مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
مقاله پژوهشی
جلد۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، صفحه ۸۳-۶۹

اجماع مبتنی برمشاهده‌گر تطبیقی سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری در حضور عیب عملگر: طرح رویداد-تحریک

فاطمه غلامی[۱]، مهناز هاشمی[۲]، غضنفر شاهقلیان[۳]

[۱] دانشجوی دکتری، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، gholami_iaun@yahoo.com

[۲] دانشیار، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، mahnazhashemi100@gmail.com

[۳] استاد، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، shahgholiangh@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰ ویرایش اول: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸ ویرایش دوم: : ۱۴۰۳/۰۵/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۵

چکیده: این مقاله، به طراحی کنترل محرک-رویداد توزیع‌شده برای کلاسی از سیستم‌های چندعاملی نامشخص با فیدبک اکید مرتبه کسری در حضور عیب عملگر با استفاده از رویکرد پسگام می‌پردازد. برای کاهش بار ارتباطی در شبکه تحت کنترل و جلوگیری از اتلاف منابع انرژی، سیگنال کنترلی براساس دیدگاه مبتنی بر رویداد طراحی شده است. در فرآیند طراحی، با توجه به عدم قابلیت اندازه‌گیری حالت‌های عوامل پیرو به صورت مستقیم، مشاهده‌گر حالت تطبیقی عصبی مرتبه کسری برای تقریب حالت‌های نامعین معرفی می‌شود. همچنین از قوانین تطبیق مجهز به شبکه عصبی برای جبران‌سازی اثرات توابع غیرخطی نامعین استفاده شده و پس از آن روش تطبیقی برای جبران عیب‌های عملگر استفاده شده است. در انتها، بر اساس رویکرد پایداری مرتبه کسری لیاپانوف و نظریه گراف، تحلیل پایداری شبکه کنترلی حلقه بسته ارائه شده تا اطمینان حاصل شود که تمام سیگنال‌های سیستم کنترلی به صورت کراندار نهایی یکنواخت محدود هستند.

کلمات کلیدی: سیستم مرتبه کسری، سیستم چندعاملی، شبکه عصبی، عیب عملگر، کنترل تطبیقی، کنترل محرک -رویداد

Adaptive Observer-Based Consensus of Fractional-Order Multi-Agent Systems in The Presence of Actuator Fault: Event-Triggered Scheme

Fatemeh Gholami1, Mahnaz Hashemi, Ghazanfar Shahgholian

Abstract: This paper addresses the distributed event-triggered control design for a class of fractional-order strict-feedback uncertain multi-agent systems in the presence of unknown actuator fault by employing backstopping strategy. To reduce the communication burden and unnecessary waste of communication resources, an event-triggered control signal is designed. In the design process, considering that the information of followers' states is not measurable directly, the fractional-order neural adaptive state observer is introduced to estimate them. The adaptive neural laws are also proposed to eliminate the undesirable effects of the unknown nonlinear functions. Then, an adaptive fault strategy is applied to compensate the loss of actuator faults. Besides, based on the Lyapunov fractional-order stability approach and graph theory, unlike the existing results, a distributed event-triggered adaptive observer-based control architecture is designed to ensure that all the closed-loop network signals are ultimately bounded.

Keywords: Adaptive control, Event-triggered control, Fractional-order systems, Multi-agent systems, Neural networks, Strict-feedback systems.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با گسترش فناوری‌های کنترل شبکه، کنترل محرک-رویداد استاتیک به تدریج به یک ایده محبوب در جوامع کنترل تبدیل شده است [۳-۱]. اگر چه رویداد محرک زمان می‌تواند فرآیند طراحی کنترل و تحلیل پایداری را تسهیل کند اما منابع محدود شبکه (مانند پهنای باند و مصرف انرژی) را هدر می‌دهد [۴،۵]، در روش کنترل مبتنی بر رویداد در هر لحظه از زمان بر اساس یک مکانیسم محاسباتی به نام مکانیسم تشخیص وقوع رخداد در مورد ارسال (داده) سیگنال تصمیم‌گیری می‌شود [۶،۷]. بنابراین همان‌گونه که در مراجع [۸-۱۰]، به صورت تحلیلی نشان داده شده در روش کنترل مبتنی بر رویداد با ارسال تعداد نمونه‌های کنترلی کمتر نسبت به روش تریگر زمانی می‌توان با حفظ پایداری سیستم حلقه بسته به هدف کنترلی مورد نظر دست یافت.

از سوی دیگر امروزه مسئله پایداری و حفظ عملکرد مطلوب سیستم در حضور عیب و خرابی‌های قابل وقوع در سیستم مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته است [۱۱،۱۲]. وقوع عیب و خرابی در عملگرهای سیستم می‌تواند در اثر آلودگی، شکستگی، نشتی و یا سوختگی در آن رخ دهد و منجر به کاهش توانایی عملگر در ایجاد تحریک مناسب به ورودی عملگر شود. با توجه به اینکه تشخیص عیب دارای مشکلاتی از قبیل تشخیص نادرست، سرعت کم تشخیص و تاخیر در تشخیص است. بنابراین در این مقاله از نگرش کنترل با قابلیت تحمل عیب و جبران‌سازی خرابی بهره برده می‌شود. در مرجع [۱۳]، سیستم‌های کنترل شبکه‌ای عملی با حضور خرابی بدون آنکه از واحد تشخیص عیب استفاده شود، کنترل کننده خود را طوری تنظیم می‌کند که عملکرد سیستم برآورده شود. انتقال داده بین عملگرها و کنترل‌کننده‌های سیستم با توجه به محدودیت پهنای باند کانال ارتباطی و توانایی های محاسباتی، توسط رویکرد محرک رویداد برای سیستم‌های کنترل شبکه‌ای حل شده است.

با توجه به تعداد زیاد عملگرها در سیستم‌های چندعاملی بررسی موارد ذکر شده در بالا برای سیستم‌های چندعاملی بسیار جذاب و کاربردی است. امروزه بسیاری از پدیده‌های واقعی و صنعتی مانند حرکت ربات‌ها [۱۴]، پرواز دسته‌جمعی هواپیماهای بدون سرنشین و ردیابی مسیر دسته‌ای از شناورهای روسطحی و زیرسطحی [۱۵،۱۶] و مدیریت انرژی در سیستم‌های قدرت [۱۷]، به صورت یک سیستم چندعاملی مدل می‌شوند. از جمله مسائل مهم در کنترل مشارکتی سیستم‌های چندعاملی، کنترل اجماع است. ایده اصلی اجماع این است که هر عامل وضعیت اطلاعاتی خود را براساس وضعیت‌های اطلاعاتی همسایگان محلی خود بروزمی‌کند به گونه‌ای که وضعیت اطلاعات نهایی هر عامل به یک مقدار مشترک همگرا شود [۱۸،۱۹]. مسئله اجماع سیستم‌های چندعاملی از نظر دینامیک عامل‌ها، برای دینامیک سیستم‌های مختلف به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۲۲-۲۰]. دینامیک سیستم تاثیر زیادی بر وضعیت توافق نهایی سیستم‌های چندعاملی دارد. علی رغم گسترش‌های فوق الذکر، استراتژی‌های کنترلی پیشین تنها برای دسته‌ای محدود از سیستم‌های چندعاملی بررسی شده است. تقریباً بیشتر پروتکل‌های کنترلی ارائه شده فقط برای سیستم‌های چندعاملی خطی و یا کلاس خاصی از سیستم های چندعاملی غیرخطی کارایی دارند. اگرچه بسیاری از سیستم‌های کاربردی مانند ربات‌های چرخ‌دار [۲۳]، هواپیماهای بدون سرنشین [۲۴]، شناورهای روسطحی و زیرسطحی [۲۵] و غیره را می‌توان با سیستم‌های ساختار مثلثی غیرخطی مدل کرد. بنابراین مطالعه بر روی این سیستم‌ها کاربردی است. در [۲۶]، طراحی مشاهده‌گر حالت تطبیقی فازی برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه صحیح در حضور عملگر اشباع مورد مطالعه قرار گرفته است، سیستم چند عاملی مورد مطالعه دارای دینامیک ساختار فیدبک اکید بوده است، به همین دلیل روش کنترل غیرخطی آن پسگام انتخاب شده است. در [۲۷]، کنترل‌کننده اجماع زمان ثابت تطبیقی عصبی برای سیستم‌های چندعاملی مکانیکی در حضور قید محدودیت ناحیه مرده طراحی شده است، در دیدگاه ارائه شده زمان همگرایی تمامی خطاهای توزیع شده یه دلیل استفاده از روش زمان ثابت مستقل از شرایط اولیه عوامل می‌باشد که منجر به افزایش کارائی دیدگاه معرفی شده می‌گردد. در [۲۸]، نیز الگوریتم کنترل عصبی‌تطبیقی با زمان مشخص برای حل مسئله اجماع ارائه شده است. سیستم در نظر گرفته شده، سیستم غیرخطی مرتبه بالا با محدودیت حالت کامل، جهت‌های کنترل نامعلوم و عیب عملگر می‌باشد. علاوه براین شبکه‌های عصبی جهت تقریب دینامیک‌های نامعین به کار برده شده است.

از طرفی رویکردهای متنوعی برای مدلسازی سیستم‌های چندعاملی مانند معادلات دیفرانسیل تصادفی، معادلات دیفرانسیل مشتقات جزئی و همچنین معادلات دیفرانسیل مرتبه کسری مورد استفاده قرار گرفته است [۲۹]. به منظور انطباق بیشتر با واقعیت، توجه بسیاری از محققان به سیستم‌های مرتبه کسری جلب شده است. به عنوان مثال سیستم حیاتی انسولین-گلوکز [۳۰]، سیستم‌های قدرت [۳۱]، حرکت گروهی زیردریایی‌های بدون سرنشین در آب‌های راکد، حرکت هواپیماهای بدون سرنشین در هوای ابری، بارانی، گردوخاک و غبارآلود و حرکت ربات‌ها بر روی چمن،محیط‌های گل‌آلود و مسیرهای شنی [۳۲]، مدارهای الکتریکی [۳۳] و غیره را می‌توان به صورت سیستم‌های مرتبه کسری مدلسازی نمود. با توجه به نوظهور بودن سیستم‌های مرتبه کسری اکثر این نوع سیستم‌ها، برای دینامیک‌های ساده و خطی مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به پیچیدگی و برخی از ویژگی‌های مشتقات کسری، روش‌های کنترل توزیع شده مرسوم برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه صحیح را نمی‌توان مستقیماً برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری توسعه داد. در [۳۴]، دیدگاه کنترل توزیع شده برای سیستم‌های چندعاملی خطی مرتبه کسری با دینامیک‌های تک انتگرال‌گیر ارائه شده است. یک استراتژی کنترل توزیع شده ضربه‌ای نیز در [۳۵]، برای سیستم‌های چندعاملی خطی گزارش شده است. در [۳۶]، کنترل‌کننده مد لغزشی توزیع شده برای سیستم مرتبه کسری غیرخطی چندعاملی با دینامیک دو انتگرال‌گیر ارائه شده است. اگرچه نقص اساسی در دیدگاه‌های [۳۹-۳۷]،

