فصلنامه علمی آماد و فناوری دفاعی، سال ششم، شماره بیست و یکم، بهار ۱۴۰۳

همگام‌سازی عدم‌قطعیت‌ها در سامانه مدیریت زنجیره تأمین دفاعی بر اساس طراحی مدل کنترل حالت لغزشی فرا پیچشی

محمدرضا عسکری سپستانکی[۱]،حمیدرضا رضائی[۲]،حسین فیاضی[۳]

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۱۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹

چکیده

زنجیره تأمین دفاعی یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر بر آمادگی دفاعی نیروهای مسلح و بسترساز توسعه پایدار در سطح کشور به شمار می‌رود که استمرار عملیات تأمین ملزومات نیروهای مسلح در تمامی شرایط، از مأموریت‌های ذاتی و مداوم این زنجیره محسوب می‌گردد. با وجود عدم قطعیت‌های محیطی (رقبا، تحریم‌های نظامی و اقتصادی و ...)، همچنین اختلالات پیش‌بینی‌نشده داخل و خارج از زنجیره، عملکرد این سامانه به‌طور کامل قابل‌تحلیل نبوده و «کنترل‌کننده حالت لغزشی زمان محدود تطبیقی[۴]» به عنوان یک روش کارآمد کنترل‌کننده سیستم در صورت رخداد عدم قطعیت‌های مدل[۵]و اختلالات[۶]معرفی‌شده است. این پژوهش، رفتار دینامیکی یک سامانه زنجیره تأمین دفاعی پرمخاطره تحت تأثیر عدم قطعیت‌های مدل، غیر خطی‌ها[۷]و اختلالات را بررسی می‌کند و یک طرح «کنترل حالت لغزشی غیرخطی فرا پیچشی[۸]» را برای تثبیت زمان محدود و حذف نوسانات شدید تکراری و پیامدهای آن طراحی می‌کند و به‌طورکلی یک رویکرد آینده‌نگر به منظور پیش‌بینی بهتر تقاضا، مدیریت بهینه موجودی، تضمین پایداری و امنیت در مقابل تغییرات نوسانی در بخش دفاع

[۱] کارشناسی ارشد مهندس برق گرایش کنترل، دانشکده فنی- مهندسی، دانشگاه زنجان و نویسنده مسئول، صندوق الکترونیکی: mohammadrezaaskari76@yahoo.com

۲ دکتری علوم دفاعی راهبردی (سیاست دفاعی)، پژوهشکده آماد، فناوری دفاعی و عرصه‌های نوپدید، دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی و تحقیقات راهبردی، صندوق الکترونیکی: Rezaee55@chmail.ir

[۳] دکتری مهندس برق گرایش الکترونیک قدرت، دانشکده فنی- مهندسی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، صندوق الکترونیکی: fayazi66@mut-es.ac.ir

[4] Adaptive finite-time sliding mode controller
[5] Model uncertainties
[6] Perturbation
[7] Non-linearities
[8] Super-twisting nonlinear global sliding mode control

ارائه می‌کند. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار «متلب – سیمولینک[1]» گویای اثربخشی بالای روش پیشنهادی، در دستیابی به عملکرد پایدار نسبت به سایر تکنیک‌های کنترلی هست که منجر به تاب آوری و مداومت در تأمین ملزومات نیروهای مسلح و ممانعت از تحمیل هزینه‌های موازی در این زنجیره، مدیریت صحیح منابع و درنهایت، آمادگی بیشتر دفاعی نیروهای مسلح می‌شود. این پژوهش از نوع کاربردی – توسعه‌ای، روش آن توصیفی و تحلیل محتوا و از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه با خبرگان ادبیات و مفاهیم لازم جمع‌آوری شده است.

واژه‌های کلیدی: اختلالات، زنجیره تأمین دفاعی، عدم قطعیت مدل، کنترل‌کننده تطبیقی، کنترل‌کننده حالت لغزشی.

[1] MATLAB-Simulink

مقدمه:

در دهه‌های اخیر، به دلیل پیچیدگی روزافزون ساختارهای اجتماعی و سیاسی جهان، تأمین امنیت و حفظ منافع ملی به یکی از چالش‌های مشهود در بیشتر کشورها تبدیل شده و حائز اولویت در تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌ها است. زنجیره تأمین دفاعی به عنوان یک مؤلفه اساسی از بخش دفاع کشور و نقشی حیاتی که در تأمین ملزومات و فناوری‌های موردتقاضا در بخش‌های عملیاتی نیروهای مسلح در راستای آمادگی دفاعی و ارتقا امنیت ملی به عهده دارد، دائماً با افزایش پیچیدگی و مخاطرات در سطح ملی و بین‌المللی مواجه هست. طراحی «کنترل حالت لغزشی فرا پیچشی مرتبه بالا تطبیقی با سطح لغزش سراسری غیرخطی»[1] به عنوان یک رویکرد پیشرفته در مهندسی کنترل به منظور همگام‌سازی سیستم زنجیره تأمین دفاعی پرمخاطره، مؤثر به نظر می‌رسد. در مطالعات پیشین و سوابق پژوهشی انجام شده در این زمینه، تطابق و همگام‌سازی اثربخش زنجیره تأمین دفاعی با شرایط محیطی پرتلاطم و حاوی اختلالات خارجی و عدم قطعیت‌های پیش‌رو، یکی از اولویت‌های اساسی این حوزه پیشنهاد شده است. این روش به واسطه توانایی تطبیق پارامترها و پاسخ سریع به تغییرات محیطی و عدم قطعیت‌های مدل، در مقابل اثرات ناشی از اختلالات خارجی، بهبود قابل‌توجهی را در افزایش سطح اطمینان در دسترسی به منابع متقاضیان، انعطاف‌پذیری و تاب آوری زنجیره تأمین دفاعی ایجاد می‌کند.

مدیریت زنجیره تأمین دفاعی که بر روی توان بازدارندگی نیروهای مسلح، کمک به تقویت قدرت دفاعی و اقتدار ملی متمرکز است، در صورت وجود اثر شلاق چرمی[2](که دلیل اصلی ایجاد پدیده نامطلوب بی‌نظمی در سیستم مدیریت زنجیره تأمین دفاعی است)، مانع از کفایت و مداومت پشتیبانی از ذی‌نفعان و متقاضیان، بخش دفاع خواهد شد و در این وضعیت، اهمیت رفع نقاط گلوگاهی و بهینه‌سازی سامانه زنجیره تأمین دفاعی برای استمرار و مداومت پشتیبانی از نیروهای مسلح در اولویت قرار می‌گیرد. به همین دلیل، نیاز به یک الگوریتم کنترلی مقاوم و بهینه که بتواند اثرات اختلالات و

---

[1] Adaptive high-order super-twisting sliding mode control with nonlinear global sliding surface

[2] نوسانی در زنجیره تأمین می‌باشد که عامل اصلی به وجود آورنده آن تغییرات در میزان تقاضا است. با حرکت از سطح مشتری جزء به سطوح بالاتر در زنجیره تأمین، تغییرات کوچک در سطوح پایین باعث تغییرات بزرگ در سطوح بالایی می‌شود (Lee, et al, 2015:108-117) .

عدم قطعیت را در سامانه زنجیره تأمین دفاعی به خوبی کاهش دهد ضروری به نظر می‌رسد و باعث کاهش ناکارآمدی‌ها، حذف فعالیت‌های اضافه و بهینه‌سازی و مدیریت صحیح منابع (اعتبارات، تجهیزات، نیروی انسانی و...) در سامانه مدیریت زنجیره تأمین دفاعی خواهد شد. از طرفی انعطاف‌پذیری را در این سیستم به منظور دستیابی به اهداف موردنظر ارتقا می‌دهد. هدف نهایی این پژوهش ارائه یک الگوریتم کنترلی حلقه بسته مقاوم و کارآمد با وظیفه بهینه‌سازی و افزایش تاب آوری در سیستم مدیریت زنجیره تأمین دفاعی پرمخاطره در حضور تأثیرات نامطلوب اثر شلاق چرمی، اختلالات و عدم قطعیت‌های مدل است که این امر موجب استمرار، کفایت و مداومت پشتیبانی در این بخش می‌شود. علاوه بر این، الگوریتم کنترلی پیشنهادی برخی از مسائل مانند پدیده نامطلوب نوسانات شدید تکراری، همگرایی زمان محدود و... را به خوبی بهبود می‌بخشد. در این راستا دلایلی همچون کمک به یکپارچه‌سازی زنجیره تأمین دفاعی، ارتقا کیفیت اشتراک‌گذاری اطلاعات، مدیریت تقاضا، سفارش و زمان واگذاری، بهره‌گیری از الگوریتم حالت لغزشی برای بهبود خود سازمان‌دهی و همکاری بین سازمانی، بهره‌گیری از کنترل‌کننده بازخورد، جهت ارتقای تاب آوری زنجیره تأمین دفاعی در رویارویی با داده‌های اشتباه در حوزه زنجیره تأمین دفاعی، اهمیت بالایی پیدا خواهد نمود.

