



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

20.1001.1.23223146.1400.8.2.7.8

نشریه سازه‌های غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۸ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۰

صفحات ۶۳ الی ۸۰

ISSN: 2322-3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

# طراحی یک کنترل کننده دو وضعیتی تطبیقی بر اساس تابع مانع و کاربرد

## آن در همزمان سازی سیستم‌های غیرخطی مرتبه بالا

جواد مصطفایی<sup>۱</sup>، حسین نوروزی<sup>۲</sup>، حسن کشاورز زیارانی<sup>۳</sup> و منصور همتی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>نویسنده مسئول، استادیار، گروه پژوهشی برق و رباتیک، پژوهش سرای رازی آبیگ، قزوین، ایران. javadmostafae1982@gmail.com,

<sup>۲</sup>مربی، گروه آموزشی برق، هنرستان امیرکبیر آبیگ، قزوین، ایران. hoseinnoruzi200@gmail.com.

<sup>۳</sup>مربی، گروه پژوهشی برق، پژوهش سرای رازی آبیگ، قزوین، ایران. eng.keshavarze@gmail.com.

<sup>۴</sup>مربی، گروه آموزشی برق، هنرستان امیرکبیر آبیگ، قزوین، ایران. hemmatimansour@gmail.com. m.aliasghary@uut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷)

### چکیده

#### واژه‌های کلیدی

کنترل کننده مد لغزشی زمان محدود  
تطبیقی تابع مانع،  
پدیده چترینگ،  
سیستم فوق آشوبی،  
همزمان سازی فوق آشوبی،  
همگرایی زمان محدود.

در این مقاله، یک کنترل کننده تطبیقی بر اساس تابع مانع برای سیستم‌های غیرخطی مرتبه بالا با در نظر گرفتن نامعینی‌ها طراحی شده است، که در آن از روش کنترل کننده مد لغزشی استفاده شده است که می‌تواند همزمان منجر به همگرایی زمان محدود شود و با اغتشاشات مقابله کند. اشکالات اصلی کنترل کننده مد لغزشی معمول را می‌توان همگرایی مجانبی، پدیده چترینگ، اشباع محرک، تخمین بهره کنترلی و عدم مقابله با عدم قطعیت‌های متغیر با زمان در نظر گرفت. در این مقاله از تابع مانع برای غلبه بر عدم قطعیت‌های متغیر با زمان استفاده شده است. از مزایای روش پیشنهادی می‌توان به حذف پدیده چترینگ، همگرایی در زمان محدود، سازگاری با عدم قطعیت‌های متغیر با زمان، عدم استفاده از تخمین و عدم نیاز به اطلاعات در مورد حد بالای اغتشاشات اشاره کرد. تجزیه و تحلیل پایداری نشان می‌دهد که با کنترل کننده پیشنهادی، خطاهای ردیابی به ناحیه همگرایی در محدوده صفر نزدیک شده و همگرایی سریع‌تری حاصل می‌شود. در نهایت، برای اثبات کارایی کنترل کننده، بر اساس تئوری همزمان سازی آشوبی، کنترل کننده پیشنهادی بر روی یک سیستم فوق آشوبی ۵ بعدی اعمال می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی، علی‌رغم اغتشاشات اعمال شده به سیستم، همگرایی در زمان محدود را فراهم و پدیده چترینگ را حذف می‌کند.



Sahand University  
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1400.8.2.7.8](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1400.8.2.7.8)

Journal of Nonlinear  
Systems in Electrical  
Engineering

Vol.8, No.2

Autumn and Winter 2021

ISSN: 2322 – 3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

# Design of an Adaptive Dual Position Controller based on the Obstacle Function and its Application in Synchronization of High-Order Nonlinear Systems

Javad Mostafae<sup>1</sup>, Hossein Norouzi<sup>2</sup>, Hassan Keshavarz Ziarani<sup>3</sup> and Mansour Hemmati<sup>4</sup>

<sup>1</sup> **Corresponding Author**, Assistant professor, Electrical and Robotic Research Group, Razi Abyek Research Center, Qazvin, Iran. javadmostafae1982@gmail.com.

<sup>2</sup> Instructor, Department of Electrical Education, Amirkabir Vocational School of Abyek, Qazvin, Iran .hoseinnoruzi200@gmail.com.

<sup>3</sup> Instructor, Electrical Research Group, Razi Abyek Research Center, Qazvin, Iran. eng.keshavarze@gmail.com.

<sup>4</sup> Instructor, Department of Electrical Education, Amirkabir Vocational School of Abyek, Qazvin, Iran .hemmatimansour@gmail.com.

## ABSTRACT

### Keywords

Barrier function adaptive finite-time sliding mode controller,

chattering phenomenon, hyperchaotic system,

hyperchaotic synchronization,

finite-time convergence.

In this paper, an adaptive controller based on the barrier function is designed for high-order nonlinear systems considering uncertainties. Accordingly, this paper uses a sliding mode controller that can simultaneously achieve asymptotic convergence and deal with disturbances. The main drawbacks of sliding mode control can be considered as asymptotic convergence, chattering phenomenon, stimulus saturation, control gain estimation and failure to deal with time-varying uncertainties. In this paper, the sliding mode controller is used to deal with the phenomenon of asymptotic convergence and chattering and the barrier function is used to overcome the time-varying uncertainties. The advantages of the proposed method include the elimination of the chattering phenomenon, convergence in finite time, compatibility with time-varying uncertainties, no use of estimation and no need for information about upper bound of disturbances. Stability analysis proves that by the proposed controller, the tracking errors approach the convergence region around origin with faster convergence. Finally, to show the efficiency of the controller, based on chaotic synchronization theory, the proposed controller is applied to a 5D hyperchaotic system. The results show that the proposed controller, despite the perturbations applied to the system, provides convergence in a finite-time and eliminates the chattering phenomenon.

## ۱ - مقدمه

در بسیاری از ساختارها، از جمله ساختارهای مکانیکی، محدودیت های فیزیکی زیادی از جمله محدودیت در چرخش زوایا، محدودیت های فشار و سایر محدودیت ها وجود دارد. در این حالت، ورودی کنترل تحت تأثیر این رفتارهای فیزیکی، دارای محدودیت های غیرخطی مانند منطقه مرده و اشباع خواهد بود [۱-۴]. اشباع محرک که یک اتفاق ناخواسته است، برنامه های کاربردی را دچار چالش می نماید و باعث ایجاد اختلال در سیستم می شود. این اتفاق ناخواسته در بسیاری از ساختارها اجتناب ناپذیر است و معمولاً همیشه در سیستم اعمال می شود. این محدودیت ها، به ویژه محدودیت های دینامیکی، باعث بدتر شدن شرایط حاکم بر سیستم می شود [۵]. از این رو نیاز به طراحی یک کنترل کننده برای غلبه بر مشکلات فوق ضروری است. تحقیقات زیادی در سال های اخیر برای حل و غلبه بر مشکلات فوق انجام شده است [۶-۹]. به عنوان مثال، در [۱۰] روش LMI برای بهبود عملکرد و پایداری سیستم های کنترل خطی تحت تأثیر اشباع محرک برای یک سیستم غیر خطی استفاده شده است. در این مقاله از یک جبران کننده گام به عقب برای تثبیت ساختار سیستم استفاده شده و یک کنترل کننده بهینه غیر خطی نیز برای مقابله با اثرات اشباع محرک طراحی شده است [۱۱]. در [۱۲] یک کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی متوالی برای یک سیستم فضاپیمای چند ورودی و چند خروجی با رویکرد اغتشاش طراحی شده است. استفاده از منطق فازی برای کنترل یک کلاس خاص از سیستم های غیر خطی با اغتشاشات خارجی و اشباع ورودی در [۱۳] پیشنهاد شده است. در این تحقیق، کنترل کننده مد لغزش برای سیستم های مورد مطالعه توسعه داده شده است.

