





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

مهندسی برق-کنترل

رساله دکتری

بهبود ارسال داده ها جهت ارتقاء پایداری و عملکرد سیستمهای کنترل تحت شبکه

نگارنده:

بهشته صادقی سبزواری

استاد راهنما:

دکتر محمد حداد ظریف

استاد مشاور:

دکتر سید کمال حسینی ثانی

مهر ۱۴۰۰

تقدیم به

بزرگوارانی که در مسیر زندگی از ایشان آموخته ام

تقدیر و تشکر

پس از شکر و حمد ایزد منان و فرستادگان پاکش؛ اکنون که این پژوهش به سرانجام رسیده است بر خود لازم میدانم تشکر کنم از

جناب آقای دکتر حداد ظریف که لطف کردند و راهنمایی رساله را به عهده داشتند و در طی سالهای تحصیل همواره همراه و پشتیبان من بودند؛

مشاور محترم رساله جناب آقای دکتر حسینی ثانی که با سعه صدر از هیچ کمک و راهنمایی ای در این مسیر فروگذار نکردند؛

اساتید محترم داور، جناب آقای دکتر قلی زاده، جناب آقای دکتر الفی و جناب آقای دکتر گنجه فر که علاوه بر قبول زحمت داوری رساله، با راهنمایی های خود به هر چه بهتر شدن نتیجه نهایی کمک کردند؛

و

پدر و مادر عزیز خودم و همسر، و همچنین همسر و دختر نازنینم که با حمایتها و همراهیهایشان پیمودن این مسیر را بر من آسان نمودند.

تعهد نامه

اینجانب بهشته صادقی سبزواری دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی برق-کنترل دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله بهبود ارسال داده ها جهت ارتقاء پایداری و عملکرد سیستمهای کنترل تحت شبکه تحت راهنمایی دکتر محمد حداد ظریف متعهد می شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

هدف از این رساله ارائه الگوریتمی جدید برای زمانبندی ارسال داده ها از طریق شبکه در سیستمهای کنترل تحت شبکه (¹NCS) میباشد به گونه ای که منجر به بهبود پایداری و عملکرد سیستم شود. سیستم مورد بررسی یک NCS زمان گسسته همراه با اغتشاش ورودی است که در معرض تاخیر و از دست دادن داده ها به صورت متغیر با زمان در هر دو کانال اندازه گیری و محرک میباشد. برای این منظور در مرحله اول یک روش کنترل پیش بین رویداد تحریک² و در مرحله بعد یک روش کنترل پیش بین خود تحریک³ ارائه میشود. در هر یک از روشهای مذکور ساختاری بر پایه مشاهده گر مرتبه کامل لئوینرگر و نیز مشاهده گر مرتبه کاهش یافته لئوینرگر و کنترل کننده پیش بین با چند بهره کنترلی ارائه میگردد. طراحی مشاهده گر و کنترل کننده در هر مرحله با استفاده از روش تابع لیاپانوف و روش نامساوی ماتریسی خطی⁴ (LMI) به گونه ای انجام میشود که قادر به پایدارسازی سیستم در حضور اغتشاشها و نقایص شبکه باشند. در نهایت با طراحی ساختاری تلفیقی الگوریتم نهایی ارائه شده است که برپایه استفاده از دو الگوریتم پایه ای کنترل رویداد تحریک⁵ و کنترل خود تحریک⁶ است. براساس نتایج شبیه سازی، الگوریتم تلفیقی با ترکیب روشهای ETPC و STPC ارائه شده در این رساله و نیز با ترکیب روشهای ETC و STC از مقاله ای دیگر، عملکرد بهتری نسبت به الگوریتمهای مجزای خود دارد. بهبود عملکرد از دو منظر پایدارسازی سیستم در حضور اغتشاشهای خارجی در عین کاهش تعداد بسته های ارسال شده و نیز از منظر کاهش مصرف منابع انرژی سیستم و پهنای باند شبکه مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: سیستم کنترل تحت شبکه، زمانبندی ارسال داده ها، کنترل پیش بین، پایداری مجانبی، کنترل یکنواخت در نهایت محدود شده.

¹ Networked Control System

² Event-triggered predictive Control (ETPC)

³ Self-triggered predictive Control (STPC)

⁴ Linear Matrix Inequality

⁵ Event-triggered Control (ETC)

⁶ Self-triggered Control (STC)

فهرست مقالات مستخرج از رساله

- B. S. Sabzevari, M. H. Zarif, S. K. H. Sani, "Event-based Controller Design for Networked Control Systems with Time-varying Random Delays", *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, Vol. 14, No. 1, 2020.
- B. S. Sabzevari, M. H. Zarif, S. K. H. Sani, "**Event-triggered Predictive Networked Control Systems with Network Imperfections and External Disturbance**", *International Journal of Industrial Electronics, Control and Optimization*. *Accepted*

➤ ب. ص. سبزواری، م. ح. ظریف، س. ک. ح. ثانی، "مروری بر الگوریتمهای مختلف انتقال داده ها در سیستمهای کنترل تحت شبکه: ارسال زمانبندی شده، ارسال بر مبنای رویداد و ارسال خودخواسته"، دوازدهمین کنفرانس ملی کیفیت و بهره وری، ۱۳۹۶.