ادبیات و پیشینه:

زنجیره تأمین دفاعی، یک حالت توسعه‌یافته از سیستم پشتیبانی لجستیکی باتوجه‌به شبکه و اطلاعات موردنیاز جنگ است. زنجیره تأمین دفاعی، خرید، انبارداری، حمل‌ونقل و نهایتاً نیروهای مسلح را در کنار هم قرار داده، توانمندی‌های زنجیره تأمین را به‌طور کامل ایجاد کرده و حداکثر منافع موردنیاز حوزه عملیات را فراهم می‌کند (*Lu, et al, 2021:402-458*). در حالت کلی، مدیریت زنجیره تأمین نظامی از دو یا چند سازمان تشکیل می‌شود که به‌طور رسمی از یکدیگر جدا بوده و به وسیله جریان‌های مواد، اطلاعات و جریان‌های مالی به یکدیگر مرتبط می‌شوند. بااین‌حال، محصولات پیچیده نظامی دارای زنجیرهٔ تأمین خاص خود بوده که به دلیل شرایط خاص تولید آن‌ها به‌نوعی دارای یک شبکه تأمین منحصربه‌فرد هستند و معمولاً روال‌های متعارف زنجیره تأمین به‌ندرت در خصوص آن‌ها اجرا می‌گردد. در عوض زنجیره تأمین محصولات ساده و نسبتاً پیچیده دفاعی، مشابهت بسیار زیادی با زنجیره تأمین محصولات دیگر صنایع داشته و از قابلیت مناسب‌تری برای پیاده‌سازی

رویکردهای مدیریت زنجیرهٔ تأمین برخوردار می‌باشند. بخش عمده‌ای از محصولات صنایع دفاعی، در دسته ساده و نسبتاً پیچیده قرار می‌گیرند (*Rahimi, et al, 2020:1-49*). هسته مرکزی این زنجیره ایجاد یک ساختار شبکه‌ای مستحکم با مرتبط کردن تمام سطوح تأمین‌کنندگان و نیروهای مسلح هست که هدف تأمین‌کنندگان، تحقق حداکثر آمادگی با دستیابی به سفارش‌ها و حداکثر نیاز نیروهای مسلح و هم‌زمان بهینه کردن هزینه‌های حمایت لجستیکی هم خواهد بود (*Karimi Zarchi, et al, 2020:67-91*).

ماهیت پویا و بی‌ثبات بازار جهانی انواع مختلفی از عدم قطعیت‌ها را در طول زنجیره تأمین ایجاد می‌کند، به‌عنوان‌مثال، عدم قطعیت تقاضا، عدم اطمینان عرضه، عدم قطعیت تحویل و عدم قطعیت پیش‌بینی. علاوه بر این عدم قطعیت‌های ناشی از منابع خارجی، عدم قطعیت‌هایی که به صورت روزانه مشاهده می‌شوند (مانند خرابی ماشین‌آلات، منابع اشتباه و کمبود عرضه) زنجیره‌های تأمین را بسیار پیچیده‌تر می‌کنند. عدم قطعیت‌ها در امتداد بالادست و پایین‌دست کل زنجیره تأمین منتشر می‌شود که منجر به تولید اثرات دینامیکی غیرخطی مختلف می‌شود. علاوه بر این عدم قطعیت‌ها، روابط بین بازیگران مختلف در زنجیره تأمین اغلب با بی‌اعتمادی و رقابت مشخص می‌شود (*Bai, et al, 2021:1263-1276*). هدف عمده دیگر زنجیره تأمین دفاعی دستیابی به وضعیت آمادگی ویژه در پایین‌ترین هزینه کل امکان‌پذیر در حضور این عدم قطعیت‌ها بوده و معیار موفقیت در زنجیره تأمین دفاعی، انعطاف‌پذیری و موفقیت در آمادگی برای جنگ است، نه دستیابی به سود (*Trakulsunti, et al, 2023:538-557*). علاوه بر این، در مفهوم زنجیره تأمین نظامی، نگه‌داشتن موجودی کافی یک اقدام مناسب برای حفظ انعطاف‌پذیری و حالت فرا کنشی است (*Rejeb, et al, 2021:1-24*). افزایش انعطاف‌پذیری در ارائه خدمات برای توافق در فعالیت‌های زنجیره تأمین از مؤلفه‌های مهم در تداوم زنجیره تأمین هست. تاب آوری با ایجاد انعطاف‌پذیری در سرمایه‌گذاری، تولید و تأمین ملزومات (جعفرنژاد و همکاران، ۱۱۹:۱۳۹۶) انعطاف‌پذیری در مراحل توزیع و جریان‌های زنجیره تأمین برای دریافت توانایی‌ها و منابع خارجی از طریق ادغام و فراگیری یا اتحاد راهبردی نیز ضروری است (رفسنجانی نژاد، ۱۴۱:۱۴۰۰). علاوه بر این، در زنجیره‌های تأمین نظامی، جریان بین تأمین‌کنندگان و

مصرف‌کنندگان نهایی به دلیل نگهداری پیشگیرانه و اصلاحی تجهیزات نظامی دفاعی دوطرفه است (*Sokri, 2014:78-86*).

ماهیت اختلال و نتایج حاصل از آن در هر قسمت زنجیره تأمین باتوجه‌به نقش آن عضو در عملکرد زنجیره، می‌تواند متفاوت باشد و به همین ترتیب جهت بازیابی هر نوع اختلال لازم است راهکار مناسب آن شرایط مورداستفاده قرار گیرد (الفت و همکاران،۱۳۹۷:۸۰) در این راستا رویکرد تاب آوری زنجیره تأمین جهت مواجهه با اختلال‌ها و بهبود و بازگشت عملکرد زنجیره تأمین به حالت قبل از وقوع چالش‌ها معرفی گردیده است (ناصحی فر و لطفی،۱۳۹۹:۸۳) تاب آوری قابلیتی است که زنجیره تأمین را قادر می‌سازد تا اختلالات را مدیریت کنند. تاب آوری زنجیره تأمین یکی از اجزای جدانشدنی استراتژی‌های مدیریت ریسک کل نگر است. بهره‌مندی از تاب آوری زنجیره تأمین موجب بازگشت به وضعیت اولیه یا حتی وضعیتی مناسب‌تر و بهتر بعد از بروز اختلال می‌شود. همان‌گونه که پیداست اختلال در زنجیره تأمین تهدیدهای عمده‌ای را برای تداوم پشتیبانی از ذی‌نفعان داخلی و خارجی سازمان به وجود می‌آورد، به خصوص هنگامی‌که این اختلال شامل تأخیر متوالی و آسیب به سرمایه‌های سازمانی نیازمند تعمیرات، باشد (*Chen, et al, 2020:1-7*). اثرات تحریم بر زنجیره تأمین دفاعی ممکن است به چندین نحو تأثیرگذار باشد. این اثرات شامل کاهش دسترسی به منابع و تأسیسات، افزایش هزینه‌ها، تأثیرات منفی بر فناوری‌ها، تغییر در راهبردهای امنیتی و تأثیر بر توان تولید نظامی می‌شوند. این تحریم‌ها می‌توانند منجر به محدودیت دسترسی به منابع تولید تجهیزات نظامی، افزایش هزینه‌های زنجیره تأمین و تغییر در استراتژی‌های امنیتی یک کشور شوند. توجه به شرایط خاص هر کشور و مدت زمان تحریم‌ها مهم است، زیرا اثرات ممکن است متغیر باشند (آذرلی و آرمون،۱۳۹۸:۱۳۵). بازی دلستر در دانشگاه MIT توسعه یافت تا دانش‌آموزان و صنعت‌گران را با مفاهیم پویایی اقتصادی و پویایی زنجیره تأمین بیشتر آشنا کند (*Jalali, et al, 2019:66-82*)؛ در این بازی مشخص شده است که از هر چهار گروه مدیریتی یک گروه در زنجیره تأمین، مخاطره قطعی در الگوی سفارش و سطوح موجودی ایجاد می‌کند (*Adobor, 2020:443-463*). این امر در عمل به وقوع بی‌نظمی در زنجیره تأمین را نشان داده است.

اکثر سیستم‌های عملی، به‌طور ذاتی، غیرخطی می‌باشند؛ بنابراین، با خطی سازی نامعینی‌های سیستم ممکن است خطاهای مدل‌سازی به وجود آید؛ بنابراین به منظور بهبود عملکرد و افزایش ایمنی

این‌گونه سیستم‌ها، باید از روش‌های کنترل مقاوم استفاده گردد (*Hashim & Hammoudi, 2021:363-378*) با توجه به این واقعیت که روش کنترل حالت لغزشی، یک روش کنترل غیرخطی و به‌طور ذاتی مقاوم است (*Li, Pei, Ma, Ren, & Huang, 2021:40-51*)؛ روش حالت لغزشی برای سیستم‌هایی که در معرض اختلالات و نامعینی‌ها می‌باشند، روش کنترلی مناسب و مؤثری به نظر می‌رسد (*Gambhire, Kishore, Londhe, & Pawar, 2021:1-18*). در این روش، حالت‌های سیستم توسط یک قانون کنترل سوئیچینگ از پیش تعریف‌شده، تحریک می‌شوند و به سمت یک سطح به نام سطح لغزش، رانده می‌شوند و در آن محدود می‌گردند. ازجمله مزیت‌های دیگر روش حالت لغزشی، تضمین همگرایی به سطح لغزش در زمان محدود، ساده بودن الگوریتم کنترلی مرتبط با آن و درنتیجه دارا بودن بار محاسباتی آنلاین نسبتاً کم، قابلیت پیاده‌سازی با سیستم‌های غیرخطی، همچنین عملکرد گذرای خوب و پاسخ سریع (*Liang, et al, 2020:1-6*)، است.