توسعه کنترل مد لغزشی در تحقیقات بسیاری انجام شده است. به عنوان مثال، در [۱۴] یک طرح اشباع برای یک کلاس خاص از سیستم های نامعین و غیرخطی با استفاده از کنترل مد لغزشی مرتبه دوم پیشنهاد شده است. بازخورد غیرخطی مرکب و الگوریتم آن برای کنترل ردیابی پرنده در حالت اشباع ورودی در [۱۵] گزارش شده است. با این حال، در بسیاری از تحقیقات انجام شده در این زمینه فرض بر این است که اغتشاشات و عدم قطعیت ها کمتر از ظرفیت کنترل بوده یا ناشناخته هستند. در [۱۶] یک کنترل کننده ساختار متغیر مقاوم برای تثبیت حالت پایدار یک هواپیمای سه محوره انعطاف پذیر در حضور منطقه مرده بدون در نظر گرفتن حد بالای عدم قطعیت طراحی شده است. در تحقیق فوق با استفاده از کنترل کننده معرفی شده، بهره کنترلی به طور یکنواخت افزایش می یابد. نقطه ضعف روش معرفی شده این است که با افزایش عدم قطعیت ها ظرفیت کنترل افزایش یافته اما با کاهش عدم قطعیت ها و اغتشاشات، بهره کنترلی کاهش نمی یابد و این مورد باعث تخمین بیش از حد شده که این تخمین باعث تشدید پدیده چترینگ می شود. در بسیاری از ساختارهای کنترلی، ورودی کنترل با دامنه بالا باعث ایجاد پدیده چترینگ می شود که این موضوع باعث تشدید پدیده اشباع نیز می شود. در این مورد، یک کنترل کننده مود لغزشی تطبیقی برای حذف تخمین در [۱۷] معرفی شده است. اشکال این روش این است که کنترل کننده مورد استفاده به اندازه ناحیه مرده حساس و وابسته است. در [۱۸] از یک استراتژی جدید کنترل مود لغزشی تطبیقی برای تثبیت ارتفاع یک وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین (کوآدروتور)، که در آن اشباع ورودی در نظر گرفته می شود، استفاده شده است. مدل دینامیکی غیرخطی پهپاد در حضور عدم قطعیت سیستم و اغتشاش خارجی ابتدا با استفاده از معادله مکانیکی اوپلر-لاگرانژ به دست آمده است. برای اطمینان از پایداری سیستم و همچنین از بین بردن اثرات منفی ویژگی های اشباع، یک قانون کنترل مد لغزشی تطبیقی اشباع شده پیشنهاد شده که همزمان از مزایای کنترل مد لغزشی و کنترل تطبیقی بهره

می‌برد. نشان داده شده با استفاده از طرح پیشنهادی، عملکرد ردیابی بهتری انجام و خاصیت کاهش اثرات اغتشاش و عدم قطعیت را می‌توان با کاهش میانگین مربعات ریشه خطا در ردیابی مسیر بهینه نمود.

در [۱۹] مسئله کنترل تطبیقی مبتنی بر داده‌های حافظه در حضور عدم قطعیت‌ها و اشباع ورودی بررسی شده است. در مرحله اول، از روش تخمین عدم قطعیت‌ها و تابع مانع به ترتیب برای مقابله با محدودیت‌های غیرخطی نامشخص و محدودیت ورودی استفاده شده است. در مرحله بعد، یک رویکرد کلی در مورد طراحی کران بالای همگرایی نامتقارن برای افزایش ناحیه همگرایی ارائه شده است. ثانیاً، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، اشباع ورودی و همگرایی نامتقارن، یک کنترل کننده مد لغزشی یکپارچه طراحی شده تا دقت ردیابی را تضمین کند. در مرحله پایانی، پایداری کنترل کننده و خطای همگرایی اثبات شده و کارایی کنترل کننده تایید شده است. در [۲۰] روش کنترل پیش‌بین مقاوم برای سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی پیوسته با زمان در حضور اشباع محرک و عدم قطعیت‌های وابسته به زمان پیشنهاد شده است. طرح پیشنهادی این مقاله بر اساس استفاده از ایده پیش‌بینی مدل همراه با کنترل مد لغزشی فازی تطبیقی برای تنظیم پارامترهای سطح لغزش با پیش‌بینی دامنه عدم قطعیت‌ها می‌باشد. در طرح پیشنهادی، پس از برآورده شدن شرایط راه اندازی، ضرایب سطح لغزش بروز شده و کنترل کننده جدید، اعمال شده و پیچیدگی محاسباتی را می‌توان با تنظیم قانون کلیدزنی کنترل کرد. در ادامه، یک کنترل کننده فازی تطبیقی استفاده شده تا از ناپایداری ناشی از اشباع محرک جلوگیری شود. بر اساس سطح لغزش تطبیقی، کران بالای خطای تقریب و بهره اشباع محرک‌ها تنظیم می‌شوند. پایداری حلقه بسته با استفاده از قضیه توابع چند گانه لیاپانوف و لم باربالات تضمین شده است. در [۲۱] یک الگوریتم جدید کنترل مد لغزشی مرتبه کسری بازگشتی زمان محدود مبتنی بر تخمین نامعینی‌ها تحت اغتشاشات و اشباع ورودی برای دسته‌ای از ربات‌ها پیشنهاد شده است. یک سطح لغزش مرتبه کسری بازگشتی بر اساس تابع لغزشی سریع ناتکین مرتبه کسری و یک عبارت انتگرالی ساخته شده که همگرایی سریع پاسخ و عملکرد ردیابی با دقت بالا را می‌توان به دست می‌دهد. در ادامه، یک سیستم کمکی برای غلبه بر اثرات نامطلوب اشباع ورودی طراحی شده است. در پایان، برای جبران عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات خارجی، یک تخمین گر زمان محدود تطبیقی طراحی و پایداری شده و خطای تخمین در زمان محدود برای کران ناشناخته نامعینی‌ها و مشتق آن اثبات شده است. پایداری کنترل کننده پیشنهادی با تئوری پایداری لیاپانوف بررسی شده است.

سیستم‌های آشوبی سیستم‌هایی هستند که در بسیاری از کاربردهای مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همزمان سازی آشوبی و کنترل آشوب یکی از چالش‌های اخیر در زمینه سیستم‌های غیرخطی می‌باشد که توجه محققان را به خود جلب کرده است. هر چه مرتبه سیستم بزرگتر و ساختار آن پیچیده تر باشد، عملیات همزمان سازی و انتقال اطلاعات بهتر و سیستم کارآمدتر می‌شود [۲۲]. برای یک گیرنده غیرمجاز، رمزگشایی مبتنی بر آشوب بدون اطلاع از دینامیک سیستم و شرایط اولیه دشوار است. یکی از راه‌های افزایش امنیت، افزایش مرتبه سیستم آشوبی است، چون که بازیابی پیام‌ها برای منابع غیرمجاز با استفاده از روش‌های معکوس دشوار است. یکی دیگر از راه‌های افزایش امنیت، پیچیدگی دینامیکی سیستم است، زیرا رمزگشایی را دشوار می‌کند. به عنوان مثال، در [۲۳]، همزمان سازی مبتنی بر هرج و مرج عمومی بین دو سیستم غیر خطی آشوبی مرتبه صحیح و مرتبه کسری مورد مطالعه قرار گرفته است. سیگنال‌های کنترلی جدید با استفاده از روش تئوری پایداری و کنترل کننده ردیابی مرجع طراحی شده اند. کنترل کننده طراحی شده در این مقاله از نوع تابع مانعی بوده که این کنترل کننده در [۲۴] تکمیل شده است. در [۲۵]، همزمان سازی زمان سیستم‌های آشوبی ممرستور چهار بعدی در حضور اغتشاش مورد مطالعه قرار گرفته است. در طرح پیشنهادی، ابتدا

یک مدار شبیه ساز ممریستور برای پیاده سازی ایجاد می شود. سپس بر اساس مدار شبیه ساز ارائه شده، مدل ممریستور ارائه و توسط کنترل کننده پیشنهادی مقاوم، کنترل می شود. در [۲۶]، همزمان سازی مبتنی بر آشوب سیستم های غیرخطی لو با اغتشاش و عدم قطعیت انجام شده و یک طرح کنترلی با توجه به ابعاد سیستم با استفاده از کنترل مد لغزشی مقاوم ارائه شده است. در مرحله اول، یک کنترل مد لغزشی یکپارچه برای همزمان سازی آشوبی سیستم های غیرخطی با پارامترهای نامشخص پیشنهاد شده است. در مرحله دوم، یک سیگنال کنترلی جدید برای همزمان سازی سیستم های غیرخطی گیرنده- فرستنده لو استفاده می شود. در این حالت، پارامترهای مثبت نامشخص با استفاده از قانون کنترل تطبیقی تخمین زده می شوند. در نهایت، پایداری ساختار کنترل طراحی شده با استفاده از روش پایداری لیاپانوف ثابت می شود.