فهرست مطالب

فهرست اشکال	ل
فهرست جداول	ع
فصل اول	۱
مروری بر ادبیات موضوع سیستمهای کنترل تحت شبکه	۱
۱-۱. مقدمه	۲
۲-۱. زمانبندی ارسال داده ها	۳
۱-۲-۱. روش کنترلی رویداد تحریک	۴
۲-۲-۱. روش کنترلی خود تحریک	۷
۳-۱. اشکالات طرحهای کنترلی	۱۰
۴-۱. انگیزه تحقیق	۱۱
۵-۱. نوآوری رساله	۱۲
۶-۱. ساختار کلی	۱۳
فصل دوم	۱۵
الگوریتم کنترل پیش بین رویداد تحریک	۱۵
۱-۲. مقدمه	۱۶
۲-۲. توصیف سیستم	۱۶
۱-۲-۲. مشاهده گر مرتبه کامل	۱۸
۱-۲-۲-۱. تشخیصگر رویداد مبتنی بر مشاهده گر مرتبه کامل	۱۸

۱۹.....	۲-۱-۲-۲. کنترل کننده پیش بین
۲۱.....	۳-۱-۲-۲. انتخابگر
۲۲.....	۲-۲-۲. مشاهده گر مرتبه کاهش یافته
۲۴.....	۳-۲. نتایج اصلی
۲۹.....	۱-۳-۲. حالت اول اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کامل
۳۲.....	۲-۳-۲. حالت دوم اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کامل
۳۵.....	۳-۳-۲. حالت اول اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته
۳۵.....	۴-۳-۲. حالت دوم اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته
۳۶.....	۴-۲. شبیه سازی
۳۶.....	۱-۴-۲. حالت اول اغتشاش
۴۶.....	۲-۴-۲. حالت دوم اغتشاش
۵۰.....	۵-۲. نتیجه گیری
۵۳.....	فصل سوم
۵۳.....	الگوریتم کنترل پیش بین خود تحریک
۵۴.....	۱-۳. مقدمه
۵۴.....	۲-۳. توصیف سیستم
۵۶.....	۱-۲-۳. تعیین کننده لحظه نمونه برداری بعدی مبتنی بر مشاهده گر
۵۷.....	۲-۲-۳. کنترل کننده پیش بین
۵۸.....	۳-۲-۳. انتخابگر
۵۹.....	۳-۳. نتایج اصلی
۵۹.....	۱-۳-۳. حالت اول اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کامل
۶۴.....	۲-۳-۳. حالت دوم اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کامل

۳-۳-۳. حالت اول اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته	۶۵
۳-۳-۴. حالت دوم اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته	۶۷
۳-۴. نتایج شبیه سازی	۶۸
۳-۴-۱. حالت اول اغتشاش	۶۸
۳-۴-۲. حالت دوم اغتشاش	۷۳
۳-۵. نتیجه گیری	۷۵
فصل چهارم	۷۷
الگوریتم کنترلی سوئیچ کننده تلفیقی	۷۷
۴-۱. مقدمه	۷۸
۴-۲. الگوریتم پیشنهادی	۷۸
۴-۳. ساختار پیشنهادی	۷۹
۴-۳-۱. بلوک "تعیین گر الگوریتم کنترلی"	۸۰
۴-۳-۲. پایداری	۸۰
۴-۴. توصیف سیستم	۸۱
۴-۵. نتایج شبیه سازی	۸۲
۴-۵-۱. الگوریتم تلفیقی اول	۸۳
۴-۵-۱-۱. مقایسه الگوریتم تلفیقی اول با الگوریتمهای مجزا	۸۷
۴-۵-۲. الگوریتم تلفیقی دوم	۸۸
۴-۵-۲-۱. مقایسه الگوریتم تلفیقی دوم با الگوریتمهای مجزا	۹۱
۴-۵-۳. الگوریتم تلفیقی سوم	۹۱
۴-۵-۳-۱. مقایسه الگوریتم تلفیقی سوم با الگوریتمهای مجزا	۹۶
۴-۶. نتیجه گیری	۹۶

فصل پنجم.....	۹۹
نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۹۹
۱-۵. نتیجه گیری	۱۰۰
۲-۵. پیشنهادات	۱۰۴
منابع	۱۰۶

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. ساختار متداول NCS ها ۲
- شکل ۲-۱. ساختار کلی سیستم کنترل تحت شبکه بر مبنای طرح کنترلی رویداد تحریک [۲۳] ۴
- شکل ۱-۲. ساختار پیشنهاد شده برای الگوریتم کنترل پیشبین رویداد تحریک در این رساله ۱۷
- شکل ۲-۲. ساختار داخلی کنترل کننده پیش بین ۱۹
- شکل ۳-۲. ساختار داخلی بلوک انتخابگر ۲۱
- شکل ۴-۲. رابطه میان متغیرهای حالت x و x_1 ۲۴
- شکل ۵-۲. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم ETPC پیشنهاد شده در [۳۷] برای مثال ۱-۲ ۳۷
- شکل ۶-۲. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم ETPC پیشنهاد شده در این مقاله برای مثال ۱-۲ ۳۸
- شکل ۷-۲. توزیع متغیر با زمان تاخیر در کانال اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی برای مثال ۱-۲ ۳۸
- شکل ۸-۲. توزیع متغیر با زمان از دست دادن بسته ها در کانال اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی برای مثال ۱-۲ ۳۹
- شکل ۹-۲. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم ETPC پیشنهاد شده در این مقاله در حضور نویز سنسور برای مثال ۱-۲ ۳۹
- شکل ۱۰-۲. خروجی واقعی و نمونه برداری شده سیستم در حضور نویز سنسور برای مثال ۱-۲ ۴۱
- شکل ۱۱-۲. متغیرهای سیستم با استفاده از الگوریتم ETPC پیشنهادی در رساله در حضور تاخیر تصادفی برای مثال ۱-۲ ۴۱
- شکل ۱۲-۲. متغیرهای سیستم با استفاده از الگوریتم ETPC پیشنهادی رساله با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته برای مثال ۱-۲ ۴۲
- شکل ۱۳-۲. متغیرهای حالت سیستم و تخمین آنها تحت الگوریتم ETPC پیشنهاد شده در [۳۱] برای مثال ۲-۲ ۴۳