یکی از معایب استفاده از کنترل‌کننده حالت لغزشی متداول، پدیده نامطلوب نوسانات شدید تکراری است که به دلیل ماهیت ناپیوسته تابع علامت در سیگنال ورودی کنترلی ایجاد می‌شود (*Rahimpour et al., 2024:1-11*). نوسانات شدید تکراری در مدیریت زنجیره تأمین باعث چالش‌های چندگانه می‌شوند (عسکری سپستانکی و همکاران، ۱۴۰۱: ۲). این نوسانات ممکن است منجر به عدم قطعیت در زمینه‌های تقاضا، تأمین و موجودی‌ها شوند و مشکلات برنامه‌ریزی و مدیریت منابع ایجاد کنند. افزایش هزینه‌ها ناشی از تطبیق سریع به تغییرات و تکرار فعالیت‌ها نیز احتمالاً افزایش می‌یابد. اختلالات در فرآیندهای تولید ممکن است منجر به تأخیرها، توقف تولید، و کاهش کیفیت محصولات گردد. همچنین، کاهش قابلیت اطمینان و اختلال در انتقال اطلاعات می‌تواند به تصمیم‌گیری ناقص و مشکلات امنیتی منجر شود. این نوسانات ممکن است استراتژی‌های طولانی مدت زنجیره تأمین را به چالش بکشند، لذا استفاده از فناوری‌های پیشرفته و راهبردهای انعطاف‌پذیر می‌تواند به مدیریت بهتر این چالش‌ها کمک کند (*Liu et al., 2021:1-17*). روش کنترل حالت لغزشی زمان محدود یک روش مناسب برای کنترل زمان محدود سامانه‌های غیرخطی و پرمخاطره در حضور عدم قطعیت‌های مدل و اختلالات خارجی است که در پژوهش‌های اخیر بسیار پرکاربرد بوده است. درروش کنترل حالت لغزشی معمولی منحنی مسیر حالت‌های سامانه در زمان بی‌نهایت به مبدأ

همگرا می‌شود و کنترل‌کننده در فاز رسیدن به سطح لغزش در مواجهه با عدم قطعیت‌ها مقاوم نیست. اما درروش کنترل حالت لغزشی زمان محدود به خاطر وجودترم غیرخطی سطح لغزش، منحنی مسیر حالت‌های سامانه در زمان محدود به مبدأ همگرا می‌شود و کنترل‌کننده در فاز رسیدن در مواجهه با عدم قطعیت‌ها کاملاً مقاوم است (*Xiu, et al, 2018:49793-49800*). اکنون، به بررسی دقیق تعدادی از منابع اساسی و به‌روز در زمینه مدیریت زنجیره **تأمین** آشوب‌ناک پرداخته خواهد شد.

لونگ و همکاران (۲۰۲۳)، در تحقیق خود با عنوان "استراتژی‌های پشتیبانی از تصمیم‌گیری پایدار و قوی در سیستم زنجیره تأمین چند سطحی در مواجهه با اختلالات"، به این نتیجه رسیدند که اجرای تدابیر پایدار و بهره‌گیری از استراتژی‌های تصمیم‌گیری قوی می‌تواند به‌طور مؤثری با چالش‌ها و اختلالات مواجهه کند. این پژوهش به تأکید بر اهمیت پایداری و استراتژی‌های تصمیمی در تقویت سیستم زنجیره تأمین اشاره دارد. با این حال، این تحقیق به بررسی سیستم‌های زنجیره تأمین زمان گسسته می‌پردازد و از یک رویکرد کنترلی زمان محدود به منظور حفظ پایداری این سیستم‌ها بهره نبرده است. همچنین، توجه به حضور عدم قطعیت‌ها در مدل‌ها در این تحقیق موردبررسی قرار نگرفته است (*Long et al., 2023:1-31*). حمید زاده و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیق خود با عنوان "کنترل و همگام‌سازی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با دینامیک‌های هایپرآشوبی با استفاده از کنترل حالت لغزشی تناسبی انتگرالی" به این نتیجه رسیدند که استفاده از کنترل‌کننده حالت لغزشی تناسبی انتگرالی در شبکه زنجیره تأمین پیچیده و هایپرآشوب‌ناک باعث کنترل و همگام‌سازی مؤثر این سامانه می‌شود. با این حال، در سیستم ارائه‌شده در این تحقیق عدم قطعیت‌های سامانه مدل‌سازی نشده است. علاوه بر این، کنترل‌کننده پیشنهادی در این تحقیق به دلیل ناپیوستگی تابع علامت دارای نوسانات شدید تکراری است که موجب می‌شود سامانه زنجیره تأمین در عمل به سمت ناپایداری برود *(Hamidzadeh et al., 2022:1-13)*. دینگ و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیق خود با عنوان "بررسی پویایی، تحقق مدار الکترونیکی و شبیه‌سازی یک سیستم زنجیره تأمین سه‌طبقه آشفته مرتبه کسری" به این نتیجه دست یافتند که بررسی دینامیکی سیستم زنجیره تأمین آشوب‌ناک با سه سطح، بر پایه معادلات مرتبه کسری، توانایی چشمگیری در تغییر رفتار سیستم را ارائه می‌دهد. در این تحقیق، به مدل‌سازی، بررسی پویایی و شبیه‌سازی یک سامانه زنجیره تأمین سه‌طبقه پرداخته شده است. با این

حال، متأسفانه هیچ رویکرد کنترلی برای همگام‌سازی این سیستم در این تحقیق ارائه نشده است (*Ding et al., 2022:1-15*).

ژو و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیق "مدیریت و بهینه‌سازی سیستم زنجیره تأمین آشفته با استفاده از الگوریتم کنترل حالت لغزشی تطبیقی" به این نتیجه رسیدند که استفاده از کنترل‌کننده حالت لغزشی تطبیقی به‌طور قابل‌توجهی می‌تواند اثر شلاق چرمی و اختلالات در سیستم زنجیره تأمین آشفته را کاهش داده و مدیریت بهینه‌تری را فراهم آورد. این کنترل‌کننده حالت لغزشی تطبیقی بهبود قابل‌توجهی در کاهش اثرات نوسانات سامانه داشته است. با این وجود، طراحی کنترل‌کننده هنوز موفق به حذف کامل نوسانات سیستم نشده و عملکرد آن به صورت زمان محدود نیست (*Xu et al., 2021: 2571-2587*). وانگ و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیق "کنترل یک سیستم زنجیره تأمین آشفته متقارن با استفاده از تکنیک جدید حالت لغزشی فوق پیچان با زمان ثابت باتوجه‌به محدودیت‌های ورودی کنترل" به این نتیجه رسیدند که اجرای تکنیک کنترل حالت لغزشی جدید با زمان ثابت و شبیه‌سازی حالت فوق‌پیچان، در مقابل محدودیت‌های ورودی کنترلی، به کنترل مؤثر و پایدار سیستم زنجیره تأمین آشوب‌ناک ناهمگن منجر می‌شود. در این تحقیق، مسائل عدم بهینه بودن پاسخ‌های سیستم و ناکافی بودن اثبات زمان محدود بودن کنترل‌کننده موردبررسی قرارگرفته و یک کنترل‌کننده تطبیقی با بهره‌های ساده به منظور شناسایی و حذف اغتشاشات خارجی توصیه شده است (*Wang et al., 2021:1-15*). شی و همکاران (۲۰۲۲)، در پژوهش خود با عنوان "کنترل ردیابی زمان ثابت تصادفی برای شبکه‌های زنجیره تأمین مبتنی بر چند عامل آشوب‌زده با ارتباطات غیرخطی" به این نتیجه رسیدند که با استفاده از نظریه پایداری معادلات دیفرانسیل تصادفی، شرایط کافی برای اجماع زمان ثابت و تخمین کران بالایی زمان همگرایی به دست می‌آید. این پژوهش بر روی سیستم‌های زنجیره تأمین زمان گسسته تمرکز دارد و کنترل‌کننده پیشنهادی در مقابل نامعینی‌ها و اغتشاشات خارجی مؤثر نبوده و نتوانسته‌اند پدیده نامطلوب نوسانات شدید تکراری را حذف کنند (*Shi et al., 2022:1-14*).

بر این اساس، یکی از اهداف و نوآوری‌های این پژوهش آن است که با فرض اینکه کران‌های بالای ترم عدم قطعیت، اختلالات ناشناخته و مشتقات اول آن‌ها نامعلوم و نامشخص باشند، یک

استراتژی کنترل حالت لغزشیِ زمان – محدود بدون نوسانات شدید تکراری برای کلاس کاملی از سیستم‌های سامانه زنجیره تأمین دفاعی ارائه شود. برای این منظور جهت غلبه بر مشکل ناشی از کران‌های بالای عدم قطعیت و اختلالات نامعلوم، روش کنترل حالت لغزشی فرا پیچشی با تکنیک کنترل تطبیقی ترکیب‌شده و استراتژی جدیدی تحت عنوان " کنترل حالت لغزشی فرا پیچشی مرتبه بالا تطبیقی با سطح لغزش سراسری غیرخطی" ارائه شده است.

روش تجزیه‌وتحلیل داده‌های تحقیق و روش اعتبارسنجی داده‌های گردآوری‌شده

باتوجه‌به اینکه این پژوهش در حیطه مطالعات آماری قرار نمی‌گیرد و در عوض به ارائه مدل ریاضی می‌پردازد، ضرورت دارد تا اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های نزدیک به‌واقع بررسی شود. به علاوه این مدل در نرم‌افزار جامع «متلب»[1]کد نویسی شده و خروجی مدل از منظر صحت‌سنجی و اعتبارسنجی موردی بررسی قرار گرفت.

مدل‌سازی دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تأمین دفاعی پرمخاطره

این پژوهش، «مدل‌سازی غیرخطی پیچیده یک زنجیره تأمین دفاعی پرمخاطره سه‌طبقه»[2] را برای نشان دادن پویایی واقعی در نظر می‌گیرید. یک مدل سه سطحی (شکل ۱) برای توصیف یک سناریوی ساده در یک زنجیره تأمین دفاعی بسیار پیچیده در نظر گرفته شده است. مدل‌های زنجیره تأمین غیرخطی در ادبیات (*Giacomo, et al, 2006:503-534*) عمدتاً بر روی وظایف خاص تمرکز می‌کنند و بنابراین به یک رویکرد «معامله محور»[3] تبدیل می‌شوند. در این تحقیق، عمدتاً بر ساخت یک مدل زنجیره تأمین دفاعی غیرخطی تمرکز می‌شود که می‌تواند پیچیدگی بیشتری را در پوشش اعوجاج اطلاعات، رضایت از سفارش خرده‌فروش و موجودی ایمنی نشان دهد. یک معیار اضافی، حساسیت شدید مدل به عدم قطعیت‌ها و شرایط اولیه است. نمادهای زیر برای تسهیل توصیف مدل معرفی‌شده‌اند:

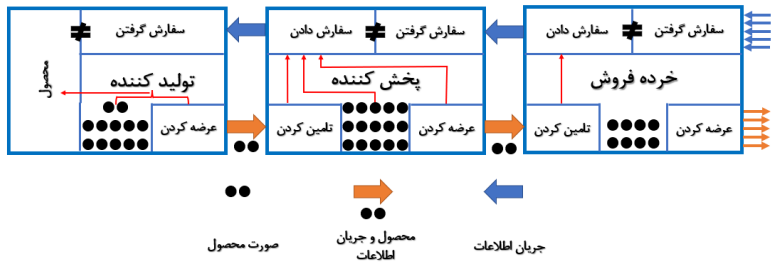
---

1 Matlab
2 Three-echelon chaotic defense supply chain
3 Transaction-Oriented

جدول ۱: نمادهای مورداستفاده در مدل سیستم مدیریت زنجیره تأمین پرمخاطره

نماد	توضیحات
i	بازه زمانی
m	میزان رضایت از تقاضای مشتری در خرده‌فروش
r	نرخ تحریف اطلاعات محصولات موردتقاضا توسط خرده‌فروش
k	ضریب ذخیره ایمنی در سازنده
x_i	مقدار تقاضای خرده‌فروشان در حال حاضر
y_i	مقداری که توزیع‌کنندگان می‌توانند در حال حاضر عرضه کنند.
z_i	مقدار تولیدشده در حال حاضر به سفارش بستگی دارد.

