



DOR:

[20.1001.1.23223146.1401.9.2.1.9](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1401.9.2.1.9)

نشریه سازه‌های غیرخطی و مهندسی برق

دوره ۱۰ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۲

صفحات ۴ الی ۲۹

ISSN: 2322-3146

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

چکیده

واژه‌های کلیدی

سیستم فیزیکی سایبری،

کنترل مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم،

کنترل تطبیقی،

عدم قطعیت پارامتری،

حمله سایبری،

پایداری زمان محدود.

طراحی کنترل کننده مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم غیر تکین تطبیقی برای سیستم های فیزیکی سایبری در حضور همزمان عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات ناخواسته و حملات سایبری محرک

عباس نعمتی

نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد میانه، دانشگاه آزاد اسلامی، میانه،

ایران. abbas.nemati@iau.ac.ir

در این مقاله یک روش جدید کنترل مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم غیر تکین تطبیقی برای پایداری سازی زمان محدود و سریع سیستم های فیزیکی سایبری در حضور همزمان عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات ناخواسته و حملات سایبری محرک پیشنهاد شده است. با استفاده از سطح لغزش و منیفولد غیرخطی پیشنهادی، مد رسیدن حذف می شود و عملکرد مقاوم کل سیستم بهبود می یابد. قوانین تطبیقی آنلاین ارائه شده با عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات ناخواسته و حملات سایبری سروکار دارند، طوری که دیگر نیازی به شناسایی کران های بالای آنها نیست. روش کنترل مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم غیر تکین تطبیقی طراحی شده، عملکرد مقاوم سیستم را در شرایط مذکور با انعطاف پذیری و دقت بالا، پاسخ سریع و نرم، بدون نوسانات گذرا و وزوز و نیز همگرایی مناسب در زمان محدود تضمین می کند. نتایج شبیه سازی عددی، اثربخشی و موفقیت روش کنترل مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم غیر تکین تطبیقی را در مقایسه با نتایج روش های کنترل مد لغزشی انتگرالی تطبیقی، کنترل مد لغزشی مرسوم و کنترل فیدبک حالت نشان می دهد.



Sahand University
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1401.9.2.1.9](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1401.9.2.1.9)

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol.10, No.2

Autumn and Winter 2023

ISSN: 2322 – 3146

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

Adaptive Non-singular SOTSM Controller Design for Cyber-Physical Systems with Parametric Uncertainties, Undesirable Disturbances and Actuator Cyber-Attacks

Abbas Nemati

Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering,
Miyaneh Branch, Islamic Azad University, Miyaneh, Iran, abbas.nemati@iau.ac.ir

ABSTRACT

Keywords

Cyber-physical system,
second-order terminal sliding
mode control,
adaptive control,
parametric uncertainty,
cyber-attack,
finite-time stability.

This paper presents a new method for adaptive non-singular Second-order Terminal Sliding Mode (SOTSM) control for the fast and finite time stabilization of Cyber-Physical Systems (CPSs) in the simultaneous presence of parametric uncertainties, unwanted disturbances and actuator cyber-attacks. By utilizing a presented non-linear manifold and sliding surface, the reaching mode is omitted and the entire system's robust performance is improved. The proposed online adaptive laws deal with parametric uncertainties, unwanted disturbances and cyber-attacks, so that there is no need to identify their upper bounds. The designed adaptive non-singular SOTSM control method guarantees the robust performance of the system in the mentioned conditions along with fast and smooth response, high accuracy and flexibility, without transient fluctuations and chattering, as well as desired convergence in finite time. The numerical simulation results show the effectiveness and success of the adaptive non-singular second-order terminal sliding mode control method in comparison to the results of the adaptive integral sliding mode control, traditional sliding mode control and state feedback control.

۱- مقدمه

سیستم های فیزیکی سایبری^۱ (CPSs) نسل جدیدی از سیستم های هوشمند هستند که دارای کاربردهای گسترده در زمینه های مختلف مانند صنایع الکترونیک، سیستم های توزیع آب، سیستم های کنترل پرواز، شبکه هوشمند، هوافضا، حمل و نقل، زیرساخت های عمرانی، مراقبت های بهداشتی، سیستم های قدرت، ساختمان های هوشمند و غیره می باشند که توجه چشمگیر دانشمندان و محققان را به ویژه در دهه اخیر به خود جلب کرده اند [۱-۳]. این سیستم ها یکپارچگی عمیقی را بین فضای فیزیکی و فضای سایبری فراهم می کنند که در آن اجزای دنیای فیزیکی (حسگرها، محرک ها و سیستم های فیزیکی) با اجزای دنیای سایبری (کنترل کننده ها/ رایانه ها) از طریق کانال های ارتباطی سیمی/ بی سیم برای پردازش اطلاعات و فراهم کردن عملکرد مناسب سیستم های فیزیکی از طریق کنترل مناسب به یکدیگر مرتبط شده اند و باید بتوانند اجرای استراتژی های کنترلی متعدد و ارتباطات با محرک ها و حسگرها را در سطح مناسب برآورد کنند و وظایف امنیتی، کنترلی و مدیریتی را بهینه نمایند [۴]. در سیستم های فیزیکی سایبری، اغتشاش ناخواسته خارجی همواره اجتناب ناپذیر بوده و بصورت سیگنال ناخواسته و غیر عمد از فضای اطراف و خارج سیستم ها بر روی آنها اعمال می شود؛ طوری که روی عملکرد سیستم ها تاثیر نامطلوب می گذارد و می تواند کارایی آنها را مختل نماید (از قبیل اثرات باد و طوفان در سیستم های فیزیکی سایبری هوافضا) [۵]. در مقابل، حمله سایبری یک سیگنال خواسته و عمدی است که توسط دشمنان و مهاجمان به روش های مختلف جهت آسیب رساندن، ناکارآمد کردن و ناپایداری سیستم های فیزیکی سایبری به بخش های مختلف آنها به ویژه بخش محرک اعمال می گردد؛ در حالت کلی اثرات نامطلوب حمله سایبری به مراتب بیشتر و شدیدتر از اغتشاش ناخواسته است.

ایمنی و حریم خصوصی دو موضوع مهم برای اطمینان از عملکرد قابل اعتماد سیستم های فیزیکی سایبری هستند. آنها به دلیل ساختار و ماهیت خود دارای رابط های قابل دسترس در فضای فیزیکی و سایبری می باشند، از این رو امنیت و ایمنی سیستم های فیزیکی سایبری به یک موضوع تحقیقات علمی مهم تبدیل شده و توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. با توجه به اینکه فرآیندهای محاسباتی در شبکه ها با امکان پردازش داده از طریق اینترنت فراهم می شوند، لذا سیستم های فیزیکی سایبری اغلب در معرض تهدیدات و حملات سایبری متعدد قرار می گیرند [۶]. علیرغم پیشرفت های موجود در رویکردهای رمزگذاری امنیت فناوری اطلاعات^۲ (IT) در سیستم های اطلاعاتی، این رویکردها تنها برای تضمین امنیت سیستم های فیزیکی سایبری در برابر حملات سایبری و تعامل مناسب بین فضای فیزیکی و سایبری کافی نیستند؛ بنابراین به دلیل اینکه حملات سایبری یکی از تهدیدهای مهم سیستم های فیزیکی سایبری محسوب می شوند، بررسی ایمنی سیستم های فیزیکی سایبری از دیدگاه سیستمی لازم و ضروری است [۷].

کنترل مقاوم در برابر حمله، این امکان را برای سیستم تحت کنترل فراهم می کند تا پس از قرارگیری در معرض حملات سایبری، در کوتاه ترین زمان ممکن، عملکرد اسمی خود را بازگرداند و تا حد امکان از کاهش کارایی جلوگیری نماید. برای بخش وسیعی از عملکرد سیستم های فیزیکی سایبری موضوعات متعددی از قبیل آنالیز پایداری [۸]، مسائل امنیتی [۶]، فیلترینگ [۹]، کنترل تحمل پذیر عیب [۱۰]، آشکارسازی عیب [۱۱]، کنترل مبتنی بر رویکرد [۱۲]، کنترل تطبیقی [۷] و کنترل H_{∞} [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه سیستم های فیزیکی سایبری برای پایش و کنترل از راه دور به اینترنت متصل می شوند، آنها در برابر انواع مختلف حملات از قبیل حمله پارازیتی [۷]، حمله تزریق داده نادرست [۱۴]، حمله بدافزار [۱۵] و حمله منع سرویس^۳ (DoS) [۱۶] بسیار آسیب پذیرند و توجه به مسایل امنیتی نیز حایز اهمیت است. بنابراین با توجه به کاربرد روزافزون سیستم های فیزیکی سایبری، پایدارسازی و ایمن سازی سریع و دقیق آنها در حضور انواع مختلف حملات سایبری، اغتشاشات ناخواسته خارجی و عدم قطعیت ها

^۱ Cyber-Physical Systems

^۲ Information Technology

^۳ Denial of Services

لازم و ضروری است؛ لذا انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه مبتنی بر توسعه روش های جدید مقاوم، سریع و دقیق بسیار مهم و ارزشمند است. در سال های گذشته روش های کنترل انعطاف پذیر متعدد برای سروکارداشتن با این حملات مانند کنترل مبتنی بر رویکرد ایمن برای سیستم های فیزیکی سایبری در برابر حملات خصمانه [۱۷]، کنترل انعطاف پذیر تطبیقی بهبود یافته در مقابل حملات محرک و سنسور [۱۸]، کنترل مقاوم هوشمند برای سیستم های فیزیکی سایبری در برابر حمله DoS [۱۹] و امثال آنها ارائه شده اند ولی با این حال، هنوز کمبودها و نیازهایی برای توسعه و توجه بیشتر وجود دارد.

در میان روش های کنترل، ساختار کنترل مد لغزشی^۱ (SMC) به عنوان یک روش کنترل مقاوم و کارآمد برای کنترل انواع مختلف سیستم ها به کار برده می شود. تکنیک SMC بطور موفقیت آمیز در سیستم های مهندسی و فیزیکی به عنوان یک روش موثر برای سروکارداشتن با غیرخطی گری سیستم، عدم قطعیت، حمله سایبری، تاخیر زمانی، اغتشاش ناخواسته و عیب به کار برده شده است. ویژگی های اساسی کنترل مد لغزشی شامل پاسخ مناسب، مقاوم در برابر آسیب های مختلف و سادگی محاسباتی در مقایسه با روش های کنترل مقاوم دیگر است [۲۰]. رویکرد طراحی کنترل مد لغزشی مرسوم به دو مد تقسیم می شود: مد رسیدن و مد لغزش. در مد رسیدن، قانون کنترل متغیرهای حالت سیستم را مجبور می کند تا به سطح لغزش تعیین شده برسند و در مد لغزش، یک سطح لغزش تعریف می شود، طوری که سیستم تحت کنترل رفتار دینامیک مطلوب را از طریق مرحله لغزش نشان می دهد [۲۱]. در طول مد رسیدن، هیچ تضمینی برای مقاوم بودن سیستم وجود ندارد و پایداری سیستم های مختلف می تواند تحت اغتشاش ناخواسته نامناسب گردد. در واقع رفتار مقاوم سیستم تنها زمانی می تواند محقق شود که متغیرهای حالت سیستم به روی سطح لغزش برسند. بنابراین یک رویکرد طراحی مناسب، مورد نیاز است تا مد رسیدن SMC حذف شده و مد لغزش دقیقاً از تمام شرایط اولیه وجود داشته باشد [۲۲]. علاوه بر این در SMC مرسوم با سطح لغزش خطی، همگرایی به نقطه تعادل مبدأ، آهسته و به صورت پایداری مجانبی است؛ همچنین پدیده وزوز در این روش کنترل باعث ایجاد نوسانات بالا در ورودی کنترل سیستم می شود و می تواند منجر به نوسانات در عملکرد سیستم فیزیکی، گرما و حتی ناپایداری آن گردد [۲۳].

به عنوان یک رویکرد امیدوارکننده، از رویکرد SMC نوع انتگرال-که معمولاً شامل یک بخش اسمی پیوسته با هدف تثبیت دینامیک حالت لغزشی و بخش جبران ناپیوسته برای اطمینان از حرکت لغزشی است- استفاده می شود. ویژگی جذاب SMC نوع انتگرال، حذف مد رسیدن مورد نظر در SMC مرسوم و حفظ مرتبه اصلی سیستم است. در سال های اخیر پیشرفت هایی در رویکرد SMC نوع انتگرال برای سیستم های دینامیکی مختلف انجام شده است ولی با این حال این روش در مواجهه با نفوذهای خارجی و عدم قطعیت ها دارای نقاط ضعفی است که باعث بروز مشکلات متعدد از جمله نوسانات گذرا و تاخیرهای زمانی می شود [۲۴].