شکل ۲-۱۴. متغیرهای حالت سیستم و تخمین آنها توسط مشاهده گر تحت الگوریتم ETPC پیشنهاد شده در این رساله برای مثال ۲-۲.....	۴۴
شکل ۲-۱۵. وقوع متغیر با زمان تاخیر در کانالهای اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی در مثال ۲-۲.....	۴۵
شکل ۲-۱۶. وقوع متغیر با زمان از دست دادن بسته ها در کانالهای اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی برای مثال ۲-۲.....	۴۵
شکل ۲-۱۷. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم ETPC پیشنهاد شده در رساله برای مثال ۲-۳.....	۴۷
شکل ۲-۱۸. تغییرات نرم ۲ی متغیرهای حالت و خروجیهای سیستم برای مثال ۲-۳.....	۴۷
شکل ۲-۱۹. وقوع متغیر با زمان تاخیر در کانالهای اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی در مثال ۲-۳.....	۴۸
شکل ۲-۲۰. وقوع متغیر با زمان از دست دادن بسته ها در کانالهای اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی در مثال ۲-۳.....	۴۹
شکل ۲-۲۱. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم ETPC پیشنهادی رساله با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته برای مثال ۲-۳.....	۴۹
شکل ۳-۱. ساختار پیشنهاد شده برای سیستم کنترل تحت شبکه با کنترل پیشبین خود تحریک در این رساله.....	۵۵
شکل ۳-۲. ساختار داخلی کنترل کننده پیش بین در الگوریتم STPC.....	۵۷
شکل ۳-۳. ساختار داخلی بلوک انتخابگر در الگوریتم STPC.....	۵۹
شکل ۳-۴. تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله برای مثال ۳-۱.....	۶۹
شکل ۳-۵. تاخیر متغیر با زمان در کانال اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی برای مثال ۳-۱.....	۷۰
شکل ۳-۶. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله در حضور نویز سنسور برای مثال ۳-۱.....	۷۰
شکل ۳-۷. خروجیهای سیستم در حضور نویز سنسور در مثال ۳-۱.....	۷۱

شکل ۳-۸. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله در حضور تاخیر تصادفی برای مثال	۳-۱
۷۲.....	
شکل ۳-۹. متغیرهای حالت سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته برای مثال	۳-۱
۷۲.....	
شکل ۳-۱۰. تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله برای مثال	۳-۲
۷۴.....	
شکل ۳-۱۱. تغییرات نرم ۲ی متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله برای مثال	۳-۲
۷۴.....	
شکل ۳-۱۲. تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته برای مثال	۳-۲
۷۵.....	
شکل ۴-۱. ساختار پیشنهادی برای پیاده سازی الگوریتم تلفیقی پیشنهادی در این رساله	۷۹.....
شکل ۴-۲. ساختار پیشنهاد شده برای الگوریتم کنترلی تلفیقی بر پایه ETPC و STPC پیشنهاد شده در این رساله	۸۱.....
شکل ۴-۳. تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای فصول دو و سه برای مثال	۴-۱
۸۴.....	
شکل ۴-۴. تغییرات متغیرهای سیستم در حضور اغتشاش، تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای فصول دو و سه برای مثال	۴-۱
۸۶.....	
شکل ۴-۵. تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای فصول دو و سه با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته برای مثال	۴-۱
۸۶.....	
شکل ۴-۶. مقادیر متغیرهای حالت سیستم تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای [۳۸] برای مثال	۴-۲
۹۰.....	
شکل ۴-۷. مقادیر متغیرهای حالت سیستم در حضور اغتشاش تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای [۳۸] برای مثال	۴-۲
۹۰.....	
شکل ۴-۸. تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله برای مثال	۴-۳
۹۲.....	

شکل ۴-۹. تغییرات نرم متغیرهای سیستم تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله برای مثال ۴-	۳
۹۲.....	
شکل ۴-۱۰. تغییرات متغیرهای سیستم در حضور اغتشاش، تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای فصول دو و سه برای مثال ۴-۳.....	۹۳
شکل ۴-۱۱. تغییرات نرم دوی بردار متغیرهای حالت و بردار خروجیهای سیستم در حضور اغتشاش، تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای فصول دو و سه برای مثال ۴-۳.....	۹۴
شکل ۴-۱۲. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم تلفیقی سوم با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته برای مثال ۴-	۱
۹۵.....	