ممکن است سفارش‌هایی که می‌دهند با سفارش‌هایی که دریافت می‌کنند برابر نباشد. مقدار سفارش نه‌تنها به مقدار موجودی شما بستگی دارد، بلکه به مقداری که می‌خواهید عرضه کنید نیز بستگی دارد. مقدار سفارش در خرده‌فروش بستگی به نسبت m دارد که در آن تقاضا طی سفارش قبلی برآورده می‌شود. توزیع‌کننده باید ازجمله موارد دیگر، میزان تحریف اطلاعات r را که می‌تواند در سفارش‌های دریافتی رخ دهد، در نظر بگیرد. تولیدکننده باید به ذخیره ایمنی k توجه داشته باشد تا از تولید دسته‌های کوچک جلوگیری کند. این سناریوها یا پدیده‌ها در شکل ۱ توضیح داده شده‌اند. توضیحی عمیق در ادامه ارائه‌شده و یک مدل ریاضی مربوطه برای تجزیه و تحلیل دینامیک شبکه زنجیره تأمین نشات گرفته شده است.



شکل ۱: طرح‌واره مدل زنجیره تأمین سه لایه‌ای

در این مقاله فرض بر این است که اطلاعات تقاضا در لایه‌های زنجیره تأمین با تأخیر یک واحد زمان منتقل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ نشان‌داده‌شده است، مقدار سفارش در هیچ سطحی با مقدار سفارش درخواستی یکسان نیست. مقدار سفارش در دوره زمانی جاری در خرده‌فروش به صورت خطی با توزیع‌کننده همراه است و تحت تأثیر میزان برآورده شدن تقاضا در دوره قبلی است. این پدیده را می‌توان به فرم معادله زیر مدل کرد.

$$x_i = m(y_{i-1} - x_{i-1}). \quad (۱)$$

در اینجا m نسبتی است که در آن تقاضا ارضا می‌شود. وابستگی یا جفت بین توزیع‌کننده، تولیدکننده و خرده‌فروش شکل ۱ خطی نیست. درواقع توزیع‌کننده باید قبل از سفارش خود، اثر ترکیبی خرده‌فروش و تولیدکننده را در نظر بگیرد، یعنی جفت درجه دوم. جدای از این، توزیع‌کننده همچنین باید در نظر داشته باشد که اطلاعات سفارش دریافتی از خرده‌فروش ممکن است تحریف‌شده باشد. این سناریو با معادله زیر مدل شده است.

$$y_i = x_{i-1}(r - z_{i-1}). \quad (۲)$$

در اینجا r ضریب تحریف اطلاعات است. مقدار تولید از واحد تولیدکننده معمولاً به سفارش‌ها توزیع‌کننده و موجودی ایمنی بستگی دارد. بااین‌حال، سفارش‌های توزیع‌کننده دوباره به سفارش‌های خرده‌فروش بستگی دارد، یعنی تولیدکننده باید قبل از تصمیم‌گیری در مورد تولید، اثر ترکیبی خرده‌فروش و توزیع‌کننده را در نظر بگیرد. این سناریو با معادله زیر مدل شده است.

$$z_i = x_{i-1}y_{i-1} + kz_{i-1}. \quad (۳)$$

معادلات (۱) تا (۳) به ترتیب مقدار تقاضا شده توسط مشتریان، سطح موجودی توزیع‌کنندگان و مقدار تولیدشده توسط تولیدکنندگان را نشان می‌دهد که در آن:

$x_i < 0$ نشان می‌دهد که عرضه کمتر از تقاضای مشتری در دوره قبل است،

$y_i < 0$ نشان می‌دهد که اطلاعات به‌شدت تحریف‌شده است و نیازی به تعدیل در سطح موجودی نیست،

$z_i < 0$ مواردی از موجودی بیش از حد یا بازگشت و درنتیجه عدم تولید جدید را نشان می‌دهد.

معادلات (۱) تا (۳) مدل‌های گسسته‌ای هستند که دینامیک شبکه زنجیره تأمین را در شکل ۵ توصیف می‌کنند. با درنظرگرفتن فواصل زمانی بسیار کوچک، مدل پیوسته‌ای را می‌توان از معادلات (۱) تا (۳) به شرح زیر به دست آورد.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= my - (m+1)x \\ \dot{y} &= rx - y - xz, \\ \dot{z} &= xy + (k-1)z\end{aligned} \qquad (۴)$$

اگر شرایط $\sigma = m + 1$ و $b = 1 - k$ برآورده شوند، رابطه (۵) به مدل لورنز در رابطه زیر منتهی می‌شود.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sigma(y - x), \\ \dot{y} &= rx - y - xz, \\ \dot{z} &= xy - bz.\end{aligned} \qquad (۵)$$

از نظریه سیستم‌های دینامیکی می‌توان ثابت کرد که این مدل بسته به مقادیر پارامتر، طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های غیرخطی را تولید می‌کند. این مدل به ویژه هنگام برخورد با مدل‌سازی سناریوها یا پدیده‌هایی که به شرایط اولیه و همچنین عدم قطعیت‌ها بسیار حساس هستند، موردتوجه است. در مورد عدم قطعیت‌های سامانه مدیریت زنجیره تأمین، وقتی در یک‌لایه اضافه می‌شوند، به‌طور مؤثر هم در بالادست و هم پایین‌دست منتشر می‌شوند. این یک دینامیک رایج است که توسط شبکه‌های زنجیره تأمین واقعی نشان داده می‌شود. مدل مشابهی همانند مدل دینامیکی (۵) نیز توسط لی و همکاران در (*Lei, et al, 2006:557-560*) برای نشان دادن پویایی زنجیره تأمین و کاهش اثر شلاق چرمی ارائه‌شده است. در این تحقیق، عدم قطعیت‌های خارجی ناشی از اختلالات خارجی در نظر گرفته می‌شود. این آشفتگی‌ها می‌تواند به دلیل پویایی بازار و نوسانات رخ دهد. علاوه براین، اختلالات خارجی نیز به صورت ترم غیرخطی در نظر گرفته می‌شود زیرا رفتار بازار ماهیت غیرخطی دارد. با فرض اینکه اختلالات می‌توانند هر یک از سه سطح شبکه زنجیره تأمین را تحت تأثیر قرار دهند، فرم آشفته معادله (۵) به صورت رابطه زیر پیشنهادشده است.

$$\begin{aligned}\dot{x}' &= \sigma(y' - x') + d_1, \\ \dot{y}' &= rx' - y' - x'z' + d_2, \\ \dot{z}' &= x'y' - bz' + d_3.\end{aligned} \qquad (۶)$$

که در آن $d_i,\ (i = 1,2,3)$ اختلالات خارجی را نشان می‌دهد.

فرمول‌بندی مسئله در حضور نامعینی‌های مدل و اختلالات خارجی

برای مدیریت و بهینه‌سازی سامانه زنجیره تأمین چند لایه آشفته، کنترل‌کننده فعال ϑ در هر سطح معرفی می‌شود تا زنجیره‌های تأمین حلقه بسته را تشکیل دهد. درواقع، اختلالات بازار می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی هم تقاضای مصرف‌کننده و هم شبکه تأمین کلی را مختل کند. برای کاربردهای عملی‌تر، اثرات اختلالات خارجی نیز در نظر گرفته می‌شود. سپس سامانه زنجیره تأمین پرمخاطره داده‌شده در رابطه (۷) به شکل فشرده در حضور اختلالات خارجی به فرم معادله زیر بازنویسی می‌شود:

$$\dot{\mathcal{M}}(t) = (A + \Delta A)\mathcal{M}(t) + f(\mathcal{M}) + d(t) + \vartheta(t) \qquad (۷)$$

که در معادله (۷) متغیرهای حالت و ماتریس‌های سیستم به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\mathcal{M} = [x \quad y \quad z]^T, \qquad d = [d_1 \quad d_2 \quad d_3]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -(n+1) & m & 0 \\ r & -1 & 0 \\ 0 & 0 & k-1 \end{bmatrix} \qquad A = \begin{bmatrix} -(n+1) & m & 0 \\ r & -1 & 0 \\ 0 & 0 & k-1 \end{bmatrix} \qquad (۸)$$

$$f(\mathcal{M}) = [0 \quad -x(t)z(t) \quad x(t)y(t)]^T,$$

به‌طوری‌که ماتریس $A, \Delta A \in \mathbb{R}^{3\times3}$ نشان‌دهنده ماتریس ثابت با مقادیر اسمی و مقادیر آشفته به دلیل تغییرات پارامتر است. $\vartheta(t)$ نشان‌دهنده بردار ورودی‌های کنترلی است که باید برای ارائه اقدامات کنترلی مناسب طراحی شوند. بردار سیگنال محدود $d(t)$ معرف اختلالات خارجی است که $|d_i(t)| < \rho_i$ به‌طور که ρ_i نشان‌دهنده کران بالای $d_i(t)$ است. در شبکه‌های زنجیره تأمین، عدم قطعیت‌های مختلف ناشی از نوسان تقاضا، نوسان موجودی و سطح کمبود به دلیل نوسانات بازار، انحراف پیش‌بینی و برخی بلایای غیرمنتظره است. علاوه بر این، بردار تابع $f(\mathcal{M})$ عبارت‌های غیرخطی را در مدل زنجیره تأمین نشان می‌دهد.