برای غلبه بر چالش های ذکر شده، استفاده از روش کنترل مد لغزشی ترمینال^۲ (TSM) و یا بهتر از آن استفاده از روش کنترل مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم^۳ (SOTSM) با سطح لغزش و منیفولد غیرخطی برای رسیدن حالت های سیستم به نقطه تعادل مبدأ در زمان محدود پیشنهاد شده است. کنترل مد لغزشی ترمینال مرسوم غالباً دارای مشکل تکینی^۴ است و منجر به ورودی های کنترل با دامنه بالا می شود، لذا می توان برای حل مشکل و تسریع همگرایی از روش کنترل SOTSM غیرتکین استفاده کرد. در روش کنترل SOTSM غیرتکین با طراحی سطح لغزش و منیفولد غیرخطی و اعمال عبارات توان کسری در آن، همگرایی حالت های سیستم به مبدأ در زمان محدود، عملکرد دقت بالا و بدون مشکل تکینی تضمین می شود. به طور کلی روش کنترل SOTSM غیرتکین، پاسخ سریع تر، همگرایی زمان محدود، کنترل مقاوم و نرم، دقت بالا، عملکرد گذرای مناسب و بدون نوسانات و پدیده وزوز ارائه می کند

^۱ Sliding Mode Control

^۲ Terminal Sliding Mode

^۳ Second-order Terminal Sliding Mode

^۴ Singularity

[۲۵]. در این مقاله به دلیل ویژگی های برتر ذکر شده برای روش کنترل SOTSM غیرتکین، از این روش برای کنترل مقاوم سیستم های فیزیکی سایبری و پایدارسازی آنها در زمان محدود و سریع استفاده شده است.

در مرجع [۶]، ساختار یادگیری مبتنی بر داده برای آشکارسازی و کاهش حملات برگشتی در سیستم های فیزیکی سایبری بررسی شده است و در مقاله [۷]، کنترل تطبیقی بدون مدل انعطاف پذیر برای CPS در مقابل حمله پارازیتی ارائه شده است. مرجع [۸] تخمین حالت سیستم های فیزیکی سایبری را با وجود حملات فریبکارانه پیشنهاد می دهد که در آن محاسبه تخمین حالت از طریق تابع چگالی احتمال انجام شده است. در مرجع [۱۲]، روش کنترل ارتجاعی مبتنی بر روینگر برای CPS تحت حملات DoS مورد بررسی قرار گرفته که در آن روینگرهای اغتشاش برای تقریب اغتشاشات ناخواسته به کار برده شده اند. روش کنترل H_{∞} مبتنی بر روینگر در [۱۳]، برای سیستم های فیزیکی سایبری تحت حملات منع سرویس پیشنهاد شده و در مرجع [۱۴]، اثر حمله تزریق داده نادرست قابل کنترل برای یک CPS بررسی شده است. در مقاله [۲۶]، نویسندگان روش های هوشمند جدید مانند مدل های تشخیص الگو و شبکه های عصبی را برای امنیت سایبری در CPS مورد مطالعه قرار داده اند و در مرجع [۲۷]، ساختار کنترل امنیتی برای سیستم های فیزیکی سایبری با یک شبکه پیچیده در لایه فیزیکی در حضور حملات تزریق داده نادرست مورد بررسی قرار گرفته است. موضوع کنترل مبتنی بر روینگر برای نوعی CPS خطی در مرجع [۲۸] مورد مطالعه قرار گرفته و یک کنترل تطبیقی برای سیستم های فیزیکی سایبری در مقابل حمله محرک در مرجع [۲۹] ارائه شده است.

در زمینه روش های کنترل مد لغزشی، کنترل مد لغزشی ترمینال متداول و کنترل مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم کارهای متعددی انجام شده است. در مرجع [۲۱] یک روش طراحی کنترل مد لغزشی برای ساختار مخزن مخروطی و در مرجع [۲۲]، روش کنترل ساختار متغیر مبتنی بر روینگر برای سیستم هایی با عدم قطعیت پارامتری و بدون مد رسیدن بررسی شده است. روش کنترل مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم از طریق تخمین بی نظمی در مرجع [۳۰] برای کنترل ردیابی مسیر در سیستم موقعیت یابی نانو مبتنی بر خمش ارایه شده و یک رویکرد کنترل مد لغزشی مبتنی بر روینگر اغتشاش در مرجع [۳۱] برای همزمان سازی سیستم های آشوب با عدم قطعیت پارامتری و تاخیر زمانی پیشنهاد شده است. روش کنترل SOTSM برای موتور سنکرون آهنربای دائم داخلی پنج فاز در برابر عیب مغناطیس زدایی در [۳۲] بررسی شده است و در مقاله [۳۳]، یک ساختار کنترل پرواز برای کوادکوپترها از طریق فرآیند خطی - سازی فیدبک مورد مطالعه قرار گرفته است که دینامیک غیرخطی آنها را به انتگرال های دو گانه و مرتبه چهارم ساده تبدیل می کند؛ در این مقاله تکنیک SMC برای خطاهای وارونگی دینامیکی در طول خطی سازی اعمال شده است ولی مدل سیستم مورد مطالعه ساده تر بوده و تحلیل پایداری در آن ارائه نشده است. در مرجع [۳۴]، کنترل توزیع متقابل موتور خطی دو محوره بر اساس روش کنترل SOTSM مورد مطالعه قرار گرفته و در [۳۵]، یک تئوری منطق فازی همراه با روش کنترل SOTSM برای مدل سازی و کنترل یک وسیله خودگردان ارایه شده است. برای کاربرد صنعتی موتورهای القایی در [۳۶]، روش کنترل SOTSM برای درایوهای موتور القایی با بهره کنترل غیرخطی پیشنهاد شده است و در [۳۷]، نویسندگان بر روی طراحی یک روش کنترل SOTSM برای ردیابی مسیر وسیله زیرآبی خودگردان^۱ (AUVs) تحت عدم قطعیت دینامیکی و اغتشاش تمرکز کرده اند.

در زمینه سیستم های فیزیکی سایبری و روش های کنترل، تحقیقات متعددی ارایه شده است ولی مطالعات کمتری روی سیستم های فیزیکی سایبری مبتنی بر طراحی مقاوم انجام شده است؛ به طوری که تاکنون روی این سیستم ها، تحقیقاتی بر اساس روش کنترل مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم غیرتکین تطبیقی با سطح لغزش و منی فولد غیرخطی و نیز با در نظر گرفتن همگرایی زمان محدود و سریع در حضور همزمان عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات ناخواسته و حملات سایبری محرک ارایه نشده است. روش های کنترل موجود نمی توانند بطور همزمان پاسخ سریع، دقت بالا، بدون نوسان، همگرایی دقیق و کنترل مقاوم را برای سیستم های فیزیکی

^۱ Autonomous Underwater Vehicles

سایبری تحت شرایط مذکور در زمان محدود فراهم نمایند. به عبارتی دیگر، بسیاری از روش های کنترل موجود برای پایداری سازی سیستم های مختلف با فرض اینکه کران بالای اغتشاشات و عدم قطعیت ها معلوم باشد ارایه شده اند و همواره با مشکلات تکینی و وزوز مواجه هستند. بنابراین برای غلبه بر این محدودیت ها و مشکلات، در این مقاله یک روش جدید کنترل SOTSM غیرتکین تطبیقی برای سیستم های فیزیکی سایبری تحت عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات ناخواسته و حملات سایبری محرک ارایه شده است. سهم اصلی و نوآوری مقاله به صورت ذیل می باشد:

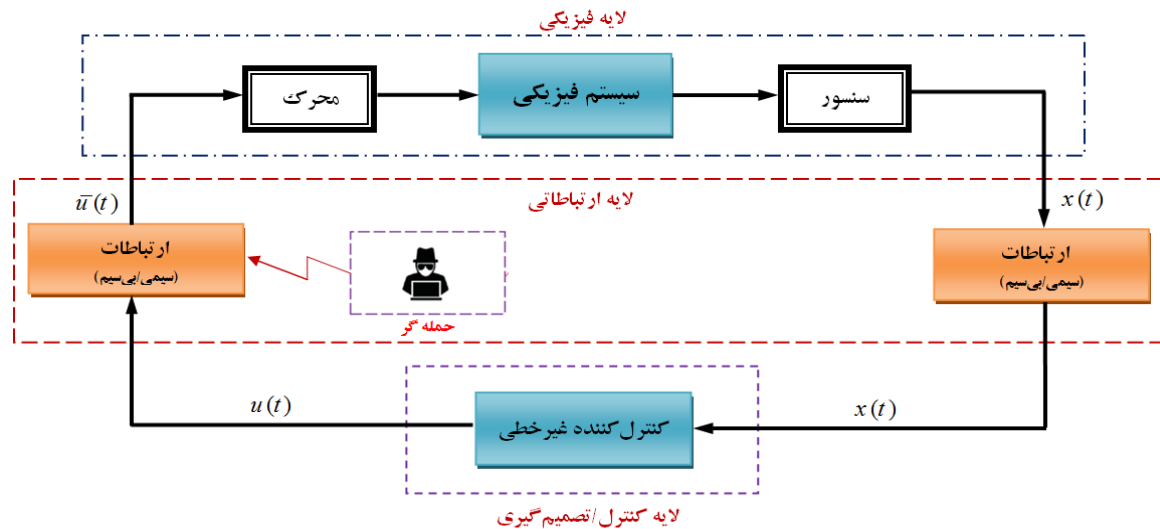
- طراحی یک روش کنترل جدید مبتنی بر تکنیک SOTSM غیرتکین برای سیستم های فیزیکی سایبری که قوانین تطبیق برخط را برای تخمین موثر کران های نامعلوم عدم قطعیت های پارامتری، حملات سایبری و اغتشاشات ناخواسته اعمال می کند؛
 - طراحی یک تکنیک کنترل مناسب برای سیستم های فیزیکی سایبری که همگرایی حالت های سیستم، قوانین کنترل، سطوح لغزشی و منیفولدهای SOTSM تطبیقی را به نقطه تعادل مبدا در زمان محدود و سریع فراهم می کند؛
 - ارایه یک طراحی جدید که بطور موثر نوسانات گذرا و رفتارهای وزوز را تضعیف و یا حذف می کند؛
 - ارایه یک رویکرد کنترل مناسب که بطور همزمان پاسخ سریع، دقت بالا، بدون نوسانات و نرم، کارآیی مطلوب و پایداری مقاوم را برای سیستم های فیزیکی سایبری در زمان محدود در مقایسه با روش های کنترل دیگر ارایه می دهد.
- در این مقاله در بخش ۲ توضیح مسئله و مفروضات لازم شامل مدل سیستم، فرض اغتشاش ناخواسته، فرم حمله سایبری و تعریف پایداری زمان محدود فراهم شده است و در بخش ۳، نتایج اصلی شامل روش جدید طراحی کنترل SOTSM غیرتکین تطبیقی برای کنترل سیستم های فیزیکی سایبری تحت عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات ناخواسته و حملات سایبری محرک ارایه شده است؛ علاوه بر این، دو قضیه برای اثبات پایداری زمان محدود کنترل کننده SOTSM غیرتکین تطبیقی طراحی شده با استفاده از تئوری پایداری لیاپانوف مطرح گردیده است. نتایج شبیه سازی و بحث ها در بخش ۴ ارائه شده اند که موفقیت و کارآیی روش کنترل پیشنهادی را در مقایسه با روش های کنترل فیدبک حالت (SFC)، SMC مرسوم و SMC انتگرالی تطبیقی نشان می دهد و در نهایت در بخش ۵ نتیجه گیری ارایه شده است.

۲- تعریف مسئله و فرضیات

در این مقاله یک سیستم فیزیکی سایبری در حضور عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات ناخواسته خارجی و حملات سایبری محرک - از قبیل حمله تزریق داده نادرست که می تواند بوسیله حمله گر ها به داخل سیگنال های ورودی کنترل از طریق لایه ارتباطاتی مطابق شکل ۱ تزریق شود- مورد بررسی قرار می گیرد.

۲-۱- مدل سیستم

شماتیک سیستم های فیزیکی سایبری نشان داده شده در شکل ۱ شامل لایه فیزیکی (محرک، سنسور و سیستم فیزیکی)، لایه ارتباطاتی (سیم یا بی سیم) و لایه کنترل/تصمیم گیری (کنترل کننده غیرخطی) می باشد.



شکل ۱- مدل سیستم فیزیکی سایبری در حضور عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات ناخواسته و حملات سایبری محرک

برای سیستم های فیزیکی سایبری مورد استفاده در صنایع، جمع آوری کلیه داده ها و مدل سازی دقیق، مشکل و پرهزینه است. بنابراین در این مقاله مدل سیستم فیزیکی مورد نظر تحت اغتشاشات ناخواسته خارجی، عدم قطعیت های پارامتری و حملات سایبری محرک به فرم سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان^۱ (LTI) زمان پیوسته به صورت ذیل تعریف می شود:

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)\bar{u}(t) + (B + \Delta B)k(x, t) + A_e e(t), \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t), \quad (2)$$

$$\bar{u}(t) = u(t) + k(t, x). \quad (3)$$

که در آن $x(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_n(t)]^T, \in R^n$ بردار حالت در زمان t را نشان می دهد و $u(t) \in R^m$ بردار ورودی کنترل دلال می کند. $k(t, x) \in R^m$ نشانگر بردار حمله، $y(t) \in R^p$ و $e(t) \in R^l$ نیز به ترتیب نشانگر اغتشاش ناخواسته کراندار و خروجی سیستم می باشند. فرض شده است که بردار حالت $x(t)$ قابل اندازه گیری بوده و می تواند از طریق فیدبک به وسیله کنترل کننده به سیستم اعمال گردد. ماتریس های $\Delta A, \Delta B, A_e, B, C$ ماتریس های ضرایب ثابت با ابعاد مناسب هستند. هدف نهایی کنترل، رسیدن حالت های سیستم از تمام شرایط اولیه به نقطه تعادل مبدا در زمان محدود و یا به عبارت دیگر، پایدارسازی سریع و زمان محدود سیستم های فیزیکی سایبری در حضور عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حملات سایبری محرک است.