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

این است که این رویکردها فقط برای سیستم‌های مرتبه کسری با شرایط سازگار کارایی دارند. و کلا در اکثر مقالاتی که روی سیستم‌های غیرخطی کار شده دو فرض غیر واقعی در نظر گرفته شده است. یکی اینکه توابع غیرخطی نامعین را به صورت خطی در پارامتر در نظر گرفته شده که در واقعیت اینچنین نیست و مسئله دیگر اینکه در اکثر پژوهش‌های موجود در زمینه طراحی کنترل‌کننده برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری فرض می‌شود که تمام حالات عوامل توسط سنسورهای مناسب قابل اندازه‌گیری هستند.اگرچه در بسیاری از موارد عملی، دسترسی به حالات عوامل غیرممکن است و یا آنکه سنسورهای مناسب برای اندازه‌گیری حالات به دلیل‌های گوناگون مانند قیمت بالادر دسترس نیست. در [۴۰]، کنترل اجماع برای یک کلاس از سیستم‌های غیرخطی مرتبه کسری با عیب‌های حسگر و عملگر و تاخیرهای زمانی در نظر گرفته شده است همچنین غیرخطی‌های نامعین توسط شبکه عصبی تخمین زده شده است.با این حال برخلاف این مقاله فرض شده تمام حالات عوامل در دسترس هستند و همچنین به صورت متناوب و براساس نرخ ثابت از داده‌های هر عامل نمونه برداری شده و در قالب بسته‌های اطلاعاتی به صورت متناوب برای کنترل‌کننده همان عامل ارسال می‌گردد. از این رو، به دلیل آن که کانال‌های مخابراتی ایده‌آل نمی‌باشند داده‌ها ارسالی می‌توانند در معرض آسیب‌های گوناگون مانند اغتشاش‌های خارجی، نویز تصادفی، عیب، تاخیر زمانی و یا سایر پدیده‌های نامطلوب قرارگیرند که در برخی از موارد می‌توانند منجر به تضعیف عملکرد کنترلی و یا ناپایداری شبکه تحت کنترل شود. اخیراً، پیشرفت‌های زیادی از سوی محققان در زمینه این مسائل ارائه شده است. برای حل مسئله توابع غیرخطی نامعین کنترل تطبیقی مبتنی بر تقریبگرهای عمومی برای سیستم‌های غیرخطی مرتبه کسری با مدل ساختار مثلثی بدست آمده است. برای سیستم‌های غیرخطی مرتبه کسری نامعین با دینامیک‌های ساختار مثلثی [۴۰-۳۷]، طراحی کنترل تطبیقی با الگوریتم پسگام به کار گرفته شده و همچنین عدم قطعیت‌های ساختاری غیرخطی پارامتری با استفاده از شبکه‌های عصبی یا سیستم‌های منطق فازی تقریب شده‌اند. با این وجود، این طرح‌های کنترلی نیازمند آن است که حالت‌های عوامل به طور مستقیم برای اندازه‌گیری در دسترس باشند. از این رو، یکی از ایده‌های مناسب برای اندازه‌گیری حالات سیستم، طراحی مشاهده‌گر حالت می‌باشد. با توجه به چالش‌های موجود در تک تک مسائل ارائه شده در نظر گرفتن همه این موارد باهم بسیار جذاب و کاربردی می‌باشد. در [۴۱]، کنترل‌کننده مبتنی بر رخداد به منظورکاهش تعداد به‌روزرسانی‌های سیگنال های کنترل برای دستیابی به اجماع مشارکتی رهبر-پیرو برای دسته‌ای از سیستم‌های مرتبه کسری غیرخطی نامعین با تبادل اطلاعات تحت گراف بی‌جهت مورد بررسی قرار گرفته است. ایراد اساسی پروتکل کنترلی پیشنهادی، طراحی مکانیسم تشخیص وقوع رخداد به صورت متمرکز بوده است. این امر سبب افزایش تعداد وقوع رخداد برای عوامل، افزایش به‌روزرسانی سیگنال کنترل هر عوامل وکاهش قابلیت اطمینان در شبکه تحت کنترل می‌گردد.

در [۴۲]، طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر رخداد برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری غیرخطی نامعین بررسی شده است. این مرجع در مقایسه با [۴۱]، تبادل اطلاعات در شبکه تحت کنترل به صورت جهت‌دار می‌باشد.در [۴۳] مسئله کنترل مهار سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری سوئیچ‌شونده با حالت‌های اندازه‌گیری نشده، توسط ترکیب مکانیسم راه‌اندازی رویداد و تکنیک کوانتیزه سازی ورودی بر بستر کنترل پسگام حل شده که می‌تواند فرکانس به‌روزرسانی کنترل‌کننده را کاهش دهد و از این طریق تا حد زیادی باعث کاهش مصرف انرژی در سیستم مورد مطالعه شده است.همچنین برای تقریب توابع غیرخطی نامعلوم از شبکه عصبی تابع پایه شعاعی استفاده شده است. در [۴۴]، کنترل‌کننده پسگام شبکه عصبی تطبیقی با فیلتر فرمان برای مسئله مهار سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری پیشنهاد شده است که استفاده از فیلتر فرمان باعث جلوگیری از انفجار پیچیدگی شده است و سیستم‌های چندعاملی مورد بررسی، شامل حالت های اندازه گیری نشده و توابع غیرخطی هستند، که شبکه عصبی تابع پایه شعاعی برای تقریب توابع غیرخطی ناشناخته استفاده و مشاهده‌گر حالت برای تخمین حالت‌های سیستم طراحی شده است. همچنین برای کاهش تعداد ارسال سیگنال‌های ورودی کنترل، کنترل‌کننده مبتنی بر رخداد پیشنهاد می‌شود که کنترل کننده پیشنهادی می تواند تضمین کند که همه عوامل پیرو می توانند به بدنه محدب رهبران همگرا شوند. علی‌رغم این پیشرفت‌ها، تاکنون نتیجه تحقیقاتی برای مسئله طراحی کنترل¬کننده توزیع شده رویداد-تحریک مبتنی بر مشاهده‌گر حالت¬ها برای سیستم-های چندعاملی مرتبه کسری نامعین با مدل ساختارفیدبک اکید گزارش نشده است.

در این مقاله، با بهره‌گیری از تقریبگر عمومی عصبی تطبیقی و استراتژی تخمین عیب ، دیدگاه کنترل کننده توزیع شده عصبی تطبیقی جبران‌ساز عیب مبتنی بر رویداد-تحریک برای سیستم‌های چندعاملی غیرخطی مرتبه کسری غیرخطی با مدل ساختار فیدبک اکید پیشنهاد شده است.

نوآوری‌های اصلی این مقاله در مقایسه با نتایج موجود به شرح زیر است:

الف- یک استراتژی کنترل اجماع عصبی تطبیقی مبتنی بر رویداد برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری غیرخطی گسترش داده شده است. برای آستانه از یک پارامتر ثابت استفاده می‌شود که نه تنها بار ارتباطی را کاهش می‌دهد، بلکه از هدر رفتن منابع ارتباطی جلوگیری می کند.

ب- اکثر نتایج کنترلی موجود فرض می‌شود اطلاعات وضعیت‌های سیستم کاملاً برای طراحی بازخورد در دسترس است. این فرض غیر واقعی است و علاوه بر این محدودیت زیادی در کاربرد کلمه واقعی ایجاد می¬کند. برای به دست آوردن یک نتیجه کلی‌تر، برای هر عامل پیرو، یک مشاهده‌گر حالت شبکه عصبی مرتبه کسری پیشنهاد شده تا طراحی خروجی بازخورد را برای شبکه‌ای از سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری در نظر بگیرد.

ج- در مقایسه با طرح‌های ETC برای سیستم‌های مرتبه کسری [۴۴-۴۱] در این مطالعه، عیب عملگر نیز در نظر گرفته‌شده است. دو مسئله

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

ETC وعیب عملگر هر کدام به صورت جداگانه کنترل‌کننده را دچار چالش و فرایند طراحی را پیچیده‌تر می‌کنند که در ادبیات‌های موجود این چالش‌های طراحی هر کدام به صورت جداگانه برطرف و کنترل کننده طراحی گردیده است. در این مطالعه این دو مسئله، تواما" در نظر گرفته‌شده است و در کنارهم قرار گرفتن این دو مسئله بسیار چالش‌برانگیز است که بر اساس رویکرد جبران عیب عملگر و مشاهده‌گر حالت عصبی، یک رویکرد ETC جبران عیب توزیع شده برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری بدون اندازه‌گیری مستقیم حالت‌ها ارائه شده است.

ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. مقدمات ریاضی اولیه در بخش دوم آمده است. بیان مسئله در بخش سوم ارائه شده است. در بخش چهارم، طراحی کنترل کننده و تجزیه و تحلیل پایداری آن بیان شده است. سپس نتایج شبیه‌سازی در بخش پنجم ارائه شده و در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ششم بیان شده است.

۲- معرفی رؤیت گر پیشنهادی

در این بخش، برخی از ابزارهای ریاضی مورد استفاده در این مقاله به‌طور مختصر برای تسهیل در طراحی سیستم کنترلی مرور شده است.

۲-۱- مشتق کسری کپوتو

در این زیر بخش، در ابتدا برخی از تعاریف و ویژگی‌های مشتق مرتبه کسری کپوتو مطرح و در ادامه، پایداری مبتنی بر لیاپانوف برای سیستم‌های مرتبه کسری ارائه شده است.

تعریف ۱ [۴۵][۱]: مشتق کسری کپوتو از مرتبه $\alpha > 0$ تابع پیوسته زمان $x(t)$ به صورت زیر تعریف شده است:

$$D_t^{\alpha} = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_0^t \frac{x^m(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-m+1}} d\tau, \qquad (۱)$$

که در آن α عدد حقیقی دلخواه، m عدد صحیح ثابت $m-1<\alpha\le m$ که تابع گاما به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\Gamma(P) = \int_0^{\infty} \tau^{P-1} e^{-t} dt, \qquad (۲)$$

برای مشتق کسری کپوتو، تبدیل لاپلاس برای تابع پیوسته زمان $x(t)$ به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\int_0^{\infty} D_t^{\alpha} x(t) e^{-st} dt = s^{\alpha} X(s) - \sum_{k=0}^{m-1} s^{\alpha-k-1} x^{(k)}(0) \qquad (۳)$$

که در رابطه فوق $X(s)$ تبدیل لاپلاس $x(t)$ است. تابع میتگ-لفلر، یکی از توابع بسیار کاربردی در حسابان مرتبه کسری و سیستم‌های کنترلی است که در ادامه تعریف شده است.

تعریف ۲[[۴۵]: تابع میتگ-لفلر با دو پارامتر به صورت بیان می شود:

$$E_{(M,N)}(Z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{Z^k}{\Gamma(MZ+N)} \qquad (۴)$$

که M و N ثابت‌های مثبت هستند و Z یک عدد مختلط است. تبدیل لاپلاس میتگ-لفلر صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L\{t^{N-1} E_{(M,N)}(-\mu t^M)\} = \frac{s^{M-N}}{s^M+\mu} \qquad (۵)$$

لم ۱ [۴۶،۴۵]: برای اعداد حقیقی N و M که نامساوی، $\frac{\pi M}{2} \le \mu \le \min(\pi, \pi M)$ را برآورده ساخته، کران تابع میتگ-لفلر به صورت رابطه (۶) محاسبه شده که $\arg(Z)$ نشان دهنده آرگومان عدد مختلط Z و C ثابت حقیقی مثبت است.

$$E_{(M,N)}(Z) \le \frac{C}{1+|Z|}, \quad \mu \le |\arg(Z)| \le \pi, |Z| \ge 0 \qquad (۶)$$

لم ۲ [۴۵]: اگر $\bar{x}(t) = [x_1(t), ..., x_n(t)]^T \in R^n$ یک تابع برداری هموار و ماتریس مثبت معین $P \in R^{n\times n}$ باشد، آنگاه نامساوی زیر برقرار است:

$$\frac{1}{2} {}_0^C D_T^{\alpha} (\bar{x}^T(t) P \bar{x}(t)) \le \bar{x}^T(t) P {}_0^C D_T^{\alpha} \bar{x}(t) \qquad (۷)$$

لم ۳ [۴۵]: اگرنامعادله دیفرانسیل مرتبه کسری با مرتبه α از تابع پیوسته $V(t)$ با رابطه (۸) برقرار باشد:

$${}_0^C D_t^{\alpha} V(t) \le -\mu V(t) + \xi, \qquad (۸)$$

که در آن μ و $\xi \ge 0$ پارامترهای مثبت هستند آنگاه:

$$V(t) \le V(0) E_{(\alpha,1)}(-\mu t^{\alpha}) + \frac{d\xi}{\mu}, t \ge 0 \qquad (۹)$$

برقرار است که در آن $d = \max\{1, C\}$ و C در لم ۱ تعریف شده است.