طراحی و تحلیل پایداری کنترل‌کننده حالت لغزشی زمان محدود بهبودیافته

به منظور دستیابی به کنترل حالت لغزشی (شکل ۲–الف) با سطح لغزشی غیرخطی برای سیستم دینامیکی (۷)، سطح لغزشی انتگرالی را می‌توان به صورت زیر پیشنهاد کرد:

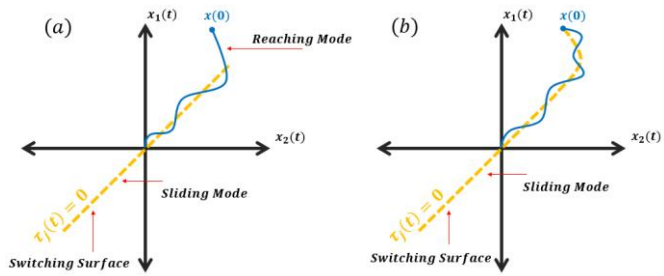
$$\tau(t) = \mathcal{M}(t) + \ell \int_0^t \mathcal{M}(\tau)\, d\tau, \qquad (۹)$$

به طوری که ℓ معرف یک ضریب مثبت است. در ادامه، سطح لغزشی سراسری (شکل ۲–ب) برای دستیابی به یک سطح لغزشی غیرخطی سراسری قوی که حالت رسیدن را حذف می‌کند و متعاقباً

منجر به وجود حالت‌های سیستم زنجیره تأمین پرمخاطره در سطح لغزش از همان لحظات اولیه می‌شود، به صورت معادله زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\delta(t) = \gamma(\tau(t) - \tau(0)\exp(-\alpha t)) \quad (۱۰)$$

در معادله (۱۰)، γ نشان‌دهنده یک بردار سطحی ثابت و α معرف مقدار مثبت است.



شکل ۲: مفهوم کنترل حالت لغزشی: (a) کنترل حالت لغزشی معمولی. (b) کنترل حالت لغزشی سراسری.

نکته ۱: در مقایسه با سطح لغزش $\tilde{\delta}(t) = \gamma(\dot{\tau}(t) - \tau(0)\exp(-\alpha t))$ سطح لغزش سراسری معادله (۱۰) دینامیک خطا را مجبور می‌کند از نمونه‌های اولیه به سطح لغزش برسند. بر این اساس، رفتار قوی سیستم زنجیره تأمین پرمخاطره در حضور اختلالات تضمین‌شده است.

اگر $\delta(t) = 0$، از معادله (۱۰) به دست می‌آید:

$$\hat{\delta}(t) = \hat{\delta}(0)\exp(-\alpha t) \quad (۱۱)$$

مشاهده می‌شود که معادله (۱۳) حل معادله دیفرانسیل مرتبه اول زیر است.

$$\dot{\hat{\delta}}(t) + \alpha\hat{\delta}(t) = 0 \quad (۱۲)$$

هدف قانون کنترل حالت لغزشی زمان محدود پیوسته تطبیقی این است که مسیرهای حالت سیستم مدیریت زنجیره تأمین سه لایه از نمونه ابتدایی به سطح لغزش برسد و سپس به سمت نقطه تعادل حرکت کنند. با مشتق گرفتن از معادله (۱۰) نسبت به زمان، معادله زیر به دست می‌آید:

$$\dot{\delta}(t) = \gamma(\ddot{\tau}(t) + \alpha\tau(0)\exp(-\alpha t)) = \gamma\left(\dot{\mathcal{M}}(t) + \ell\mathcal{M}(t) + \alpha\tau(0)\exp(-\alpha t)\right) \quad (۱۳)$$

با درنظرگرفتن معادلات (۷) و (۱۳)، معادله زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}\dot{\delta}(t) &= \gamma\left(\dot{\mathcal{M}}(t) + \ell\mathcal{M}(t) + \tau(0)\exp(-\alpha t)\right) \\ &= \gamma(A\mathcal{M}(t) + f(\mathcal{M}) + d(t) + \vartheta(t) + \ell\mathcal{M}(t) + \alpha\tau(0)\exp(-\alpha t))\end{aligned} \quad (۱۴)$$

بر اساس معادله (۱۴)، $\dot{\delta}(t) = 0$ شرط ضروری برای ماندن حالت‌های سیستم زنجیره تأمین پرمخاطره بر روی سطح لغزش $\delta(t)$ است. بازم به ذکر است که در طراحی قانون کنترل معادل‌ترم اختلالات خارجی $d(t)$ در نظر گرفته نمی‌شود. بر این اساس قانون کنترل معادل به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\vartheta_{eq}(t) = -\left((A+\ell)\mathcal{M}(t) + f(\mathcal{M}) + \alpha\tau(0)\exp(-\alpha t)\right) \quad (۱۵)$$

بااین‌حال، اگر ترم اختلالات خارجی $d_i(t)$ در سیستم زنجیره تأمین پرمخاطره در نظر گرفته شود، هیچ تضمینی برای عملکرد کنترل رضایت‌بخش وجود ندارد. ازاین‌رو، برای حذف اثرات اختلالات ناخواسته، باید یک قانون کنترل کمکی تعریف شود. از نظر عملی، اطلاعات دقیقی در مورد کران بالای اختلالات سیستم وجود ندارد، بنابراین، مقابله با ترم اختلالات خارجی $d(t)$ آسان نیست. با این حال، فرض کنید که بی‌نظمی‌های پیش‌بینی‌نشده خارجی محدود هستند، یعنی $|d_i(t)| < \rho_i(t)$ به طوری که $\rho_i(t)$ یک ثابت مجهول مثبت است. همچنین، فرض کنید $\hat{\rho}_i(t)$ تخمینی از $\rho_i(t)$ است که با قانون تطبیقی زیر به دست می‌آید:

$$\dot{\hat{\rho}}_i(t) = \varrho\|\delta(t)\gamma^T\| \quad (۱۶)$$

به طوری که در معادله (۱۶)، ϱ معرف یک مقدار ثابت و مثبت است. در ادامه، عبارت قانون کنترل کمکی را می‌توان به صورت معادله زیر تعریف کرد:

$$\vartheta_{aux}(t) = -\left(\hat{\rho}_i(t)\ sign\ (\delta(t)\gamma^T + c\delta(t)\gamma^T)\right) \quad (۱۷)$$

در معادله (۱۷)، ترم c معرف یک مقدار ثابت مثبت است. بخش اول معادله (۱۷) یک قانون کنترل تطبیقی برای جبران ترم‌های نامعین دارای باند معلوم است و بخش دوم به ارائه یک قانون کنترل تناسبی نسبت به سطح لغزش پرداخته است که به عنوان یک‌ترم بازخورد برای افزایش پایداری سیستم و بهبود پاسخ گذرا استفاده می‌شود.

با انتگرال گرفتن از معادله (۱۶) نسبت به سطح لغزش $\delta(t)$، می‌توان یک تخمین از پارامتر ρ_i به فرم معادله زیر به دست آورد:

$$\hat{\rho}_i(t) = c\int \|\delta(t)\gamma^T\|\, dt \qquad (۱۸)$$

با قرار دادن معادله (۱۸) در معادله (۱۷)، قانون کنترل تناسبی – انتگرالی زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}\vartheta_{aux}(t) &= -\left(c\delta(t)\gamma^T + \varrho\, sign\,(\delta(t)\gamma^T)\int \|\delta(t)\gamma^T\|\, dt\right)\\ &= -sign\,(\delta(t)\gamma^T)\left(c\|\delta(t)\gamma^T\| + \varrho\int \|\delta(t)\gamma^T\|\, dt\right)\\ &= c_p\|\delta(t)\gamma^T\| + c_i\int \|\delta(t)\gamma^T\|\, dt,\end{aligned} \qquad (۱۹)$$

در رابطه (۱۹)، $c_p = -c\, sign\,(\delta(t)\gamma^T)$ و $c_i = -\varrho\, sign\,(\delta(t)\gamma^T)$ است. تعیین پارامترهای طراحی c_p و c_i به برخی موارد بستگی دارد. پارامترهای ضریب c و ϱ در معادله (۱۸) باید طوری طراحی شوند که از همگرایی حالت‌های سیستم زنجیره تأمین پرمخاطره به مبدأ اطمینان حاصل شود. عبارت $\varrho\int\|\delta(t)\gamma^T\|\, dt$ به عنوان ورودی کنترل انتگرال در نظر گرفته می‌شود که تقریبی برای اختلالات به منظور حذف خطای حالت پایدار است. با افزایش مقادیر ϱ، خطای حالت پایدار کاهش می‌یابد و قانون انطباق سریع‌تر می‌شود. به منظور بهبود پایداری سیستم و رفتار دینامیکی یک تکنیک کنترل متناسب، از عبارت $c\|\delta(t)\gamma^T\|$ استفاده می‌شود. علاوه بر این، این عبارت خطای تخمین اختلالات را حذف می‌کند. برای کاهش خطای ردیابی، مقادیر زیادی از c استفاده می‌شود. با این حال، این می‌تواند منجر به افزایش بیش از حد شود. بالعکس، کاهش مقدار c منجر به افزایش کنترل کوچک و کاهش دقت ردیابی مسیر می‌شود. قانون کنترل کامل را می‌توان از (۱۵) و (۱۹) به صورت زیر به دست آورد:

$$\begin{aligned}\vartheta(t) &= \vartheta_{eq}(t) + \vartheta_{aux}(t)\\ &= -\big((A+\ell)\mathcal{M}(t) + f(\mathcal{M}) + \alpha\tau(0)\exp(-\alpha t) + +c\delta(t)\gamma^T\\ &+ \hat{\rho}_i(t)\, sign\,(\delta(t)\gamma^T)\big).\end{aligned} \qquad (۲۰)$$

قضیه ۱. سطح لغزش سراسری غیرخطی تعریف شده در معادله (۱۱) را در نظر بگیرید و فرض کنید که اختلالات خارجی ناشناخته و محدود هستند به طوری که $\|d_i(t)\| < \rho_i(t)$ و $\rho_i(t)$ یک مقدار مثبت و ناشناخته است. فرض کنید $\hat{\rho}_i(t)$ تخمین $\rho_i(t)$ است که با قانون تطبیقی معادله (۱۶) به دست می‌آید. با اجرای رویکرد کنترل تطبیقی (۲۰)، مسیرهای سیستم زنجیره تأمین پرمخاطره معادله (۷) به سطح لغزش $\delta(t) = 0$ همگرا می‌شوند و پس‌ازآن روی آن باقی می‌مانند.

