (۲۵)، سطح لغزش ترمینال انتگرالی بر اساس رابطه (۱۷) و خطای تقریب به صورت رابطه (۲۰) باشد، مسیرهای سیستم آشوبگونه به سطح لغزش ترمینال که به‌صورت رابطه (۲۷) مشخص شده است، همگرا می‌شوند.

$$S(X(t)) = 0 \quad (۲۷)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]

اثبات قضیه ۱- به‌منظور اثبات پایداری سیستم (۱۶) با قانون کنترل (۲۵)، از تئوری پایداری لیاپانوف استفاده می‌گردد. برای این منظور تابع لیاپانوف رابطه (۲۸) که یک تابع مثبت معین است، در نظر گرفته می‌شود.

$$V = \frac{1}{2} S^2 > 0 \tag{۲۸}$$

با محاسبه مشتق این تابع لیاپانوف نسبت به زمان خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{V} = S\dot{S} = S[& f_3(\underline{X}) + \frac{ap_1}{q_1} X_1^{\frac{p_1}{q_1}-1} X_2 \\ & + \frac{bp_2}{q_2} X_2^{\frac{p_2}{q_2}-1} X_3 + c_1 X_1 + c_2 X_1^{\beta} + u_{IITSMC}] \end{aligned} \tag{۲۹}$$

که در آن سیگنال کنترل مجموع سیگنال کنترل سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی و کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی می‌باشد که به‌صورت رابطه (۳۰) نشان داده شده است.

$$u_{IITSMC} = u_{ANFIS} + u_{ITSM} \tag{۳۰}$$

سیگنال u_{ANFIS} بخش تقریب‌زده شده‌ای است که توسط سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی به طور آنلاین تقریب زده می‌شود.

$$\begin{aligned} f = & f_3(\underline{X}) + \frac{ap_1}{q_1} X_1^{\frac{p_1}{q_1}-1} X_2 + \frac{bp_2}{q_2} X_2^{\frac{p_2}{q_2}-1} X_3 \\ & + c_1 X_1 + c_2 X_1^{\beta} \end{aligned} \tag{۳۱}$$

$$u_{ANFIS} = -\hat{f} \tag{۳۲}$$

که در رابطه (۳۲)، $\hat{f}$ همان سیگنال تخمین‌زده شده در سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی است.

$$\begin{aligned} \dot{S}(t) = & f_3(\underline{X}) + \frac{ap_1}{q_1} X_1^{\frac{p_1}{q_1}-1} X_2 + \frac{bp_2}{q_2} X_2^{\frac{p_2}{q_2}-1} X_3 \\ & + c_1 X_1 + c_2 X_1^{\beta} + u_{IITSMC} \\ & = f + u_{IITSMC} = f + u_{ANFIS} + u_{ITSM} \\ & = f - \hat{f} + u_{ITSM} \end{aligned} \tag{۳۳}$$

بنابراین با استفاده از رابطه (۲۰) خواهیم داشت:

$$\dot{S}(t) = f - \hat{f} + u_{ITSM} \le \left| f - \hat{f} \right| + u_{ITSM} \le \varepsilon + u_{ITSM} \tag{۳۴}$$

بنابراین مشتق تابع لیاپانوف به‌صورت رابطه (۳۵) بدست می‌آید.

$$\dot{V} = S\dot{S} \le S[\varepsilon - K_{ITSM} \operatorname{sgn}(S)] \tag{۳۵}$$

به دلیل آن‌که $S.\operatorname{sgn}(S) = |S|$ است، بنابراین می‌توان به رابطه (۳۶) دست یافت.

$$\begin{aligned} \dot{V} \le & S[-K_{ITSM} \operatorname{sgn}(S) + \varepsilon] = -K_{ITSM} |S| \\ & + \varepsilon S \le -K_{ITSM} |S| + |S||\varepsilon| \\ & \le |S|[-K_{ITSM} + |\varepsilon|] \end{aligned} \tag{۳۶}$$

با انتگرال‌گیری از دو طرف رابطه (۳۶) از زمان صفر تا T داریم:

$$V(T) - V(0) \le [-K_{ITSM} + |\varepsilon|] \int_0^T |S| dt \tag{۳۷}$$

با توجه به اینکه $V(T) > 0$ است، به کمک رابطه (۳۷) با سوپریمم گرفتن از دو طرف آن و با همگرایی $T \to \infty$، همچنین با فرض $K_{ITSM} > |\varepsilon|$ می‌توان به رابطه (۳۸) رسید.

$$\begin{aligned} & \lim_{T\to\infty} \sup_{T\to\infty} \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T |S| dt \\ & \le \left[\frac{1}{K_{ITSM} - |\varepsilon|}\right] V(0) \lim_{T\to\infty} \left(\frac{1}{T}\right) \end{aligned} \tag{۳۸}$$

طرف راست ناتساوی رابطه (۳۸) به صفر همگرا می‌شود. بنابراین طرف چپ آن نیز به صفر متمایل خواهد شد. بنابراین مطابق با رابطه (۳۸) به‌طور مستقیم $S \xrightarrow[t\to\infty]{} 0$ نتیجه می‌شود. بنابراین مسیرهای سیستم آشوبگونه به سطح لغزش $S(t) = 0$ همگرا خواهند شد.