فهرست جداول

جدول ۱-۱. خلاصه بررسی تعدادی از مقالات منتشر شده در سالهای اخیر با موضوع روش کنترلی رویداد تحریک.....	۶
جدول ۲-۱. خلاصه بررسی تعدادی از مقالات منتشر شده در سالهای اخیر با موضوع روش کنترلی خود تحریک.....	۹
جدول ۳-۱. نقاط ضعف هریک از روشهای کنترلی	۱۰
جدول ۳-۱. تعداد بسته های ارسال شده در الگوریتم STPC پیشنهاد شده در رساله با استفاده از مشاهده گر مرتبه کامل برای مثال ۳-۲ به ازاء مقادیر مختلف D^1 و D^2	۷۳
جدول ۴-۱. تعداد بسته های ارسالی از طریق هر یک از دو الگوریتم ETPC و STPC در الگوریتم تلفیقی به ازاء مقادیر مختلف δ	۸۵
جدول ۴-۲. مقدار Ψ برای الگوریتمهای پیشنهاد شده در فصول دو، سه و چهار برای مثال ۴-۱.....	۸۸
جدول ۴-۳. مقدار Ψ برای الگوریتمهای پیشنهاد شده در فصول دو، سه و چهار برای مثال ۴-۲.....	۹۱
جدول ۴-۴. مقدار Ψ برای الگوریتمهای پیشنهاد شده در فصول دو، سه و چهار برای مثال ۴-۳.....	۹۶

فصل اول

مروری بر ادبیات موضوع سیستمهای کنترل تحت شبکه

۱-۱. مقدمه

یک سیستم کنترل تحت شبکه^۷ (NCS) سیستمی است که در آن حلقه های کنترلی از طریق یک شبکه مخابراتی به نحوی بسته میشوند که سیگنالهای سیستم حلقه بسته بین اجزاء مختلف سیستم (حسگر(ها)، کنترل کننده(ها) و محرک (ها)) از طریق یک شبکه مخابراتی مشترک تبادل شوند. شکل ۱-۱ یک ساختار متداول از NCS ها را نشان میدهد.

NCS ها به دلیل وجود شبکه مخابراتی، در مقایسه با سیستم کنترلی سنتی مزایای متعددی دارند؛ مانند: سیمکشی کمتر، هزینه پایینتر، انعطاف پذیری بیشتر و قابلیت نگهداری بیشتر سیستم. در نتیجه NCS ها طی دهه های گذشته در حوزه های متعددی مورد استفاده قرار گرفته اند؛ مانند شبکه های رباتی [۱]، سیستمهای نقل و انتقال هوشمند [۲]، عمل جراحی [۳]، سیستمهای فیزیکی سایبری [۴]، میکروگریدها [۵] و وسایل نقلیه دریایی بدون سرنشین [۶].



شکل ۱-۱. ساختار متداول NCS ها

از سوی دیگر به کارگیری شبکه مخابراتی در سیستمهای کنترل چالشهای جدیدی را به حوزه سیستمهای کنترل وارد میکند که ناشی از نقایص موجود در ساختار این شبکه هاست. این نقایص رفتار NCS را از طریق افت عملکرد یا ایجاد ناپایداری به شدت تحت تاثیر قرار میدهند. به همین دلیل ضروری است که یک نمایش دینامیکی مناسب از NCS ها را بسازیم و کنترل کننده های موثری طراحی کنیم که پایداری را تحت این شرایط میسر کنند. [۷]

^۷ Networked Control System (NCS)

اصلی ترین چالشهای پیش روی NCS ها ناشی از تاخیر القایی شبکه، از دست دادن بسته ها، جابجایی بسته ها، محدودیت پهنای باند شبکه، محدودیت منابع شبکه و اغتشاشهای وارد به سیستم است که روشهای مختلف رویارویی با هریک از این چالشها در سالهای اخیر از زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. [۸-۱۵]

۱-۲. زمانبندی ارسال داده ها

یکی از مهمترین چالشهای پیش روی سیستمهای کنترل تحت شبکه محدودیت پهنای باند شبکه ارتباطی میباشد. به دلیل وجود این محدودیت، لازم است الگوریتم بهینه ای را برای ارسال داده ها از طریق شبکه طراحی کنیم تا ضمن ارسال داده های ضروری، از اتلاف منابع سیستم جلوگیری شود. به این منظور لازم است الگوریتمی ارائه شود که براساس آن تصمیم بگیریم در هر سیستم کنترل تحت شبکه چه زمانی داده اندازه گیری شده توسط حسگرها باید بر روی شبکه قرار گیرد یا به عبارتی چه زمانی تحریک کنترلی صورت گیرد. در حقیقت یکی از مهمترین چالشها کاهش تعداد انتقالات در طول زمان، در عین حفظ مطلوبیت ویژگیهای عملکرد کنترلی و پایداری است. اهمیت این امر در آن است که در بسیاری از کاربردها، منابع ارتباطی محدود هستند و با سایر قسمتها به اشتراک گذاشته شده اند. [۱۶] با کاهش تعداد داده های منتقل شده از طریق شبکه علاوه بر حفظ منابع انرژی سیستم، اثرات القایی شبکه بر روی عملکرد سیستم نیز کاهش میابند.