اثبات: با جاگذاری رویکرد کنترلی (۲۰) در معادله (۱۴)، رابطه زیر را می‌توان به دست آورد:

$$\dot{\delta}(t) = -\gamma(c\delta(t)\gamma^T + \hat{\rho}_i(t)\, sign\,(\delta(t)\gamma^T) - d_i(t)) \quad (۲۱)$$

برای ارزیابی ویژگی پایداری روش کنترل پیشنهادی، نظریه پایداری لیاپانوف را در نظر می‌گیریم. اجازه دهید معادله مثبت – معین زیر را به عنوان کاندید تابع لیاپانوف انتخاب کنیم:

$$L(t) = \frac{1}{2}\delta(t)^2 + \frac{1}{2}\beta\hat{\rho}_i(t)^2, \quad (۲۲)$$

در معادله (۲۲)، $\tilde{\rho}_i(t) = \hat{\rho}_i(t) - \rho_i(t)$ با مشتق گرفتن از $L(t)$ نسبت به زمان و جایگذاری روابط (۱۶) و (۲۱) در معادله (۲۲)، معادله زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}
\dot{L}(t) &= \delta(t)\dot{\delta}(t) + \beta\tilde{\rho}_i(t)\dot{\tilde{\rho}}_i(t) \\
&= \delta(t)\gamma(-c\delta(t)\gamma^T - \hat{\rho}_i\, sign\,(\delta(t)\gamma^T) + d_i(t)) \\
&+ \beta\big(\hat{\rho}_i(t) - \rho_i(t)\big)\dot{\hat{\rho}}_i(t) \\
&= \delta(t)\gamma(-c\delta(t)\gamma^T - \hat{\rho}_i(t)\, sign\,(\delta(t)\gamma^T) + d_i(t)) \\
&+ \beta\varrho\big(\hat{\rho}_i(t) - \rho_i(t)\big)\|\delta(t)\gamma^T\| \\
&\le \|\delta(t)\gamma\|\|d_i(t)\| - \hat{\rho}_i(t)\|\delta(t)\gamma\| + \beta\varrho\|\delta(t)\gamma\|\big(\hat{\rho}_i(t) - \rho_i(t)\big) \\
&+ \beta\varrho\|\delta(t)\gamma\|\rho_i - \beta\varrho\|\delta(t)\gamma\|\rho_i \\
&= -\|\delta(t)\gamma\|(\rho_i(t) - \|d_i(t)\|) \\
&- (1 - \beta\varrho)\|\delta(t)\gamma\|\big(\hat{\rho}_i(t) - \rho_i(t)\big).
\end{aligned} \quad (۲۳)$$

به طوری که $\rho_i(t) > \|d_i(t)\|$ و $\beta\varrho < 1$ است. بنابراین معادله (۲۳) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned}
\dot{L}(t) &\le -\sqrt{2}\|\gamma\|(\rho_i(t) - \|d_i(t)\|)\frac{|\delta(t)|}{\sqrt{2}} - \sqrt{\frac{2}{\beta}}(1 - \beta\varrho)\frac{\tilde{\rho}_i(t)}{\sqrt{\frac{2}{\beta}}}\|\delta(t)\gamma\| \\
&\le -\min\left\{\sqrt{2}\|\gamma\|(\rho_i(t) - \|d_i(t)\|), \sqrt{\frac{2}{\beta}}(-\beta\varrho)\|\delta(t)\gamma\|\right\} \\
&\times\left(\frac{|\delta(t)|}{\sqrt{2}} + \frac{\tilde{\rho}_i(t)}{\sqrt{\frac{2}{\beta}}}\right) = -\aleph L(t)^{\frac{1}{2}},
\end{aligned} \quad (۲۴)$$

به طوری که $\aleph = \min\left\{\sqrt{2}\|\gamma\|(\rho_i(t) - \|d_i(t)\|), \sqrt{\frac{2}{\beta}}(-\beta\varrho)\|\delta(t)^T\gamma\|\right\} > 0$.

درنهایت، با بهره‌گیری از قانون انطباق با استفاده از کنترل‌کننده تطبیقی (۲۰)، سطح لغزش سراسری غیرخطی در زمان محدود به صفر همگرا می‌شود.

شبیه‌سازی

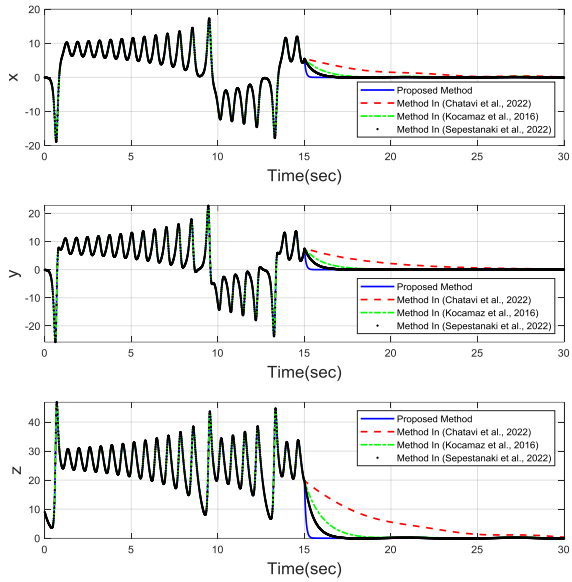
در این بخش به منظور نشان دادن بیشتر اثربخشی تکنیک کنترل طراحی‌شده برای زنجیره تأمین دفاعی پرمخاطره در حضور عدم قطعیت‌های مدل و اختلالات خارجی ناشناخته، سیستم کنترل فوق در نرم‌افزار متلب – سیمولینک شبیه‌سازی‌شده و همان‌طور که ثابت شد، سامانه زنجیره تأمین دفاعی آشوب‌ناک تحت عدم قطعیت‌های مدل و اختلالات ناشناخته به صورت معادله (۷) در نظر گرفته می‌شود.

برای این منظور پارامترهای سامانه را به صورت $(\mathrm{m}، n، r، k) = (10, 9, 28, -5.3)$ در نظر می‌گیریم. علاوه‌براین، فرض بر این است که اختلالات پارامتر در ماتریس سیستم به صورت $(m، n، r، k) = (0.2, 0.2, 0.3, 0.1)$ انتخاب می‌شوند، و اختلالات خارجی توسط $(d_1, d_2, d_3) = (sin(t), 0.1\ cos(5t), 0.3\ sin(t)))$ تحمیل می‌شوند. شرایط اولیه برای متغیرهای حالت به صورت $(x(0), y(0), z(0)) = (0, 0.11, -9)$ انتخاب‌شده است. علاوه بر این، مقادیر پارامترهای کنترلی که توسط الگوریتم بهینه‌سازی معادله (۴۱) به‌دست‌آمده است عبارت‌اند از:

$$\ell = 38.12, \gamma = [1.01, 1.23, 1.67], \alpha = 14.35, \varrho = 2.31, \mu_0 = 0.83, c = 4.42 \quad (۲۵)$$

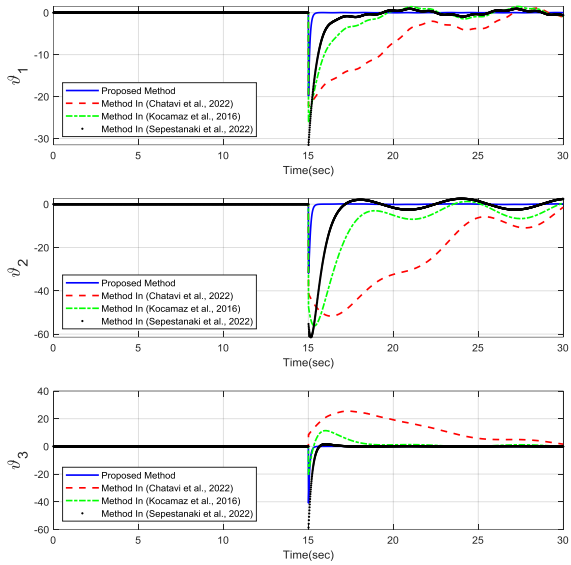
لازم به یادآوری است که بزرگی متغیرهای حالت $(x، y، z)$ به تدریج از x به z افزایش می‌یابد و این رفتار به اصطلاح به عنوان اثر شلاق چرمی در زنجیره تأمین توصیف می‌شود. طول اجرا برای هر شبیه‌سازی عددی به عنوان ۳۰ دوره زمانی انتخاب می‌شود. به منظور نشان دادن بیشتر کارایی و اثربخشی روش ارائه‌شده، روش ارائه‌شده در این تحقیق را با روش کنترل‌کننده بازخورد حالت غیرخطی مبتنی بر LMI قوی H_∞ در (*Chatavi, et al, 2022:1-19*)، روش استفاده هوشمند در (*Kocamaz, et al, 2016:476-487*) و همچنین روش حالت لغزشی ترمینال بدون نوسانات شدید تکراری بر اساس تابع مانع تطبیقی در (*Sepestanaki, et al, 2022:103469-102384*) از نظر سرعت همگرایی، اورشوت و آندرشوت، و همچنین حذف پدیده نامطلوب نوسانات شدید تکراری مقایسه می‌کنیم. لازم به ذکر است که سیگنال‌های کنترلی پس از ۱۵ ثانیه به سیستم مدیریت زنجیره تأمین پرمخاطره دفاعی آشفته اعمال‌شده است. شکل ۳ وضعیت سیستم مدیریت زنجیره تأمین پرمخاطره دفاعی را در حضور عدم قطعیت‌های مدل و اختلالات خارجی نشان می‌دهد. به‌وضوح

مشاهده می‌شود که نرخ همگرایی روش پیشنهادی به‌طور قابل‌توجهی بهتر از روش‌های دیگر است که نشان‌دهنده کارایی روش کنترل پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های ارائه‌شده است.