فرض ۱- زوج ماتریس (A, B) به طور کامل کنترل پذیر است.

فرض ۲- ماتریس اغتشاش ناخواسته کراندار نامعلوم شرط تطابق را برآورد می کند، به طوری که فرض می شود $\|w\| \leq A_e = Bw$ و $\|e(t)\| \leq \epsilon$ و $\dot{w}$ و $\dot{e}$ نیز پارامترهای مثبت هستند.

فرض ۳- $k(t, x)$ و $e(t)$ نسبت به زمان مشتق پذیر هستند.

¹ Linear Time-Invariant

۲-۲- حمله سایبری محرک

حمله سایبری در این مقاله، یک نوع از حملات سایبری محرک متغیر با زمان از قبیل حمله تزریق داده نادرست است که تحت این حمله، داده نامطلوب از طریق لایه های ارتباطی به داخل ورودی کنترل (توسط حمله گرها جهت رسیدن به اهداف تخریبی مشخص) تزریق می شود. فرم حمله به صورت رابطه (۴) می باشد [۳۸]:

$$k(x, t) = G_a(t)k'(x, t), \quad (4)$$

$k'(x, t)$ شامل اطلاعات سیستم است که می تواند توسط مهاجمان به کار برده شود و $G_a(t)$ الگوی حمله سایبری را نشان می دهد به طوری که $G_a(t) = \text{diag}\{G_1, G_2, \dots, G_m\}$ است، $G_i = 1$ به این معنی است که توسط مهاجمان به سیگنال کنترل i ام و یا محرک i ام حمله شده است؛ در غیر این صورت $G_i = 0$ می باشد.

فرض ۴- یک ثابت مثبت k^* وجود دارد به طوری که $\|k'(x, t)\| \leq k^*$ است.

تعریف ۱- پایدار زمان محدود:

سیستم خطی / غیر خطی $\dot{x} = f(x)$ مفروض است و $x(t) \in R^n$ به حالت سیستم دلالت می کند. اگر یک ثابت مثبت T (زمان نشست) موجود باشد به طوری که رابطه ذیل برقرار گردد:

$$\lim_{t \rightarrow T} \|x(t)\| = 0 \quad (5)$$

آنگاه برای تمام زمان های $t \geq T$ شرط $\|x(t)\| = 0$ حاصل می شود؛ به این ترتیب سیستم $\dot{x} = f(x)$ پایدار زمان محدود نامیده می شود.

قضیه ۱- پایداری زمان محدود [۳۹]:

فرض کنید $W(t)$ یک تابع معین مثبت^۱ (PD) به عنوان تابع کاندید لیاپانوف باشد و نامعادله تفاضلی زیر را برقرار سازد:

$$\dot{W}(t) \leq -\gamma_1 W(t) - \gamma_2 W(t)^\phi; \quad \forall t \geq t_0, W(t_0) \geq 0 \quad (6)$$

به طوری که γ_1 و γ_2 ثابت های مثبت و ϕ نسبت دو عدد صحیح مثبت ($\phi < 1$) هستند؛ بنابراین برای هر زمان اولیه t_0 ، $W(t)$ حداقل در یک زمان محدود t_s به صورت رابطه (۷) به صفر همگرا می شود؛ به عبارتی در این صورت مبدأ یک نقطه تعادل پایدار زمان محدود برای سیستم $\dot{x} = f(x, t)$ خواهد بود:

$$t_s = t_0 + \frac{1}{\gamma_1(1-\phi)} \ln \frac{\gamma_1 W(t_0)^{1-\phi} + \gamma_2}{\gamma_2} \quad (7)$$

۳- نتایج اصلی

در این بخش روش کنترل استخراج میشود و جزئیات اثبات روابط ارائه می شود.

^۱ Positive Definite (PD)

۳-۱- تعیین سطح لغزش

یک سطح لغزش به صورت زیر تعیین می شود:

$$s(x) = -\Psi x(0) \exp(-\alpha t) + \Psi x(t), \quad (8)$$

ماتریس ضرایب بهره Ψ شامل $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n$ دارای ابعاد مناسب و α نیز پارامتر مثبت مناسب است. سطح لغزش (۸) می تواند به صورت زیر بسط داده شود:

$$s(x) = \sum_{i=1}^n \Psi_i x_i(t) - \exp(-\alpha t) \sum_{i=1}^n \Psi_i x_i(0) \quad (9)$$

که ضرایب $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n$ مثبت بوده و طوری انتخاب می شوند که ریشه های چند جمله ای (۱۰) در سمت چپ صفحه S واقع شوند.

$$F(\delta) = \sum_{i=1}^n \Psi_i \delta^{i-1} = \Psi_1 + \Psi_2 \delta + \Psi_3 \delta^2 + \dots + \Psi_n \delta^{n-1} + \Psi_{n+1} \delta^n \quad (10)$$

انتخاب مناسب Ψ_i ، کاهش خطا را در رسیدن مسیرهای حالت های سیستم به نقطه تعادل مبدا نتیجه می دهد به این ترتیب، سیستم فیزیکی سایبری در مد لغزش پایدار خواهد بود.

فرض ۵- با انتخاب مناسب Ψ ، ماتریس $\Psi(B + \Delta B)$ وارون پذیر است.

تذکره ۱: در مقایسه با سطح لغزش خطی $s_l(x) = \Psi x(t)$ ، در سطح لغزش غیرخطی (۹) متغیرهای حالت های سیستم مجبور می شوند تا دقیقاً از لحظه اولیه به روی سطح برسند؛ لذا در این وضعیت، مرحله رسیدن حذف شده و عملکرد مقاوم سیستم فراهم می شود.

تذکره ۲: وقتی که سطح لغزش (۸) به نقطه تعادل مبدا همگرا می شود؛ آنگاه خواهیم داشت:

$$s_l(x) = s_l(x(0)) \exp(-\alpha t) \quad (11)$$

توجه کنید که رابطه (۱۱) پاسخ یکتای معادله تفاضلی مرتبه اول زیر است:

$$\dot{s}_l(x) + \alpha s_l(x) = 0 \quad (12)$$

رابطه (۱۱) همگرایی نمایی $s_l(x)$ به صفر را نشان می دهد. مشتق مرتبه اول رابطه (۸) به صورت ذیل می باشد:

$$\begin{aligned} \dot{s}(x) &= -\Psi x(0)(-\alpha) \exp(-\alpha t) + \Psi \dot{x}(t) \\ &= \Psi \alpha x(0) \exp(-\alpha t) + \Psi \dot{x}(t), \end{aligned} \quad (13)$$

با جاگذاری رابطه (۱) در رابطه (۱۳) می توان به دست آورد:

$$\dot{s}(x) = \Psi \alpha x(0) \exp(-\alpha t) + \Psi [(A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t) + (B + \Delta B)k(t, x) + A_e e(t)], \quad (14)$$

مشتق مرتبه دوم سطح لغزش (۸) با جای گذاری رابطه (۱) در آن به صورت ذیل خواهد بود:

$$= -\Psi\alpha^2x(0)\exp(-\alpha t) + \Psi[(A + \Delta A)\dot{x}(t) + (B + \Delta B)\dot{u}(t) + (B + \Delta B)\dot{k}(t, x) + A_e\dot{e}(t)], \quad (15)$$

۳-۲- قانون کنترل و منیفولد مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم

بر اساس $\dot{s}(x) = 0$ مشتق زمانی اول قانون کنترل معادل، به صورت زیر به دست می آید:

$$\dot{u}_{eq} = -(\Psi(B + \Delta B))^{-1}[\Psi[(A + \Delta A)\dot{x}(t) + (B + \Delta B)\dot{k}(t, x) + A_e\dot{e}(t) - \alpha^2x(0)\exp(-\alpha t)]], \quad (16)$$

برای همگرایی سطح لغزش $s(x)$ به صفر در زمان محدود، منیفولد روش SOTSM غیرتکین به صورت زیر فراهم می شود:

$$\Gamma(x) = \eta_1\dot{s}(x)^\phi + \eta_2s(x) \quad (17)$$

که η_1 و η_2 دو پارامتر مثبت بوده و $0/5 < \phi < 1$ می باشد. ترکیب سطح لغزش $s(x)$ با منیفولد $\Gamma(x)$ برای حذف مرحله رسیدن و فراهم سازی همگرایی زمان محدود حایز اهمیت است.

قضیه ۲: سیستم فیزیکی سایبری در حضور عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات ناخواسته و حملات سایبری مطابق رابطه (۱) در نظر گرفته شده است. با به کار بردن سیگنال ورودی کنترل در زمان محدود به صورت زیر داریم:

$$\begin{aligned} \dot{u} = & -(\Psi(B + \Delta B))^{-1}[\Psi(A\dot{x}(t) - x(0)\alpha^2\exp(-\alpha t)) \\ & + \dot{s}(x)^{-\phi+1}(\eta\operatorname{sgn}(\Gamma(x))|\Gamma(x)|^\phi) \\ & + \Omega_2\operatorname{sgn}(\Gamma(x)) + \Omega_1\|x(t)\|\operatorname{sgn}(\Gamma(x)) \\ & + \dot{s}(x)^{-\phi+1}(\sigma\Gamma(x))], + \frac{\eta_2}{\phi\eta_1}\dot{s}(x)^{-\phi+2} \end{aligned} \quad (18)$$

که در آن Q و σ ضرایب مثبت انتخابی هستند و با فرض اینکه پارامترهای مثبت Ω_1 و Ω_2 رابطه زیر را برآورد سازند:

$$|\Psi(\Delta A\dot{x}(t) + (B + \Delta B)\dot{k}(t, x) + A_e\dot{e}(t))\dot{s}(x)^{\phi-1}| < \Omega_1\|x(t)\| + \Omega_2, \quad (19)$$

متغیرهای حالت سیستم (۱) از تمام شرایط اولیه در زمان محدود به سوی سطح لغزش (۹) هدایت شده و روی سطح باقی می ماند.

اثبات:

یک تابع کاندید لیاپانوف به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$W_1(\Gamma) = \frac{1}{2}\Gamma(x)^2 \quad (20)$$

با گرفتن مشتق مرتبه اول نسبت به زمان از رابطه (۲۰) داریم:

$$\dot{W}_1(\Gamma) = \Gamma(x)\dot{\Gamma}(x) \quad (21)$$

با در نظر گرفتن روابط (۱۴)، (۱۵) و (۱۷) و نیز با گرفتن مشتق زمانی مرتبه اول از $\Gamma(x)$ داریم:

$$\begin{aligned}\dot{\Gamma}(x) &= \eta_1 \phi \dot{s}(x) \dot{s}(x)^{-1+\phi} + \eta_2 \dot{s}(x) \\ &= \eta_1 \delta \dot{s}(x)^{-1+\phi} [\dot{s}(x) + \eta_2 \dot{s}(x) (\eta_1 \delta \dot{s}(x)^{-1+\phi})^{-1}] \\ &= \eta_1 \phi \dot{s}(x)^{-1+\phi} \left[\dot{s}(x) + \frac{\eta_2}{\phi \eta_1} \dot{s}(x)^{-\phi+2} \right].\end{aligned}\quad (22)$$

با جای گذاری (۲۲) در داخل (۲۱)، داریم:

$$\begin{aligned}-\Psi \alpha^2 x(0) \exp(-\alpha t) \dot{W}_1(\Gamma) &= \Gamma(x) \eta_1 \phi \dot{s}(x)^{-1+\phi} \left[\frac{\eta_2}{\phi \eta_1} \dot{s}(x)^{-\phi+2} \right. \\ &\quad \left. + \Psi [(A + \Delta A) \dot{x}(t) + (B + \Delta B) \dot{u}(t) + (B + \Delta B) \dot{k}(t, x) + A_e \dot{e}(t)] \right],\end{aligned}\quad (23)$$

با جای گذاری (۱۸) در داخل (۲۳) و با ساده سازی می توان نوشت:

$$\begin{aligned}\dot{W}_1(\Gamma) &= \eta_1 \phi \Gamma(x) [\Psi \dot{s}(x)^{-1+\phi} [\Delta A \dot{x}(t) + (B + \Delta B) \dot{k}(t, x) + A_e \dot{e}(t)] \\ &\quad - \Omega_1 \|x(t)\| \operatorname{sgn}(\Gamma(x)) - \Omega_2 \operatorname{sgn}(\Gamma(x)) \\ &\quad - (q \operatorname{sgn}(\Gamma(x)) |\Gamma(x)|^\phi - \sigma \Gamma(x))],\end{aligned}\quad (24)$$