۲-۲- نظریه گراف

از تئوری گراف جبری معمولاً به عنوان یک ابزار ریاضی برای گرفتن ارتباطات و جریان اطلاعات بین عوامل همسایه در سیستم های چندعاملی استفاده می‌شود [۲۳]. $G = \{V, A, E\}$ یک گراف وزنی جهت‌دار از مرتبه N در نظر گرفته شده است که در این گراف $V = \{v_i : i = 1, 2, ..., N\}$ مجموعه‌ای از عوامل پیرو و همچنین $E \subseteq \{e_{ij} : i = 1, 2, ..., N, j = 1, 2, ..., N, i \ne j\}$ مجموعه یال‌ها هستند. رابطه $e_{ij} = (v_i, v_j) \in E$ برقرار است اگر و تنها اگر تبادل اطلاعات ازعامل i به عامل j وجود داشته باشد. علاوه براین،

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

ماتریس مجاورت عامل پیرو با $A=\left[a_{ij}\right]\in R^{N\times N}$ نشان داده شده که در آن $a_{ij}\neq 0$ است اگر رابطه $e_{ji}\in E$ برقرار باشد و همچنین $a_{ij}=0$ به این معنی که هیچ مسیری از عامل j به عامل i وجود ندارد. مجموعه همسایه‌های عامل پیرو iام با نماد N_i و به صورت $N_i=\left\{j\middle|a_{ij}\neq 0\right\}$ تعریف شده است. در ادامه، ماتریس لاپلاسین به صورت $L=D-A$ تعریف شده که در آن $D=diag\left(d_i\right)R^{N\times N}$ ماتریس درجه وزنی عامل iام و $d_i=\sum j\in N_i\, a_{ij}$.

ارتباطات بین عوامل پیرو و رهبر از طریق گراف جهت‌دار دیگر $\bar{G}=\left\{\bar{V},\bar{E}\right\}$ مدل شده است که در آن $\bar{V}=\left\{0,1,...,N\right\}$، $\bar{E}\subseteq\left\{e_{ij}:i=0,1,...,N,\, j=0,1,...,N, i\neq j\right\}$ و "0" نشان دهنده عامل رهبر است. ماتریس مجاورت رهبر نیز به صورت $B=diag\left(b_i\right)\in R^{N\times N}$ تعریف شده که در آن $b_i>0$ اگر فقط اگر عامل iام به خروجی رهبر دسترسی داشته باشد و در غیر این صورت $b_i=0$ است. یک گراف جهت دار دارای یک درخت پوشا جهت دار است اگر حداقل یک عامل (به نام ریشه) وجود داشته باشد که از ریشه به هر عامل یک مسیر وجود داشته باشد.

تعریف ۳: درخت پوشا زیرمجموعه‌ای از گراف G است که همه رئوس آن با کمترین مقدار یال‌های ممکن پوشش یافته است.

۳-۲- شبکه‌های عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی بعنوان تقریبگر عمومی در مجامع کنترلی شناخته شده‌اند و به طور گسترده برای تقریب توابع غیرخطی نامعین در بسیاری از سیستم‌های کنترلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تابع نامعین پیوسته $f(\bar{x})$ بر روی مجموعه فشرده Ω با توجه به ویژگی تقریبگر عمومی شبکه‌های عصبی به صورت [۴۷]،

$$f(\bar{x})=\Xi^{*}\varphi(\bar{x})+\varepsilon(\bar{x}),\quad \forall\bar{x}\in\Omega\subset R^{q} \qquad (۱۰)$$

تقریب زده شده که در آن $\Xi^{*}=[v_1,v_2,...,v_q]$ بردار وزن‌های ثابت و ایده‌ال، $\varphi(\bar{x})=[\varphi_1(\bar{x}),\varphi_2(\bar{x}),...,\varphi_q(\bar{x})]^T$ بردار تابع پایه، $q>1$ تعداد نورون‌ها در لایه مخفی و $\varepsilon(\bar{x})$ حداقل خطای تقریب را نشان می‌دهد.

فرض ۱: برروی مجموعه فشرده Ω، بردار وزن‌های شبکه عصبی و حداقل خطای تقریب نامساوی‌های (۱۱) را برآورده ساخته است که در آن ζ^{*} و ε^{*} پارامترهای نامعین و مثبت هستند.

$$\left\|\Xi^{*}\right\|\leq\zeta^{*},\quad \left|\varepsilon(\bar{x})\right|\leq\varepsilon^{*},\quad \forall\bar{x}\in\Omega, \qquad (۱۱)$$

۳- بیان مسئله

روابط دینامیکی iامین عامل پیرو مرتبه کسری با ساختار فیدبک اکید به صورت زیر توصیف شده است:

$$\begin{aligned} D_t^{\alpha}x_{i,1}(t)&=x_{i,2}(t)+f_{i,1}(x_{i,1}(t))\\ D_t^{\alpha}x_{i,2}(t)&=u_i(t)+f_{i,2}(\underline{x}_{i,2}(t))\\ y_i(t)&=x_{i,1}(t)\end{aligned} \qquad (۱۲)$$

که $0<\alpha<1$ مرتبه مشتق کپوتو، $\underline{x}_{i,2}=[x_{i,1},x_{i,2}]^T\in R^2$ بردار حالت iامین عامل، $u_i\in R$ و $y_i\in R$ به ترتیب ورودی و خروجی iامین عامل می‌باشند. $f_{i,k}(\bullet)$ برای $\forall k=1,2$ تابع غیرخطی نامعین iامین عامل پیرو است. عیب عملگر iامین عامل پیرو به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u_i(t)=\kappa_i v_i(t) \qquad (۱۳)$$

برای $t\geq t^{*}$ مدل شده که $0<\kappa_i<1$ ضریب کاهش کارایی عملگر، ثابت نامعین و مثبت می‌باشد، v_i سیگنال ورودی عملگر می‌باشد. علاوه براین، t^{*} زمان وقوع عیب در عملگر iام بوده است. رهبر در سیستم چندعاملی مورد مطالعه با نماد، "0" به صورت زیر توصیف شده است:

$$\begin{aligned} D_t^{\alpha}x_{0,1}(t)&=x_{0,2}(t)\\ D_t^{\alpha}x_{0,2}(t)&=G_0(\underline{x}_0(t))\\ y_0(t)&=x_{0,1}(t)\end{aligned} \qquad (۱۴)$$

که $x_{0,1}$ و $x_{0,2}$ حالت‌های رهبر $\underline{x}_0=[x_{0,1},x_{0,2}]^T$ بردار حالات رهبر و $G_0(\underline{x}_0)$ تابع نامعین غیرخطی را نشان می‌دهد.

اهداف کنترل: هدف اصلی در این مقاله طراحی کنترل‌کننده توزیع شده عصبی تطبیقی مبتنی بر رویداد برای حل مسئله اجماع در سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری غیرخطی نامعین می‌باشد به گونه‌ای که:

۱-تمام سیگنال‌ها در شبکه کنترلی حلقه بسته به صورت یکنواخت و نیمه سراسری کراندار هستند.

۲-خطای مشاهده‌گر، خطای اجماع و خطای تقریب پارامترهای نامعین شبکه عصبی به همسایگی‌های بسیار کوچک از اطراف صفر همگرا می‌شوند.

۳-از وقوع پدیده زنو به شدت اجتناب می‌شود.

برای دستیابی به اهداف فوق،فرض‌هایی‌که در طراحی کنترل کننده بکار گرفته‌شده عبارتند از:

فرض ۲: فقط خروجی عوامل پیرو به صورت مستقیم توسط حسگر های مناسب قابل اندازه‌گیری است. به بیان دیگر، حالات دوم عوامل پیرو برای طراحی کنترل کننده توزیع شده در دسترس نیست.

فرض ۳: گراف جهت دار مورد بررسی دارای درخت پوشا می‌باشد و عامل رهبر ریشه درخت است.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

تابع نامعین $f_{i,k}(\cdot)$ با استفاده از شبکه عصبی با رابطه (۱۵) تقریب زده شده است:

$$\begin{aligned} f_{i,k}(\underline{x}_{i,k}) &= \hat{f}_{i,k}(\hat{\underline{x}}_{i,k} \,|\, \theta^*_{i,k}) + \delta_{i,k} \\ &= \theta^{*T}_{i,k}\phi_{i,k}(\hat{\underline{x}}_{i,k}) + \delta_{i,k}, \end{aligned} \tag{۱۵}$$

شبکه عصبی، $\phi_{i,k}(\hat{\underline{x}}_{i,k})$ بردار رگرسور شبکه عصبی، $\hat{\underline{x}}_{i,k} = [\hat{x}_{i,1}, \hat{x}_{i,2}]^T$ بردار تخمین حالت $\underline{x}_{i,k} = [x_{i,1}, x_{i,2}]^T$ و ورودی شبکه عصبی هستند.

با جایگذاری رابطه (۱۵) در رابطه (۱۲)، روابط زیر به دست آمده است:

$$\begin{aligned} D_t^{\alpha} x_{i,1}(t) &= x_{i,2}(t) + \theta^{*T}_{i,1}\phi_{i,1}(\hat{x}_{i,1}) + \delta_{i,1}, \\ D_t^{\alpha} x_{i,2}(t) &= u_i(t) + \theta^{*T}_{i,2}\phi_{i,2}(\hat{\underline{x}}_{i,2}) + \delta_{i,2}, \\ y_i(x) &= x_{i,1}(t) \end{aligned} \tag{۱۶}$$

رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned} D_t^{\alpha} x_i &= A_i x_i + K_i y_i + \Psi_i^T \theta_i^* + \Delta_i + B_i u_i(t) \\ y_i &= C_i^T x_i \end{aligned} \tag{۱۷}$$

که در آن:

$$A_i = \begin{bmatrix} -k_{i,1} & 1 \\ -k_{i,2} & 0 \end{bmatrix}, B_i = [0,1]^T, K_i = [k_{i,1}, k_{i,2}]^T,$$

$$\theta_i^* = [\theta^*_{i,1}, \theta^*_{i,2}]^T, \Psi_i^T = \begin{bmatrix} \phi_{i,1}(\hat{x}_{i,1}) & 0 \\ 0 & \phi_{i,2}(\hat{\underline{x}}_{i,2}) \end{bmatrix},$$

$$C_i = [0,1]^T, \Delta_i = [\delta_{i,1}, \delta_{i,2}]^T, x_i = [x_{i,1}, x_{i,2}],$$

برای تضمین اثبات پایداری سیستم لازم است مقادیر ویژه ماتریس A_i دارای بخش حقیقی منفی باشد [۴۸]. از این رو وجود دارد $P_i^T = P_i > 0$ برای هر $Q_i^T = Q_i > 0$ به طوری‌که:

$$A_i^T P_i + P_i A_i = -Q_i \tag{۱۸}$$

٤- طراحی کنترل‌کننده

٤-۱- طراحی مشاهده‌گر حالت مرتبه کسری

از آنجایی که در هر عامل فقط خروجی همان عامل به صورت مستقیم برای طراحی کنترل‌کننده در دسترس است، در ابتدا باید مشاهده‌گر حالت مرتبه کسری برای تخمین حالات غیرقابل اندازه گیری در نظر گرفته شود.