ساختار و آموزش سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی

روابط سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی در مراجع مختلفی مورد بررسی قرار گرفته شده است[۲۱،۲۲، ۱۹]. این سیستم استنتاج فازی-عصبی دارای پنج لایه است ودر این مقاله دارای سه ورودی که همان حالات سیستم می‌باشند، است. ابتدا فرض می‌کنیم که قوانین به صورت رابطه (۳۹) باشند:

$$\begin{aligned} & Rule(i): if\ X_1\ is\ A_i\ and\ X_2 is\ B_i \\ & and\ X_3 is\ C_i\ then\ f_i = p_i X_1 \\ & + q_i X_2 + r_i X_3 + s_i \end{aligned} \tag{۳۹}$$

و برای غیر فازی ساز از غیر فازی ساز میانگین مراکز استفاده نماییم، خروجی لایه‌ها به صورت زیر خواهد بود:

لایه اول: در این لایه ورودی ها از توابع عضویت عبور می‌کنند. اگر برای هریک از سه ورودی، پنج تابع عضویت در نظر گرفته شود، روابط مربوط به خروجیهای متناظر با ورودی X_1 بصورت رابطه (۴۰)

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]

می‌باشد که برای بقیه ورودیها با توابع عضویت $B_i(X_2), C_i(X_3)$ نیز به همین شکل می‌باشد.

$$o_{1,i} = \mu A_i(X_1) = \exp(-((X_1 - c_i)/\sigma_i)^2), \quad i = 1,\dots,5 \tag{۴۰}$$

که $\{c_i, \sigma_i\}$ مجموعه پارامترها هستند. پارامترهای این لایه به پارامتر های اولیه معروف هستند.

لایه دوم: خروجی این لایه ضرب سیگنال های ورودی است که در واقع معادل قسمت اگر قوانین هستند. برای سیستمی با ۳ ورودی و ۵ تابع عضویت برای هرکدام از آنها، ۱۲۵ قانون خواهیم داشت:

$$o_{2,i} = w_i = \mu A_i(X_1)\mu B_i(X_2)\mu C_i(X_3); \quad i = 1,\dots,125 \tag{۴۱}$$

لایه سوم: خروجی این لایه نرمالیزه شده لایه قبلی است:

$$o_{3,i} = \overline{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{125} w_i}; \; i = 1,\dots,125 \tag{۴۲}$$

لایه چهارم:

$$o_{4,i} = \overline{w}_i f_i = \overline{w}_i (p_i X_1 + q_i X_2 + r_i X_3 + s_i); \quad i = 1,\dots,125 \tag{۴۳}$$

پارامترهای این لایه، پارامترهای تالی نام دارند.

لایه پنجم: خروجی این لایه، خروجی کلی سیستم است:

$$o_{5,i} = \sum_i \overline{w}_i f_i; i = 1,\dots,125 \tag{۴۴}$$

آموزش سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی، به‌منظور تخمین آنلاین دینامیک نامعلوم سیستم، از طریق روش آموزش ترکیبی صورت می‌گیرد. در این روش از ترکیب روش‌های گرادیان نزولی و حداقل مربعات خطای بازگشتی، به‌ترتیب برای تنظیم پارامترهای اولیه و تالی استفاده می‌شود و رابطه بروزرسانی پارامترها استخراج می‌گردد[۲۲].

گرادیان نزولی: در روش آموزش ترکیبی، از گرادیان نزولی برای تنظیم پارامترهای اولیه استفاده می‌شود. در این روش با درنظرگرفتن تابع تعلق گوسین رابطه (۴۵)، معیار کارایی بصورت رابطه (۴۶) می‌باشد:

$$\mu A_i(x) = \exp(-((x - c_i)/\sigma_i)^2) \tag{۴۵}$$

$$E_k = \frac{1}{2}(y_k - o_k)^2 \tag{۴۶}$$

رابطه تنظیم پارامتر برای پارامتر اولیه c_i به صورت رابطه (۴۷) است. همچنین برای پارامتر اولیه σ_i نیز بطور مشابه بدست می‌آید.

$$\frac{\partial E_k}{\partial c_i} = \frac{\partial E_k}{\partial o_{5,i}} \frac{\partial o_{5,i}}{\partial o_{4,i}} \frac{\partial o_{4,i}}{\partial o_{3,i}} \frac{\partial o_{3,i}}{\partial o_{2,i}} \frac{\partial o_{2,i}}{\partial o_{1,i}} \frac{\partial o_{1,i}}{\partial c_i} \tag{۴۷}$$

که در آن

$$\frac{\partial o_{5,i}}{\partial o_{4,i}} = 1, \qquad \frac{\partial o_{4,i}}{\partial o_{3,i}} = f_i \tag{۴۸}$$

برای مشتق لایه سوم به دوم اگر نود مقابل قانون متناظر را در نظر بگیریم به صورت رابطه (۴۹) است:

$$\frac{\partial o_{3,i}}{\partial o_{2,i}} = \frac{\partial}{\partial w_i}\left(\frac{w_i}{\sum_{j=1}^{125} w_j}\right) = \frac{\sum_{j=1}^{125} w_j - w_i}{(\sum_{j=1}^{125} w_j)^2} \tag{۴۹}$$