با فرض $\Gamma(x) \operatorname{sgn}(\Gamma(x)) \leq |\Gamma(x)|$ داریم:

$$\begin{aligned}\dot{W}_1(\Gamma) &\leq \eta_1 \phi \Gamma(x) \Psi \dot{s}(x)^{-1+\phi} [\Delta A \dot{x}(t) + (B + \Delta B) \dot{k}(t, x) + A_e \dot{e}(t)] \\ &\quad - \eta_1 \phi (\Omega_1 \|x(t)\| |\Gamma(x)| + \Omega_2 |\Gamma(x)|) \\ &\quad - \eta_1 \phi (q |\Gamma(x)|^{\phi+1} + \sigma \Gamma(x)^2),\end{aligned}\quad (25)$$

با لحاظ رابطه (۱۹) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}\dot{W}_1(\Gamma) &\leq \eta_1 \phi \Gamma(x) [\Omega_1 \|x(t)\| + \Omega_2] \\ &\quad - \eta_1 \phi (\Omega_1 \|x(t)\| |\Gamma(x)| + \Omega_2 |\Gamma(x)|) \\ &\quad - \eta_1 \phi (q |\Gamma(x)|^{\phi+1} + \sigma \Gamma(x)^2) \\ &\leq -\eta_1 \phi (q |\Gamma(x)|^{\phi+1} + \sigma \Gamma(x)^2),\end{aligned}\quad (26)$$

بنابراین، می توان رابطه (۲۶) را به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned}\dot{W}_1(\Gamma) &\leq -\eta_1 \phi \sigma |\Gamma(x)|^2 - \eta_1 \phi q |\Gamma(x)|^{\phi+1} \\ &= -\gamma_1 W_1(\Gamma) - \gamma_2 W_1(\Gamma)^{\phi^+}\end{aligned}\quad (27)$$

که $\phi^+ = 0/5(\phi + 1)$ و $\gamma_2 = 2\eta_1 \phi q$ ، $\gamma_1 = 2\eta_1 \phi \sigma$ می باشد. بنابراین مطابق قضیه ۱ تابع کاندید لیاپانوف (۲۰) کاهش می یابد و سطح لغزش (۹) و حالت های سیستم در زمان محدود به نقطه تعادل همگرا می شوند؛ به این ترتیب اثبات به پایان می رسد.

۳-۳ کنترل کننده مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم غیر تکین تطبیقی

تعیین پارامترهای Γ_1 و Γ_2 معمولاً طاققت فرسا است به عبارتی، تعیین کران بالا برای اغتشاش ناخواسته، عدم قطعیت های پارامتری و حملات سایبری محرک به صورت $|\Psi \Delta A \dot{x}(t) + \Psi(B + \Delta B)\dot{k}(t, x) + \Psi A_e \dot{e}(t)|$ ساده نیست؛ بنابراین برای غلبه بر این چالش از قوانین تطبیقی استفاده می شود. قانون کنترل (۱۸) با توجه به قوانین تطبیقی به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{u} = & -(\Psi(B + \Delta B))^{-1} [\Psi(A\dot{x}(t) - x(0)\alpha^2 \exp(-\alpha t)) \\ & + \dot{s}(x)^{-\phi+1} (q \operatorname{sgn}(\Gamma(x)) |\Gamma(x)|^\phi) \\ & + \hat{\Omega}_1 \|x(t)\| \operatorname{sgn}(\Gamma(x)) + \hat{\Omega}_2 \operatorname{sgn}(\Gamma(x)) \\ & + \dot{s}(x)^{-\phi+1} (\sigma \Gamma(x))] + \frac{\eta_2}{\phi \eta_1} \dot{s}(x)^{-\phi+2} \end{aligned} \quad (28)$$

که در آن $\hat{\Omega}_1$ و $\hat{\Omega}_2$ تخمین Ω_1 و Ω_2 هستند. پارامترهای تطبیقی $\hat{\Omega}_1$ و $\hat{\Omega}_2$ از طریق قوانین تطبیقی به صورت زیر تعیین می شوند:

$$\dot{\hat{\Omega}}_1 = \frac{\|x(t)\|}{\epsilon_2} |\dot{s}(x)^{2\phi-1} \Gamma(x)|, \quad (29)$$

$$\dot{\hat{\Omega}}_2 = \frac{|\dot{s}(x)^{2\phi-1} \Gamma(x)|}{\epsilon_1}. \quad (30)$$

که ϵ_1 و ϵ_2 دو ثابت مثبت هستند. با انتخاب مقادیر مناسب ϵ_1 و ϵ_2 نرخ تطبیق تنظیم می شود. با توجه به روابط $\tilde{\Omega}_1 = \hat{\Omega}_1 - \Omega_1$ و $\tilde{\Omega}_2 = \hat{\Omega}_2 - \Omega_2$ می توان نوشت:

$$\dot{\tilde{\Omega}}_1 = \dot{\hat{\Omega}}_1 = \frac{\|x(t)\|}{\epsilon_2} |\dot{s}(x)^{2\phi-1} \Gamma(x)|, \quad (31)$$

$$\dot{\tilde{\Omega}}_2 = \dot{\hat{\Omega}}_2 = \frac{|\dot{s}(x)^{2\phi-1} \Gamma(x)|}{\epsilon_1}. \quad (32)$$

قضیه ۳: سیستم فیزیکی سایبری تحت عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات ناخواسته و حملات سایبری محرک مطابق رابطه (۱) را در نظر می گیریم. با به کار بردن قانون کنترل SOTSM رابطه (۲۸) و قوانین تطبیقی (۲۹) و (۳۰)، متغیرهای حالت سیستم (۱) از شرایط اولیه در یک زمان محدود به سمت سطح لغزش غیرخطی (۹) رانده می شوند و روی آن باقی می مانند.

اثبات:

تابع کاندید لیاپانوف به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$W_2(\Gamma) = \frac{1}{2} \epsilon_1 \tilde{\Omega}_2^2 + \frac{1}{2} \Gamma(x)^2 + \frac{1}{2} \epsilon_2 \tilde{\Omega}_1^2 \quad (33)$$

با مشتق گیری از تابع $V_2(\Gamma)$ داریم:

$$W_2(\Gamma) = \epsilon_1 \dot{\tilde{\Omega}}_2 \tilde{\Omega}_2 + \dot{\Gamma}(x) \Gamma(x) + \epsilon_2 \dot{\tilde{\Omega}}_1 \tilde{\Omega}_1 \quad (34)$$

با به کار بردن رابطه (۲۲) و جاگذاری روابط (۳۱) و (۳۲) در رابطه (۳۴) داریم:

$$\begin{aligned} \dot{W}_2(\Gamma) = & \epsilon_1 \dot{\hat{\Omega}}_2 (\hat{\Omega}_2 - \Omega_2) + \epsilon_2 \dot{\hat{\Omega}}_1 (\hat{\Omega}_1 - \Omega_1) + \eta_1 \phi \Gamma(x) \dot{s}(x)^{-1+\phi} \left[\Psi(A + \Delta A) \dot{x}(t) \right. \\ & + \Psi(B + \Delta B) \dot{u}(t) + \Psi(B + \Delta B) \dot{k}(t, x) + \Psi A_e \dot{e}(t) - \Psi \alpha^2 x(0) \exp(-\alpha t) \\ & \left. + \frac{\eta_2}{\phi \eta_1} \dot{s}(x)^{-\phi+2} \right], \end{aligned} \quad (35)$$

با جای گذاری (۲۸) در (۳۵) می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{W}_2(\Gamma) = & \epsilon_1 \dot{\hat{\Omega}}_2 (\hat{\Omega}_2 - \Omega_2) + \epsilon_2 \dot{\hat{\Omega}}_1 (\hat{\Omega}_1 - \Omega_1) + \eta_1 \phi \Gamma(x) \dot{s}(x)^{-1+\phi} \left[\Psi(A + \Delta A) \dot{x}(t) \right. \\ & - \Psi(A \dot{x}(t) - x(0) \alpha^2 e^{-\alpha t}) - \dot{s}(x)^{-\phi+1} (q \operatorname{sgn}(\Gamma(x)) |\Gamma(x)|^\phi) \\ & - \hat{\Omega}_1 \|x(t)\| \operatorname{sgn}(\Gamma(x)) - \hat{\Omega}_2 \operatorname{sgn}(\Gamma(x)) \\ & - \frac{\eta_2}{\phi \eta_1} \dot{s}(x)^{-\phi+2} - \dot{s}(x)^{-\phi+1} (\sigma \Gamma(x)) \\ & \left. + \Psi(B + \Delta B) \dot{k}(t, x) + \Psi A_e \dot{e}(t) - \Psi \alpha^2 x(0) \exp(-\alpha t) \right. \\ & \left. + \frac{\eta_2}{\phi \eta_1} \dot{s}(x)^{-\phi+2} \right], \end{aligned} \quad (36)$$

با ساده سازی رابطه (۳۶) و فرض $|\Gamma(x)| \operatorname{sgn}(\Gamma(x)) \leq |\Gamma(x)|$ ، رابطه (۳۷) به صورت زیر حاصل می شود:

$$\begin{aligned} \dot{W}_2(\Gamma) \leq & \epsilon_1 \dot{\hat{\Omega}}_2 (\hat{\Omega}_2 - \Omega_2) + \epsilon_2 \dot{\hat{\Omega}}_1 (\hat{\Omega}_1 - \Omega_1) \\ & \dot{s}(x)^{-1+\delta} \left[-\hat{\Omega}_1 \|x(t)\| |\Gamma(x)| - \hat{\Omega}_2 |\Gamma(x)| \right] \\ & + \eta_1 \phi \Gamma(x) \dot{s}(x)^{-1+\phi} \left[\Psi \Delta A \dot{x}(t) + \Psi(B + \Delta B) \dot{k}(t, x) + \Psi A_e \dot{e}(t) \right] \\ & - \eta_1 q |\Gamma(x)|^{\phi+1} - \Omega \eta_1 \phi \Gamma(x)^2. \end{aligned} \quad (37)$$

با جای گذاری روابط (۳۱) و (۳۲) در رابطه (۳۷) داریم:

$$\begin{aligned} \dot{W}_2(\Gamma) \leq & (\hat{\Omega}_1 - \Omega_1) \frac{\|x(t)\|}{|\dot{s}(x)|} |\dot{s}(x)|^\phi \Gamma(x) + (\hat{\Omega}_2 - \Omega_2) \frac{|\dot{s}(x)|^\phi \Gamma(x)}{|\dot{s}(x)|} \\ & + \eta_1 \phi \dot{s}(x)^{-1+\phi} \left[-\hat{\Omega}_1 \|x(t)\| |\Gamma(x)| - \hat{\Omega}_2 |\Gamma(x)| \right] \\ & + \eta_1 \phi \Gamma(x) \dot{s}(x)^{-1+\phi} \left[\Psi \Delta A \dot{x}(t) + \Psi(B + \Delta B) \dot{k}(t, x) + \Psi A_e \dot{e}(t) \right] \\ & - \eta_1 q |\Gamma(x)|^{\phi+1} - \sigma \eta_1 \phi \Gamma(x)^2, \\ \leq & |\hat{\Omega}_1 - \Omega_1| \frac{\|x(t)\|}{|\dot{s}(x)|} |\dot{s}(x)|^\phi \Gamma(x) + |\hat{\Omega}_2 - \Omega_2| \frac{|\dot{s}(x)|^\phi \Gamma(x)}{|\dot{s}(x)|} \\ & + \eta_1 \phi |\dot{s}(x)|^{-1+\phi} \left[-|\hat{\Omega}_1 \|x(t)\| |\Gamma(x)| - |\hat{\Omega}_2 |\Gamma(x)| \right] \\ & + \eta_1 \phi |\Gamma(x)| |\dot{s}(x)|^{-1+\phi} \left| \Psi \Delta A \dot{x}(t) + \Psi(B + \Delta B) \dot{k}(t, x) + \Psi A_e \dot{e}(t) \right| \end{aligned} \quad (38)$$

با اضافه و کم کردن عبارت $|\hat{\Omega}_1 \|x(t)\| |\Gamma(x)| + |\hat{\Omega}_2 |\Gamma(x)|$ در رابطه (۳۸)، رابطه (۳۹) به دست می آید:

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_2(\Gamma) &\leq |\hat{\Omega}_1 - \Omega_1| \frac{\|x(t)\|}{|\dot{s}(x)|} |\dot{s}(x)\phi\Gamma(x)| + |\hat{\Omega}_2 - \Omega_2| \frac{|\dot{s}(x)\phi\Gamma(x)|}{|\dot{s}(x)|} \\
 &\quad - \eta_1\phi|\dot{s}(x)\phi^{-1}| [|\Omega_1\|x(t)\| ||\Gamma(x)| + |\Omega_2||\Gamma(x)|] \\
 &\quad + \eta_1\phi|\dot{s}(x)\phi^{-1}| [|\Omega_1\|x(t)\| ||\Gamma(x)| + |\Omega_2||\Gamma(x)|] \\
 &\quad + \eta_1\phi|\dot{s}(x)^{-1+\phi}| [-|\hat{\Omega}_1\|x(t)\| ||\Gamma(x)| - |\hat{\Omega}_2||\Gamma(x)|] \\
 &\quad + \eta_1\phi|\Gamma(x)| |\dot{s}(x)^{-1+\phi}| |\Psi\Delta A\dot{x}(t) + \Psi(B + \Delta B)\dot{k}(t, x) + \Psi A_e\dot{e}(t)| \\
 &\leq |\hat{\Omega}_1 - \Omega_1| \frac{\|x(t)\|}{|\dot{s}(x)|} |\dot{s}(x)\phi\Gamma(x)| + |\hat{\Omega}_2 - \Omega_2| \frac{|\dot{s}(x)\phi\Gamma(x)|}{|\dot{s}(x)|} \\
 &\quad - \eta_1\phi|\dot{s}(x)\phi^{-1}| [|\Omega_1\|x(t)\| ||\Gamma(x)| + |\Omega_2||\Gamma(x)|] \\
 &\quad - \eta_1\phi|\dot{s}(x)^{-1+\delta}| [|\hat{\Omega}_1 - \Omega_1\|x(t)\| ||\Gamma(x)| + |(\hat{\Omega}_2 - \Omega_2)||\Gamma(x)|] \\
 &\quad + \eta_1\phi|\Gamma(x)| |\dot{s}(x)^{-1+\phi}| |\Psi\Delta A\dot{x}(t) + \Psi(B + \Delta B)\dot{k}(t, x) + \Psi A_e\dot{e}(t)| \\
 &\leq |\tilde{\Omega}_1| \frac{\|x(t)\|}{|\dot{s}(x)|} |\dot{s}(x)\phi\Gamma(x)| + |\tilde{\Omega}_2| \frac{|\dot{s}(x)\phi\Gamma(x)|}{|\dot{s}(x)|} \\
 &\quad - \eta_1\phi|\dot{s}(x)\phi^{-1}| [|\Omega_1\|x(t)\| ||\Gamma(x)| + |\Omega_2||\Gamma(x)|] \\
 &\quad - \eta_1\phi|\dot{s}(x)^{-1+\phi}| [|\tilde{\Omega}_1\|x(t)\| ||\Gamma(x)| + |\tilde{\Omega}_2||\Gamma(x)|] \\
 &\quad + \eta_1\phi|\Gamma(x)| |\dot{s}(x)^{-1+\phi}| |\Psi\Delta A\dot{x}(t) + \Psi(B + \Delta B)\dot{k}(t, x) + \Psi A_e\dot{e}(t)| \\
 &\quad - \eta_1\phi|\dot{s}(x)^{-1+\phi}| (|\Omega_1\|x(t)\| + |\Omega_2| - |\Psi\Delta A\dot{x}(t) + \Psi(B + \Delta B)\dot{k}(t, x) + \\
 &\quad \Psi A_e\dot{e}(t)|) |\Gamma(x)| - |\tilde{\Omega}_1| (\eta_1\phi - 1) |\dot{s}(x)^{-1+\phi}| \|x(t)\| |\Gamma(x)| + |\tilde{\Omega}_2| (\eta_1\phi - \\
 &\quad 1) |\dot{s}(x)^{-1+\phi}| |\Gamma(x)|.
 \end{aligned}
 \tag{۳۹}$$

با توجه به رابطه (۳۹) می توان عبارات زیر را در نظر گرفت:

$$\mu_1 = \eta_1\phi|\dot{s}(x)^{-1+\phi}| (|\Omega_1\|x(t)\| + |\Omega_2| - |\Psi\Delta A\dot{x}(t) + \Psi(B + \Delta B)\dot{k}(t, x) + \Psi A_e\dot{e}(t)|)
 \tag{۴۰}$$

$$\mu_2 = (\eta_1\phi - 1) |\dot{s}(x)^{-1+\phi}| \|x(t)\| |\Gamma(x)|
 \tag{۴۱}$$

$$\mu_3 = (\eta_1\phi - 1) |\dot{s}(x)^{-1+\phi}| |\Gamma(x)|
 \tag{۴۲}$$

با به کار بردن رابطه (۳۹) و روابط (۴۰) - (۴۲) می توان نوشت:

$$\dot{W}_2(\Gamma) \leq -\mu_1 |\Gamma(x)| - \mu_2 |\tilde{\Omega}_1| - \mu_3 |\tilde{\Omega}_2|,
 \tag{۴۳}$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\dot{W}_2(\Gamma) \leq -2^{-\frac{1}{2}} \left[2^{+\frac{1}{2}} \mu_1 |\Gamma(x)| + \epsilon_2^{+\frac{1}{2}} \mu_2 |\tilde{\Omega}_1| \left(\frac{\epsilon_2}{2}\right)^{-\frac{1}{2}} + \epsilon_1^{+\frac{1}{2}} \mu_3 |\tilde{\Omega}_2| \left(\frac{\epsilon_1}{2}\right)^{-\frac{1}{2}} \right],
 \tag{۴۴}$$

با در نظر گرفتن $\mu_{\Omega} = \min \{ 2^{+\frac{1}{2}} \mu_1, \left(\frac{\epsilon_1}{2}\right)^{-\frac{1}{2}} \mu_2, \left(\frac{\epsilon_2}{2}\right)^{-\frac{1}{2}} \mu_3 \}$ بر اساس قضیه (۲) به صورت زیر به دست می آید:

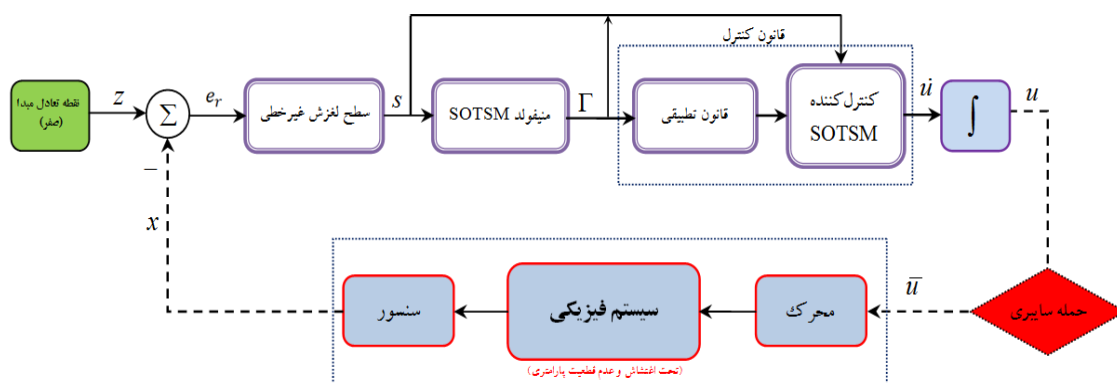
$$W_2(\Gamma) \leq -2^{-\frac{1}{2}} \mu_{\Omega} \left[|\Gamma(x)| + \epsilon_2^{+\frac{1}{2}} |\tilde{\Omega}_1| + \epsilon_1^{+\frac{1}{2}} |\tilde{\Omega}_2| \right], \quad (45)$$

یا به طور معادل می توان نوشت:

$$\dot{W}_2(\Gamma) \leq -\mu_{\Omega} W_2(\Gamma)^{+\frac{1}{2}}. \quad (46)$$

بنابراین با به کار بردن قانون کنترل پیشنهادی SOTSM در (۲۸)، سطح لغزش غیرخطی (۹) در زمان محدود به نقطه تعادل مبدا همگرا می شود؛ به عبارتی دیگر، حالت های سیستم فیزیکی سایبری تحت عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات ناخواسته و حملات سایبری محرک - که از تمام شرایط اولیه به سوی سطح لغزش غیرخطی هدایت شده بودند - در زمان محدود به نقطه تعادل مبدا می رسند و در نتیجه، سیستم پایدار زمان محدود خواهد بود.

در شکل ۲، شماتیک کنترل کننده SOTSM تطبیقی طراحی شده برای سیستم های فیزیکی سایبری در حضور عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک نشان داده شده است. مطابق شکل ۲، ساختار کنترل کننده SOTSM شامل سطح لغزش غیرخطی (S)، منیفولد مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم (Γ)، قوانین تطبیقی و کنترل است. سیگنال کنترل پیوسته (u) از طریق انتگرال گیری از قانون کنترل ناپیوسته ($\dot{u}$) به دست می آید و سپس از طریق لایه ارتباطاتی (بی سیم/سیم) در حضور عدم قطعیت پارامتری، حمله سایبری محرک و اغتشاش ناخواسته به لایه فیزیکی (محرک، سیستم فیزیکی، سنسور) اعمال می شود. این گونه طراحی برای قانون کنترل ($\dot{u}$) می تواند برای کاهش پدیده وزوز و نوسانات گذرا، فراهم سازی عملکرد با دقت بالا و نرخ همگرایی سریع تر موثر باشد. سپس خروجی لایه فیزیکی (x) از طریق لایه ارتباطاتی به فرم حلقه فیدبک منفی جهت مقایسه با نقطه تعادل مبدا (صفر) به بلوک جمع کننده ارسال می گردد، خروجی جمع کننده ($e_r = |z - x|, z = 0$) مجدداً به ساختار لایه کنترل اعمال می شود تا زمانی که خطا صفر شده و حالت های سیستم به نقطه تعادل مبدا برسند و در آنجا بمانند. بنابراین هدف کنترل که همگرایی زمان محدود حالت های سیستم از تمام شرایط اولیه به نقطه تعادل مبدا می باشد، به این صورت برآورد می شود.



شکل ۲- شماتیک کنترل کننده SOTSM تطبیقی طراحی شده برای سیستم های فیزیکی سایبری در حضور عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک

تذکره ۳: برای کاهش پدیده وزوز ناشی از تابع علامت ($\text{sgn}(\Gamma(x))$) می توان قانون کنترل پیشنهادی (۲۸) را با استفاده از تابع تانژانت هیپربولیک به صورت زیر بهبود داد:

$$\begin{aligned} \dot{u} = & -(\Psi(B + \Delta B))^{-1} [\Psi(A\dot{x}(t) - x(0)\alpha^2 \exp(-\alpha t)) \\ & + \dot{s}(x)^{-\phi+1} (\text{sgn}(\Gamma(x)) |\Gamma(x)|^\phi) \\ & + \hat{\Omega}_1 \|x(t)\| \tanh(\xi \Gamma(x)) + \hat{\Omega}_2 \tanh(\xi \Gamma(x)) \\ & + \dot{s}(x)^{-\phi+1} (\sigma \Gamma(x))] + \frac{\eta_2}{\phi \eta_1} \dot{s}(x)^{-\phi+2} \end{aligned} \quad (47)$$

که تابع تانژانت هیبربولیک به صورت ذیل تعریف می شود:

$$\tanh(\xi \Gamma(x)) = \frac{(e^{\xi \Gamma(x)} - e^{-\xi \Gamma(x)})}{(e^{\xi \Gamma(x)} + e^{-\xi \Gamma(x)})} \quad (48)$$

و در آن، ξ ثابت شیب تابع تانژانت هیبربولیک می باشد.

❖ بنابراین بر اساس موارد ارائه شده، الگوریتم طراحی کنترل کننده بصورت زیر ارائه می گردد:

گام اول: انتخاب/ تعیین سطح لغزش مناسب مطابق رابطه (۸) یا (۹)، طوری که ریشه های چند جمله ای (۱۰) در سمت چپ صفحه S واقع شوند؛

گام دوم: محاسبه قانون کنترل معادل بر اساس رابطه (۱۶)؛

گام سوم: انتخاب/ تعیین منیفولد مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم غیرتکین مطابق رابطه (۱۷)؛

گام چهارم: طراحی سیگنال ورودی کنترل با توجه به رابطه (۱۸)؛

گام پنجم: طراحی قوانین تطبیقی بر اساس روابط (۲۹) - (۳۲)؛

گام ششم: طراحی کنترل کننده مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم غیرتکین تطبیقی با کاهش وزوز طی مراحل فوق و رابطه (۴۷).