به این منظور، دینامیک های مشاهده‌گر حالت کسری به صورت زیر در iامین عامل طراحی شده است [۴۹]:

$$\begin{aligned} D_t^{\alpha}\hat{x}_{i,1}(t) &= \hat{x}_{i,2}(t) + \hat{\theta}^T_{i,1}\phi_{i,1}(\hat{x}_{i,1}) + k_{i,1}e_{i,1} \\ D_t^{\alpha}\hat{x}_{i,2}(t) &= u_i(t) + \hat{\theta}^T_{i,2}\phi_{i,2}(\hat{\underline{x}}_{i,2}) + k_{i,2}e_{i,1} \\ \hat{y}_i(x) &= \hat{x}_{i,1}(t), \quad i = 1,\dots,N \end{aligned} \tag{۱۹}$$

که برای عامل پیرو iام $\hat{x}_{i,1}(t)$ و $\hat{x}_{i,2}(t)$ تخمین حالات $x_{i,1}$ و $x_{i,2}$ و $\hat{\theta}_{i,k}$ بردار تقریب شبکه عصبی و $\phi_{i,k}(\hat{x}_{i,k})$ بردار رگرسور شبکه عصبی می‌باشد. اکنون معادله (۱۹) به صورت زیر بازنویسی شده است:

$$\begin{aligned} D_t^{\alpha}\hat{x}_i &= A_i\hat{x}_i + K_i y_i + \Psi_i^T\hat{\theta}_i + B_i u_i(t), \\ \hat{y}_i &= C_i^T\hat{x}_i, \end{aligned} \tag{۲۰}$$

که در آن $\hat{\theta}_i = [\hat{\theta}_{i,1}, \hat{\theta}_{i,2}]^T$ تخمین $\theta_i^* = [\theta^*_{i,1}, \theta^*_{i,2}]^T$ است. بردار خطای مشاهده‌گر به صورت

$$e_i(t) = [e_{i,1}, e_{i,2}]^T = x_i(t) - \hat{x}_i(t), \tag{۲۱}$$

تعریف شده است که $x_i = \underline{x}_{i,2}$ و $\hat{x}_i = \hat{\underline{x}}_{i,2}$ با اعمال معادله (۲۱)، معادله دینامیکی این مشاهده‌گر به شکل زیر ارائه شده است:

$$D_t^{\alpha}e_i = D_t^{\alpha}x_i - D_t^{\alpha}\hat{x}_i = A_i e_i + \Psi_i^T\tilde{\theta}_i + \Delta_i \tag{۲۲}$$

که در آن $\tilde{\theta}_i = \theta_i^* - \hat{\theta}_i = [\tilde{\theta}_{i,1}, \tilde{\theta}_{i,2}]^T$ بردار خطای تقریب پارامترهای نامعین شبکه عصبی است. اکنون، تابع لیاپانوف برای iامین دنبال‌کننده به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$V_{i,0} = e_i^T P_i e_i. \tag{۲۳}$$

با مشتق‌گیری از تابع لیاپانوف ارائه شده در (۲۳):

$$D_t^{\alpha}V_{i,0} \le D_t^{\alpha}e_i^T P_i e_i + e_i^T P_i D_t^{\alpha}e_i \tag{۲۴}$$

با جایگذاری (۲۳) در (۲۴)، نامساوی زیر رابطه (۲۵) حاصل شده است:

$$\begin{aligned} D_t^{\alpha}V_{i,0} &\le e_i^T(A_i^T P_i + P_i A_i)e_i + \\ &\quad 2e_i^T P_i \Psi_i^T\tilde{\theta}_i + 2e_i^T P_i \Delta_i \\ &\le -\lambda_{\min}(Q_i)\|e_i\|^2 + \\ &\quad 2e_i^T P_i \Psi_i^T\tilde{\theta}_i + 2e_i^T P_i \Delta_i \end{aligned} \tag{۲۵}$$

که در آن $\lambda_{\min}(Q_i)$ کوچکترین مقدار ویژه ماتریس Q_i است. با استفاده از اعمال نامساوی یانگ [۲۰] در رابطه (۲۵)، نامساوی‌های زیر بدست می‌آید:

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

$$2e_i^T P_i \Psi_i^T \tilde{\theta}_i \le \|e_i\|^2 + \|P_i\|^2 \|\Psi_i\|^2 \|\tilde{\theta}_i\|^2 \quad (۲۶)$$

$$2e_i^T P_i \Delta_i \le \|e_i\|^2 + \|P_i\|^2 \rho_i^{*2} \quad (۲۷)$$

که در آن $\|\Delta_i\| \le \rho_i^*$ است. با جایگذاری (۲۶) و (۲۷) در (۲۵)، نامساوی زیر بدست می‌آید:

$$D_t^\alpha V_{i,0} \le -(\lambda_{\min}(Q_i)-2)\|e_i\|^2 + \|P_i\|^2 \rho_i^{*2} + \|P_i\|^2 \|\Psi_i\|^2 \|\tilde{\theta}_i\|^2 \quad (۲۸)$$

با توجه به عدم وجود اصل جداسازی در طراحی این مشاهده‌گر برای MAS های غیرخطی مرتبه کسری، یک کنترل کننده مرتبه کسری مناسب برای اطمینان از پایداری مشاهده‌گر طراحی شده است.

٤-۲- طراحی کنترل‌کننده مرتبه کسری

طراحی کنترل‌کننده و تحلیل پایداری سیستم کنترلی حلقه بسته به صورت همزمان در این زیربخش ارائه خواهد شد. در ابتدا، کنترل‌کننده عصبی تطبیقی توزیع شده با توجه به رویکرد پسگام طراحی شده است. به این منظور، تعریف تغییر متغیرهای زیر در طراحی کنترل‌کننده ضروری است [۵۰]:

$$z_{i,1} = \sum_{j=1}^{N} a_{ij}(x_{i,1}-x_{j,1}) + b_i(x_{i,1}-x_{0,1}) \quad (۲۹)$$

$$z_{i,2} = \hat{x}_{i,2} - \eta_{i,1}, \quad (۳۰)$$

که $z_{i,1}$ خطای ردیابی توزیع شده، $z_{i,2}$ سطح خطای دوم و $\eta_{i,1}$ کنترل‌کننده مجازی هستند. در ادامه، طرح کنترلی به صورت گام به گام ارائه شده است:

- **گام اول:** با مشتق‌گیری مرتبه کسری از رابطه (۲۹) داریم:

$$D_t^\alpha z_{i,1} = \sum_{j=1}^{N} a_{ij}(D_t^\alpha x_{i,1} - D_t^\alpha x_{j,1}) + b_i(D_t^\alpha x_{i,1} - D_t^\alpha x_{0,1}) \quad (۳۱)$$

با جایگذاری (۱۲)در (۳۱)، رابطه زیر به دست آمده است:

$$D_t^\alpha z_{i,1} = \sum_{j=1}^{N} a_{ij}(x_{i,2} + f_{i,1}(x_{i,1}) - x_{j,2} - f_{j,1}(x_{j,1})) + b_i(x_{i,2} + f_{i,1}(x_{i,1})) - b_i D_t^\alpha x_{0,1} \quad (۳۲)$$

با بازنویسی رابطه (۳۲)، رابطه زیر حاصل شده است:

$$D_t^\alpha z_{i,1} = (\sum_{j=1}^{N} a_{ij} + b_i)(x_{i,2} + f_{i,1}(x_{i,1})) - \sum_{j=1}^{N} a_{ij}(x_{j,2} + f_{j,1}(x_{j,1})) - b_i D_t^\alpha x_{0,1} \quad (۳۳)$$

با توجه به رابطه (۱۶) و تعریف خطای مشاهده‌گر در رابطه (۲۱) داریم:

$$D_t^\alpha z_{i,1} = (d_i + b_i)(z_{i,2} + e_{i,2} + \eta_{i,1} + \theta_{i,1}^{*T}\phi_{i,1}) - \sum_{j=1}^{N} a_{ij}(x_{j,2} + \theta_{j,1}^{*T}\phi_{j,1}(x_{j,1})) - b_i D_t^\alpha x_{0,1} \quad (۳۴)$$

سپس، سیگنال کنترل مجازی به صورت (۳۵) طراحی شده:

$$\eta_{i,1} = -\tau_{i,1} z_{i,1} - \hat{\theta}_{i,1}^T \phi_{i,1}(x_{i,1}) + \frac{1}{d_i + b_i} * \left\{ \sum_{j=1}^{N} a_{ij}(\hat{x}_{j,2} + \hat{\theta}_{j,1}^T \phi_{j,1}(x_{j,1}) + b_i D_t^\alpha x_{0,1} \right\} \quad (۳۵)$$

که در آن $\tau_{i,1} > 0$ بهره کنترلی و $\hat{x}_{j,2}$ تخمین حالت $x_{j,2}$ است. با ترکیب رابطه (۳۵) و رابطه (۳۴)، دینامیک حلقه بسته زیر به دست می‌آید:

$$D_t^\alpha z_{i,1} = (d_i + b_i)(-\tau_{i,1} z_{i,1} + e_{i,2} + z_{i,2} + \tilde{\theta}_{i,1}^T \phi_{i,1}(x_{i,1})) - \sum_{j=1}^{N} a_{ij}(\tilde{\theta}_{j,1}^T \phi_{j,1} + e_{j,2}) \quad (۳۶)$$

اکنون تابع لیاپانوف به شکل زیر انتخاب شده است:

$$V_{i,1} = \frac{1}{2} z_{i,1}^2 + \frac{1}{2r_{i,1}} \tilde{\theta}_{i,1}^T \tilde{\theta}_{i,1} + \frac{1}{2r_{j,1}} \sum_{j=1}^{N} a_{ij} \tilde{\theta}_{j,1}^T \tilde{\theta}_{j,1} \quad (۳۷)$$

که در آن $\tilde{\theta}_{i,1} = \theta_{i,1}^* - \hat{\theta}_{i,1}$ و $\tilde{\theta}_{j,1} = \theta_{j,1}^* - \hat{\theta}_{j,1}$ خطاهای تخمین پارامترهای نامعین و $r_{i,1} > 0$ و $r_{j,1} > 0$ پارامترهای طراحی را نشان می‌دهند. با توجه به رابطه (۳۷) خواهیم داشت که:

$$D_t^\alpha V_{i,1} \le z_{i,1} D_t^\alpha z_{i,1} - \frac{1}{r_{i,1}} \tilde{\theta}_{i,1}^T D_t^\alpha \hat{\theta}_{i,1} - \frac{1}{r_{j,1}} \sum_{j=1}^{N} a_{ij} \tilde{\theta}_{j,1}^T D_t^\alpha \hat{\theta}_{j,1} \quad (۳۸)$$

با جایگذاری (۳۶) در (۳۸)، نامساوی(۳۹) به بدست آمده است:

$$D_t^\alpha V_{i,1} \le z_{i,1}\{(d_i + b_i)(-\tau_{i,1} z_{i,1} + z_{i,2} + e_{i,2} + \tilde{\theta}_{i,1}^T \phi_{i,1}(x_{i,1}) - \sum_{j=1}^{N} a_{ij}(\tilde{\theta}_{j,1}^T \phi_{j,1}(x_{j,1}) + e_{j,2})\} - \frac{1}{r_{i,1}} \tilde{\theta}_{i,1}^T D_t^\alpha \hat{\theta}_{i,1} - \sum_{j=1}^{N} \frac{a_{ij}}{r_{j,1}} \tilde{\theta}_{j,1}^T D_t^\alpha \hat{\theta}_{j,1} \quad (۳۹)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

سپس، قوانین تطبیق به صورت زیر انتخاب شده اند:

$$D_t^{\alpha}\hat{\theta}_{i,1} = r_{i,1}z_{i,1}(d_i+b_i)\phi_{i,1}(x_{i,1}) - r_{i,1}\beta_{i,1}\hat{\theta}_{i,1}, \quad (۴۰)$$

$$D_t^{\alpha}\hat{\theta}_{j,1} = r_{j,1}z_{i,1}\phi_{j,1}(x_{j,1}) - r_{j,1}\beta_{j,1}\hat{\theta}_{j,1}, \quad (۴۱)$$

که $\beta_{j,1}>0$ و $\beta_{i,1}>0$ پارامترهای طراحی می باشند. با جایگذاری (۴۰) و(۴۱)در (۳۹) نامعادله دیفرانسیل زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} D_t^{\alpha}V_{i,1} \le & -\tau_{i,1}(d_i+b_i)z_{i,1}^2 + (d_i+b_i)z_{i,2}z_{i,1} + \\ & (d_i+b_i)e_{i,2}z_{i,1} - z_{i,1}\sum_{j=1}^{N} a_{ij}e_{j,2} + \\ & \beta_{i,1}\tilde{\theta}_{i,1}^T\hat{\theta}_{i,1} + \sum_{j=1}^{N}\beta_{j,1}a_{ij}\tilde{\theta}_{j,1}^T\hat{\theta}_{j,1} \end{aligned} \quad (۴۲)$$

در ادامه به بررسی گام دوم طراحی پرداخته می‌شود.