هدف این مقاله طراحی یک کنترل کننده مد لغزشی زمان محدود بر اساس عملکرد مانع برای سیستم های دارای اشباع ورودی است که در ادامه این کنترل کننده برای یک سیستم غیرخطی مرتبه بالا اعمال می شود. سیستم غیرخطی مورد مطالعه یک سیستم فوق آشوبی مرتبه ۵ جدید است. تحت کنترل کننده پیشنهادی، متغیرهای حالت می توانند در حضور اشباع محرک به یک منطقه خاص در اطراف مبدأ همگرا شوند و سپس در آنجا باقی بمانند. یکی از مزایای روش مورد استفاده، عدم نیاز به دانستن حد بالای اغتشاشات است که معمولاً در کنترل مد لغزشی معمولی درخواست می شود. همچنین، یکی دیگر از ویژگی های طرح کنترل پیشنهادی مطابقت بهره کنترلی با تغییرات دامنه اغتشاشات می باشد به طوری که تخمین بیش از حد از بین می رود.

خلاصه این مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲ فرمول مسئله و ساختار کنترلی مد لغزشی زمان محدود تطبیقی تابع مانعی و معرفی می شود و مقایسه ای بین کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده مشابه انجام خواهد شد. در بخش ۳، یک سیستم غیرخطی فوق آشوبی ۵ بعدی جدید معرفی و تحلیل غیرخطی انجام خواهد شد. بخش ۴ به کاربرد روش پیشنهادی و شبیه سازی عددی اختصاص داده خواهد شد. در نهایت، در بخش ۵، نتیجه گیری از بخش های قبلی انجام خواهد شد.

## ۲- فرمول بندی مسئله و طراحی کنترل کننده

### ۲-۱- فرمول بندی مسأله

یک سیستم غیر خطی از مرتبه  $n$  را به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f(x_2) \\ \dot{x}_2 = f(x_3) \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = f(x_n) \\ \dot{x}_n = F(x, t) + D(x, t) + B(x, t)u \end{cases} \quad (1)$$

جایی که  $x = [x_1, \dots, x_n]^T$ ,  $F(x, t)$ ,  $B(x, t)$  و  $D(x, t)$  مجموع عدم قطعیت ها و اغتشاشات سیستم می باشد.

در این مورد با توجه به ساختار کلی سیستم (۱)، موارد و نتایج زیر را خواهیم داشت:

(۱) در طرح پیشنهادی، کنترل کننده مد لغزشی تابع مانعی بر اساس ساختار کلی رابطه (۱) پیشنهاد شده است. در طرح کنترلی پیشنهادی، سطح بالایی از عدم قطعیت مورد نیاز است و اندازه منطقه همگرایی را نیز می توان از پیش تعیین نمود به طوری که عملکرد کنترل کننده، مستقل از حد بالای عدم قطعیت است. در نهایت نوسانات ناخواسته در سیستم، کاهش یافته و پدیده چترینگ نیز حذف خواهد شد.

(۲) کنترل کننده مد لغزشی زمان محدود تابع مانعی را به صورت (۲) در نظر بگیرید:

$$u = \frac{1}{B(x,t)}(u_1 + u_2) \quad (2)$$

جایی که  $u_1, u_2$  ورودی های ناپیوسته کنترلی هستند که در ادامه طراحی خواهند شد. برای طراحی کنترل کننده، سطح لغزش را به صورت (۳) تعریف می کنیم [۲۷]:

$$\delta = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} x_1 \quad (3)$$

جایی که  $\lambda$  یک ثابت مثبت هستند و برای تعیین عملکرد در فاز لغزش استفاده می شود. با استفاده از تعاریف  $x, x_1$  رابطه (۳) را به صورت زیر خواهیم داشت [۲۸]:

$$\delta = [A^T \quad 1]x \quad (4)$$

جایی که  $A = [\lambda^{(n-1)}, (n-1)\lambda^{(n-2)}, \dots, (n-1)\lambda]^T$ . با مشتق گیری از متغیر سطح لغزش و با استفاده از معادلات (۱) و (۲) داریم:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= [0 \quad A^T]x + \dot{x}_n = [0 \quad A^T]x + F(x,t) + D(x,t) + B(x,t) \\ &= [0 \quad A^T]x + F(x,t) + D(x,t) + \chi(u_1 + u_2) \end{aligned} \quad (5)$$

جایی که  $0 \leq \chi(u(t)) \leq 1$  و  $\chi$  به عنوان بهره ورودی کنترل معرفی می شود. با فرض  $\chi = 1$  و  $D(x,t) = 0$  و  $u_2 = 0$  ورودی کنترل  $u_1$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$u_1 = -F(x,t) - [0 \quad A^T]x \quad (6)$$

با قرار دادن معادلات (۲) و (۶) در معادله (۵) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}\dot{\delta} &= \begin{bmatrix} 0 & A^T \end{bmatrix} x + F(x, t) + D(x, t) + \chi(u_1 + u_2) = \\ &= \begin{bmatrix} 0 & A^T \end{bmatrix} x + F(x, t) + \chi(-F(x, t) - \begin{bmatrix} 0 & A^T \end{bmatrix} x) + \chi u_1 + D(x, t) \\ &= (1 - \chi)(F(x, t) - \begin{bmatrix} 0 & A^T \end{bmatrix} x) + \chi u_1 + D(x, t) = \\ &= \chi u_1 + \gamma\end{aligned}\quad (7)$$

جایی که  $\gamma$  عدم قطعیت افزایشی می باشد و برابر است با:

$$\gamma = (1 - \chi)(F(x, t) + \begin{bmatrix} 0 & A^T \end{bmatrix} x) + D(x, t) \quad (8)$$

فرض می شود  $D(x, t)$  محدود بوده و برای تمام حالت های  $x$ ، تابع  $F(x, t)$  متناهی می باشد، بنابراین  $\gamma$  نیز محدود بوده و به صورت زیر تعریف می شود:

$$|\gamma| < k \quad (9)$$

جایی که  $k$  ثابت مثبتی است که یک کران بالایی برای آن وجود دارد اما ناشناخته است. برای غلبه بر عدم قطعیت های  $\gamma$ ، یک عدد ثابت مثبت از منحنی  $\mathcal{E}$  را انتخاب می کنیم تا متغیرهای سطح لغزش به آن ناحیه همگرا شوند. با توجه به منطقه همگرایی و با توجه به اندازه اغتشاشات، دو حالت برای  $\mathcal{E}$  در نظر می گیریم.

**حالت (۱):** برای  $|\delta| \geq \mathcal{E}$ ، ورودی کنترل را به صورت (۱۰) طراحی می کنیم:

$$u_2 = -\alpha \hat{\tau} \hat{k} \tanh(\delta) \quad (10)$$

جایی که  $\hat{\tau}$ ،  $\hat{k}$  پارامترهای تطبیقی سیستم بوده و به صورت (۱۱) تعریف می شوند:

$$\begin{aligned}\hat{k} &= \eta^{-1} |\delta| \\ \hat{\tau} &= \alpha \hat{\tau}^3 k |\delta| \\ \alpha &> 1, \eta > 0, \hat{\tau}(0) > 0\end{aligned}\quad (11)$$

**حالت (۲):** برای  $|\delta| \leq \mathcal{E}$  ورودی کنترل را به صورت (۱۲) طراحی می کنیم:

$$u_2 = -F_b(\delta) \tanh(\delta) \quad (12)$$

جایی که تابع  $F_b(\delta)$  در رابطه (۱۲) تابع مانع می باشد که در [۲۹] به صورت (۱۳) معرفی شده است.

$$F_b(\delta) = \frac{|\delta|}{\mathcal{E} - |\delta|} \text{ for } \delta \in (-\mathcal{E}, \mathcal{E}) \quad (13)$$

بنابراین طراحی کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی تابع مانع به اتمام رسید. برای طراحی کنترل کننده (۲)، ابتدا فرض نمودیم  $u_2 = 0$  بوده و ورودی کنترل  $u_1$  را به صورت رابطه (۶) به دست آوردیم. در مرحله بعد برای طراحی ورودی کنترل  $u_2$  که به صورت سویچینگ می باشد دو حالت را در نظر گرفتیم که این حالت ها بر اساس منطقه همگرایی و با توجه به اندازه اغتشاشات در نظر گرفته شدند که حالت اول به صورت رابطه (۱۰) و حالت دوم نیز که از کنترل کننده تابع مانع استفاده شد، در رابطه (۱۲) تعریف گردید.