از نقطه نظر تحریک کنترلی، سه روش کنترلی متفاوت وجود دارد که عبارتند از کنترل با تحریک زمانبندی شده^۸، کنترل رویداد تحریک^۹ و کنترل خود تحریک^{۱۰}. طرحهای کنترلی اولیه سیستمهای کنترل تحت شبکه بر اساس روش تحریک زمانبندی شده بودند که بعدها پایه تئوری طرحهای کنترلی رویداد تحریک و خود تحریک قرار گرفت. در روش کنترل زمانبندی شده، حسگرها به طور متناوب در لحظات مشخص و از پیش تعیین شده از متغیرهای سیستم نمونه برداری میکنند. تمام متغیرهای نمونه برداری شده از طریق شبکه ارتباطی برای کنترل پلنت منتقل میشود. در این روش دوره تناوب بر مبنای زمان پردازش CPU و پهنای باند ارتباطی انتخاب میشود. [۱۷]

روش تحریک زمانبندی شده برای مدتی طولانی به دلیل سادگی تحلیل و طراحی بسیار جذاب بود. مشکل عمده این رویکرد آن است که بدون در نظر گرفتن بار حال حاضر شبکه یا تغییرات در سیستمهای کنترلی، همواره

^۸ Time-triggered Control

^۹ Event-triggered Control (ETC)

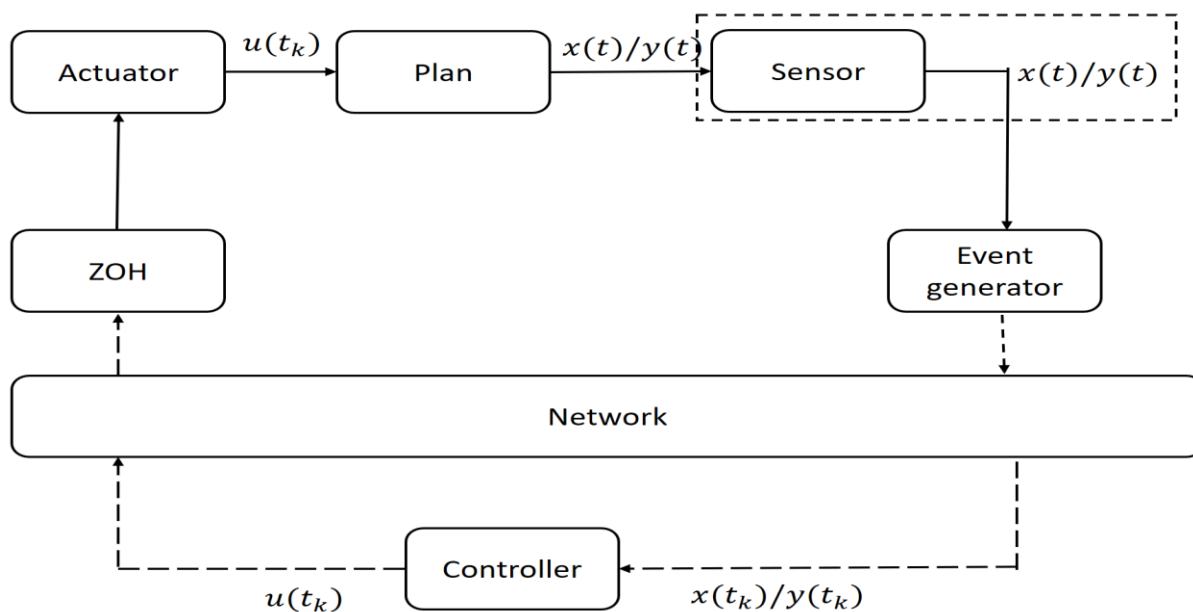
^{۱۰} Self-triggered Control (STC)

استفاده ثابتی از پهنای باند ارتباطی میکند. دوره نمونه برداری از ابتدا به گونه ای تعیین میشود که پایداری عملکرد را تحت بدترین شرایط حفظ کند حتی در حضور بزرگترین اغتشاش یا ازدحام ترافیکی. اما در این روش همواره منابع زیادی به دلیل ارتباطات غیرضروری در سیستمهای کنترل تحت شبکه تلف میشوند.

بنابراین روشهای رویداد تحریک و خود تحریک برای حل این مشکل توسعه یافتند. این دو روش متشکل از دو عنصر میباشند: یک مکانیسم تحریک که تعیین میکند چه زمانی ورودی کنترلی باید مجدداً به روز رسانی شود؛ و کنترل کننده پسخوردی که ورودی کنترلی را محاسبه میکند. [۱۸]

۱-۲-۱. روش کنترلی رویداد تحریک

روش کنترلی رویداد تحریک در حقیقت ابزاری برای محدود ساختن ارتباطات پسخوردی در یک حلقه کنترلی است. این ارتباطات تنها به لحظه هایی محدود میشوند که در آنها وقوع یک رویداد از پیش تعیین شده تعیین میکند که ورودی کنترلی به منظور تحقق ویژگی خاصی در رفتار یک سیستم حلقه بسته نیازمند به روز رسانی میباشد. زمانهای رویداد بسته به مقادیر متغیرهای حالت یا خروجیهای سیستم تعیین میشود. به این ترتیب ارتباط پسخوردی با رفتار سیستم تطبیق داده میشود. از آنجایی که رویدادها عموماً به صورت ناهمگام در طول زمان رخ میدهند، اساساً روش کنترلی رویداد تحریک کاملاً با یک روش کنترلی تحریک زمانبندی شده متفاوت است. [۱۹] در مقالات [۲۰-۲۲] و منابع آنها میتوان اطلاعات تفصیلی را در باب روش کنترل بر مبنای رویداد مطالعه نمود.