شکل ۳: رفتار مسیرهای حالت سیستم مدیریت زنجیره تأمین دفاعی پرمخاطره تحت سیستم کنترلی.

با توجه به نمودار ۳، واضح است که کنترل‌کننده پیشنهادی نقش به سزایی در همگام‌سازی بهینه هر سطح از زنجیره تأمین دفاعی بازی می‌کند. این کنترل‌کننده در کوتاه‌ترین زمان ممکن، بهترین اجرای خود را ارائه داده و به خوبی موفق به مقابله اختلالات و عدم قطعیت‌های مدل شده است. شکل ۴ سیگنال‌های کنترل را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۴ مشاهده می‌شود که روش ارائه‌شده کمترین تلاش کنترلی را نسبت به سایر روش‌ها دارد و همچنین کنترل‌کننده پیشنهادی در حین پایداری نوسانات کمتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. علاوه بر این، سیگنال‌های کنترلی روش ارائه‌شده دارای نوسانات کمتری بوده و پیوسته و روان هستند. بر این اساس، تثبیت دقیق مسیرهای وضعیت سیستم مدیریت زنجیره تأمین دفاعی پرمخاطره در حضور عدم قطعیت‌های مدل و اختلالات خارجی بلافاصله با فعال شدن کنترل‌کننده ارائه‌شده انجام می‌شود. این نشان می‌دهد که اجرای یک طراحی مدیریت ایمن با سیستم مدیریت زنجیره تأمین دفاعی پرمخاطره تحت عدم قطعیت‌های مدل و اختلالات بازار امکان‌پذیر است.



شکل ۴: سیگنال‌های ورودی کنترل.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که با پیاده‌سازی کنترل‌کننده پیشنهادی در هر سطح از زنجیره تأمین دفاعی، امکان دستیابی به یک رویکرد مدیریتی بهینه و کارآمد وجود دارد. این رویکرد می‌تواند در کمترین زمان ممکن تصمیمات بهینه‌ای را اتخاذ کرده و سطوح مختلف زنجیره تأمین دفاعی را در مقابل پدیده‌های نامطلوب، همچون شلاق چرمی، و اختلالات و نامعینی‌ها حفظ نماید. این اقدامات، به تضمین مقاومت و پایداری سیستم در مواجهه با چالش‌ها و تغییرات متغیر محیطی، اساسی است. بنابراین، اجرای کنترل‌کننده پیشنهادی به عنوان یک استراتژی مدیریتی مؤثر، می‌تواند به بهبود عملکرد و کاهش اثرات منفی در زنجیره تأمین دفاعی منجر گردد. این گسترش مفهومی نشان‌دهنده اهمیت این راهکار در بهبود کارایی و انعطاف‌پذیری سیستم‌های زنجیره تأمین دفاعی است.

خلاصه‌ای از مصاحبه با خبرگان

با توجه به نظرات ارائه‌شده توسط افراد مصاحبه شونده، کاهش تأثیرات منفی شلاق چرمی و بهبود مدیریت تقاضا در زنجیره تأمین دفاعی نیازمند اقدامات گسترده‌ای است. علاوه بر تنوع در

تأمین‌کنندگان و تحقیق و توسعه، مواردی چون مدیریت موجودی، امنیت سایبری، تعهد به استانداردهای اخلاقی، برنامه‌ریزی برای مواجهه با تغییرات و همکاری و اشتراک‌گذاری اطلاعات نیز از اهمیت بالایی برخوردارند. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیبی از مدیریت فناوری اطلاعات، استفاده از فناوری‌های نوین، مدیریت بهینه زنجیره ارزش، سیستم‌های رصدی و آینده‌نگر، توسعه نیروی انسانی ماهر، آموزش و انگیزه، استفاده از زیرساخت‌های امن و پایدار، و ارتقا فرهنگ مصرف‌کنندگان، اقدامات کلیدی برای افزایش اثربخشی در مدیریت زنجیره تأمین دفاعی می‌باشند. علاوه بر این، بر اساس نظرات افراد مصاحبه شونده، برای استقرار کنترل‌کننده حالت لغزشی و مدیریت نوسانات در زنجیره تأمین دفاعی، اقداماتی ازجمله توسعه هماهنگی بین عناصر زنجیره تأمین، ارتقا ارتباطات، فرهنگ کار گروهی، پرهیز از بخش نگری، بازدارندگی از آینده‌نگری، آگاهی سازی و فرهنگ‌سازی، مدیریت تعاملات داخل و خارج زنجیره، بهبود تاب آوری، مقاومت اجزا، استانداردسازی کنترل‌کننده، گرفتن فیدبک و بازخورد، تشریح الگوریتم‌ها، و استفاده از داده‌های صحیح، اقدامات اساسی و ضروری می‌باشند. این نتایج نشان می‌دهد که ایجاد یک سیستم مدیریتی جامع و هوشمند با توجه به این عوامل، می‌تواند به بهبود عملکرد و کاهش نوسانات مخرب در زنجیره تأمین دفاعی منجر شود. همچنین، مشکلات و چالش‌های مرتبط با پیاده‌سازی کنترل‌کننده حالت لغزشی به منظور مدیریت بهینه نوسانات در زنجیره تأمین دفاعی که به ترتیب نیاز به توجه بیشتری دارند، عبارت‌اند از: اولاً، اهمیت داده‌های دقیق برای حفظ آمادگی و اتخاذ تصمیمات کلان در زمینه مدیریت زنجیره تأمین دفاعی بیان‌شده است. دوم این‌که پیچیدگی در طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم کنترل حالت لغزشی به عنوان یک چالش مهم در مدل‌سازی سیستم و کنترل زنجیره تأمین آورده شده است. سوم این‌که هزینه‌های زیاد آموزش و تأمین تجهیزات نیز به عنوان یک موانع اساسی موردتوجه قرارگرفته است که ازجمله عدم آگاهی و مهارت مدیران، نداشتن نگاه راهبردی، و راضی بودن به وضع موجود در مسیر استقرار کنترل‌کننده در زنجیره تأمین دفاعی مطرح‌شده است. این عوامل نشان‌دهنده نقاط ضعف و چالش‌هایی هستند که در پیاده‌سازی مؤثر و کارآمد کنترل‌کننده حالت لغزشی در زنجیره تأمین دفاعی باید به آن‌ها توجه شود. درنهایت، بر اساس نظرات افراد مصاحبه شونده، نتایج و پیامدهای مثبت استقرار کنترل‌کننده حالت لغزشی به منظور مدیریت نوسانات در زنجیره تأمین دفاعی عبارت‌اند از افزایش عملکرد و کارایی سیستم، بهبود سرعت و کیفیت اجرا، افزایش رضایت مشتری و صرفه‌جویی در

منابع، حداکثر سازی بازده، مدیریت منابع محدود، بالابردن حس رضایت و کیفیت اجرا، شفافیت و جلوگیری از نفوذ، تسریع در جریان‌های کالا و مالی، و استقرار کلان داده و امنیت. این نتایج نشان می‌دهند که اجرای موفق کنترل‌کننده حالت لغزشی در زنجیره تأمین دفاعی می‌تواند بهبودهای چشمگیری در اداره و عملکرد سیستم به دنبال داشته باشد و به مواردی ازجمله صرفه‌جویی در هزینه‌ها و افزایش رضایت مشتری منجر شود.

نتیجه‌گیری:

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از اثبات‌ها و شبیه‌سازی‌ها و همچنین مصاحبه با خبرگان حوزه مدیریت زنجیره تأمین دفاعی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از «الگوریتم حالت لغزشی» در سامانه مدیریت زنجیره تأمین دفاعی، به مجموعه‌ای از پیامدهای مثبت مانند: بهبود عملکرد سیستم با توانایی تشخیص نیازها و بهره‌برداری بهینه از منابع، کاهش هزینه‌ها از طریق بهبود فرایندها و کاهش اضافه‌کاری، افزایش سرعت و کارایی با تشخیص سریع تغییرات و افزایش کارایی سیستم، بهبود کیفیت خدمات با تشخیص بهتر نیازها و ارائه خدمات بهتر و متناسب با نیازهای کاربران، افزایش اعتماد به سیستم با اجرای بهینه فرایندها، افزایش پایداری و انعطاف‌پذیری در مواجهه با تغییرات، کاهش خطاها و پدیده نوسانات شدید تکراری، پیش‌بینی بهتر تقاضا و مدیریت موجودی بهینه و تضمین پایداری و امنیت در مقابل تغییرات نوسانی و حملات مختلف منجر می‌شود. با این وجود، استفاده از این الگوریتم نیز همراه با نقاط ضعفی است. این نقاط شامل: پیچیدگی در طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم به دلیل پیچیدگی خود، نیاز به داده‌های دقیق برای عملکرد بهینه، حساسیت به نویز و نوسانات شدید، هزینه‌های بالای آموزش و تجهیزات موردنیاز برای پیاده‌سازی و آموزش می‌باشند؛ بنابراین، قبل از استفاده از این الگوریتم، بررسی دقیقی از ملزومات، شرایط سیستم و تجارب مشابه در زمینه‌های مختلف، ضروری است. درنتیجه، تکنیک «کنترل حالت لغزشی فرا پیچشی تطبیقی» با موفقیت در یک سامانه مدیریت زنجیره تأمین دفاعی پرمخاطره چند لایه، تحت عدم قطعیت‌های مدل و اختلالات اعمال‌شده است. طرح پیشنهادی پژوهش انجام‌شده، ضمن مدیریت مؤثر سامانه زنجیره تأمین دفاعی در یک‌زمان محدود و تثبیت رفتار نامتعارف در مراحل تقاضا، تأمین، توزیع و مصرف ملزومات نیروهای مسلح، کمک می‌کند که این سامانه به شیوه‌ای پایدار و قابل‌پیش‌بینی (فرا

کنشی) عمل نموده و مانع از غافلگیری در عملکردها خواهد شد. نتایج تحلیل نشان‌دهنده اثربخشی طرح ارائه‌شده، در برخورد با عدم قطعیت‌های مدل و انواع اختلالات است که منجر به تحقق اهداف زنجیره تأمین دفاعی و پشتیبانی مؤثر و مداوم از نیروهای مسلح و بخش دفاع در کشور خواهد شد. با توجه به دلایل اشاره‌شده می‌توان این قابلیت را به عنوان رویکردی کنترلی برای سیستم‌های مدیریت زنجیره تأمین دفاعی پرمخاطره، مطرح نمود.