برای نودهای غیر متناظر به صورت رابطه (۵۰) است:

$$\frac{\partial o_{3,i}}{\partial o_{2,i}} = \frac{\partial}{\partial w_i}\left(\frac{w_j}{\sum_{j=1}^{125} w_j}\right) = \frac{-w_j}{(\sum_{j=1}^{125} w_j)^2} \tag{۵۰}$$

مشتق لایه دوم نسبت به لایه اول به صورت رابطه (۵۱) است:

$$\frac{\partial o_{2,i}}{\partial o_{1,i}} = \frac{\partial}{\partial A_m} \prod_{A_j \in R(A_m)} A_j = \prod_{A_j \in R(A_m), A_j \neq A_m} A_j \tag{۵۱}$$

که در فرمول بالا $A_j \in R(A_m)$ مشخص کننده مجموعه‌های فازی است که بخش مقدمه قانونی را تشکیل می‌دهد که شامل مجموعه فازی A_m است.در نتیجه مشتق مجموع مربعات خطا نسبت به پارامترهای اولیه برای نودهای متناظر لایه سوم به دوم به صورت رابطه (۵۲) می‌باشد:

$$\frac{\partial E}{\partial c_i} = -(y_i - o_i) f_i \frac{\sum_{j=1}^{125} w_j - w_i}{(\sum_{j=1}^{125} w_j)^2} \prod_{A_j \in R(A_m), A_j \neq A_m} A_j \cdot \frac{\partial o_{1,i}}{\partial c_i} \tag{۵۲}$$

برای نود های غیر متناظر لایه سوم نسبت به دوم بصورت رابطه (۵۳) می‌باشد:

$$\frac{\partial E}{\partial c_i} = -(y_i - o_i) f_i \frac{-w_j}{(\sum_{j=1}^{125} w_j)^2} \prod_{A_j \in R(A_m), A_j \neq A_m} A_j \cdot \frac{\partial o_{1,i}}{\partial c_i} \tag{۵۳}$$

حال بایدمشتق لایه اول به پارامترهای اولیه محاسبه گردد:

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]

$$\frac{\partial o_{1,i}}{\partial c_i} = \frac{\partial}{\partial c_i}[\exp[-[\frac{x-c_i}{\sigma_i}]^2]] = 2\frac{[x-c_i]}{\sigma_i^2}\exp[-[\frac{x-c_i}{\sigma_i}]^2 \quad (۵۴)$$

$$\frac{\partial o_{1,i}}{\partial \sigma_i} = \frac{\partial}{\partial \sigma_i}[\exp[-[\frac{x-c_i}{\sigma_i}]^2]] = 2\frac{[x-c_i]^2}{\sigma_i^3}\exp[-[\frac{x-c_i}{\sigma_i}]^2 \quad (۵۵)$$

بنابراین طبق روابط (۵۲) تا (۵۵)، رابطه بروزرسانی پارامترهای اولیه استخراج می گردد.

حداقل مربعات خطا: در روش آموزش ترکیبی، برای بروزرسانی پارامترهای تالی در رابطه (۳۹)، از حداقل مربعات خطای بازگشتی استفاده می‌شود. در حالت کلی خروجی یک مدل خطی به صورت رابطه (۵۶) می‌باشد:

$$y = \theta_1 f_1(u) + \theta_2 f_2(u) + ... + \theta_n f_n(u) \quad (۵۶)$$

که u بردار ورودی است و f ها توابع شناخته‌شده هستند و θها پارامترهای نامعلوم هستند که باید تقریب زده شوند. برای شناسایی پارامترها نیاز به داده های آموزشی داریم که به صورت رابطه (۵۷) بیان می‌شوند.

$$\{(u_i; y_i)\}, i = 1, ..., m\} \quad (۵۷)$$

با جایگزینی زوج های ورودی و خروجی در معادله اصلی به m معادله خطی به صورت رابطه (۵۸) می‌رسیم.

$$\begin{aligned} y_1 &= \theta_1 f_1(u_1) + \theta_2 f_2(u_1) + ... + \theta_n f_n(u_1) \\ y_2 &= \theta_1 f_1(u_2) + \theta_2 f_2(u_2) + ... + \theta_n f_n(u_2) \\ &\vdots \\ y_m &= \theta_1 f_1(u_m) + \theta_2 f_2(u_m) + ... + \theta_n f_n(u_m) \end{aligned} \quad (۵۸)$$

که در فرم ماتریسی به صورت $A\theta = Y$ می‌باشد که در آن ماتریس A به فرم رابطه (۵۹) است:

$$A = \begin{bmatrix} f_1(u_1) & \cdots & f_n(u_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(u_m) & \cdots & f_n(u_m) \end{bmatrix} \quad (۵۹)$$

θ یک بردار $n \times 1$ و Y بردار خروجی $m \times 1$ است.