۴- نتایج شبیه سازی و بحث

به عنوان مثال؛ در این مقاله برای نشان دادن سطح لغزش و منیفولد غیرخطی و قانون کنترل زمان محدود پیشنهادی بر اساس روش کنترل مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم غیرتکین تطبیقی، مدل دینامیک یک سیستم فیزیکی سایبری با کاربرد هوافضا مانند وسیله هوایی بدون سرنشین (هواپیما/ پهباد) بر اساس رابطه (۱) به صورت ذیل ارائه می شود [۵]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) = & (-0/0251 + 0/0012)x_1(t) + 0/10453x_2(t) - 0/99452x_3(t) \\ & + 0/1228u_1(t) - \left(\frac{0}{27630} - \frac{0}{0018}\right)u_2(t) + 0/1228k_1(x, t) \\ & - 0/27630k_2(x, t) + 0/1228e(t), \\ \dot{x}_2(t) = & (574/70 + 0/5431)x_1(t) - 0/02151x_3(t) - (53/610 - 0/1421)u_1(t) \\ & + 33/25u_2(t) - 53/610k_1(x, t) + 33/25k_2(x, t) - 53/610e(t), \\ \dot{x}_3(t) = & 16/2x_1(t) + 0/0034x_2(t) + \left(\frac{195}{5} - \frac{0}{2103}\right)u_1(t) - 529/40u_2(t) \\ & + 195/5k_1(x, t) - 529/4k_2(x, t) + 195/5e(t). \end{aligned} \quad (49)$$

که شرایط اولیه به صورت $x(0) = [4 \quad -2 \quad 0.5]$ است و ماتریس های حالت، عدم قطعیت های پارامتری و ورودی به- صورت $\Delta B = [0, 0/0018; 0/1421, 0; -0/2103, 0]$ ، $A = [-0/0251, 0/10453, -\frac{0}{99452; 574}/7, 0, 0; 16/2, 0, 0]$ ، $B = [0/1228, -0/27630; -53/610, 33/25; 195/$ ، $\Delta A = [0/0012, 0, 0; 0/5431, 0, -0/02151; 0, 0/0034, 0]$

$A_e = B\varpi$ مطابق رابطه $A_e = [0/1228; -53/610; 195/5,]$ و نیز ماتریس اغتشاش ناخواسته به صورت $\varpi = [1 \ 0]^T$ هستند.

برای نشان دادن میزان موثر بودن روش کنترل مد لغزش ترمینال مرتبه دوم غیرتکین تطبیقی جدید پیشنهادی، برتری نتایج آن بر نتایج سه روش کنترل موجود، شامل روش کنترل فیدبک حالت (SFC)، روش کنترل مد لغزشی (SMC) مرسوم و روش کنترل مد لغزشی نوع انتگرالی تطبیقی نشان داده شده است، اغتشاش ناخواسته به صورت $e(t) = \sin(t)$ و حمله سایبری محرک شدید مطابق (۴) شامل $\dot{k}_2(x, t)$ و $\dot{k}_1(x, t)$ ، $G_a(t) = \text{diag}\{1, 1\}$ به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

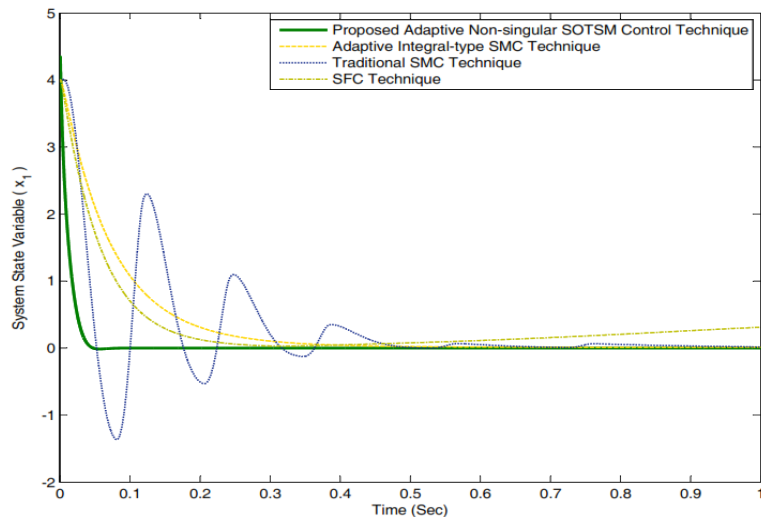
$$\begin{aligned}\dot{k}_1(x, t) &= \frac{1}{3} \sin\left(\frac{\pi}{3}t + \frac{1}{5}\right) + \frac{1}{3} |x_1 + x_2| \sin\left(\frac{\pi}{3}t + \frac{1}{5}\right), \\ \dot{k}_2(x, t) &= \frac{1}{3} \sin\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{1}{4}\right) + \frac{1}{3} |x_2 + x_3| \sin\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{1}{4}\right).\end{aligned}\quad (50)$$

مقادیر ضرایب و پارامترهای طراحی کنترل کننده SOTSM غیرتکین تطبیقی پیشنهادی به صورت زیر تعیین شده اند:

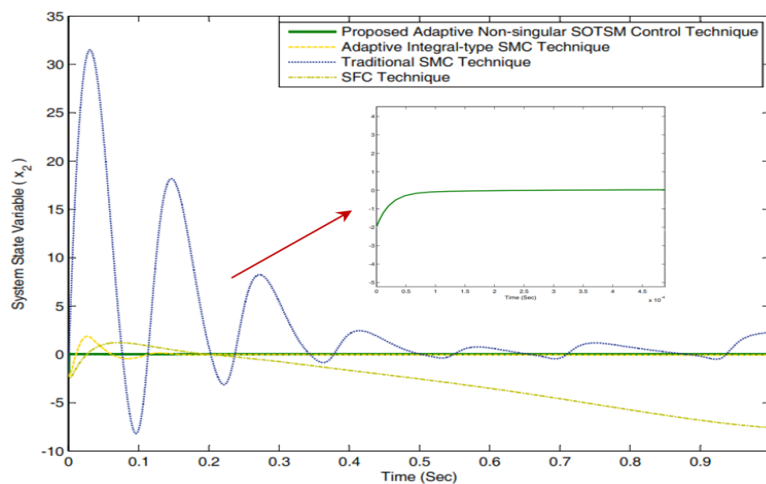
$$\Psi_1 = 2/9 \times 10^{-6}, \Psi_2 = 2/05 \times 10^{-3}, \Psi_3 = 0/31, \Psi_4 = 0/28, \Psi_5 = 4/65, \Psi_6 = 2/3, \phi = 0/82, \\ \eta_1 = 1/8, \eta_2 = 3/9, \xi = 0/9, \sigma = 3, \alpha = 18, \varrho = 7, \hat{\Omega}_{11}(0) = \hat{\Omega}_{12}(0) = \hat{\Omega}_{21}(0) = \hat{\Omega}_{22}(0) = 0, u_1(0) = u_2(0) = 0.$$

همچنین پارامترهای نامعلوم به طور مناسب در زمان محدود تخمین زده شده اند و مقادیر نهایی پارامترهای تطبیقی به صورت $\hat{\Omega}_{22} = 0/3152$ و $\hat{\Omega}_{21} = 0/6012$ ، $\hat{\Omega}_{12} = 0/7846$ ، $\hat{\Omega}_{11} = 1/674$ می باشند.

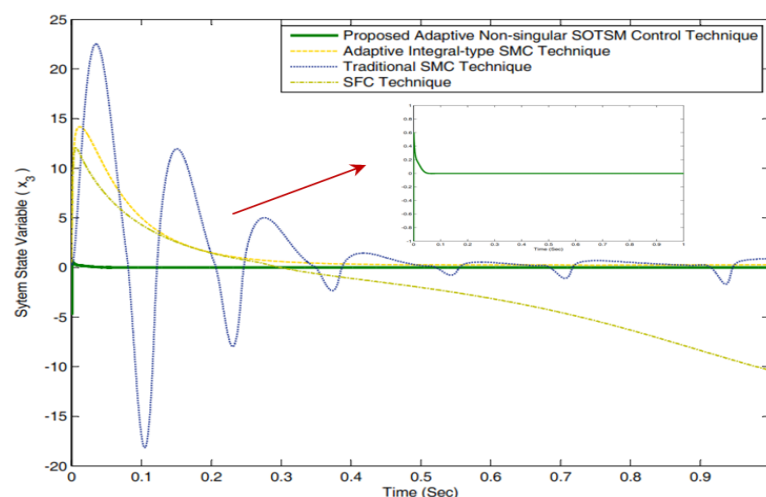
در شکل ۳، متغیرهای حالت x_1 ، x_2 و x_3 سیستم فیزیکی سایبری با در نظر گرفتن روش کنترل SOTSM تطبیقی پیشنهادی با سطوح لغزش غیرخطی در مقایسه با روش کنترل SMC نوع انتگرالی تطبیقی، روش SMC مرسوم با سطوح لغزش خطی و روش SFC [۳۸، ۵] تحت عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک نشان داده شده است. بر اساس شکل ۳، با به کار بردن روش SFC با قانون کنترل $u = -\Psi_{sf}x$ ، متغیرهای حالت x_1 و x_2 و x_3 به مبدا همگرا نشده و منجر به ناپایداری سیستم می شوند. مطابق شکل ۳ با اعمال روش کنترل مد لغزشی مرسوم با قانون کنترل $u = [0/87 \times 10^{-6}, 0/96 \times 10^{-4}, 0/16; 2/35, 2/87, 0/37]\Psi, -(\Psi(B + \Delta B))^{-1}(\Psi Ax) - \omega \text{sgn}(s)$ و بر اساس شرایط لغزش مناسب با مقادیر $\omega_1 = 6/9$ و $\omega_2 = 0/91$ ، متغیرهای حالت x_1 و x_2 و x_3 دارای نوسانات گذرای شدید از $t = 0$ تا $t = 0/34s$ بوده و بعد از آن با نوسانات ضعیف به اطراف مبدا همگرا می شوند. با توجه به شکل ۳، با به کار بردن روش کنترل مد لغزشی نوع انتگرالی تطبیقی با سطح لغزش انتگرالی $\Psi_i = s, s = \Psi_i x + \Psi_i \int_{t_0}^t x d\tau$ متغیر حالت x_2 دارای نوسانات گذرا بوده و حالت ها در زمان نسبتاً غیرسریع به صفر همگرا می شوند. با توجه به نتایج شبیه سازی در شکل ۳ مشاهده می شود که با اعمال روش کنترل SOTSM تطبیقی پیشنهادی در حضور همزمان عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک، متغیرهای حالت x_1 و x_2 و x_3 در یک زمان محدود و سریع به صورت $t_{x_1} = 0/056s$ ، $t_{x_2} = 0/8 \times 10^{-4}s$ و $t_{x_3} = 0/061s$ به نقطه تعادل مبدا همگرا شده و منجر به پایداری سریع سیستم فیزیکی سایبری در زمان محدود می شوند. بنابراین کنترل کننده مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم غیرتکین تطبیقی پاسخ دقیق، سریع، نرم، بدون نوسانات و وزوز در مقایسه با روش های کنترل دیگر ارایه می دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳- متغیرهای حالت سایبری تحت عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک با به کار بردن روش کنترل SOTSM تطبیقی پیشنهادی در مقایسه با روش های SMC نوع انتگرالی تطبیقی، SMC مرسوم و SFC

الف- متغیر حالت x_1 ب- متغیر حالت x_2 ج- متغیر حالت x_3

در (ب)

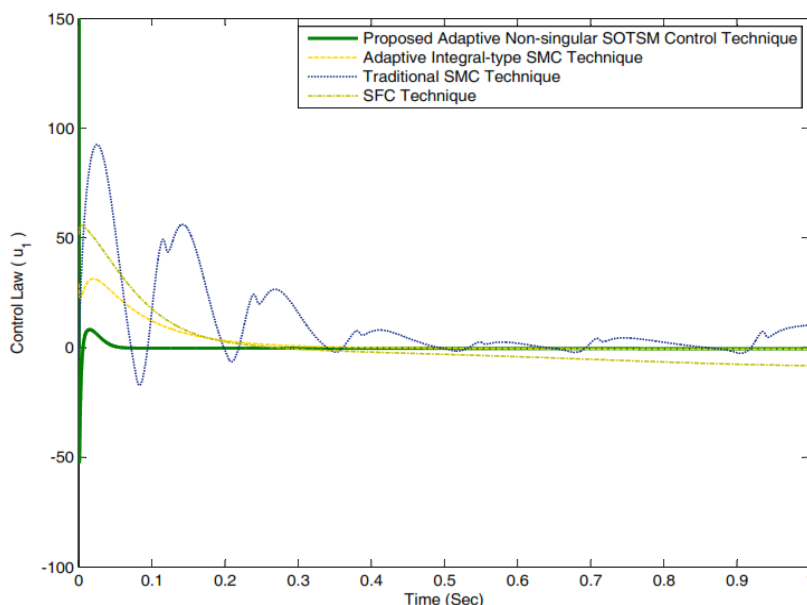
شکل ۴، مسیرهای زمانی قوانین کنترل u_1 و u_2 سیستم فیزیکی سایبری با به کار بردن روش کنترل SOTSM تطبیقی جدید پیشنهادی در مقایسه با روش SMC نوع انتگرالی تطبیقی، روش SMC مرسوم و روش SFC تحت عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک ارایه شده است.