**قضیه (۱):** سیستم غیرخطی (۱) را با مجموع عدم قطعیت ها و اغتشاشات  $D(x, t)$  در نظر بگیرید. با اعمال کنترل کننده معرفی شده در (۲)، می توان تضمین نمود که سطح لغزش  $\delta$  به صورت مجانبی به ناحیه از پیش تعریف شده  $|\delta| < \varepsilon$  همگرا شود.

## ۲-۲- تحلیل پایداری

**فرض (۱):** با توجه به خاصیت عددی، همیشه یک ثابت مثبت  $\tau$  وجود دارد که شرایط زیر را برآورده می کند [۱۶]:

$$0 < \tau \leq \chi(u(t)) \leq 1 \quad (14)$$

**فرض (۲):** خطاها را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$\tilde{\tau} = \tau - \hat{\tau}^{-1} \quad (15)$$

$$\tilde{k} = k - \hat{k} \quad (16)$$

**اثبات قضیه (۱):** برای حالت (۱)، با ورودی کنترل (۶) و برای  $|\delta| \geq \varepsilon$ ، ابتدا تابع لیاپانوف مثبت معین  $v$  را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$v = 0.5(\delta^2 + \eta \tilde{k}^2 + \tilde{\tau}^2) \quad (17)$$

با استفاده از رابطه (۷) و استفاده از مشتق تابع لیاپانوف و قرار دادن آن در ورودی کنترل (۲) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \delta \dot{\delta} + \eta \tilde{k} \dot{\tilde{k}} + \tilde{\tau} \dot{\tilde{\tau}} \\ &= \delta(\chi u_2 + \gamma) - \eta \tilde{k} \dot{\hat{k}} + \tilde{\tau} \dot{\hat{\tau}} \\ &= \delta(-\chi \alpha \hat{\tau} \hat{k} \tanh(\delta) + \gamma) - \eta \tilde{k} \dot{\hat{k}} + \tilde{\tau} \hat{\tau}^{-2} \dot{\hat{\tau}} \\ &\leq -\chi \alpha \hat{\tau} \hat{k} |\delta| + |\gamma| |\delta| - \tilde{k} |\delta| - \hat{k} |\delta| \\ &= -(\chi - \tau) \alpha \hat{\tau} \hat{k} |\delta| + |\gamma| |\delta| - \tilde{k} |\delta| - \alpha \hat{k} |\delta| \\ &\leq |\gamma| |\delta| - (k - \hat{k}) |\delta| - \alpha \hat{k} |\delta| \\ &= -((\alpha - 1) \hat{k} + (k - |\gamma|)) |\delta| \end{aligned} \quad (18)$$

با  $k > |\gamma|$  و  $\alpha > 1$  در نتیجه  $\dot{v} \leq 0$  و در نتیجه با این شرایط، حالت های سیستم به سطح لغزش می رسند. در این صورت به ازاء  $|\delta| \geq \varepsilon$ ، مدهای سیستم در زمان محدود به  $(-\varepsilon, \varepsilon)$  می رسند. بنابراین اثبات حالت اول کامل می شود.

**اثبات قضیه (۱):** برای حالت (۲)، با ورودی کنترل (۱۰) و برای  $|\delta| < \varepsilon$ ، ابتدا یک متغیر میانی  $\theta$  به صورت زیر تعریف می کنیم:



$$\theta = \varepsilon \frac{|\gamma|}{|\gamma| + \chi} \quad (19)$$

لازم به ذکر است که متغیر  $\theta$  متناسب است با اغتشاشات متغیر با زمان  $\gamma$ . با توجه به مطالب عنوان شده، ما به دنبال این هستیم که با  $\theta \leq |\delta| \leq \varepsilon$  ورودی کنترل تابع مانع (۱۰) تضمین کند که سطح لغزش  $\delta(t)$  به  $[-\theta, \theta]$  همگرا می شود. تابع کاندید لیاپانوف به صورت زیر انتخاب می شود:

$$w = 0.5 \left( \delta^2 + (F_b(\delta) - F_b(0))^2 \right) \quad (20)$$

با استفاده از رابطه (۷) و استفاده از مشتق تابع کاندید لیاپانوف و قرار دادن آن در ورودی کنترل (۶) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \delta \dot{\delta} + F_b(\delta) \dot{F}_b(\delta) \\ &= \delta (\chi u_2 + \gamma) + F_b(\delta) \frac{\varepsilon}{(\varepsilon - |\delta|)^2} \tanh(\delta) \dot{\delta} \\ &= \delta (-\chi F_b(\delta) \tanh(\delta) + \gamma) + F_b(\delta) \frac{\varepsilon}{\varepsilon - |\delta|^2} \tanh(\delta) (-\chi F_b(\delta) \tanh(\delta) + \gamma) \\ &\leq -\chi F_b(\delta) |\delta| + |\gamma| |\delta| + F_b(\delta) \frac{\varepsilon}{(\varepsilon - |\delta|)^2} (-\chi F_b(\delta) + |\gamma|) \\ &= -(\chi F_b(\delta) - |\gamma|) |\delta| - F_b(\delta) \frac{\varepsilon}{(\varepsilon - |\delta|)^2} (\chi F_b(\delta) - |\gamma|) \end{aligned} \quad (21)$$

که روابط زیر را می توان با تعریف  $\gamma_1, \gamma_2$  به صورت زیر از رابطه (۲۱) به دست آورد:

$$\gamma_1 = \chi F_b(\delta) - |\gamma| \quad (22)$$

$$\gamma_2 = (\chi F_b(\delta) - |\gamma|) \frac{\varepsilon}{(\varepsilon - |\delta|)^2} \quad (23)$$

با توجه به روابط (۱۳) و (۱۹)، برای تمام  $\theta \leq |\delta| \leq \varepsilon$  و  $\gamma_1, \gamma_2 \geq 0$  می توان نتیجه گرفت  $F_b(\delta) \geq F_b(\theta) = \chi^{-1} |\gamma|$ . بنابراین معادله (۲۱) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \dot{W} &\leq -\gamma_1 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} |\delta| - \gamma_2 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} F_b(\delta) \\ &\leq -\min\{\gamma_1 \sqrt{2}, \gamma_2 \sqrt{2}\} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}} |\delta| + \frac{1}{\sqrt{2}} F_b(\delta) \right\} \\ &\leq -\phi W^{0.5} \end{aligned} \quad (24)$$

جایی که:

$$\phi = \min\{\gamma_1 \sqrt{2}, \gamma_2 \sqrt{2}\} \quad (25)$$

با  $\phi \geq 0$  یک ثابت مثبت  $\bar{\phi}$  وجود دارد که:

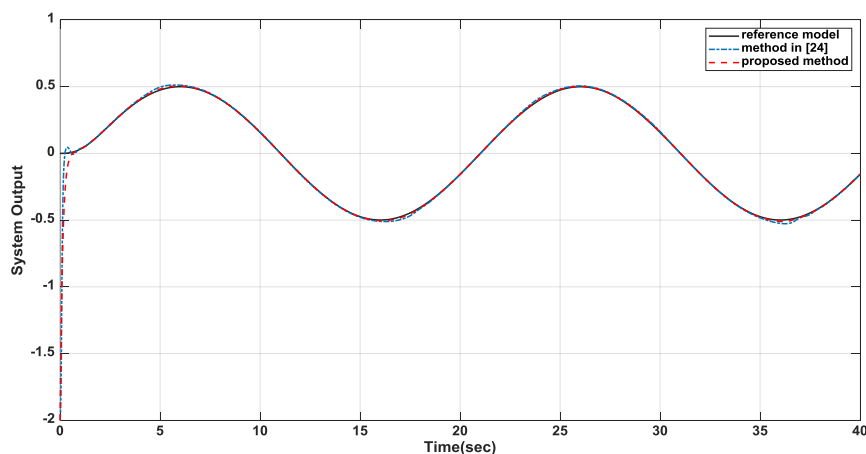
$$\bar{\phi} \leq \phi, \forall \theta < |\delta| < \varepsilon \quad (26)$$