حال در این حالت بردار θ به صورت رابطه (۶۰) قابل محاسبه است.

$$\theta = A^{-1}Y \quad (۶۰)$$

در حالت کلی داده‌ها ممکن است با نویز همراه باشند یا مدل ممکن است نتواند به طور دقیق خروجی را معین کند. بنابراین رابطه (۶۱) را می‌توان در نظر گرفت.

$$A\theta + e = Y \quad (۶۱)$$

در این حالت ما به دنبال یافتن $\theta = \hat{\theta}$ هستیم که مجموع مربعات خطا را می‌نیمم کند:

$$E(\theta) = \sum_{i=1}^{m}(y_i - a_i^T\theta)^2 = e^T e = (y-A\theta)^T(y-A\theta) \quad (۶۲)$$

اگر AA^T معکوس پذیر باشد، آنگاه:

$$\hat{\theta} = (AA^T)^{-1}A^T y \quad (۶۳)$$

روش دیگری نیز برای محاسبه پارامتر ها وجود دارد که یک روش بازگشتی است (RLSE) این روش به دو دلیل به وجود آمده است.۱)گاهی ممکن است که ماتریس AA^T معکوس پذیر نباشد. ۲)فرض کنید θ محاسبه گردیده است. اگر یک جفت داده ورودی خروجی جدید به سیستم اضافه شود، در روش قبل باید کل پارامترها محاسبه شوند، ولی در این روش فقط مقدار پارامتر جدید به دست می-آید.

بنابراین فرمول های بازگشتی در روش مربعات خطای بازگشتی بصورت رابطه (۶۴) می‌باشند.

$$\begin{aligned} S_{k+1} &= S_k - \frac{S_k a_{k+1} a_{k+1}^T S_k}{1 + a_{k+1}^T S_k a_{k+1}} \\ \theta_{k+1} &= \theta_k + S_{K+1} a_{k+1}(y_{k+1} - a_{k+1}^T \theta_k) \\ k &= 0, 1, ..., m\text{-}1 \end{aligned} \quad (۶۴)$$

برای شرایط اولیه $\theta_0 = 0$ و $S_0 = \gamma I$ در نظر گرفته می‌شود که I ماتریس همانی به ابعاد $m \times m$ است و γ یک عدد صحیح بزرگ است. همچنین a_{k+1}، سطرهای ماتریس A در لحظه $k+1$ می‌باشد.

۳-۳ الگوریتم زنبور

الگوریتم زنبور یک الگوریتم بهینه سازی بر اساس هوش جمعی و رفتار هوشمندانه جمعیت زنبور عسل است و در واقع در این روش، جمعیت زنبورهای عسل به دنبال بهترین پاسخ ممکن در فضای حل مسئله، بر مبنای تابع هزینه تعریف شده می‌باشند[۲۴،۲۳].

زنبورهای کاوشگر که در فضای حل مسئله با احتمال یکنواخت، پراکنده می‌شوند، یک حل بهینه را از طریق تابع هزینه ارزیابی می کند.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]

مکان‌های مشاهده‌شده توسط زنبورهای کاوشگر، طبق تابع هزینه درجه‌بندی می‌شوند و مکان برتر با مقدار حداقل هزینه یا بالاترین برازندگی، برای جستجوی محلی انتخاب می‌شود. برای هریک از مکان‌های انتخاب‌شده، زنبورهای کارگر به‌طور تصادفی در همسایگی مکان‌هایی با رتبه بالا، قرار می‌گیرند. سپس زنبورهای اضافی به‌طور تصادفی و به‌عنوان زنبورهای پیشاهنگ برای یافتن گلزارهای جدید، در فضای کلی حل مسئله پراکنده می‌شوند. در آخر هر تکرار از برنامه، جمعیت جدید کلونی زنبور از دو گروه تشکیل می‌شوند. اولین گروه شامل زنبور پیشاهنگ که به‌عنوان مراکز و نماینده هر گلزار و نشان-دهنده نتایج جستجوی محلی الگوریتم می‌باشند. دومین گروه، زنبور پیشاهنگ می‌باشند که به‌صورت تصادفی در فضای حل مسئله تولید می‌شوند و نمایانگر جستجوی سراسری هستند..

تابع هزینه

تابع هزینه مجموع وزن‌دار میانگین نمایی حالات سیستم و میانگین نمایی سیگنال کنترل، با وزن های مشخص و به‌منظور پایدارسازی حالات سیستم به سمت نقطه تعادل در نظر گرفته شده است. وزن‌های مربوط به جملات تابع هزینه طوری در نظر گرفته می‌شود که در کنار پایدارسازی حالات در کمترین زمان ممکن، تلاش کنترلی قابل قبول، با نقطه شروع مناسب در کنار جلوگیری از افزایش زیاد چترینگ بدست آید. در رابطه (۶۵) تابع هزینه‌ای که برای مسئله مور نظر در این مقاله استفاده شده است، آورده شده است.

$$J = a_1\sqrt{\int_0^{t_f}\frac{1}{t_f}u^2} + a_2\sqrt{\int_0^{t_f}\frac{1}{t_f}x_1^2} + a_3\sqrt{\int_0^{t_f}\frac{1}{t_f}x_2^2} + a_4\sqrt{\int_0^{t_f}\frac{1}{t_f}x_3^2} \quad (۶۵)$$

در رابطه فوق، a_1, a_2, a_3, a_4 اعدادی اسکالر هستند و پارامترهای مربوط به الگوریتم زنبور هستند.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند بر روی سیستم آشوبگونه کولِت اعمال می‌شود. شرایط اولیه [1 -1 0] در نظر گرفته شده است و سیستم تحت نامعینی و اغتشاش خارجی قرار دارد. سیگنال پالس با دامنه ۰٫۶ و پهنای ۱ ثانیه، از ثانیه ۴ تا ۵، به‌عنوان اغتشاش خارجی به کنترل‌کننده‌ها اعمال می‌شود. همچنین نامعینی جمعی غیرساختاریافته سازگار، در سیستم حلقه بسته ترکیبی هوشمند مبتنی برسیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی، سیگنال سینوسی به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\Delta f = 2\sin(\pi x_1)\sin(\pi x_2)\sin(\pi x_3)$$
$$|d(t)| \le 0.6, \quad |\Delta f| \le 2 \quad (۶۵)$$