پیشنهادها:

- ابتدا طی پژوهشی عدم قطعیت‌های موجود در زنجیره تأمین دفاعی با دقت تجزیه‌وتحلیل شود این تحلیل باید همه مراحل زنجیره از تأمین مواد اولیه تا توزیع محصولات نهایی و بازیافت را در نظر بگیرد.
- در پژوهش‌های آتی شرایط و الزامات به‌کارگیری فناوری‌های اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی و بلاک چین برای افزایش شفافیت و کارایی در فرآیندها و جریان‌های سامانه زنجیره تأمین دفاعی در کنار تکنیک مطرح‌شده در این تحقیق، بررسی و شناسایی شوند.

منابع:

آذرلی، آرمان و آرمون، آرش، (۱۳۹۸)، **مقایسه تأثیرات تحریم بر صنعت دفاعی با بخش اقتصادی و شناسایی راهبردهای موفقیت ساز صنعت دفاع**، فصلنامه مطالعات دفاعی استراتژیک – سال هفدهم، شماره ۷۵.

الفت، لعیا، امیری، مقصود، تیموری، ابراهیم و قاسم‌زاده گِوَری، فاطمه، (۱۳۹۷)، **مدیریت بلادرنگ اختلالات چندگانه در زنجیره تأمین چند سطحی با رویکرد برنامه‌ریزی بازیابی**، فصلنامه علمی – پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی – سال شانزدهم، شماره ۵۰.

جعفرنژاد، احمد، اعتضادی، سهیلا و خلیلی، صابر، (۱۳۹۶)، مدیریت ریسک در زنجیره تأمین، مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول، ۱۳۹۶.

رفسنجانی نژاد، سیما، (۱۴۰۰)، **بازطراحی نظام حکمرانی و سیاست‌گذاری در عصر انقلاب چهارم صنعتی**، تهران: مرکز بررسی‌های استراتژیک ریاست جمهوری، تابستان ۱۴۰۰.

عسکری سپستانکی, محمدرضا, هادی برحق طلب, مجتبی, جلیلوند, ابوالفضل و مبین, صالح. (۱۴۰۱)، **کنترل حالت لغزشی مبتنی بر تابع مانع پیوسته برای سیستم‌های آشوب‌ناک با حضور عدم قطعیت‌های مدل و اغتشاشات خارجی نامعلوم**، ششمین کنفرانس ملی مهندسی برق و سیستم‌های هوشمند، خرداد ۱۴۰۱.

ناصحی‌فر، وحید، لطفی، حامد، (۱۳۹۹)، **طراحی الگوی تاب آوری زنجیره تأمین در صنعت خرده فروشی**، فصلنامه علمی رهیافتی در مدیریت بازرگانی – دوره ۱، شماره ۴.

Adobor, H. (2020). Supply chain resilience: an adaptive cycle approach. The International Journal of Logistics Management, 31(3), 443-463.

Bai, B., Gao, J., & Lv, Y. (2021). Linking marketing and supply chain management in the strategy of demand chains via a review of literature. Management Research Review, 44(9), 1263-1276.

Chatavi, M., Vu, M. T., Mobayen, S., & Fekih, A. (2022). H∞ Robust LMI-Based Nonlinear State Feedback Controller of Uncertain Nonlinear Systems with External Disturbances. Mathematics, 10(19), 3518.

Chen, L., Dui, H., & Zhang, C. (2020). A resilience measure for supply chain systems considering the interruption with the cyber-physical systems. Reliability engineering & system safety, 199, 106869.

Ding, Q., Abba, O. A., Jahanshahi, H., Alassafi, M. O., & Huang, W.-H. (2022). Dynamical investigation, electronic circuit realization and emulation of a fractional-order chaotic three-echelon supply chain system. Mathematics, 10(4), 625.

Gambhire, S., Kishore, D. R., Londhe, P., & Pawar, S. (2021). Review of sliding mode based control techniques for control system applications. International Journal of Dynamics and Control, 9, 363-378.

Giacomo, L. D., & Patrizi, G. (2006). Dynamic nonlinear modelization of operational supply chain systems. Journal of Global Optimization, 34, 503-534.

Hamidzadeh, S. M., Rezaei, M., & Ranjbar-Buorani, M. (2022). Control and Synchronization of The Hyperchaotic Closedloop Supply Chain Network by PI Sliding Mode Control. IJIEPR, 33(4), 1-13.

Hashim, S. A. A.-S., & Hammoudi, A. K. (2021). Design and Characterization of Second Order Sliding Mode Controller for Pendulum System. Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences, 24(1), 40-51.

Jalali, M. S., Siegel, M., & Madnick, S. (2019). Decision-making and biases in cybersecurity capability development: Evidence from a simulation game experiment. The Journal of Strategic Information Systems, 28(1), 66-82.

Karimi Zarchi, M., Mabodi, H., Fathi, M. R., & Khosravi, A. (2020). Providing Resilient Defense Supply Chain Model Using Structural-Interpretative Modeling. Journal of Management Improvement, 14(2), 67-91.

Kocamaz, U. E., Taşkın, H., Uyaroğlu, Y., & Göksu, A. (2016). Control and synchronization of chaotic supply chains using intelligent approaches. Computers & Industrial Engineering, 102, 476-487.

Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (2015). The bullwhip effect in supply chains. IEEE Engineering Management Review, 43(2), 108-117.

Lei, Z., Li, Y.-j., & Xu, Y.-q. (2006). Chaos synchronization of bullwhip effect in a supply chain. Paper presented at the 2006 international conference on management science and engineering.

Li, Y., Pei, P., Ma, Z., Ren, P., & Huang, H. (2021). Method for system parameter identification and controller parameter tuning for super-twisting sliding mode control in proton exchange membrane fuel cell system. Energy Conversion and Management, 243, 114370.

Liang, Y., Zhang, W.-h., Lu, Y., & Wang, Z.-S. (2020). Optimal control and Simulation for enterprise financial risk in Industry environment. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 1-6.

Liu, Z., Jahanshahi, H., Volos, C., Bekiros, S., He, S., Alassafi, M. O., & Ahmad, A. M. (2021). Distributed consensus tracking control of chaotic multi-agent supply chain network: A new fault-tolerant, finite-time, and chatter-free approach. Entropy, 24(1), 33.

Long, L. N. B., Cuong, T. N., Kim, H.-S., & You, S.-S. (2023). Sustainability and robust decision-support strategy for multi-echelon supply chain system against disruptions. International Journal of Logistics Research and Applications, 1-31.

Lu, K., Liao, H., & Zavadskas, E. K. (2021). An overview of fuzzy techniques in supply chain management: Bibliometrics,

methodologies, applications and future directions. Technological and Economic Development of Economy, 27(2), 402-458.

Rahimi, A., Raad, A., Alem Tabriz, A., & Motameni, A. (2020). Providing a Lean Supply Chain Model for Iran's Defense Industries Using Interpretative Structural Modeling Approach. Industrial Management Studies, 18(56), 1-49.

Rahimpour, R., Sepestanaki, M. A., Mobayen, S., Mokhtare, Z., Fekih, A., Assawinchaichote, W., & Zhilenkov, A. (2024). An LMI adaptive-barrier function global sliding mode control of uncertain nonlinear systems with input saturation. Ain Shams Engineering Journal, 15(2), 102460.

Rejeb, A., Rejeb, K., Simske, S. J., & Treiblmaier, H. (2021). Drones for supply chain management and logistics: a review and research agenda. International Journal of Logistics Research and Applications, 1-24.

Sepestanaki, M. A., Barhaghtalab, M. H., Mobayen, S., Jalilvand, A., Fekih, A., & Skruch, P. (2022). Chattering-free terminal sliding mode control based on adaptive barrier function for chaotic systems with unknown uncertainties. IEEE Access, 10, 103469-103484.

Shi, L., Guo, W., Wang, L., Bekiros, S., Alsubaie, H., Alotaibi, A., & Jahanshahi, H. (2022). Stochastic Fixed-Time Tracking Control for the Chaotic Multi-Agent-Based Supply Chain Networks with Nonlinear Communication. Electronics, 12(1), 83.

Sokri, A. (2014). Military supply chain flexibility measures. Journal of Modelling in Management, 9(1), 78-86.

Trakulsunti, Y., Antony, J., Jayaraman, R., & Tortorella, G. (2023). The application of operational excellence methodologies in logistics: a systematic review and directions for future research. Total Quality Management & Business Excellence, 34(5-6), 538-557.

Wang, B., Jahanshahi, H., Volos, C., Bekiros, S., Yusuf, A., Agarwal, P., & Aly, A. A. (2021). Control of a symmetric chaotic supply chain system using a new fixed-time super-twisting sliding mode technique subject to control input limitations. Symmetry, 13(7), 1257.

Xiu, C., & Guo, P. (2018). Global terminal sliding mode control with the quick reaching law and its application. Ieee Access, 6, 49793-49800.

Xu, X., Lee, S.-D., Kim, H.-S., & You, S.-S. (2021). Management and optimisation of chaotic supply chain system using adaptive sliding mode control algorithm. International journal of production research, 59(9), 2571-2587.