بنابراین، خواهیم داشت:  $\dot{w} \leq -\bar{\phi} w^{0.5}$

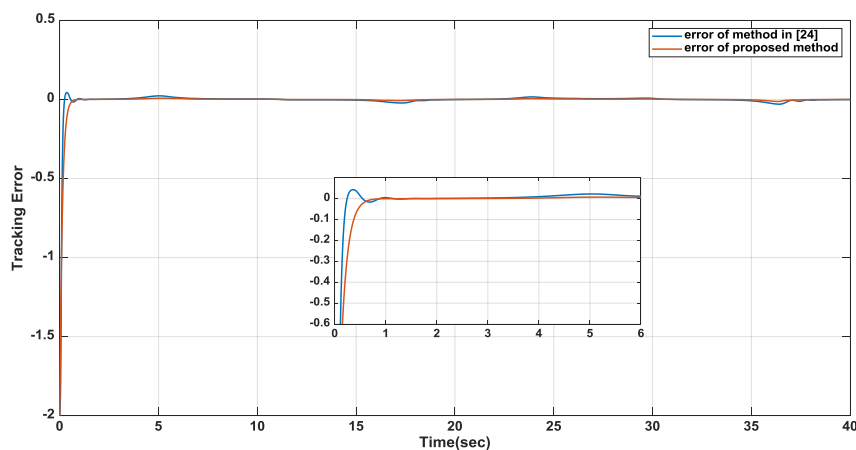
با استفاده از نتایج، برای  $\theta \leq |\delta| \leq \varepsilon$  متغیر سطح لغزش با شرایط اولیه  $\delta(0)$  در یک زمان محدود به  $[-\theta, \theta]$  همگرا می شود. بنابراین اثبات حالت دوم نیز کامل می شود.

### ۳-۲- نتایج شبیه سازی کنترل کننده پیشنهادی

در این بخش، برای ارزیابی بیشتر عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، عملکرد آن را با کنترل کننده مشابه در [۲۴] مقایسه می کنیم. شکل ۱ خروجی سیستم را با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با خروجی های کنترل کننده [۲۴] در مقایسه با مدل مرجع نشان می دهد. در این شکل ابتدا یک مدل مرجع به صورت سینوسی انتخاب نمودیم. سپس با اعمال ورودی مرجع به هر دو کنترل کننده در سیمولینک متلب، به ارزیابی پاسخ هر دو کنترل کننده پرداختیم. همانطور که مشخص است در مقایسه با مدل مرجع، کنترل کننده مدل لغزشی تابع مانعی عملکرد بهتر و دقیق تری دارد. پاسخ زمانی خطاهای ردیابی در شکل ۲ نشان داده شده است، که در آن سیگنال خطای ردیابی به طور مناسب به مبدأ همگرا می شود و عملکرد ردیابی سریع تر و دقیق تری را نسبت به روش [۲۴] ارائه می دهد.



شکل ۱. خروجی های سیستم



شکل ۲. خطاهای ردیابی

### ۳- طراحی سیستم فوق آشوبی

سیستم غیر خطی فوق آشوبی ۵ بُعدی را در نظر بگیرید که به صورت (۲۷) طراحی شده است:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + a_1 x_4 \\ \dot{x}_2 &= x_3 - a_2 x_2 \\ \dot{x}_3 &= a_3 x_4 - a_4 x_1 x_3 \\ \dot{x}_4 &= -x_3 - a_5 x_4 + x_1 x_2 - a_6 x_2 \\ \dot{x}_5 &= -x_4 - a_7 x_5 + x_1 x_3 - a_8 x_3 \end{aligned} \quad (27)$$

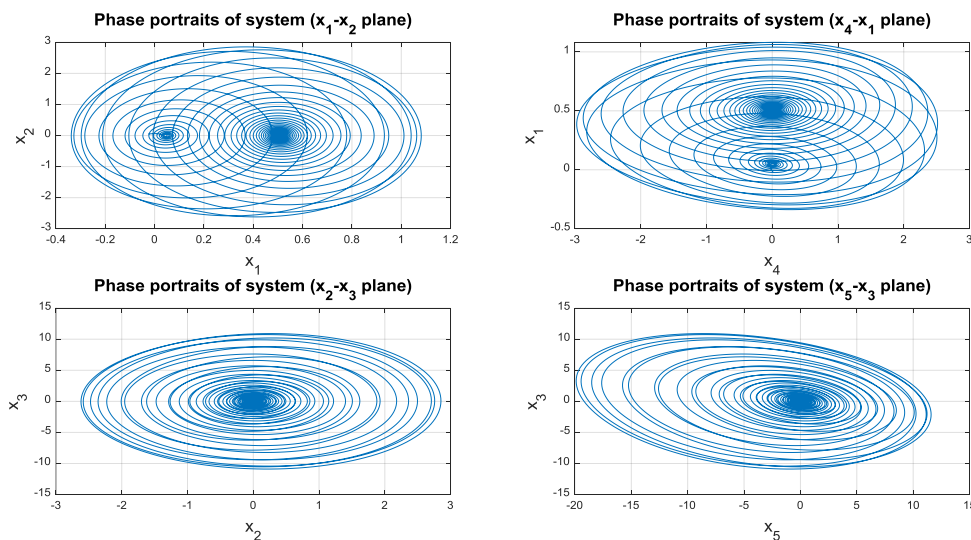
جایی که:

$$\begin{aligned} a_1 = 0.06, a_2 = 0.025, a_3 = 15.8, a_4 = 0.24, a_5 = 0.48, a_6 = 0.95 \\ a_7 = .085, a_8 = 6.2 \end{aligned} \quad (28)$$

با شرایط اولیه:

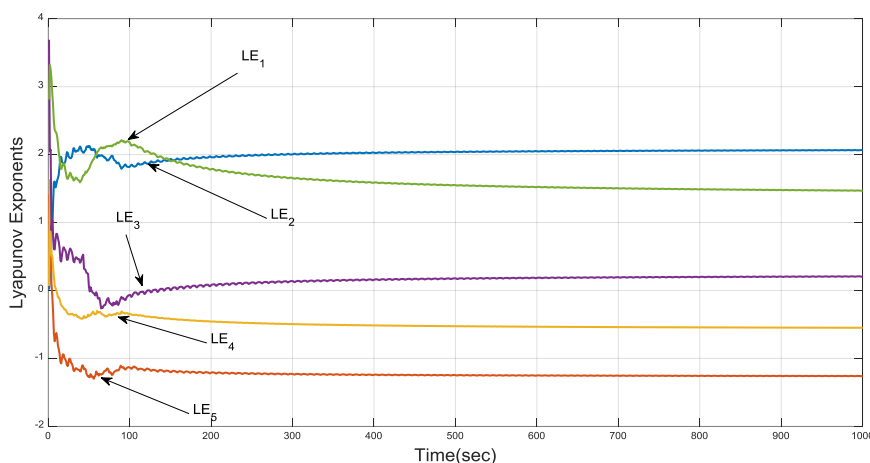
$$\begin{aligned} x_1(0) = -0.025, x_2(0) = -0.053, x_3(0) = -0.0075, x_4(0) = -0.019, \\ x_5(0) = -0.007, \end{aligned} \quad (29)$$

سیستم (۲۷) یک سیستم فوق آشوبی است. حالت های دوبعدی سیستم فوق آشوبی (۲۷) در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. حالت های دوبعدی سیستم فوق آشوبی

واگرایی و همگرایی حالت های یک سیستم غیر خطی، با نمایش نماهای لیاپانوف آن تعیین می شود. یکی از ویژگی های اصلی سیستم های فوق آشوبی، داشتن حداقل دو یا چند نمای لیاپانوف مثبت است [۲۶]. شکل ۴ نماهای لیاپانوف سیستم فوق آشوبی پیشنهادی را نشان می دهد.



شکل ۴: نماهای لیاپانوف سیستم فوق آشوبی جدید

همانطور که مشخص است، سیستم دارای نماهای لیاپانوف زیر است:

$$LE_1 = 2.192, LE_2 = 1.969, LE_3 = 0, LE_4 = -0.3605, LE_5 = -1.189 \quad (30)$$

بر اساس نتایج به دست آمده، سیستم دارای دو نمای لیاپانوف مثبت، یک نمای لیاپانوف صفر و دو نمای لیاپانوف منفی است.