مقادیر مربوط به توانهای سطح لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند در کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی بصورت زیر انتخاب گردیده است.

$$p_1 = 5, q_1 = 7, p_2 = 3, q_2 = 7 \quad (۶۶)$$

به‌منظور انتخاب ضرایب مد لغزشی ترمینال انتگرالی از الگوریتم زنبور استفاده شده است که پارامترهای مربوط به تابع هزینه الگوریتم زنبور عسل، بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$a_1 = 0.3, a_2 = 2, a_3 = 2, a_4 = 2 \quad (۶۷)$$

پارامترهای کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند که توسط الگوریتم زنبور عسل بدست آمده‌اند بصورت زیر بدست آمده است. این پارامترها با الگوریتم زنبور در شرایط بدون نامعینی و اغتشاش بدست آمده‌اند.

$$a = 4.5379, b = 3.8963, K_{IITSM} = 144.4525,$$
$$c_1 = 0.1020, c_2 = -0.7325, \beta = 1.30 \quad (۶۸)$$

همچنین فرض گردیده است که مجموعه داده‌هایی از تابع رابطه (۲۱) در اختیار است که با آنها سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیی آموزش داده می‌شود. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، کنترل-کننده هوشمند در حضور اغتشاش خارجی بخوبی سیستم را پایدار نموده است. سرعت پاسخ مناسب است و چترینگ بطور کامل حذف گردیده است. همچنین پاسخ گذرا مناسب می‌باشد. در حقیقت این کنترل‌کننده قادر به کنترل مناسب سیستم در حضور نامعینی‌های موجود در سیستم و نامعلوم بودن دینامیک سیستم می‌باشد. همچنین در شکل ۴ کنترل‌کننده هوشمند در حضور نامعینی نیز بخوبی سیستم را کنترل نموده است و دارای سرعت پاسخ مناسب و بدون چترینگ می‌باشد.

سطح لغزش در نظرگرفته‌شده در این روش برای داشتن پاسخی مناسب بدون چترینگ، ترکیبی از روش‌های انتگرالی و مد لغزشی ترمینال می‌باشد و به‌منظور مقایسه‌ای بین روش مد لغزشی ترمینال و روش کنترلی این مقاله، نتایج شبیه‌سازی برای کنترل مد لغزشی ترمینال نیز انجام شده است. نتایج مربوط به کنترل مد لغزشی ترمینال، مطابق آنچه در [۱۵] مطرح گردیده و در [۲۵] بر روی سیستم کولت با وجود نامعینی و اغتشاش خارجی انجام شده است، در شکل ۵ آورده شده است. مقادیر توانهای سطح لغزش بصورت زیر درنظر گرفته شده است:

$$p_1 = 5, q_1 = 7, p_2 = 3, q_2 = 7 \quad (۶۹)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]

همچنین مقادیر پارامترهای آن با الگوریتم زنبورعسل به‌صورت زیر بدست آمده است:

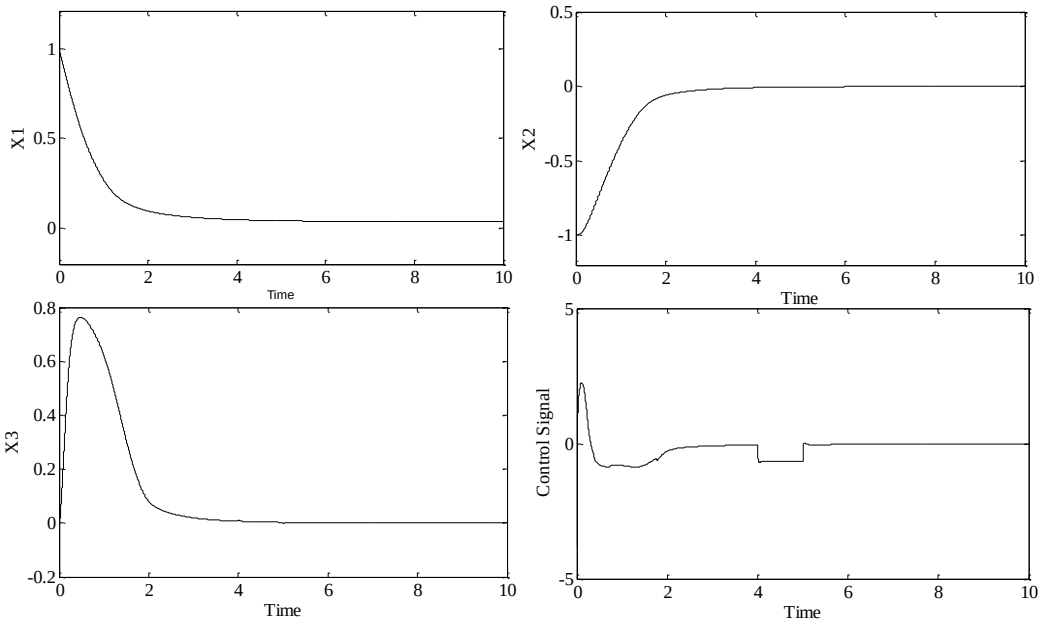
$$a = 4.7023,\quad b = 4.7964,\quad K_{TSM} = 126.6199 \qquad (۷۰)$$