گام دوم: با مشتق گیری مرتبه کسری از (۳۰) رابطه زیر بدست آمده است:

$$\begin{aligned} D_t^{\alpha}z_{i,2} = & k_i\hat{\rho}_i v_{io}(t_i^m) + \hat{\theta}_{i,2}^T\phi_{i,2}(\hat{\underline{x}}_{i,2}) + \\ & k_{i,2}e_{i,1} - D_t^{\alpha}\eta_{i,1} \end{aligned} \quad (۴۳)$$

براساس رابطه(۴۳)، با استفاده از تعریف $\tilde{\rho}_i = \rho_i - \hat{\rho}_i$ رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} D_t^{\alpha}z_{i,2} = & k_i(\rho_i - \tilde{\rho}_i)v_{io}(t_i^m) + \hat{\theta}_{i,2}^T\phi_{i,2}(\hat{\underline{x}}_{i,2}) + \\ & k_{i,2}e_{i,1} - D_t^{\alpha}\eta_{i,1} \\ = & v_{io}(t_i^m) - k_i\tilde{\rho}_i v_{io}(t_i^m) + \hat{\theta}_{i,2}^T\phi_{i,2}(\hat{\underline{x}}_{i,2}) + \\ & k_{i,2}e_{i,1} - D_t^{\alpha}\eta_{i,1} \end{aligned} \quad (۴۴)$$

در نتیجه i امین سیگنال کنترل کننده میانی به صورت زیر طراحی می‌شود.

$$v_{io}(t) = -\tau_{i,2}z_{i,2} - \hat{\theta}_{i,2}^T\phi_{i,2}(\hat{\underline{x}}_{i,2}) - k_{i,2}e_{i,1} + D_t^{\alpha}\eta_{i,1} \quad (۴۵)$$

ارائه شده که $\tau_{i,2}>0$ پارامتر طراحی می باشد. سپس، ورودی کنترلی رویداد-تحریک به صورت زیر ارائه شده است:

$$v_{i0}(t) = Q_i(t_i^m), \quad t\in[t_i^m, t_i^{m+1}), t_i^0 = 0, \quad (۴۶)$$

که $t_i^m (m=0,1,2,....)$ زمان بروزرسانی کنترل کننده برای عامل i ام با شرط $t_i^0 < t_i^1 < ... < t_i^m < ...$ و $\lim_{m\to\infty} t_i^m = +\infty$ است.

قانون رویداد-تحریک برای تعیین زمان t_i^m براساس رابطه (۴۷) محاسبه شده:

$$t_i^{m+1} = \underset{t}{Inf}\left\{t > t_i^m \left\| Q_i(t) - Q_i(t_i^m)\right| > \mathfrak{M}_i\right\} \quad (۴۷)$$

که $\mathfrak{M}_i$ یک ثابت مثبت است. با اعمال (۴۵) به (۴۴) و اضافه و کم کردن $v_{io}(t)$ داریم:

$$\begin{aligned} D_t^{\alpha}z_{i,2} = & v_{io}(t_i^m) - v_{io}(t) - \\ & k_i\tilde{\rho}_i v_{io}(t_i^m) - \tau_{i,2}z_{i,2} \end{aligned} \quad (۴۸)$$

تابع کاندید لیاپانوف به صورت

$$V_{i,2} = \frac{1}{2}z_{i,2}^2 + \frac{1}{2r_{i,2}}\tilde{\theta}_{i,2}^T\tilde{\theta}_{i,2} + \frac{\kappa_i}{2r_{i,3}}\tilde{\rho}_i^2, \quad (۴۹)$$

تعریف شده است که $r_{i,3}>0, r_{i,2}>0$ ، ثابت‌های طراحی هستند. با مشتق از معادله (۴۹) و جایگذاری (۴۸) در آن رابطه (۵۰) حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} D_t^{\alpha}V_{i,2} \le & z_{i,2}(v_{io}(t_i^m) - v_{io}(t) - k_i\tilde{\rho}_i v_{io}(t_i^m) - \\ & \tau_{i,2}z_{i,2} + \tilde{\theta}_{i,2}^T\phi_{i,2}(\hat{\underline{x}}_{i,2}) - \\ & \tilde{\theta}_{i,2}^T\phi_{i,2}(\hat{\underline{x}}_{i,2}) - 1/r_{i,2}\tilde{\theta}_{i,2}^T D_t^{\alpha}\tilde{\theta}_{i,2}^T - \\ & k_i/r_{i,3}\tilde{\rho}_i D_t^{\alpha}\hat{\rho}_i \end{aligned} \quad (۵۰)$$

اکنون، قوانین به روزرسانی پارامترهای نامعین به صورت(۵۱) و (۵۲) انتخاب می شوند:

$$D_t^{\alpha}\hat{\theta}_{i,2} = r_{i,2}z_{i,2}\phi_{i,2}(\hat{\underline{x}}_{i,1}, \hat{\underline{x}}_{i,2}) - r_{i,2}\beta_{i,2}\hat{\theta}_{i,2}, \quad (۵۱)$$

$$D_t^{\alpha}\hat{\rho}_{i,2} = r_{i,3}z_{i,2}v_{io} - r_{i,3}\beta_{i,3}\hat{\rho}_{i,2} \quad (۵۲)$$

که $\beta_{i,2}>0$ و $\beta_{i,3}>0$ پارامترهای طراحی هستند. با جایگذاری (۵۱) و (۵۲) در (۵۰) رابطه زیر حاصل شده است:

$$\begin{aligned} D_t^{\alpha}V_{i,2} \le & -\tau_{i,2}z_{i,2}^2 + z_{i,2}(Q_i(t_i^m) - \\ & Q_i(t)) - \tilde{\theta}_{i,2}^T z_{i,2}\phi_{i,2}(\hat{\underline{x}}_{i,2}) + \\ & \beta_{i,2}\tilde{\theta}_{i,2}^T\hat{\theta}_{i,2} + \beta_{i,3}\tilde{\rho}_i\hat{\rho}_i \end{aligned} \quad (۵۳)$$

در بخش ادامه ، پایداری سیستم کنترل حلقه بسته پیشنهادی تحلیل می‌شود.

۳-٤- پایداری حلقه بسته

در این زیربخش، پایداری شبکه کنترلی حلقه بسته بررسی خواهد شد.

قضیه ۱: دسته ای ازسیستم‌های مرتبه کسری چندعاملی نامعین در حضور عیب عملگر و حالت‌های غیرقابل اندازه‌گیری را تحت گراف جهت‌دار در نظر بگیرید. اگر فرض‌های ۱-۳ برقرار باشد، آنگاه تحت قوانین تطبیق مرتبه کسری (۴۰)، (۴۱)، (۵۱) و (۵۲) و قانون کنترل محرک-رویداد (۴۷) می‌توان ثابت کرد که تمام سیگنال‌ها در شبکه کنترلی حلقه بسته به صورت نیمه سراسری کران‌دار نهایی یکنواخت می‌باشند. علاوه بر این، خطای ردیابی توزیع شده، خطای مشاهده‌گر حالت و خطای تقریب پارامترهای نامعین شبکه عصبی با انتخاب مناسب

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

پارامترهای مناسب طراحی به کران هایی بسیار کوچک از اطراف مبدا همگرا می‌شود.

اثبات: برای اثبات پایداری شبکه کنترلی حلقه بسته، تابع کاندید لیاپانوف زیر در نظر گرفته شده است:

$$V(t)=\sum_{i=1}^{N}\left(V_{i,0}(t)+\sum_{k=1}^{2}V_{i,k}(t)\right) \tag{۵۴}$$

با مشتق مرتبه کسری از تابع لیاپانوف فوق و استفاده از نامساوی های (۲۸)، (۴۲)و (۵۳) داریم:

$$\begin{aligned}D_t^{\alpha}V \le \sum_{i=1}^{N}\{&-(\lambda_{\min}(Q_i)-2)\|e_i\|^2-\tau_{i,1}(d_i+b_i)z_{i,1}^2-\\&\tau_{i,2}z_{i,2}^2+\|\rho_i\|^2\rho_i^{*2}+\|\rho_i\|^2\|\tilde{\theta}_i\|^2+\\&(d_i+b_i)z_{i,2}^2z_{i,1}^2(d_i+b_i)e_{i,2}z_{i,2}^2-\\&-z_{i,1}\sum_{j=1}^{N}a_{ij}e_{j,2}-\tilde{\theta}_{i,2}^Tz_{i,2}\phi_{i,2}(\hat{x}_{i,2})+\\&\beta_{i,1}\tilde{\theta}_{i,1}\hat{\theta}_{i,1}+\sum_{j=1}^{N}a_{ij}\beta_{i,1}\tilde{\theta}_{j,1}^T\hat{\theta}_{j,1}+z_{i,2}(Q_i(t_i^m)-\\&Q_i(t))+\beta_{i,2}\tilde{\theta}_{i,2}^T\hat{\theta}_{i,2}+\|\rho_i\|^2\|\tilde{\theta}_i\|^2\}\end{aligned} \tag{۵۵}$$

به دلیل اینکه علامت روابط نامعین است با استفاده از نامساوی یانگ و روابط زیر اکیدا" منفی و اکیدا" مثبت بودن جملات را مشخص می کنیم:

$$\beta_{i,1}\tilde{\theta}_{i,1}^T\hat{\theta}_{i,1}\le-\frac{1}{2}\beta_{i,1}\|\tilde{\theta}_{i,1}\|^2+\frac{1}{2}\beta_{i,1}\|\theta_{i,1}^*\|^2 \tag{۵۶}$$

$$\beta_{i,2}\tilde{\theta}_{i,2}^T\hat{\theta}_{i,2}\le-\frac{1}{2}\beta_{i,2}\|\tilde{\theta}_{i,2}\|^2+\frac{1}{2}\beta_{i,2}\|\theta_{i,2}^*\|^2 \tag{۵۷}$$

$$\sum_{j=1}^{N}a_{ij}\beta_{j,1}\tilde{\theta}_{j,1}^T\hat{\theta}_{j,1}\le-\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N}a_{ij}\beta_{j,1}\|\tilde{\theta}_{j,1}\|^2+\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N}a_{ij}\beta_{j,1}\|\theta_{j,1}^*\|^2 \tag{۵۸}$$

$$\beta_{i,3}\tilde{\rho}_i\hat{\rho}_i\le-\frac{1}{2}\beta_{i,3}\tilde{\rho}_i^2+\frac{1}{2}\beta_{i,3}\rho_i^2 \tag{۵۹}$$

با جایگذاری (۵۶)-(۵۹)در رابطه (۵۵) نامعادله دیفرانسیل زیر محاسبه شده است:

$$\begin{aligned}D_t^{\alpha}V\le\sum_{i=1}^{N}\{&-\left(\lambda_{\min}(Q_i)-2-\frac{1}{2}(d_i+b_i)-\frac{Na_{ji}^2}{2}\right)\|e_i\|^2\\&-\left(\tau_{i,1}-(d_i+b_i)-\frac{N}{2}\right)z_{i,1}^2\\&-\left(\tau_{i,2}-(d_i+b_i)\right)z_{i,2}^2+\|P_i\|^2\rho_i^{*2}+\frac{1}{2}\mathfrak{M}_i^2\\&-\left(\frac{1}{2}\beta_{i,1}-\|P_i\|^2\right)\|\tilde{\theta}_{i,1}\|^2+\frac{1}{2}\beta_{i,1}\|\theta_{i,1}^*\|^2\\&-\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N}a_{ij}\beta_{j,1}\|\tilde{\theta}_{j,1}\|^2+\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{2}a_{ij}\beta_{j,1}\|\theta_{j,1}^*\|^2\end{aligned} \tag{۶۰}$$

که $\left\|\phi_{i.2}(\hat{x}_{i,2})\right\|^2\le l$ و l تعداد نرون‌ها در لایه مخفی است.