#### ۴- همزمان سازی فوق آشوبی

در این بخش، همزمان سازی زمان محدود و قضایای آن بین دو سیستم پیشنهادی و فوق آشوبی با عدم قطعیت های پارامتری و اغتشاشات ناشناخته ارائه شده است. در این مرحله، ما از سیستم (۲۷) با تغییر در شرایط اولیه و پارامترهای آن، هم به عنوان سیستم فرستنده و هم به عنوان سیستم گیرنده برای همزمان سازی فوق آشوبی استفاده می کنیم. سیستم اصلی فوق آشوبی فرستنده را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1m} &= x_{2m} + a_{1m}x_{4m} \\ \dot{x}_{2m} &= x_{3m} - a_{2m}x_{2m} \\ \dot{x}_{3m} &= a_{3m}x_{4m} - a_{4m}x_{1m}x_{3m} \\ \dot{x}_{4m} &= -x_{3m} - a_{5m}x_{4m} + x_{1m}x_{2m} - a_{6m}x_{2m} \\ \dot{x}_{5m} &= -x_{4m} - a_{7m}x_{5m} + x_{1m}x_{3m} - a_{8m}x_{3m} \end{aligned} \quad (31)$$

جایی که:

$$a_{1m} = 0.06, a_{2m} = 0.025, a_{3m} = 15.8, a_{4m} = 0.24, a_{5m} = 0.48, a_{6m} = 0.95, a_{7m} = 0.085, a_{8m} = 6.2 \quad (32)$$

به طور مشابه، برای سیستم گیرنده خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1s} &= x_{2s} + a_{1s}x_{4s} + u_1 + d_1 \\ \dot{x}_{2s} &= x_{3s} - a_{2s}x_{2s} + u_2 + d_2 \\ \dot{x}_{3s} &= a_{3s}x_{4s} - a_{4s}x_{1s}x_{3s} + u_3 + d_3 \\ \dot{x}_{4s} &= -x_{3s} - a_{5s}x_{4s} + x_{1s}x_{2s} - a_{6s}x_{2s} + u_4 + d_4 \\ \dot{x}_{5s} &= -x_{4s} - a_{7s}x_{5s} + x_{1s}x_{3s} - a_{8s}x_{3s} + u_5 + d_5 \end{aligned} \quad (33)$$

جایی که:

$$a_{1s} = 0.042, a_{2s} = 0.065, a_{3s} = 14.9, a_{4s} = 0.3, a_{5s} = 0.5, a_{6s} = 0.88, a_{7s} = 0.05, a_{8s} = 6 \quad (34)$$

در سیستم گیرنده (۳۳)،  $d_i$  اغتشاشات و  $u_i$  ورودی های کنترل هستند.

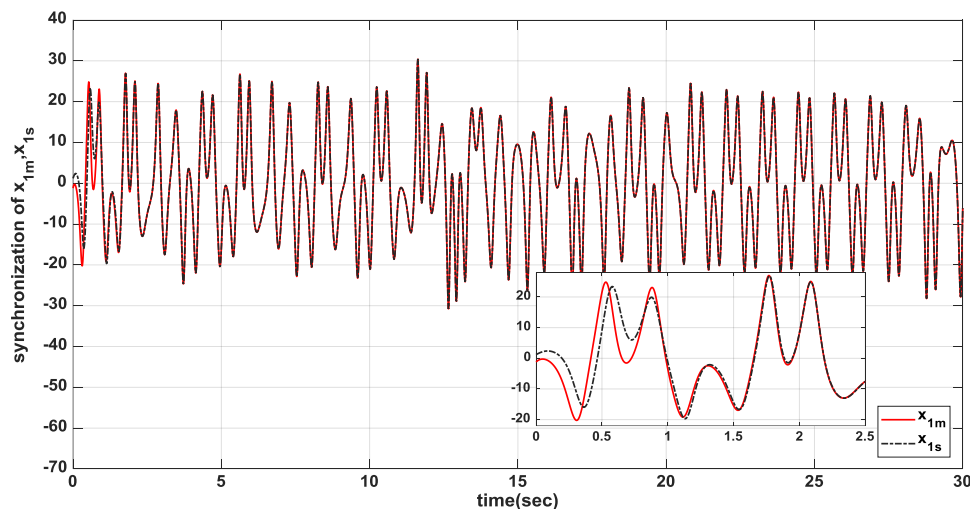
**فرض ۳** خطاهای همزمان سازی فوق آشوبی زمان محدود بین سیستم فرستنده (۳۲) و سیستم گیرنده (۳۳) را به صورت  $e_i = x_{is} - x_{im} \ (i=1, \dots, 5)$  در نظر می گیریم:

**فرض ۴** به طور کلی، محدودیت های مربوط به اغتشاشات و نامعینی ها به صورت  $|f(x(\tau))| \leq \alpha_1$  ,  $|d(\tau)| \leq \alpha_2$  می باشند.

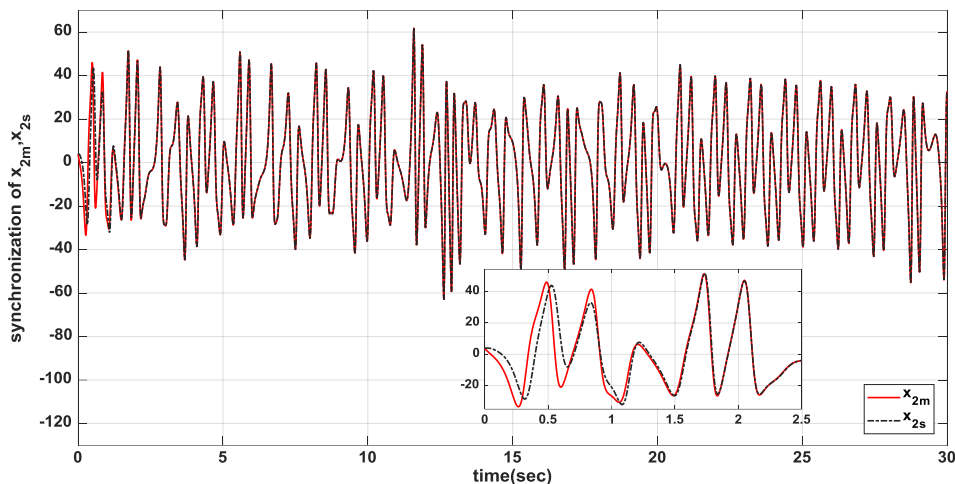
برای همزمان سازی فوق آشوبی، از کنترل کننده (۲) استفاده خواهیم نمود. سپس، بر اساس فرض ۳، ما اطمینان داریم که همزمان سازی فوق آشوبی بین سیستم فرستنده (۳۲) و سیستم گیرنده (۳۳)، در زمان محدود به دست خواهد آمد. بر اساس فرض ۴، مجموع اغتشاشات و نامعینی ها را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1 \sin(t) + 9 \\ 2 \cos(3t) + 1.5 \\ -0.5 \sin(1.2t) - 3 \\ -1.2 \cos(1.4t) \\ 6.3 \cos(2t) - 5.3 \end{bmatrix} \quad (35)$$

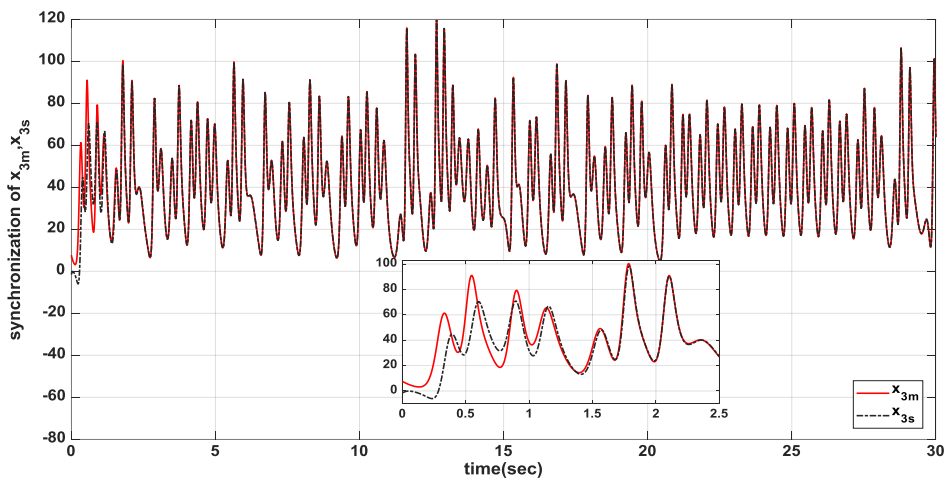
شکل ۵ تا شکل ۹ همزمان سازی فوق آشوبی بین سیستم فوق آشوبی فرستنده (۳۲) و سیستم فوق آشوبی گیرنده (۳۳) را نمایش می دهد. همانطور که مشخص است سیستم های گیرنده و فرستنده در زمان محدود حدود ۲/۳ ثانیه همگرا شده اند.