شبیه‌سازی مربوط به مد لغزشی ترمینال نیز در شکل ۵ نشان داده شده است که این روش پیش‌تر در [۲۵] بر روی سیستم کولت اعمال گردیده بود و به عنوان مقایسه با روش ارائه‌شده در این مقاله آورده شده است. همانطورکه مشاهده می‌شود، زمان نشست حالات مطلوب می‌باشد. اما پاسخ دارای چترینگ زیادی می‌باشد که این مشکل در کنترل‌کننده طراحی‌شده در این مقاله برطرف گردیده است. همچنین در مواردی که فقط اطلاعات ورودی خروجی بخشی از دینامیک سیستم در دسترس است، استفاده از سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی بحث‌شده در این مقاله روشی موثر و مناسب جهت کنترل سیستم و پایدارسازی حالات می‌باشد.

به منظور مشاهده تاثیر استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی زنبور در طراحی کنترل‌کننده، نتایج مربوط به انتخاب تصادفی ضرایب کنترل-کننده مد لغزشی ترمینال در شکل ۶ آورده شده است. ضرایب بصورت تصادفی و دستی مطابق رابطه (۷۱) در نظر گرفته شده است:

$$a = 9.31,\quad b = 2,\quad K_{TSM} = 70.2 \qquad (۷۱)$$

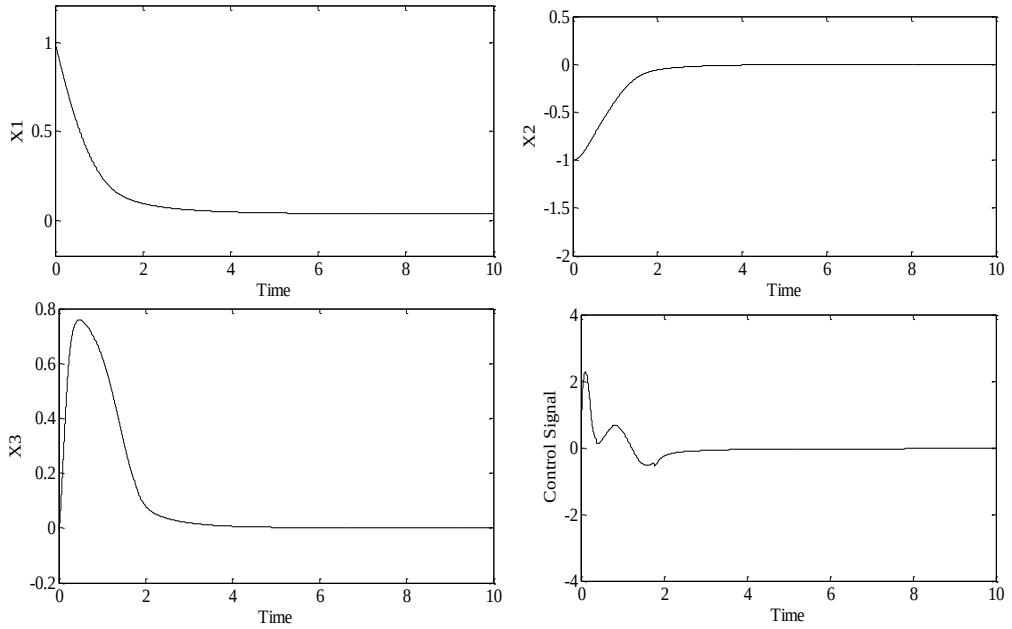
همانطور که مشخص است تلاش کنترلی در مقایسه با شکل ۵ بسیار زیاد است و پایدارسازی در حالات سیستم انجام نشده است. بنابراین نیازمند صرف زمان زیادی می‌باشیم تا با سعی و خطا به پاسخی نسبتا مطلوب برسیم.