به منظور اثبات کرانداری سیگنال‌های کنترلی حلقه بسته با تعریف پارامترهای ثابت و مثبت ϖو ξبه ترتیب در (۶۱) و (۶۲).

$$\begin{aligned}&\varpi=\min_{\substack{i=1,..,N\\j=1,..,N}}\{\frac{\left(\lambda_{\min}(Q_i)-2-\frac{1}{2}(d_i+b_i)-\frac{Na_{ji}^2}{2}\right)}{\lambda_{\max}(P_i)}>0,\\&2\left(\tau_{i,1}-(d_i+b_i)-\frac{N}{2}\right)>0,\left(\tau_{i,2}-0.5-0.5(d_i+b_i)\right)>0,\\&r_{i,1}\left(\frac{1}{2}\beta_{i,1}-\|P_i\|^2\right),r_{i,2}\left(\frac{1}{2}\beta_{i,2}-L-\|P_i\|^2\right),r_{j,1}\beta_{j,1}\}\end{aligned} \tag{۶۱}$$

$$\begin{aligned}\xi=\sum_{i=1}^{N}\{&\|P_i\|^2\rho_i^{*2}+\frac{1}{2}\beta_{i,1}\|\theta_{i,1}^*\|^2+\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{2}a_{ij}\beta_{j,1}\|\theta_{j,1}^*\|^2\\&+\sum_{j=1}^{N}+\frac{1}{2}\beta_{i,2}\|\theta_{i,2}^*\|^2+\frac{1}{2}\beta_{i,3}\rho_i^2+\frac{1}{2}\mathfrak{M}_i^2\}\end{aligned} \tag{۶۲}$$

نامعادله دیفرانسیل مرتبه کسری زیر از (۵۵)به دست آمده است:

$$D_t^{\alpha}V(t)+\varpi V(t)\le\xi \tag{۶۳}$$

از این رو براساس لم ۳، تمام سیگنال‌های حلقه بسته کراندارنهایی یکنواخت می‌باشند، به این معنی که:

$$V(t)\le V(0)E_{\alpha,1}(-\mu t^{\alpha})+d\xi/\varpi \tag{۶۴}$$

که $d=\max\{1,C\}$ و C در تابع تقریب میتگ-لفلر تعریف شده است [۵۱]. با میل دادن زمان به سمت بی نهایت نامساوی‌های زیر به دست آمده است:

$$\sum_{i=1}^{N}z_{i,1}^2\le 2d\xi/\varpi \tag{۶۵}$$

$$\sum_{i=1}^{N}\|e_i\|^2\le 2d\xi/\left(\lambda_{\min}(P_i)\varpi\right) \tag{۶۶}$$

که در آنها $\lambda_{\min}(p_i)$ کوچکترین مقدار ویژه ماتریس p_i را نشان می دهد. از نامساوی های(۶۵)و (۶۶)، اثبات همگرایی خطاهای ردیابی توزیع شده و خطاهای مشاهده حالت به ناحیه کوچکی در اطراف مبدا با انتخاب مناسب پارامترهای کنترل نتیجه شده است.

در این مرحله باید ثابت شود که از رفتار Zeno اجتناب می‌شود [۵۲].

برای $t\in[t_i^m,t_i^{m+1})$، با استفاده از ویژگی مشتق مرتبه کسری کپوتو، $\left|Q_i(t)-Q_i(t_i^m)\right|=\left|D^{-\alpha}(D^{\alpha}(Q_i(t)))\right|$ برقرار است. با در نظر گرفتن این موضوع، همراه با تعریف انتگرال مرتبه کسری، رابطه زیر برقرار است:

$$\left|Q_i(t)-Q_i(t_i^m)\right|\le\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_{t_i^m}^{t}(t-\tau)^{\alpha-1}\left|D^{\alpha}Q_i(\tau)\right|d\tau \tag{۶۷}$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

برای $D_w^{\alpha} g(h(w))$ نامساوی زیر برقرار است:

$$D_w^{\alpha} g(h(w)) \le \frac{\partial}{\partial h} g(h) D_w^{\alpha}(h(w)) \qquad (۶۸)$$

بنابراین $D_w^{\alpha}(Q_i(\tau)) = \aleph_i + A_i$ ، که برای $j \in N_j$ داریم:

$$\begin{aligned}\aleph_i = {} & \frac{\partial Q_i}{\partial x_{i,1}} D_w^{\alpha} x_{i,1} + \frac{\partial Q_i}{\partial \hat{x}_{j,1}} D_w^{\alpha} \hat{x}_{j,1} + \\ & \frac{\partial Q_i}{\partial \hat{\theta}_{i,1}} D_w^{\alpha} \hat{\theta}_{i,1} + \frac{\partial Q_i}{\partial \hat{\theta}_{i,2}} D_w^{\alpha} \hat{\theta}_{i,2} + \frac{\partial Q_i}{\partial x_{i,d}} D_w^{\alpha} x_{i,d} + \\ & \frac{\partial Q_i}{\partial \hat{x}_{j,2}} D_w^{\alpha} \hat{x}_{j,2} + \frac{\partial Q_i}{\partial \hat{x}_{i,2}} D_w^{\alpha} \hat{x}_{i,2} +\end{aligned} \qquad (۶۹)$$

از آنجایی که بر اساس معادله (۶۴) تمام سیگنال‌ها در سیستم حلقه بسته محدود می‌شوند استنباط می‌شود که $\aleph_i$ هم محدود است و $\left|D^{\alpha}(Q_i(\tau))\right| \le c_i$،برقرار است بنابراین نامساوی زیر درست است:

$$\left|Q_i(t) - Q_i(t_i^m)\right| \le \frac{1}{\Gamma(q+1)} (t - t_i^m)^{\alpha} c_i \qquad (۷۰)$$

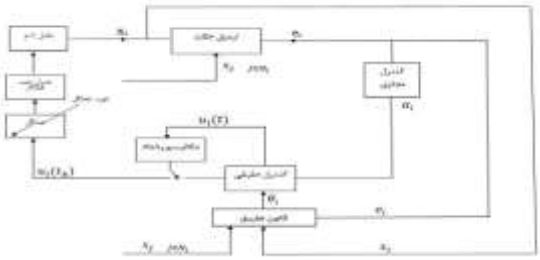
براساس قانون تحریک رویداد (۴۷)، رویداد بعدی نمی تواند قبل از t_i^{m+1} رخ دهد و $\lim_{t \to t_i^{m+1}} (\left|Q_i(t) - Q_i(t_i^m)\right| - \mathfrak{M}_i) = 0$ برقرار است، با در نظر گرفتن این واقعیت و معادله (۷۰)، رابطه (۷۱) به‌دست می‌آید.

$$\mathfrak{M}_i \le \frac{1}{\Gamma(q+1)} (t_i^{m+1} - t_i^m)^{\alpha} C_i \qquad (۷۱)$$

از معادله (۷۱)، می توان دریافت که:

$$t_i^{m+1} - t_i^m \ge \left(\frac{\Gamma(\alpha+1)\mathfrak{M}_i}{C_i}\right)^{1/\alpha} > 0 \qquad (۷۲)$$

و به این صورت از پدیده زنو در هر عامل پیرو اجتناب می‌شود. در ادامه بلوک‌دیاگرام سیستم حلقه بسته در شکل(۱) رسم شده است.



شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته

برای این شبیه سازی به صورت جدول (۱) در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، شرایط اولیه حالت عامل‌ها و پارامترها به صورت جدول (۲) بیان می‌شوند که عملکرد قابل قبولی را برای کنترل‌کننده پیشنهادی به دست می‌آورد. پارامترهای عیب عملگر مطابق جدول (۳) انتخاب شده است. گراف تبادل اطلاعات به کارگرفته شده برای شبیه‌سازی در شکل (۲) نشان داده شده که شامل رهبر با برچسب L و چهار عامل پیرو با برچسب‌های F_1، F_2، F_3 و F_4 است. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۳) الی (۸) نشان داده شده است. عملکرد اجماع در شکل (۳) نشان داده شده است، همان‌گونه که واضح است عوامل پیرو در حضور تبادل اطلاعات ناپیوسته بین کنترل‌کننده و محرک قابلیت تعقیب رهبر را دارا هستند. در شکل (۴) خطای اجماع برای عوامل پیرو نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که خطای اجماع کران‌دار بوده که تایید کننده نتایج حاصل در اثبات پایداری است. از نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۳) و (۴) می‌توان دریافت که این رویکرد کنترلی پیشنهادی قادر به حل مسئله اجماع برای گروهی از سیستم‌های مرتبه کسری غیرخطی ساختار فیدبک اکید در حضور عدم قطعیت‌ها بدون اندازه‌گیری همه حالت‌های عوامل پیرو بوده است. در شکل (۵) نیز سیگنال کنترل هر عامل ترسیم شده است.

به دلیل استفاده از دیدگاه رخداد در به‌روز رسانی سیگنال کنترل عوامل، نمودارهای ارائه شده در شکل (۵) پیوسته تکه‌ای هستند که باعث کاهش مصرف انرژی (از طریق کاهش تعداد به‌روز رسانی‌های سیگنال کنترل عوامل) در شبکه کنترلی در مقایسه با حالت پیوسته زمان در به‌روز رسانی‌های سیگنال کنترل شده است.

جدول ۱: دینامیک عامل‌ها

Agent	Dynamic
1	$\begin{bmatrix} D_{x_{1,1}}^{0.6} \\ D_{x_{1,2}}^{0.6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} x_{1,1} \\ x_{1,2}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_1$
2	$\begin{bmatrix} D_{x_{2,1}}^{0.6} \\ D_{x_{2,2}}^{0.6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{2,1} & x_{2,2} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} x_{2,1} \\ x_{2,1}^2 \sin(x_{1,2}^2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_2$
3	$\begin{bmatrix} D_{x_{3,1}}^{0.6} \\ D_{x_{3,2}}^{0.6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{3,1} & x_{3,2} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} x_{3,1} \sin(x_{3,1}^2) \\ x_{3,1}^2 - x_{3,1} \sin(x_{3,2}^2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_3$
4	$\begin{bmatrix} D_{x_{4,1}}^{0.6} \\ D_{x_{4,2}}^{0.6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{4,1} & x_{4,2} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} x_{4,1} \sin(x_{4,1}) \\ x_{4,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_4$

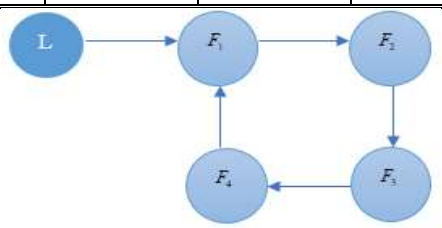
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

جدول ۲: شرایط اولیه و پارامترها

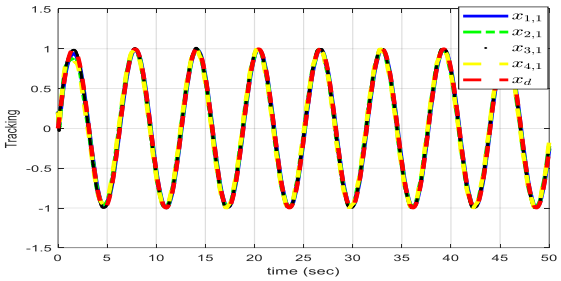
r	$r_{11}=r_{12}=r_{13}=r_{21}=r_{22}=r_{23}=r_{31}=r_{32}=r_{33}=r_{41}=r_{42}=r_{43}=10$
β	$\beta_{11}=\beta_{12}=\beta_{13}=\beta_{21}=\beta_{22}=\beta_{23}=\beta_{31}=\beta_{32}=\beta_{33}=\beta_{41}=\beta_{42}=\beta_{43}=1$
τ	$\tau_{11}=\tau_{21}=\tau_{31}=\tau_{41}=25$ $\tau_{12}=\tau_{22}=\tau_{32}=\tau_{42}=10$
Initial state	$x_1(0)x_2(0)=x_3(0)=x_4(0)=[0.2,0]$
graph matrices	$A=\begin{bmatrix}0&0&0&1\\1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\end{bmatrix}$ $B=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&0\end{bmatrix}$ $D=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$