شکل ۲-۱. ساختار کلی سیستم کنترل تحت شبکه بر مبنای طرح کنترلی رویداد تحریک [۲۳]

همانطور که در [۲۳] آورده شده است، ساختار پایه‌ای سیستم‌های کنترل تحت شبکه با استفاده از روش رویداد تحریک در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. برخلاف کنترل حلقه بسته متداول، یک مولد رویداد بین پلنت و کنترل کننده قرار داده شده است که تعیین می‌کند آیا داده نمونه‌برداری شده باید منتقل شود یا خیر. وظیفه کنترلی این مولد رویداد آن است که در صورت برقراری شرط رویداد، داده نمونه برداری شده توسط حسگر را بر روی شبکه قرار دهد.

بنابراین روش کنترلی رویداد تحریک با کاهش تعداد داده های ارسال شده از طریق شبکه، اثرات القایی شبکه بر روی عملکرد سیستم را به میزان زیادی کاهش می‌دهد. یک روش موثر دیگر برای مقابله با اثرات القایی شبکه استفاده از روش کنترل پیش بین است که پس از اثرگذاری شبکه بر روی داده ها، به مقابله با این اثرات می‌پردازد. با ترکیب روش کنترلی رویداد تحریک و روش کنترل پیش بین روش کاملتری تحت عنوان روش کنترل پیش بین رویداد تحریک^{۱۱} (ETPC) تبیین میشود. در این روش پس از تصمیم گیری در باب ضرورت ارسال هریک از داده های نمونه برداری شده و قرار دادن داده های ضروری بر روی شبکه؛ اثرات القایی شبکه بر روی داده های ارسال شده نیز؛ با استفاده از بلوک کنترل پیش بین؛ جبران میشود. الگوریتم ارائه شده در رساله حاضر نیز برای بخش رویداد تحریک، به طور خاص یک الگوریتم ETPC است که کارایی آن از طریق دو مثال مقایسه ای، در فصل بعد نشان داده شده است.

جدول ۱-۱ خلاصه بررسی تعدادی از مقالات منتشر شده در سالهای اخیر با موضوع روش کنترلی رویداد تحریک است. این جدول ویژگیها و محدودیتهای در نظر گرفته شده برای NCS مورد نظر در هر یک از مقالات را نشان میدهد. در ستون آخر جدول نیز روش کنترلی مورد استفاده به منظور پایدارسازی سیستم در هر مقاله ذکر شده است.

جدول ۱-۱ نشان میدهد که الگوریتم ارائه شده در رساله حاضر، بیش از تمام کارهای موجود که به روش کنترلی رویداد تحریک پرداخته اند، نقایص شبکه را تحت پوشش قرار میدهد. با بررسی دقیقتر منابع [۲۴-۳۱] که مشخصا مشابه با رساله حاضر روش ETPC را مطرح کرده اند، درمی یابیم که مقاله [۲۴] در سیستم کنترل تحت شبکه مورد بررسی خود از دست دادن بسته ها و عدم قطعیت را در نظر گرفته است و بهینه سازی را براساس خطای ردگیری و متغیرهای حالت انجام میدهد در حالیکه در رساله حاضر وجود نقایص بیشتری در شبکه در نظر گرفته شده است و سیستم با پسخورد خروجی در نظر گرفته شده است. مقاله [۲۵] در شبکه مخابراتی مورد استفاده در

^{۱۱} Event-Triggered Predictive Control (ETPC)

NCS خود تنها حضور تاخیر را در نظر گرفته است و به منظور تحلیل آن دو ساختار جداگانه در نظر گرفته است که در یکی از آنها تاخیر شبکه کوچکتر از بازه نمونه برداری است و در دیگری بزرگتر از بازه نمونه برداری است.

جدول ۱-۱. خلاصه بررسی تعدادی از مقالات منتشر شده در سالهای اخیر با موضوع روش کنترلی رویداد تحریک

شماره منبع	مدل سیستم	اثرات القایی شبکه			نوع اغتشاش		نوع پسخورد		روش کنترلی
		زمان-گسسته	زمان-پیوسته	تأخیر	از دست دادن بسته ها	جابجایی بسته ها	ورودی	حالت	
[۲۴]	✓				✓			✓	ETPC
[۲۵]	✓			✓					ETPC
[۲۶]			✓		✓			✓	ETPC
[۲۷]	✓			✓					ETPC
[۲۸]	✓			✓					ETPC
[۲۹]	✓			✓					ETPC
[۳۰]	✓			✓	✓	✓			ETPC
[۳۱]	✓			✓	✓			✓	ETPC
رساله حاضر	✓			✓	✓	✓	✓		ETPC

مقاله [۲۶] یک سیستم کنترل تحت شبکه را در حضور از دست دادن بسته ها و با پسخورد حالت مورد بررسی قرار میدهد و دو تشخیصگر رویداد یکی در سمت حسگر و یکی هم در سمت کنترل کننده در نظر میگیرد که منجر به پیچیدگی فیزیکی بیشتری نسبت به ساختار پیشنهادی در رساله حاضر میشود در حالیکه نقایص کمتری را در شبکه مخابراتی در نظر گرفته است.