مطابق (ب)

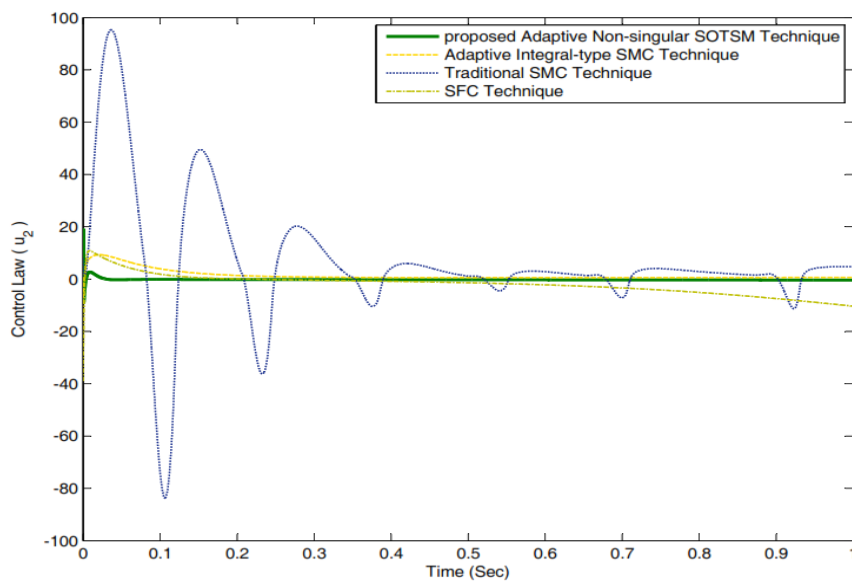
شکل ۴، با اعمال کنترل کننده فیدبک حالت به سیستم فیزیکی سایبری، قوانین کنترل u_1 و u_2 به صفر همگرا نشده و باعث ناپایداری سیستم می گردند؛ بنابراین این کنترل کننده وقتی که سیستم فیزیکی سایبری تحت شرایط مذکور قرار دارد، کنترل کننده مناسبی نمی باشد. قوانین کنترل u_1 و u_2 با اعمال رویکرد کنترل SMC مرسوم، نوسانات گذرای شدید از $t = 0$ تا $t = 0/36s$ دارند و بعد از آن با نوسانات نسبتاً ضعیف در اطراف مبداء امتداد می یابد؛ به خاطر وجود نوسانات، دامنه غیرنرم و تاخیر زمانی در رسیدن به مبداء، رویکرد SMC مرسوم نیز زمانی که سیستم فیزیکی سایبری تحت شرایط مذکور قرار دارد و سرعت پایداری سازی سیستم نیز حایز اهمیت است، رویکرد کنترل مناسبی نیست. بر اساس (ب)

شکل ۴، با اعمال روش SMC نوع انتگرالی تطبیقی، قوانین کنترل u_1 و u_2 با نرخ نسبتاً آهسته به اطراف صفر همگرا می شوند؛ لذا این روش کنترل نیز نمی تواند روش کنترل سریع و زمان محدود مناسب باشد.
با توجه به (ب)

شکل ۴، قوانین کنترل u_1 و u_2 سیستم فیزیکی سایبری با به کار بردن استراتژی کنترل SOTSM تطبیقی جدید پیشنهادی در حضور عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک نشان می دهند که قوانین کنترل طراحی شده دارای عملکرد مناسب، دقیق، پاسخ سریع، نرم و بدون نوسانات گذرا می باشند و همچنین همگرایی زمان محدود مناسب به نقطه تعادل مبداء به صورت $t_{u1} = 0/052s$ و $t_{u2} = 0/033s$ در مقایسه با نتایج روش SMC مرسوم ارایه می دهند.



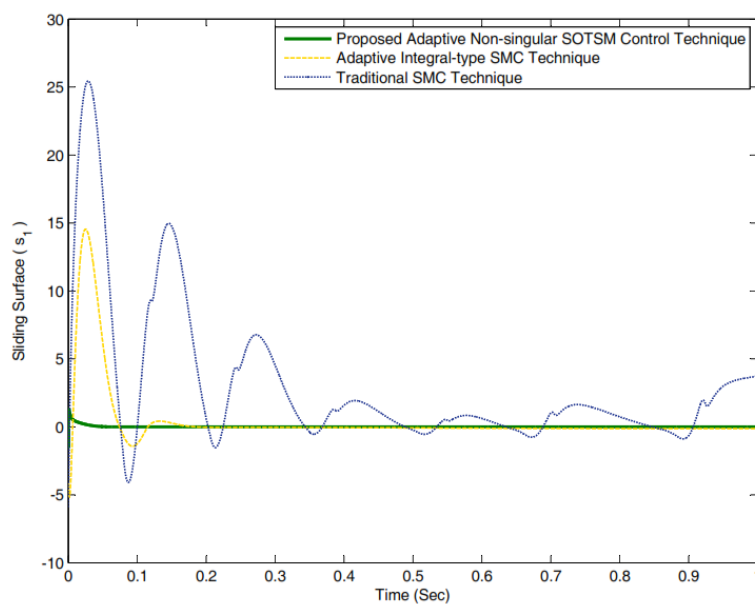
(الف)



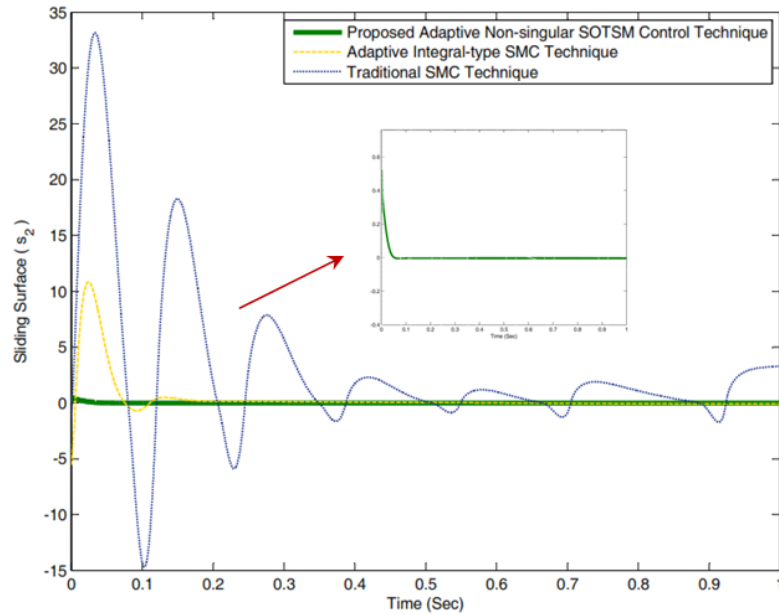
(ب)

شکل ۴- قوانین کنترل سیستم فیزیکی سایبری تحت عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک با به کار بردن روش کنترل SOTSM تطبیقی جدید پیشنهادی در مقایسه با روش های SMC نوع انتگرالی تطبیقی، SMC مرسوم و SFC

الف- قانون کنترل u_1 ب- قانون کنترل u_2



(الف)



(ب)

شکل ۵- سطوح لغزش فیزیکی سایبری تحت عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک با به کار بردن روش کنترل SOTSM تطبیقی جدید پیشنهادی در مقایسه با روش های SMC نوع انتگرالی تطبیقی، SMC مرسوم و SFC

الف- سطح لغزش s_1 ب- سطح لغزش s_2

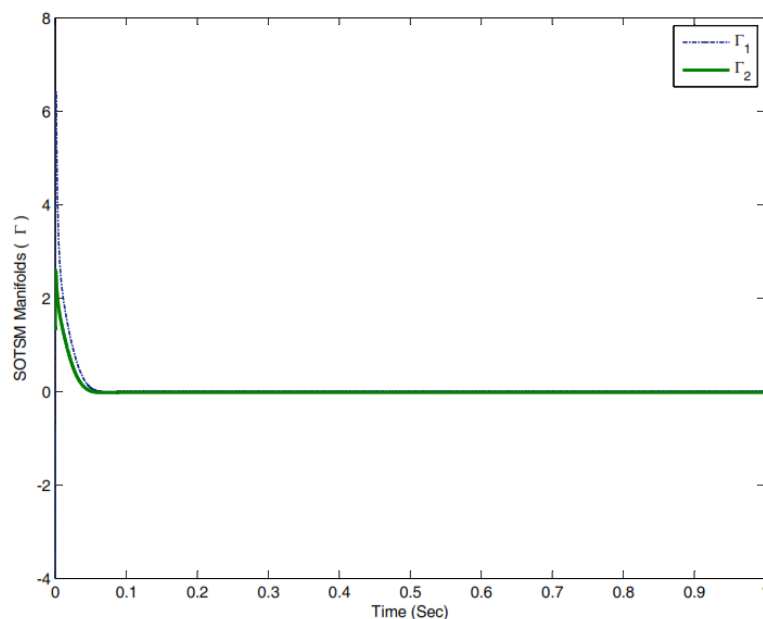
در (ب)

شکل ۵، سطوح لغزش s_1 و s_2 سیستم فیزیکی سایبری تحت عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک با اعمال روش کنترل SOTSM تطبیقی پیشنهادی در مقایسه با روش SMC نوع انتگرالی تطبیقی و روش SMC مرسوم نشان داده شده است. مطابق (ب)

شکل ۵، با به کار بردن روش SMC مرسوم در سطوح لغزش s_1 و s_2 نوسانات گذرای شدید از $t = 0$ تا $t = 0.49s$ وجود دارد و بعد از آن با نوسانات نسبتاً ضعیف در اطراف صفر امتداد می یابند که نشانگر نامناسب بودن کنترل کننده در شرایط مذکور است. با اعمال روش SMC انتگرالی تطبیقی نیز در سطوح لغزش s_1 و s_2 نوسانات گذرا از $t = 0$ تا $t = 0.17s$ وجود دارد که می توان بیان کرد روش SMC نوع انتگرالی تطبیقی وقتی که سیستم به طور همزمان تحت عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک قرار گرفته است، روش کنترل سریع و مناسبی نیست. با توجه به (ب)

شکل ۵، با اعمال روش کنترل SOTSM تطبیقی پیشنهادی سطوح لغزش s_1 و s_2 به طور سریع در زمان محدود $t_{s1} = 0.031s$ و $t_{s2} = 0.048s$ به نقطه تعادل مبداء همگرا می شوند؛ لذا سطوح لغزش روش کنترل پیشنهادی، در مقایسه با روش های دیگر، مناسب، دقیق، نرم، بدون نوسانات (گذرا و ماندگار) و وزوز است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که نرخ همگرایی به مبداء در روش کنترل SOTSM تطبیقی پیشنهادی سریع تر و بهتر از روش های کنترل دیگر می باشد.

منحنی زمانی منیفولدهای SOTSM تطبیقی سیستم فیزیکی سایبری تحت عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶ منیفولدهای SOTSM غیرتکین تطبیقی مناسب، بدون نوسانات گذرا و ماندگار، بدون وزوز، نرم و دقیق هستند. همچنین منیفولدها در یک زمان محدود و سریع به نقطه تعادل مبدا همگرا می شوند. به عنوان یک نتیجه، با به کار بردن روش کنترل SOTSM غیرتکین تطبیقی طراحی شده برای سیستم های فیزیکی سایبری تحت شرایط مذکور، نتایج شبیه سازی نشان می دهد که سیستم دارای عملکرد مقاوم و پایدار با همگرایی زمان محدود، عملکرد مناسب، موثر و کارآمد، سریع، دقت بالا و بدون نوسانات و وزوز است. بنابراین نتایج به دست آمده تایید می کنند که کنترل کننده SOTSM تطبیقی جدید طراحی شده برای سیستم های فیزیکی سایبری در مقایسه با کنترل کننده های مقاوم دیگر دارای عملکرد مناسب و موفق تری است.



شکل ۶- منیفولدهای SOTSM تطبیقی پیشنهادی سیستم فیزیکی سایبری تحت عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک

جدول ۱- مدت زمان همگرایی متغیرهای حالت، قوانین کنترل، سطوح لغزش و منیفولدها به نقطه تعادل مبدا (پایداری) در سیستم فیزیکی سایبری تحت عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک با اعمال روش کنترل SOTSM تطبیقی پیشنهادی در مقایسه با روش های SMC نوع انتگرالی تطبیقی، SMC مرسوم و SFC

Γ_2	Γ_1	s_2	s_1	u_2	u_1	x_3	x_2	x_1	روش کنترل/ پارامترهای سیستم
0/072s	0/078s	0/048s	0/031s	0/033s	0/052s	0/061s	0/0008s	0/056s	روش جدید پیشنهادی
ندارد	ندارد	0/208s	0/192s	0/289s	0/282s	0/491s	0/125s	0/311s	روش SMC انتگرالی تطبیقی
ندارد	ندارد	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	0/991s	روش SMC مرسوم
ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار	روش SFC

در جدول ۱، مدت زمان همگرایی متغیرهای حالت، قوانین کنترل، سطوح لغزش و منیفولدها به نقطه تعادل مبدا (وضعیت پایداری) در سیستم فیزیکی سایبری تحت عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک با اعمال روش کنترل SOTSM تطبیقی جدید پیشنهادی در مقایسه با روش SMC نوع انتگرالی تطبیقی، روش SMC مرسوم و روش SFC نشان داده شده است. مطابق جدول ۱، روش کنترل جدید پیشنهادی در مقایسه با روش های دیگر می تواند بطور سریع همگرایی متغیرهای حالت، قوانین کنترل، سطوح لغزش و منیفولدها را به نقطه تعادل مبدا در سیستم فیزیکی سایبری تحت شرایط مذکور فراهم کند و سبب پایداری زمان محدود و سریع سیستم گردد. بعد از روش جدید پیشنهادی، روش SMC انتگرالی تطبیقی دارای وضعیت پایداری نسبتاً مناسبی است ولی نمی تواند پایداری سریع و زمان محدود سیستم های فیزیکی سایبری را در شرایط مذکور فراهم سازد، لذا زمانی که پایداری زمان محدود و سریع سیستم فیزیکی سایبری تحت آسیب های متعدد مورد نظر است نمی تواند جوابگو باشد، ضمن اینکه مطابق نتایج ارائه شده در برخی موارد دارای نوسانات گذرای اولیه نیز می باشد. بر اساس جدول ۱، روش SMC مرسوم فقط در یک مورد x_1 با تاخیر زیاد به نقطه تعادل مبدا همگرا شده و در بقیه موارد ناپایدار است. در نهایت، روش SFC در تمامی موارد ناپایدار بوده و نمی تواند پایداری سیستم فیزیکی سایبری را در حضور عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک فراهم نماید. بنابراین با توجه به جدول ۱، در حالت کلی می توان بیان کرد که روش کنترل جدید پیشنهادی در مقایسه با روش های کنترل دیگر، دارای کارایی مطلوب و موثرتری است.