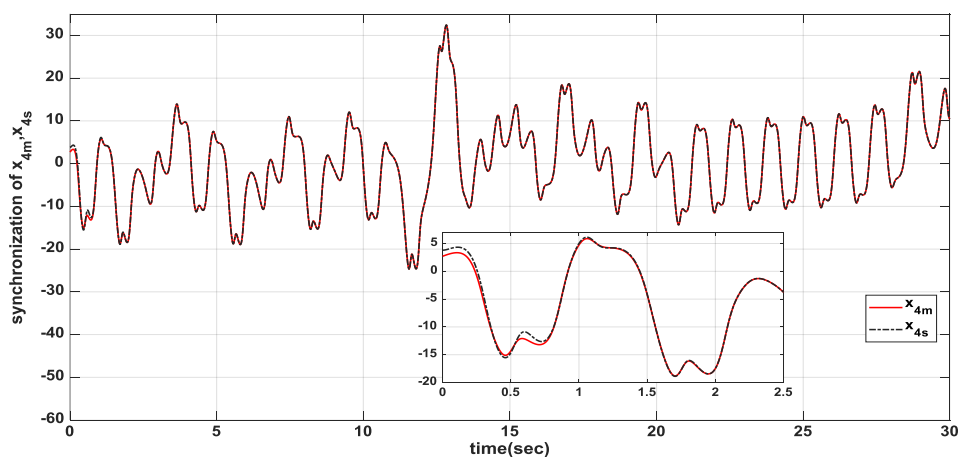
شکل ۵. همزمان سازی فوق آشوبی بین سیستم های گیرنده و فرستنده در حالت اول



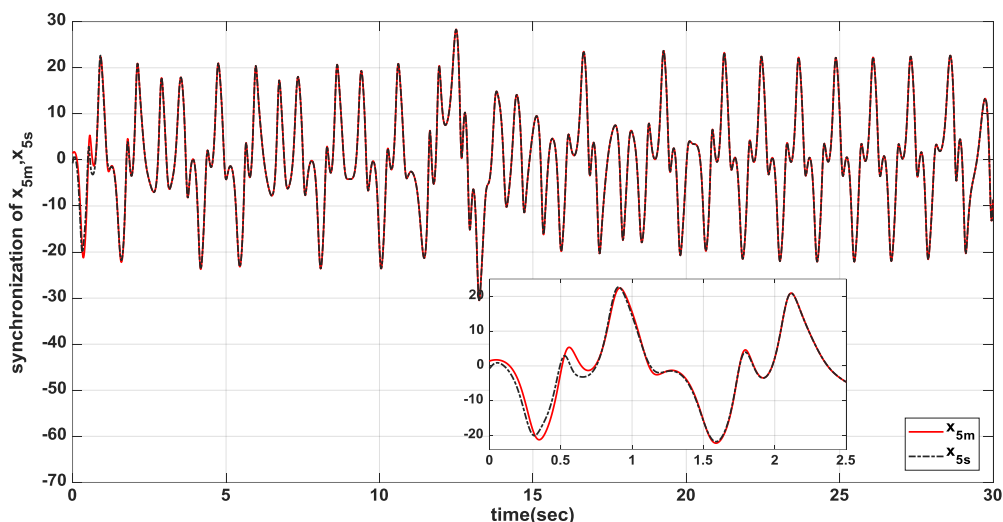
شکل ۶. همزمان سازی فوق آشوبی بین سیستم های گیرنده و فرستنده در حالت دوم



شکل ۷. همزمان سازی فوق آشوبی بین سیستم های گیرنده و فرستنده در حالت سوم

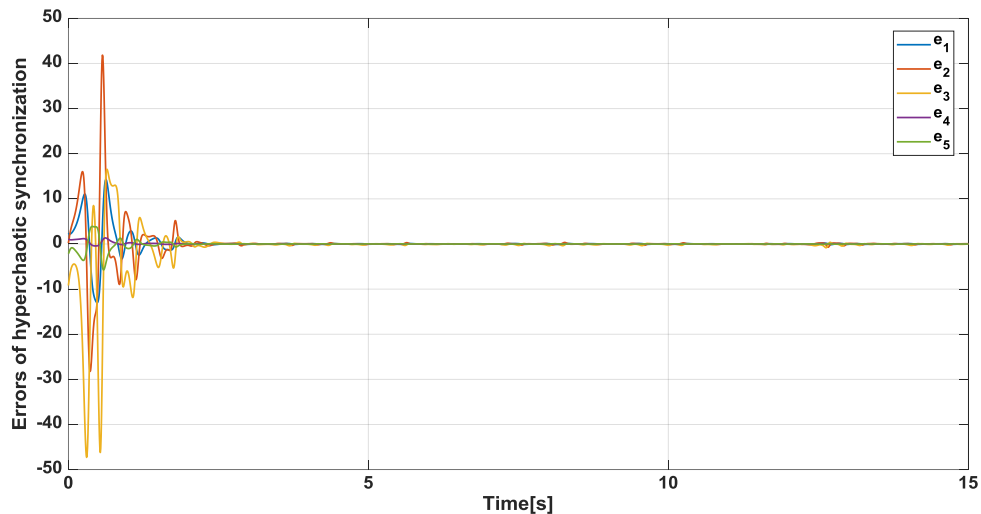


شکل ۸. همزمان سازی فوق آشوبی بین سیستم های گیرنده و فرستنده در حالت چهارم

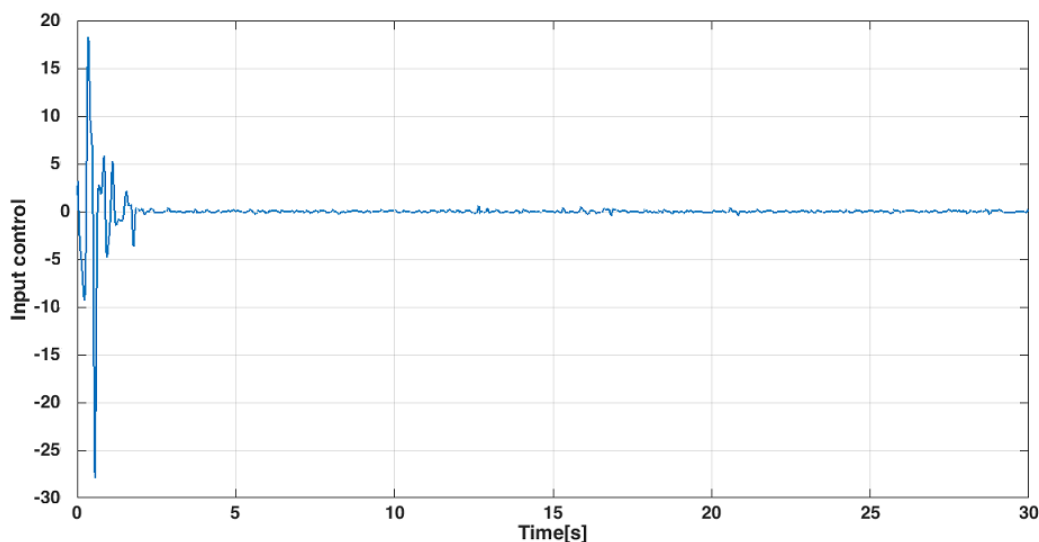


شکل ۹. همزمان سازی فوق آشوبی بین سیستم های گیرنده و فرستنده در حالت پنجم

شکل ۱۰ خطاهای همزمان سازی فوق آشوبی بین سیستم های گیرنده و فرستنده را نمایش می دهد. در نهایت، ورودی کنترلی مورد استفاده برای همزمان سازی فوق آشوبی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی، به راحتی می توان مشاهده کرد که سیستم فوق آشوبی فرستنده (۳۲) و سیستم فوق آشوبی گیرنده (۳۳) در زمان محدود همگرا شده و خطاهای همزمان سازی به مبدا رسیده اند.