مقاله [۲۷] یک الگوریتم ETPC را برای یک ساختار NCS با پسخورد خروجی نشان میدهد که در معرض تاخیر زمانی است و از دو روش مدل مجتمع و مدل تکه ای خطی الگوریتمهای پایدارسازی سیستم را پیشنهاد میدهد ولی برخلاف رساله حاضر وجود شبکه مخابراتی را تنها در حد فاصل میان حسگر و کنترل کننده در نظر میگیرد و نقایص شبکه را نیز تنها محدود به تاخیر زمانی نموده است.

در مقاله [۲۸] برای دو ساختار جداگانه، الگوریتم پایدارسازی ارائه شده است. یکبار زمانی که شبکه تنها در حد فاصل کنترل کننده و محرک وجود داشته باشد و یکبار زمانی که شبکه هم در بین حسگر و کنترل کننده و هم در بین کنترل کننده و محرک وجود داشته باشد. در هر دو ساختار تنها وجود تاخیر در شبکه های مخابراتی در نظر گرفته شده است و اغتشاش و سایر نقایص شبکه نادیده گرفته شده اند.

مقاله [۲۹] در ساختار پیشنهادی خود برای NCS دو تشخیصگر رویداد را یکی در سمت حسگر و دیگری در سمت کنترل کننده در نظر گرفته است. وجود تاخیر در هر دو کانال اندازه گیری و محرک لحاظ شده است و اثر گسسته سازی در هنگام قرار دادن داده بر روی هر یک از کانالها بر پایداری سیستم در نظر گرفته شده است.

مقاله [۳۰] ساختاری مشابه ساختار پیشنهادی در رساله حاضر را در نظر گرفته است با این تفاوت که کنترل کننده پیشنهادی آن کنترل کننده ای با گین ثابت است در حالیکه در این رساله کنترل کننده سوئیچ کننده با گین متغیر پیشنهاد شده است. همچنین در حالیکه در مقاله [۳۰] وجود تاخیر، از دست دادن بسته ها و جابجایی بسته ها لحاظ شده اند، اغتشاشهای ورودی و خروجی نادیده گرفته شده اند. الگوریتم پایدارسازی پیشنهاد شده در این مقاله مشابه با الگوریتم پیشنهادی در رساله حاضر برپایه تابع لیاپونوف و به روش LMI است.

ساختار ارائه شده در مقاله [۳۱] نیز شامل دو تشخیصگر رویداد؛ یکی در سمت حسگر و دیگری در سمت کنترل کننده؛ میباشد. تاخیر و از دست دادن بسته ها در هر دو کانال در نظر گرفته شده است و منابع انرژی سیستم نیز محدود فرض شده است. برخلاف رساله حاضر سیستم به صورت پسخورد حالت در نظر گرفته شده است و نیز حضور اغتشاش کاملاً نادیده گرفته شده است. همچنین کنترل کننده مورد استفاده در [۳۱] به صورت بهره ثابت است.

۱-۲-۲. روش کنترلی خود تحریک

به عنوان جایگزینی برای کنترل رویداد تحریک، کنترل خود تحریک مزایای قابل توجهی در مقایسه با کنترل رویداد تحریک دارد. در این روش نیازی به بررسی پیوسته شرط تحریک نمیباشد. به همین دلیل اتلاف کمتری

در منابع مربوط به حسگرها وجود خواهد داشت و همچنین پیچیدگی کمتری در پیاده‌سازی فیزیکی به وجود خواهد آمد. گذشته از آن روشی انعطاف‌پذیرتر برای تعیین لحظه تحریک فراهم می‌آورد که احتمالاً منجر به عدم انجام عملکردی خاص در شرایط حضور سیستم در نقطه تعادل خود می‌گردد. گذشته از آن، به سخت افزار مازاد دیگری برای تکمیل نظارت مداوم بر شرط تحریک نیاز نخواهد بود که این برخلاف روش رویداد تحریک است. مزایای جذاب روش کنترلی خود تحریک منجر به تمایل روبه رشد محققین در بررسی ابعاد مختلف این روش شده است. [۲۳]

در حقیقت تفاوت اصلی میان روشهای رویداد تحریک و خود تحریک آن است که در روش رویداد تحریک، در هر لحظه نمونه برداری شرط رویداد بررسی میشود و در صورت لزوم داده ارسال میشود درحالی که برای حالت خود تحریک پس از هر بار نمونه برداری، براساس داده جدید لحظه نمونه برداری بعدی پیش بینی میگردد. [۳۲]

بنابراین روش کنترلی خود تحریک نیز مانند روش کنترلی رویداد تحریک با کاهش تعداد داده های ارسال شده از طریق شبکه، اثرات القایی شبکه بر روی عملکرد سیستم را به میزان زیادی کاهش میدهد. با ترکیب روش کنترلی خود تحریک و روش کنترل پیش بین، روش کاملتری تحت عنوان روش کنترل پیش بین خود تحریک^{۱۲} (STPC) تبیین میشود. در این روش پس از تعیین لحظه نمونه برداری بعدی و قرار دادن داده نمونه برداری جدید بر روی شبکه؛ اثرات القایی شبکه بر روی داده های ارسال شده نیز؛ با استفاده از بلوک کنترل پیش بین؛ جبران میشود. الگوریتم ارائه شده در رساله حاضر نیز برای بخش کنترل خود تحریک، به طور خاص یک الگوریتم STPC است که کارایی آن از طریق دو مثال مقایسه ای، در فصل سوم نشان داده شده است.