۵- نتیجه گیری

این مقاله یک روش کنترل SOTSM تطبیقی جدید با سطوح لغزش غیرخطی و منیفولدهای SOTSM غیرتکین در یک زمان محدود و سریع برای سیستم های فیزیکی سایبری در حضور عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات ناخواسته و حملات سایبری محرک متغیر با زمان ارائه می کند. قوانین کنترل به گونه ای طراحی شده اند که متغیرهای حالت سیستم را وادار می کنند تا از لحظه اولیه در یک زمان محدود به روی سطوح لغزش رانده شده و روی آن باقی بمانند و به سمت نقطه تعادل مبدا همگرا شوند. روش کنترل SOTSM ارائه شده، قابلیت رسیدن متغیرهای حالت سیستم به منیفولدهای روش کنترل SOTSM غیرتکین و همگرایی سریع حالت ها را به نقطه تعادل مبدا در راستای منیفولد در زمان محدود تضمین می کند. با استفاده از تابع تانژانت هیپربولیک و قانون کنترل پیوسته تطبیق برخط، پدیده وزوز حذف شده است و عملکرد مقاوم و پایدار سیستم دقیقاً از تمام شرایط اولیه برآورد می شود؛ همچنین هیچ اطلاعاتی برای کران عدم قطعیت پارامتری، اغتشاش ناخواسته و حمله سایبری محرک نیاز نیست. در حالت کلی، روش کنترل مد لغزشی ترمینال مرتبه دوم غیرتکین تطبیقی پیشنهادی برای سیستم های فیزیکی سایبری در معرض عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات ناخواسته و حملات سایبری محرک می تواند بطور مناسب پایداری زمان محدود، کنترل مقاوم و نرم، پاسخ سریع، عملکرد بدون نوسانات و وزوز، رفتار گذرای مناسب و دقت بالا را تضمین نماید. در نهایت نتایج شبیه سازی، میزان موثر و موفقیت آمیز بودن استراتژی کنترل SOTSM غیرتکین تطبیقی در مقایسه با نتایج روش های کنترل فیدبک حالت، کنترل مد لغزشی مرسوم و کنترل مد لغزشی انتگرالی تطبیقی را نشان می دهد. به عنوان پیشنهاد برای ادامه کار، پژوهشگران و محققان می توانند بر روی موضوعات مختلف سیستم های فیزیکی سایبری از جمله طراحی کنترل کننده مقاوم برای سیستم های فیزیکی سایبری در برابر حملات سایبری سنسور، آشکارسازی عیب در سیستم های فیزیکی سایبری به همراه طراحی کنترل کننده مقاوم در برابر آن و استفاده از هوش مصنوعی برای پایداری سازی زمان محدود سیستم های فیزیکی سایبری مطالعات لازم را انجام دهند.

مراجع:

- [1] N. Rajeswaran, M. L. Swarupa, R. Maddula, H. H. Alhelou, and V. Kesava Vamsi Krishna, "A Study on Cyber-Physical System Architecture for Smart Grids and Its Cyber Vulnerability," in *Power Systems Cybersecurity: Methods, Concepts, and Best Practices*: Springer, pp. 413-427, 2023.
- [2] J. M. Bradley, C. H. Fleming, K. Y. Rozier, and A. Pritchett, "Impact and Influence of Cyber-Physical Systems Research on Autonomous Aerospace Systems," in *AIAA SCITECH 2023 Forum*, pp. 1-23, 2023.
- [3] M. I. Ghafoor et al, "A Review on Enhancing Cyber-Physical System Security using Artificial Intelligence," *Journal of Applied and Emerging Sciences*, vol. 12, no. 2, pp. 210-218, 2023.
- [4] Z. Li and J. Zhao, "Resilient adaptive control of switched nonlinear cyber-physical systems under uncertain deception attacks," *Information Sciences*, vol. 543, pp. 398-409, 2021.
- [5] L. Eugene, W. Kevin, and D. Howe, "Robust and adaptive control with aerospace applications," *Springer London*, ed. 2, ISBN: 978-3-031-38314-4, nop. 618, 2023.
- [6] L. Zhai and K. G. Vamvoudakis, "A data-based private learning framework for enhanced security against replay attacks in cyber-physical systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 31, no. 6, pp. 1817-1833, 2021.
- [7] X. Qiu, Y. Wang, X. Xie, and H. Zhang, "Resilient Model-Free Adaptive Control for Cyber-physical Systems Against Jamming Attack," *Neurocomputing*, vol. 413, pp. 422-430, 2020.
- [8] C. Zhao, J. Lam, and H. Lin, "State estimation of CPSs with deception attacks: Stability analysis and approximate computation," *Neurocomputing*, vol. 423, pp. 318-326, 2021.
- [9] H. Geng, Z. Wang, J. Hu, F. E. Alsaadi, and Y. Cheng, "Outlier-resistant sequential filtering fusion for cyber-physical systems with quantized measurements under denial-of-service attacks," *Information Sciences*, vol. 628, pp. 488-503, 2023.
- [10] L. Zhao and G.-H. Yang, "Cooperative adaptive fault-tolerant control for multi-agent systems with deception attacks," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 357, no. 6, pp. 3419-3433, 2020.
- [11] A. S. Khan, A. Q. Khan, N. Iqbal, M. Sarwar, A. Mahmood, and M. A. Shoaib, "Distributed fault detection and isolation in second order networked systems in a cyber-physical environment," *ISA transactions*, vol. 103, pp. 131-142, 2020.
- [12] C.-L. Zhang, G.-H. Yang, and A.-Y. Lu, "Resilient observer-based control for cyber-physical systems under denial-of-service attacks," *Information Sciences*, vol. 545, pp. 102-117, 2021.
- [13] M. Wang, Y. Liu, and B. Xu, "Observer-based H^∞ control for cyber-physical systems encountering DoS jamming attacks: An attack-tolerant approach," *ISA transactions*, vol. 104, pp. 1-14, 2020.
- [14] J. Yang, "A Controllable False Data Injection Attack for a Cyber Physical System," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 6721-6728, 2021.
- [15] M. Alaeiyan, A. Dehghantanha, T. Dargahi, M. Conti, and S. Parsa, "A multilabel fuzzy relevance clustering system for malware attack attribution in the edge layer of cyber-physical networks," *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 1-22, 2020.
- [16] Y. Zhao, F. Zhu, W. Zhang, and H. Su, "Security switching control of cyber-physical system with incremental quadratic constraints under denial-of-service attack", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 45, no. 1, pp. 157-167, 2023.
- [17] A.-Y. Lu and G.-H. Yang, "Event-triggered secure observer-based control for cyber-physical systems under adversarial attacks," *Information Sciences*, vol. 420, pp. 96-109, 2017.
- [18] L. An and G.-H. Yang, "Improved adaptive resilient control against sensor and actuator attacks," *Information Sciences*, vol. 423, pp. 145-156, 2018.

- [19] M. S. Haghighi, F. Farivar, A. Jolfaei, and M. H. Tadayon, "Intelligent robust control for cyber-physical systems of rotary gantry type under denial of service attack," *The Journal of Supercomputing*, vol. 76, no. 4, pp. 3063-3085, 2020.
- [20] M. Zou, P. Fang, Y. Hou, Y. Wang, D. Hou, and H. Peng, "Synchronization analysis of two eccentric rotors with double-frequency excitation considering sliding mode control," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 92, pp. 105-125, 2021.
- [21] K. P. Shenoy and T. Ashwini, "Design of a Sliding Mode Controller for a Conical Tank Process," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1033, pp. 1-7, 2021.
- [22] C. T. Nguyen, T. T. Nguyen, and H. T. Chiem, "Observer-based Single-Phase Robustness Variable Structure Controller for Uncertain Interconnected Systems without Reaching Phase," *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 21, no. 2, pp. 22-33, 2019.
- [23] F. Wang, J. Wang, K. Wang, C. Hua, and Q. Zong, "Finite-time control for uncertain systems and application to flight control," *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, vol. 25, no. 2, pp. 163-182, 2020.
- [24] Y. Wang, H. Pu, P. Shi, C. K. Ahn, and J. Luo, "Sliding mode control for singularly perturbed Markov jump descriptor systems with nonlinear perturbation," *Automatica*, vol. 127, pp. 109-127, 2021.
- [25] M. Abolvafoei and S. Ganjefar, "Adaptive second-order terminal PID sliding mode control design for integer-order approximation of wind turbine system for maximum power extraction," *IET Control Theory & Applications*, vol. 15, no. 17, pp. 2210-2220, 2021.
- [26] S. Suprabhath Koduru, V. S. P. Machina, and S. Madichetty, "Cyber Attacks in Cyber-Physical Microgrid Systems: A Comprehensive Review," *Energies*, vol. 16, no. 12, pp. 4573-4592, 2023.
- [27] Y. Zhao, P. Gu, F. Zhu, T. Liu, and R. Shen, "Security control scheme for cyber-physical system with a complex network in physical layer against false data injection attacks," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 447, pp. 127-142, 2023.
- [28] L. Wang, X. Xue, Y. Wei, T. Li, and X. Chen, "Observer Based Control for Linear Cyber-physical Systems," *International Journal of Applied Mathematics*, vol. 50, no. 4, pp. 1-7, 2020.
- [29] H. Yang, Y. Jiang, and S. Yin, "Adaptive Control for Cyber-Physical Systems against Actuator Attacks," in *2020 IEEE Conference on Industrial Cyber-physical Systems (ICPS)*, vol. 1: IEEE, pp. 73-78, 2020.
- [30] A. AlGhanimi, J. Zheng, A. Aldhalemi, J. Khawwaf, and Z. Man, "Second-order terminal sliding mode control based on perturbation estimation for nanopositioning stage," *IET Cyber-Systems and Robotics*, vol. 2, no. 4, pp. 161-167, 2020.
- [31] O. Mofid, M. Momeni, S. Mobayen, and A. Fekih, "A Disturbance-Observer-Based Sliding Mode Control for the Robust Synchronization of Uncertain Delayed Chaotic Systems: Application to Data Security," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 16546-16555, 2021.
- [32] Y. Zafari and S. Shoja-Majidabad, "Second-order terminal sliding mode control of five-phase IPMSM with super twisting observer under demagnetisation fault," *International Journal of Modelling, Identification and Control*, vol. 34, no. 2, pp. 127-136, 2020.
- [33] A. Mahmood and Y. Kim, "Decentralized formation flight control of quadcopters using robust feedback linearization," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 354, no. 2, pp. 852-871, 2017.
- [34] Z. Li, Q. Zhang, J. An, H. Liu, and H. Sun, "Cross-coupling control method of the two-axis linear motor based on second-order terminal sliding mode," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 36, no. 3, pp. 1485-1499, 2022.
- [35] M. Abdillahi, A. Belkheir, N. Jennan, and E. M. Mellouli, "Fuzzy Logic Based Adaptive Second-Order Nonsingular Terminal Sliding Mode Lateral Control for Uncertain Autonomous Vehicle," in *Artificial Intelligence and Smart Environment: ICAISE*, Springer, pp. 454-461, 2023.
- [36] B. Wang, T. Wang, Y. Yu, and D. Xu, "Second-Order Terminal Sliding-Mode Speed Controller for Induction Motor Drives with Nonlinear Control Gain," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 10923-10934, 2022.

- [37] L. Qiao and W. Zhang, "Adaptive second-order fast nonsingular terminal sliding mode tracking control for fully actuated autonomous underwater vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 44, no. 2, pp. 363-385, 2018.
- [38] X. Huang, D. Zhai, and J. Dong, "Adaptive integral sliding-mode control strategy of data-driven cyber-physical systems against a class of actuator attacks," *IET Control Theory & Applications*, vol. 12, no. 10, pp. 1440-1447, 2018.
- [39] B. Vaseghi, M. A. Pourmina, and S. Mobayen, "Secure communication in wireless sensor networks based on chaos synchronization using adaptive sliding mode control," *Nonlinear Dynamics*, vol. 89, no. 3, pp. 1689-1704, 2017.