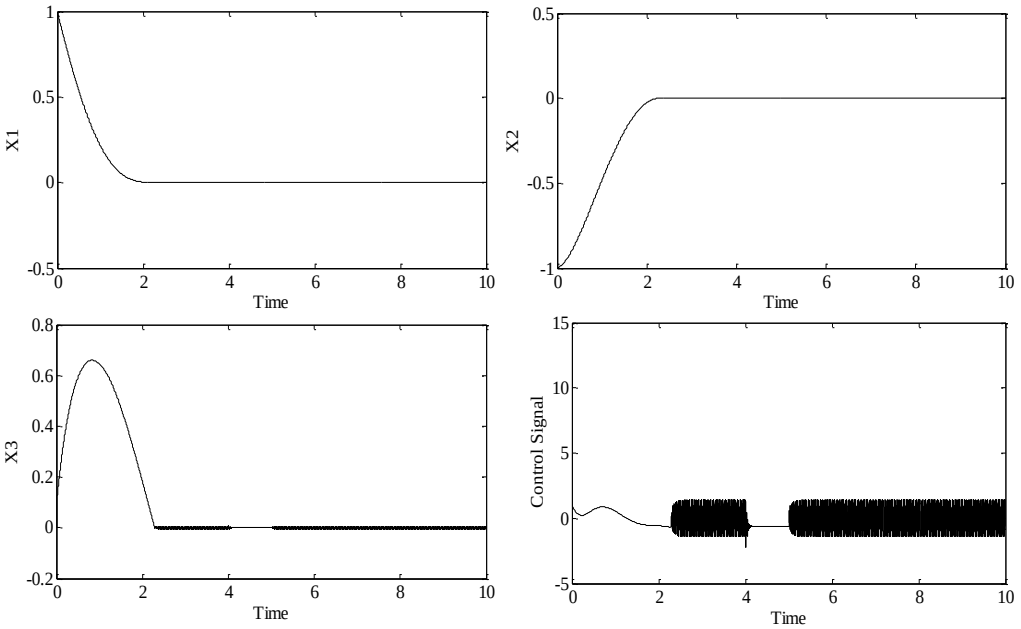
شکل ۳: پاسخ زمانی حالات X_1 , X_2 X_3 و سیگنال کنترل u در کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند مبتنی بر سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی(IITSM) سیستم کولِت در حضور اغتشاش

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]



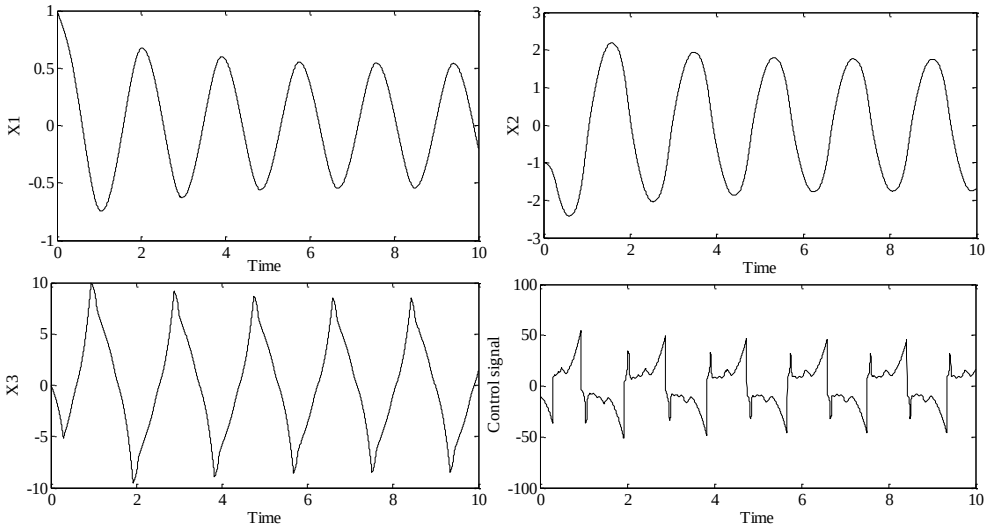
شکل ۴: پاسخ زمانی حالات X_1 , X_2 X_3 و سیگنال کنترل u در کنترل مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند مبتنی بر سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی(IITSM) سیستم کولِت در حضور عدم قطعیت



شکل۵: پاسخ زمانی حالات X_1 , X_2 X_3 و سیگنال کنترل u در کنترل مد لغزشی ترمینال(TSM) سیستم کولِت در حضور عدم قطعیت و اغتشاش و با ضرایب بدست‌آمده توسط الگوریتم زنبور عسل

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]



شکل۶: پاسخ زمانی حالات X_1 , X_2 X_3 و سیگنال کنترل u در کنترل مد لغزشی ترمینال(TSM) سیستم کولِت در حضور عدم قطعیت و اغتشاش و با ضرایب تصادفی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله کنترل‌کننده مد لغزشی ترمینال انتگرالی هوشمند مبتنی بر سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی برای سیستم آشوبگونه کولِت طراحی گردید. هدف از ارائه روش پیشنهادی، دستیابی به اهداف مورد نظر از جمله کاهش چترینگ، سرعت پاسخ مناسب و مقاومت نسبت به اغتشاشات و نامعینی یا پاسخ گذرای مطلوب در شرایطی بود که بخشی از سیستم نامعلوم است و فقط به اطلاعات ورودی- خروجی سیستم دسترسی داریم. سطح لغزش در نظر گرفته‌شده، ترکیب سطح لغزش مد لغزشی ترمینال و انتگرال تابعی از حالات سیستم است که برای اولین بار پیشنهاد شده است. همچنین برای افزایش دقت پاسخ، پارامترها با الگوریتم زنبور محاسبه شده‌اند. مقایسه روش مطرح‌شده در این مقاله با روش مد لغزشی ترمینال نشان می‌دهد که کنترل‌کننده طراحی‌شده عملکرد بهتری نسبت به مد لغزشی ترمینال داشته‌اند و چترینگ در آن حذف گردیده است. همچنین سرعت پاسخ و پاسخ گذرای سیستم نیز مطلوب می‌باشد. در واقع در روش مد لغزشی ترمینال باید دینامیک سیستم معلوم باشد که در کنار آن، مد لغزشی ترمینال می‌تواند اثرات وجود نامعینی و اغتشاش را در سیستم بهبود دهد. در روش ارائه‌شده این مقاله، در صورت داشتن اطلاعات ورودی- خروجی و بدون دسترسی به معادلات دینامیکی سیستم می‌توان بطور مطلوبی سیستم را کنترل نمود و به اهداف کنترلی مطلوب دست یافت. همچنین روش ارائه‌شده در این مقاله، قابل اعمال به کلاس وسیعی از سیستم‌های پیوسته و غیرخطی بدون تاخیر و خودگردان نیز می‌باشد.