جدول ۳: پارامترهای عیب عملگرهای عامل

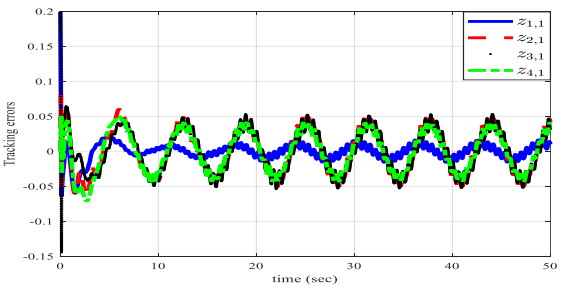
Agent	Without fault t<3	Fault of loss of efficiency	
		3<t<6	t≥6
1	$K_1=1$	$K_1=0.2$	$K_1=0.1$
2	$K_2=1$	$K_2=0.6$	$K_2=0.3$
3	$K_3=1$	$K_3=0.2$	$K_3=0.2$
4	$K_4=1$	$K_4=0.5$	$K_4=0.1$



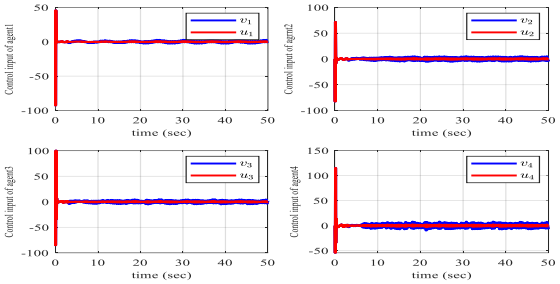
شکل ۲: گراف جهت دار



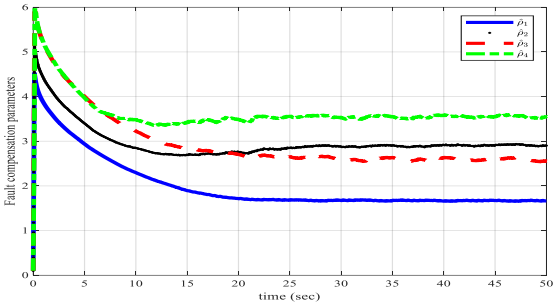
شکل ۳: اجماع عامل پیرو



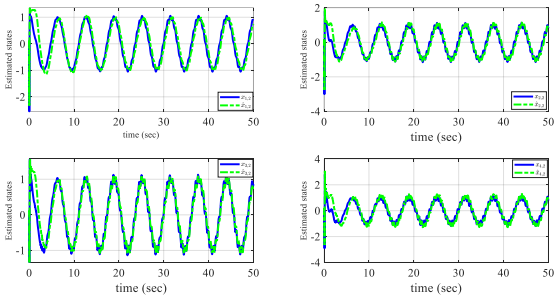
شکل ۴: خطای اجماع



شکل ۵: سیگنال‌های کنترل هر عامل



شکل ۶: پارامتر تخمین عیب



شکل ۷: حالت‌های دوم عامل‌ها و تخمین حالت‌ها

در شکل (۶)، پارامترهای جبران‌ساز عیب برای هر عامل نشان داده شده که با استفاده از این تخمین‌ها جبران سازی اثر عیب در سیگنال کنترل انجام شده که باعث پایداری شبکه کنترلی حلقه بسته در حضور عیب‌های عملگر و عملکرد خوب ردیابی شده است. همچنین از این شکل کران-داری و مثبت بودن پارامترهای تطبیق تقریب زده شده نیز استنباط می‌شود. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده حداقل فاصله زمانی بین رخدادهای متوالی به ترتیب برای عوامل پیرو اول تا چهارم ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۹، ۰/۰۰۶ و ۰/۰۰۷ است که از این نتایج می‌توان عدم وقوع پدیده زنو (عدم وقوع دو به‌روز رسانی متوالی سیگنال کنترل برای هر عامل بدون فاصله زمانی) را در شبکه کنترلی حلقه بسته دریافت نمود.

همگرایی حالت‌های تخمین زده شده به حالت‌های واقعی پیرو از طریق مشاهده‌گر تطبیقی عصبی مرتبه کسری پیشنهادی در شکل (۷) نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که این روش کنترل مبتنی بر رخداد پیشنهادی می‌تواند پایداری شبکه کنترلی را در حضور عیب‌های نامعین تضمین کند. علاوه بر این، به دلیل انتخاب رویکرد مبتنی بر رخداد مناسب می‌تواند دفعات به‌روز رسانی سیگنال کنترل هر عامل را کاهش داد.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

۱-۵- شبیه‌سازی مقایسه‌ای

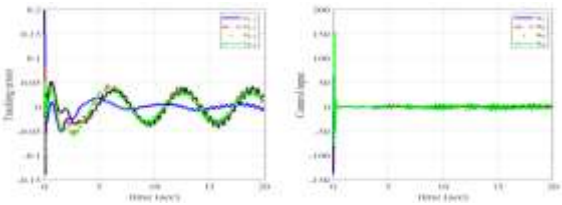
به منظور نشان دادن کارایی رویکرد کنترلی ارائه شده در این مقاله در کاهش تعداد به‌روز رسانی‌های کنترل‌کننده هر عامل در مقایسه با دیدگاه پیوسته زمان مقاله [۵۳]، در این زیر بخش شبیه‌سازی مقایسه‌ای صورت گرفته است. در این مثال، سیستم مورد بررسی یک سیستم قدرت تک ماشینه با باس بینهایت معرفی شده در مقاله [۵۳] است. نمودار ساختار این سیستم عملی در شکل(۹) ترسیم شده است. دینامیک سیستم مقایسه‌ای نیز به صورت زیر در نظر گرفته شده‌است.

$$\begin{aligned} D_t^{0.95}\varphi_r &= \omega_f + f_1 \\ D_t^{0.95}\omega_f &= -\frac{F}{L}\omega_f - \frac{\mathrm{P}_{\max}}{L}\sin(\varphi_r) \\ &+ \frac{\mathrm{P}_{\mathrm{m}}}{L} + \frac{\mathrm{P}_a}{L}\cos(\varepsilon t) + f_2 + u \end{aligned} \qquad (۷۳)$$

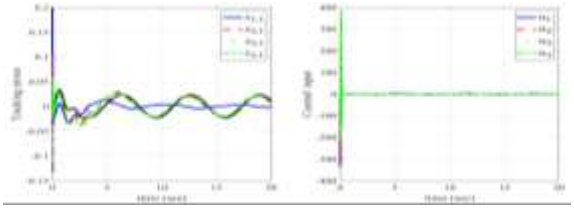
که در آن L و F به ترتیب، اینرسی چرخشی و ثابت میرایی ژنراتور را نشان می‌دهند. همچنین، $\mathrm{P}_{\max}$ حداکثر قدرت ژنراتور، P_{m}، قدرت ماشین و P_a نشان دهنده دامنه اختلال قدرت است.

به منظور شبیه‌سازی، تمام پارامترهای شبیه‌سازی مشابه زیربخش قبل با مرتبه کسری ۰/۹۵ انتخاب شده است. تعداد به‌روزرسانی در حالت کنترل‌کننده محرک-رویداد معرفی شده در این مقاله در مقایسه با مرجع [۵۳]، به شدت کاهش یافته است که کارایی دیدگاه ارائه شده را نشان می‌دهد.

علاوه براین، در شکل(۸) عملکرد اجماع تحت دیدگاه‌های به‌روز رسانی‌های پیوسته زمان کنترل‌کننده در مرجع [۵۳] با دیدگاه ارایه شده مبتنی بر رخداد مقایسه شده است. از نتایج فوق می‌توان دریافت که به دلیل به‌روزرسانی غیرپیوسته زمان کنترل‌کننده مبتنی بر رخداد عملکرد مطلوب اجماع در ردیابی مسیر عامل رهبر در مقایسه با کنترل پیوسته زمان به کاهش یافته است که منجر به افزایش کران خطای اجماع تحت کنترل مبتنی بر رخداد شده است. همچنین حل‌های کنترل مبتنی بر به‌روزرسانی پیوسته زمان دارای نوسانات بسیار کمتری هستند .از سوی دیگر می‌توان با تنظیم برخی از ثابت‌های طراحی کنترل‌کننده مانند افزایش بهره کنترلی و یا کاهش ثابت استانه رخداد خطای اجماع در حالت کنترل مبتنی بر رخداد را کاهش داد، اگرچه این مسئله می‌تواند منجر به افزایش تعداد به‌روز رسانی‌های کنترل‌کننده مبتنی بر رخداد گردد. از این‌رو باید بین کاهش تعداد به‌روزسانی کنترل‌کننده و کاهش کران خطای اجماع (به بیان دیگر افزایش دقت اجماع) در عمل با تنظیم ثابت‌های طراحی مصالحه برقرار نمود.

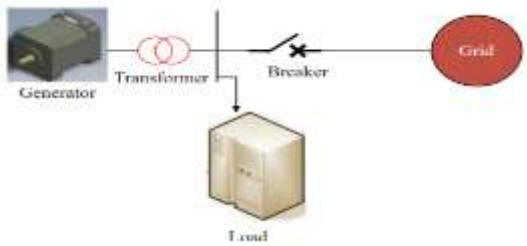


(الف) رویکرد محرک رویداد



(ب) رویکرد محرک زمان

شکل ۸: سطوح خطا در دو رویکرد مختلف



شکل (۹): نمودار ساختار سیستم قدرت تک ماشینه با باس بینهایت [۵۳]

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کنترل‌کننده محرک-رویداد شبکه عصبی تطبیقی مبتنی بر مشاهده‌گر برای دسته‌ای از سیستم‌های چندعاملی مرتبه کسری فیدیک اکید توسعه داده شده است، که در آن حالت‌های غیرقابل اندازه‌گیری و غیرخطی‌های ناشناخته به طور همزمان در نظر گرفته شده‌اند. با شبکه‌های عصبی پایه شعاعی، مشاهده‌گر حالت مرتبه کسری و روش طراحی پسگام، به ترتیب مسئله غیرخطی‌های ناشناخته و متغیرهای حالت‌های غیرقابل اندازه‌گیری برای دینامیک‌های فیدبک اکید حل شده است. بر اساس تجزیه و تحلیل لیاپانوف، نشان داده شده که کنترل‌کننده طراحی شده، محدودیت نیمه‌سراسری تمام سیگنال‌ها در سیستم حلقه بسته و همگرایی خطاهای ردیابی را بدون نقض محدودیت‌ها تضمین می‌کند. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی برای نشان دادن کارایی سیستم کنترل پیشنهادی ارائه شده است. در این مقاله، انتقال داده بین عوامل همسایه به صورت زمان حقیقی فرض شده است. از این رو برای کاربردی شدن دیدگاه مورد تحقیق می‌توان تاخیر زمانی بین عوامل را در انتقال اطلاعات بررسی کرد. از سوی دیگر، برای جلوگیری از وقوع پدیده نامطلوب اشباع محرک‌های عوامل (محدود کردن کران سیگنال کنترل) عوامل می‌توان قید محدودیت اشباع بهره برد.

مراجع

[1] D. Alibeigi, E. Abbaspour, B. Fani, H. Samet, "An intelligent multi-agent based approach for protecting distribution networks", Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System, vol. 1, no. 1, pp. 36-62, June 2022.