شکل ۱۰. خطاهای همزمان سازی فوق آشوبی بین سیستم های گیرنده و فرستنده



شکل ۱۱. ورودی کنترلی مورد استفاده در همزمان سازی فوق آشوبی

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، از یک کنترل کننده تطبیقی بر اساس عملکرد مانع برای غلبه بر اغتشاشات برای همزمان سازی زمان محدود سیستم فوق آشوبی ۵ بعدی استفاده شده است. کنترل کننده طراحی شده از نوع سوئیچینگ بوده و با توجه به اینکه همزمان سازی فوق آشوبی بر اساس تابع خطا طراحی می شود، سطح لغزش مورد استفاده بر اساس تابع خطا تعیین شده است. یکی از نقاط قوت کنترل کننده پیشنهادی، سازگاری و تطبیق کنترل کننده با دامنه اغتشاشات است بدین صورت که با افزایش اغتشاشات سیگنال کنترلی افزایش و با کاهش اغتشاشات سیگنال کنترلی کاهش می یابد. همچنین، کنترل کننده پیشنهادی توانسته بر پدیده چترینگ غلبه کرده و در طراحی آن از تخمین استفاده نشده است. در ادامه یک سیستم غیرخطی ۵ بعدی طراحی و نمودارهای دویعدی سیستم رسم شد و پس از معرفی نماهای لیاپانوف، ثابت نمودیم سیستم غیرخطی معرفی شده، فوق آشوبی می باشد. در مرحله بعد، برای نشان دادن عملکرد کنترل کننده طراحی شده، پس از مقایسه خروجی کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده مشابه، تکنیک همزمان سازی را روی سیستم فوق آشوبی پیشنهادی با کنترل کننده طراحی شده پیاده سازی نمودیم. نتایج نشان می دهد سیستم های فوق آشوبی گیرنده و فرستنده در زمان محدود همگرا شده و خطاهای ردیابی نیز در یک زمان محدود حول مبدا همگرا می شوند.

## مراجع

- [۱] B. Xiao, Q. Hu, and Y. Zhang, "Adaptive sliding mode fault tolerant attitude tracking control for flexible spacecraft under actuator saturation," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 20, no. 6, pp. 1605-1612, 2011.
- [۲] M. Polycarpou, J. Farrell, and M. Sharma, "On-line approximation control of uncertain nonlinear systems: issues with control input saturation," in *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.*, 2003, vol. 1: IEEE, pp. 543-548.
- [۳] Y.-S. Zhong, "Globally stable adaptive system design for minimum phase SISO plants with input saturation," *Automatica*, vol. 41, no. 9, pp. 1539-1547, 2005.
- [۴] J. Zheng and M. Fu, "Saturation control of a piezoelectric actuator for fast settling-time performance," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 220-228, 2011.



- [۵] V. Kapila and K. Grigoriadis, *Actuator saturation control*. CRC Press, 2002.
- [۶] J. Sun and C. Liu, "Distributed fuzzy adaptive backstepping optimal control for nonlinear multimissile guidance systems with input saturation," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 447-461, 2018.
- [۷] Z. Zheng and L. Sun, "Path following control for marine surface vessel with uncertainties and input saturation," *Neurocomputing*, vol. 177, pp. 158-167, 2016.
- [۸] J. Du, X. Hu, and Y. Sun, "Adaptive robust nonlinear control design for course tracking of ships subject to external disturbances and input saturation," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 50, no. 1, pp. 193-202, 2017.
- [۹] Q. Zhou, L. Wang, C. Wu, H. Li, and H. Du, "Adaptive fuzzy control for nonstrict-feedback systems with input saturation and output constraint," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 47, no. 1, pp. 1-12, 2017.
- [۱۰] T. Hu, A. R. Teel, and L. Zaccarian, "Regional anti-windup compensation for linear systems with input saturation," in *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005.*, 2005: IEEE, pp. 3397-3402.
- [۱۱] Y. Liu, Z. Zhao, and F. Guo, "Adaptive Lyapunov-based backstepping control for an axially moving system with input saturation," *IET Control Theory & Applications*, vol. 10, no. 16, pp. 2083-2092, 2016.
- [۱۲] M. Chen and J. Yu, "Adaptive dynamic surface control of NSVs with input saturation using a disturbance observer," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 28, no. 3, pp. 853-864, 2015.
- [۱۳] S. Gao, B. Ning, and H. Dong, "Fuzzy dynamic surface control for uncertain nonlinear systems under input saturation via truncated adaptation approach ", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 290, pp. 100-117, 2016.
- [۱۴] A. Ferrara and M. Rubagotti, "A sub-optimal second order sliding mode controller for systems with saturating actuators," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 54, no. 5, pp. 1082-1087, 2009.
- [۱۵] S. Sadala and B. Patre, "A new continuous sliding mode control approach with actuator saturation for control of 2-DOF helicopter system," *ISA transactions*, vol. 74, pp. 165-174, 2018.
- [۱۶] Q. Hu, G. Ma, and L. Xie, "Robust and adaptive variable structure output feedback control of uncertain systems with input nonlinearity," *Automatica*, vol. 44, no. 2, pp. 552-559, 2008.
- [۱۷] S. Wang, Y. Gao, J. Liu, and L. Wu, "Saturated sliding mode control with limited magnitude and rate," *IET Control Theory & Applications*, vol. 12, no. 8, pp. 1075-1085, 2018.
- [۱۸] X. Shao, G. Sun, W. Yao, J. Liu, and L. Wu, "Adaptive Sliding Mode Control for Quadrotor UAVs with Input Saturation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021.
- [۱۹] H. Liu, Q. Cheng, J. Xiao, and L. Hao, "Data-driven adaptive integral terminal sliding mode control for uncertain SMA actuators with input saturation and prescribed performance," *ISA transactions*, 2021.
- [۲۰] A. Mousavi and A. H. Markazi, "A predictive approach to adaptive fuzzy sliding-mode control of under-actuated nonlinear systems with input saturation," *International Journal of Systems Science*, vol. 52, no. 8, pp. 1599-1617, 2021.
- [۲۱] Z. Chen, X. Wang, and Y. Cheng, "Adaptive finite-time disturbance observer-based recursive fractional-order sliding mode control of redundantly actuated cable driving parallel robots under disturbances and input saturation," *Journal of Vibration and Control*, p. 10775463211051460, 2021.
- [۲۲] C. Li, F. Zhao, C. Liu, L. Lei, and J. Zhang, "A hyperchaotic color image encryption algorithm and security analysis," *Security and Communication Networks*, vol. 2019, 2019.
- [۲۳] P. K. Muhuri, Z. Ashraf, and S. Goel, "A novel image steganographic method based on integer wavelet transformation and particle swarm optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 92, p. 106257, 2020.
- [۲۴] A. Armghan *et al.*, "Barrier Function Based Adaptive Sliding Mode Controller for a Hybrid

- AC/DC Microgrid Involving Multiple Renewables," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 18, p. 8672, 2021.
- [۲۵] L. Wang, T. Dong, and M.-F. Ge, "Finite-time synchronization of memristor chaotic systems and its application in image encryption," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 347, pp. 293-305, 2019/04/15/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2018.11.017>.
- [۲۶] W. Kwon, B. Koo, and S. Lee, "Integral-based event-triggered synchronization criteria for chaotic Lur'e systems with networked PD control," *Nonlinear Dynamics*, vol. 94, no. 2, pp. 991-1002, 2018.
- [۲۷] J.-J. E. Slotine and W. Li, *Applied nonlinear control* (no. 1). Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [۲۸] Y. Pan, C. Yang, L. Pan, and H. Yu, "Integral sliding mode control: performance, modification, and improvement," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 7, pp. 3087-3096, 2017.
- [۲۹] H. Obeid, L. M. Fridman, S. Laghrouche, and M. Harmouche, "Barrier function-based adaptive sliding mode control," *Automatica*, vol. 93, pp. 540-544, 2018