مراجع

[1] P. Arena, S. Baglio , L. Fortuna, and G. Manganaro, , "Hyperchaos from cellular neural networks," Electronics letters, vol. 31, pp. 250-251, 1995.

[2] A. C. Enys, A. Tamas , evic ius and A. Baziliauskas, "Hyperchaos in coupled Colpitts oscillators," Chaos, Solitions Fractionals, vol. 17, pp. 349-353, 2003.

[3] J. P. Goedgebuer, L. Larger, and H. Porle, "Optical cryptosystem based on synchronization of hyperchaos generated by a delayed feedback tunable laser diode," Physical Review Letters, vol. 80, pp.2249-2252, 1998.

[4] C. Sparrow, “The Lorenz equation: bifurcation, chaos and strange attractors,” New York, Springer, 1982.

[5] G. Chen, and T. Ueta, "Yet another chaotic attractor," International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 12, PP. 1465-1466, 1999.

[6] S. Dadras, H. R. Momeni, and V. J. Majid, "Sliding mode control for uncertain new chaotic dynamical system," Chaos, Solitions Fractionals, vol. 41, pp. 1857-1862, 2009.

[7] Y. Hong, G. Yang, D. Cheng, S. Spurgeon, "A new approach to terminal sliding mode control design," Asian Journal of Control, Vol. 7, pp. 177-181, 2005.

[8] Yang, Liang and Yang, Jianying, "Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems," International Journal of

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]

[17] P. Coullet, C. Tresser, A. Arnodo, "Transition to stochasticity for a class of forced oscillators", Phys Lett A, vol, 72, pp. 268-270, 1979.

[18] A. Arnodo, P. Coullet, C. Tresser, "Possible new strange attractors with spiral structure", Common Math Phys, vol. 79, pp. 573–9, 1981.

[19] J.S.R. Jang, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics", Vol. 23, No, 3, pp, 665-685, 1993.

[20] Zhang, Yajun, Chai, Tianyou, Wang, Hong, "A Nonlinear Control Method Based on ANFIS and Multiple Models for a Class of SISO Nonlinear Systems and Its Application", Vol. 22, No. 11, pp. 1783-1795, 2011.

[21] O. Nelles, "Nonlinear System Identification: From Classical approaches to Neural Networks and Fuzzy Models", Springer-Verlag, Germany, 2001.

[22] C. Loganathanl, K.V. Girija, "Investigations on Hybrid Learning in ANFIS", Int. Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 4, Issue 10, pp. 2248-9622, 2014.

[23] D. T. Pham, M. Castellani, "The Bees Algorithm: modeling foraging behavior to solve continuous optimization problems", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 223, No. 12, pp. 2919-2938, 2009.

[24] R. Gholipour, A. Khosravi, H. Mojallali, "Bees Algorithm based Intelligent Backstepping Controller Tuning for Gyro System", The Journal of Mathematics and Computer Science, Vol.5, No. 3, pp. 205-211, 2012.

[25] S. Khari, Z. Rahmani, B. Rezaie, "chaos control using fuzzy controller based on combination of intelligent terminal sliding mode and state feedback controllers ," international journal of engineering & technology sciences, vol. 03, issue 04, pp. 317-336, 2015.

Robust and Nonlinear Control, vol. 21, pp. 1865-1879, 2011.

[9] S. T. Venkataraman, S. Gulati, “Control of nonlinear systems using terminal sliding modes,” Proceedings American Control Conference, Chicago, IL, U.S.A., pp. 891–893, 1992.

[10] X. Yu, Z. Man “Model reference adaptive control systems with terminal sliding modes,” International Journal of Control, vol. 66, pp. 1165–1176, 1996.

[11] X. Yu, Z. Man, “Fast terminal sliding mode control for single input systems,” Proceedings of 2000 Asian Control Conference, Shanghai, China, July 2000.

[12] X. Yu, Z. Man, “Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems,” IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. 49, pp. 261–264, 2002.

[13] Y. Feng, X. Yu, Z. Man “Non-singular adaptive terminal sliding mode control of rigid manipulators,” Automatica, vol 38, pp. 2159–2167, 2002.

[14] X. Yu, Z. Man, Y. Feng, Z. Guan “Nonsingular terminal sliding mode control of a class of nonlinear dynamical systems,” Proceedings of 2002, IFAC 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002.

[15] S. Khari, Z. Rahmani, B. Rezaie, "Designing fuzzy logic controller based on combination of terminal sliding mode and state feedback controllers for stabilizing chaotic behaviour in rod-type plasma torch system," Transactions of the Institute of Measurement and Control, doi:10.1177/0142331214568607, 2015.

[16] K. Konishi, M. Hirai, and H. Kokame, "Sliding mode control for a class of chaotic systems" Physics letters A, vol. 245, pp. 511-517, 1998.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-02-14]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.3.4.1]