[2] F. Mohammadzamani, M. Hashemi, G. Shahgholian, "Adaptive control of nonlinear time delay systems in the presence of output constraints and actuator's faults", International Journal of Control, vol. 96, no. 3, pp. 541-553, March 2023.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

[3] K.R. Kumar, S. Maheswarapu, "Optimal power flows with security constraints using cubic lattice structured multi agent based PSO algorithm by optimal placement of multiple TCSCs", Majlesi Journal of Electrical Engineering, vol. 8, no. 4, pp. 1-26, vol. 2014.

[4] T. Liu, Z.P. Zhong, "Event-based control of nonlinear systems with partial state and output feedback", Automatica, vol. 53, pp. 10-22, Mar. 2015.

[5] F. Mohammadzamani, M. Hashemi, G. Shahgholian, "Adaptive control of nonlinear time delay systems in the presence of output constraints", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 10, no. 40, pp. 3-12, Winter 2020.

[6] R. Obermaisser, "Event-triggered and time-triggered control paradigms", Springer Science & Business Media, vol. 22, Sept. 2004.

[7] W.P.M.H. Heemels, K.H. Johansson, P. Tabuada, "An introduction to event-triggered and self-triggered control", Proceeding of the IEEE/CDC, pp. 3270-3285, Maui, HI, USA, Dec. 2012.

[8] J. Sun, J. Yang, S. Li, W.X. Zheng, "Output-based dynamic event-triggered mechanisms for disturbance rejection control of networked nonlinear systems", IEEE Trans. on Cybernetics, vol. 50, no. 5, pp. 1978-1988, May. 2020.

[9] X. Ge, Q.L. Han, L. Ding, Y.L. Wang, X.M. Zhang, "Dynamic event-triggered distributed coordination Control and its applications: a survey of trends and techniques", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 50, no. 9, pp. 3112-3125, Sept. 2020.

[10] T.F. Li, J. Fu," Event-triggered control of switched linear systems", Journal of the Franklin Institute, vol. 354, pp. 6451-6462, Oct. 2017.

[11] S. Payandeh-Najafabadi, M. Hashemi, "The adaptive sliding synchronization of uncertain Duffing-Holmes fractional-order chaotic systems with dead-zone", Journal of Vibration and Control, vol. 30, no. 19-20, pp. 4486-4497, Oct. 2024.

[12] G. Shahgholian, "An overview of hydroelectric power plant: Operation, modeling, and control", Journal of Renewable Energy and Environment, vol. 7, no. 3, pp. 14-28, July 2020.

[13] Z. Liu, J. Wang, C. L. P. Chen, Y. Zhang, "Event trigger fuzzy adaptive compensation control of uncertain stochastic nonlinear systems with actuator failures", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, vol. 26, no. 6, pp. 3770-3781, Dec. 2018.

[14] P. Hernández-León, J. Dávila, S. Salazar, X. Ping, "Distance-based formation maneuvering of non-holonomic wheeled mobile robot multi-agent system", IFAC-PapersOnLine, vol. 53, pp. 5665-5670, Jan. 2020.

[15] H. Liu, P. Weng, X. Tian, Q. Mai, "Distributed adaptive fixed-time formation control for UAV-USV heterogeneous multi-agent systems", Ocean Engineering, vol. 267, pp. 113240, Jan. 2023.

[16] Y. Yu, J. Guo, C. K. Ahn and Z. Xiang, "Neural adaptive distributed formation control of nonlinear multi-UAVs with unmodeled dynamics", IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems, vol. 34, no. 11, pp. 8555-9561, Nov. 2023.

[17] Z. Peng, D. Wang, Z. Chen, X. Hu and W. Lan, "Adaptive dynamic surface control for formations of autonomous surface vehicles with uncertain dynamics", IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol. 21, no. 2, pp. 513-520, March. 2013.

[18] C.E. Ren, L. Chen, C.L.P. Chen, T. Du, "Quantized consensus control for second-order multi-agent systems with nonlinear dynamics", Neurocomputing, vol. 175, pp. 529-540, Jan. 2016.

[19] C.L.P. Chen, G.X. Wen, Y.J. Liu, F.Y. Wang, "Adaptive consensus control for a class of nonlinear multiagent time-delay systems using neural networks", IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems, vol. 25, no. 6, pp. 1217-1226, June 2014.

[20] Z. Zhang, F. Hao, L. Zhang, L. Wang, "Consensus of linear multi-agent systems via event-triggered control", International Journal of Control, vol. 87, pp. 1243-1251, June 2014.

[21] A. Zhang, D. Zhou, P. Yang, M. Yang, "Event-triggered finite-time consensus with fully continuous communication free for second-order multi-agent systems", International Journal of Control, Automation and Systems, vol. 17, pp. 836-846, April 2019.

[22] D. Liu, G.H. Yang, "A dynamic event-triggered control approach to leader-following consensus for linear multiagent systems", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 51, no. 10, pp. 6271-6279, Oct. 2021.

[23] L. Yan, T. Stouraitis and S. Vijayakumar, "Decentralized ability-aware adaptive control for multi-robot collaborative manipulation", IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 2, pp. 2311-2318, April 2021.

[24] D. Wang, Q. Zong, B. Tian, F. Wang, L. Dou," Finite-time fully distributed formation reconfiguration control for UAV helicopters", International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 28, pp. 5943-5961, Dec. 2018.

[25] S. Li, X. Wang, " Finite-time consensus and collision avoidance control algorithms for multiple AUVs", Automatica, vol. 49, pp. 3359-3367, Nov. 2013.

[26] Y. Li, K. Li and S. Tong, "An Observer-Based Fuzzy Adaptive Consensus Control Method for Nonlinear Multiagent Systems", IEEE Trans. on

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

[38] M.K. Shukla, B.B. Sharma, "Backstepping based stabilization and synchronization of a class of fractional order chaotic systems", Chaos, Solitons & Fractals.vol. 102, pp 274-284, Sept. 2017.

[39] F. Zouari, A. Ibeas, A. Boulkroune, J. Cao, M.M Arefi, "Neuro-adaptive tracking control of non-integer order systems with input nonlinearities and time-varying output constraints", Information Sciences, vol. 485. no. 24, pp 170-192, June 2019.

[40] S. Song, B. Zhang, J. Xia and Z. Zhang, "Adaptive backstepping hybrid fuzzy sliding mode control for uncertain fractional-order nonlinear systems based on finite-time scheme", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 50, no. 4, pp. 1559-1569, April 2020.

[41] F. Wang, Y. Yang, "Leader-following consensus of nonlinear fractional-order multi-agent systems via event-triggered control", International Journal of Systems Science, vol.48, pp. 571-577, Feb. 2017.

[42] M. Shi, S. Hu, Y. Yu," Generalised exponential consensus of the fractional-order nonlinear multi-agent systems via event-triggered control", International Journal of Systems Science, vol. 50, pp. 1244-1251, April 2019.

[43] J. Yuan, T. Chen, "Switched fractional order multiagent systems containment control with event-triggered mechanism and input quantization", Fractal and Fractional, vol. 6, no. 2, pp. 77, Jan. 2022.

[44] T. Chen, J. Yuan," Command-filtered adaptive containment control of fractional-order multi-agent systems via event-triggered mechanism", Transa. of the Institute of Measurement and Control, vol. 45, no. 9, pp. 1646-1660, June 2023.

[45] I. Podlubny, "Fractional differential equation", Academic Press, San Diego.1999.

[46] R. Gorenflo, A.A. Kilbas, S.V. Rogosin, "On the generalized mittag-leffler type functions", Integral Transforms and Special function, vol. 7, pp. 215-224, Oct. 1998.

[47] M. Wei, Y.X. Li, Sh. Tong," Event-triggered adaptive neural control of fractional-order nonlinear systems with full-state constraints", Neurocomputing, vol. 412, pp. 320-326, Oct. 2020.

[48] X.Y. Zhang, Y.X. Li and J. Sun,"Observer-based robust adaptive neural control for nonlinear multi-agent systems with quantised input.", International Journal of Systems Science, vol. 55, pp. 1270-1282, Jan. 2024.

[49] Z. Yongliang, X. Li, S. Tong. "Observer-based decentralized control for non-strict-feedback fractional-order nonlinear large-scale systems with unknown dead zones", IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems, vol. 34, no. pp. 7479-7490, Oct. 2022.

[50] H. Lili, H. Yu, X. Xia, "Fuzzy adaptive tracking control of fractional-order multi-agent systems Fuzzy Systems, vol. 30, no. 11, pp. 4667-4678, Nov. 2022.

[27] D. Liu, Z. Liu, C. L. P. Chen, Y. Zhang, "Distributed adaptive neural fixed-time tracking control of multiple uncertain mechanical systems with actuation dead zones", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 52, no. 6, pp. 3859-3872, June 2022.

[28] C. Zhou, Y. Wang, M. Lv, N. Wang, "Neural-adaptive specified-time constrained consensus tracking control of high-order nonlinear multi-agent systems with unknown control directions and actuator faults", Neurocomputing, vol. 538, Article Number: 126168, June 2023.

[29] M. Hashemi, G. Shahgholian, "Distributed robust adaptive control of high order nonlinear multi agent systems", ISA Transactions, vol. 74, pp. 14-27, March 2018.

[30] I. Doye, H. Voos, M. Darouach, J.G. Schneider, "Static output feedback $\mathscr{H}\infty$ control for a fractional-order glucose-insulin system", International Journal of Control, Automation and Systems, vol. 13, pp. 798-807, Aug. 2015.

[31] S. Song, B. Zhang, X. Song and Z. Zhang, "Neuro-fuzzy-based adaptive dynamic surface control for fractional-order nonlinear strict-feedback systems with input constraint", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 51, no. 6, pp. 3575-3586, June 2021.

[32] Y. Cao, Y. Li, W. Ren and Y. Chen, "Distributed coordination of networked fractional-order systems", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 40, no. 2, pp. 362-370, April 2010.

[33] T.J. Freeborn, "A survey of fractional-order circuit models for biology and biomedicine", IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, vol. 3, no. 3, pp. 416-424, Sept. 2013.

[34] H.Y. Yang, Y. Yang, F. Han, M. Zhao, L. Guo, "Containment control of heterogeneous fractional-order multi-agent systems", Journal of the Franklin Institute", vol. 356, pp. 752-765, Oct. 2019.

[35] T. Ma, T. Li, B. Cui, "Coordination of fractional-order nonlinear multi-agent systems via distributed impulsive control", International Journal of Systems Science, vol. 49, pp 1-4, Jan. 2018.

[36] J. Bai, G. Wen, A. Rahmani, Y. Yu, "Consensus for the fractional-order double-integrator multi-agent systems based on the sliding mode estimator", IET Control Theory and Applications, vol: 12, no. 5, pp 621-628, Dec. 2018.

[37] X. Zhang, S. Zheng, C. K. Ahn and Y. Xie, "Adaptive neural consensus for fractional-order multi-agent systems with faults and delays", IEEE Trans on Neural Networks and Learning Systems, vol. 34, no. 10, pp. 7873-7886, Feb. 2022.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]

with partial state constraints and input saturation via event-triggered strategy", Information Sciences, vol. 646, Article Number: 119396, Oct. 2023.

[51] F. Mohammadzamani, M. Hashemi, G. Shahgholian, "Adaptive neural control of non-linear fractional order multi-agent systems in the presence of error constraints and input saturation", IET Control Theory and Applications, vol. 16, no. 13, PP. 1283-1298, April 2022.

[52] W. Chaoyue, Z. Ma, Sh. Tong, "Adaptive fuzzy output-feedback event-triggered control for fractional-order nonlinear system", Mathematical Biosciences and Engineering, vol. 19, no. 12, pp. 12334-12352, Jan. 2022.

[53] Y. Liu, H. Zhang, Y. Wang, H. Liang, "Adaptive containment control for fractional-order nonlinear multi- agent systems with time-varying parameters", IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 9, no. 9, pp. 1627-1638, Sept. 2022.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-01-30]