جدول ۱-۲ حاوی خلاصه اطلاعات مربوط به مقالات با موضوع روش کنترلی خود تحریک است. مشابه جدول ۱-۱، علاوه بر ویژگیهای سیستم مورد بررسی در هر مقاله و نقایصی که برای شبکه مخابراتی در ساختار مورد بررسی هر مقاله در نظر گرفته شده است؛ در ستون آخر روش کلی مورد استفاده هر مقاله برای تبیین الگوریتم پایدارسازی سیستم ذکر شده است.

مقالات [۳۳-۳۶] به طور خاص از روش STPC مشابه با رساله حاضر استفاده کرده اند. بررسی دقیقتر این منابع نشان میدهد که مقاله [۳۳] برای تعیین زمان نمونه برداری بعدی در الگوریتم خود تحریک از بهینه سازی یک

^{۱۲} Self-Triggered Predictive Control (STPC)

تابع هزینه استفاده کرده است و پایدارسازی را بر پایه تابع لیاپانوف انجام داده است و این در حالی است که شبکه های مخابراتی را به صورت ایده آل در نظر گرفته است و هیچیک از نقایص شبکه را لحاظ نکرده است.

جدول ۱-۲. خلاصه بررسی تعدادی از مقالات منتشر شده در سالهای اخیر با موضوع روش کنترلی خود تحریک

شماره منبع	مدل سیستم		اثرات القایی شبکه			نوع اغتشاش		نوع پاسخورد		روش کنترلی
	زمان- گسسته	زمان- پیوسته	تاخیر	از دست دادن بسته ها	جابجایی بسته ها	ورودی	خروجی	حالت	خروجی	
[۳۳]	✓							✓		STPC
[۳۴]	✓					✓		✓		STPC
[۳۵]	✓							✓		STPC
[۳۶]	✓					✓	✓		✓	STPC
رساله حاضر	✓		✓		✓	✓	✓		✓	STPC

مقاله [۳۴] یک الگوریتم کنترلی STPC تصادفی را در شرایط وجود اغتشاشها و محدودیتهای احتمالاتی ارائه میکند. در این مقاله نشان داده شده است که لزوماً لحظه نمونه برداری بعدی قابل محاسبه است اما روش پیشنهادی برای محاسبه آن یک روش برنامه نویسی بازگشتی است که بار محاسباتی زیادی را با خود به همراه دارد. در حالی که روش پیشنهادی در این رساله، لحظه نمونه برداری بعدی را مستقیماً محاسبه میکند. علاوه بر آن، در این رساله نقایص بیشتری در شبکه لحاظ شده است.

مقاله [۳۵] از روش تابع هزینه برای تعیین لحظه نمونه برداری بعدی بهره میبرد و سیستمی را تحلیل میکند که در معرض هیچیک از نقایص شبکه نیست در حالیکه در رساله حاضر علاوه بر تعیین مستقیم لحظه نمونه برداری

بعدی نقایص بیشتری در شبکه در نظر گرفته شده است. در [۳۶] یک الگوریتم STPC برای سیستمی در معرض اغتشاشهای محدود ورودی و خروجی پیشنهاد شده است و لحظه نمونه برداری بعدی برپایه یک تابع هزینه تعیین میشود.

۱-۳. اشکالات طرحهای کنترلی

جدول ۱-۳. نقاط ضعف هریک از روشهای کنترلی

روش کنترلی	نقاط ضعف
تحریک زمانبندی شده	-اتلاف منابع انرژی سیستم به دلیل انجام نمونه برداری به صورت متناوب و ارسال تمام داده های نمونه برداری شده از طریق شبکه حتی در لحظات غیرضروری - اشغال غیرضروری پهنای باند شبکه به دلیل ارسال حجم زیاد داده
رویداد تحریک	- اتلاف منابع سیستم به دلیل نمونه برداری متناوب داده ها - اتلاف منابع سیستم به دلیل بررسی مدام شرط رویداد
خود تحریک	-عدم عکس العمل مناسب نسبت به اغتشاشهای وارد شده به سیستم بین دو لحظه نمونه برداری متوالی

با توجه به توضیحات ذکر شده در قسمت قبل، هر یک از سه روش کنترلی ایراداتی دارند که به طور خلاصه در جدول ۱-۳ گردآوری شده اند. از آنجا که الگوریتمهای مورد بررسی الگوریتمهای مربوط به زمانبندی ارسال داده ها میباشند، در حقیقت میزان قابلیت هر الگوریتم در تشخیص ضرورت انجام نمونه برداری جدید و سپس تشخیص ضرورت ارسال داده نمونه برداری شده است که تعیین کننده است. به همین دلیل هر جا که الگوریتم کنترلی مورد بحث قادر نباشد هر یک از دو وظیفه بالا را به خوبی انجام دهد نقطه ضعف آن الگوریتم تلقی میشود و منجر به اتلاف منابع انرژی سیستم و اشغال غیرضروری پهنای باند شبکه مخابراتی میگردد. علاوه بر آن به دلیل اینکه اثرات القایی شبکه بر روی داده های ارسال شده از طریق شبکه مخابراتی عملکرد سیستم را تحت تاثیر قرار میدهد؛ ارسال داده های غیرضروری از این منظر نیز نقطه ضعف الگوریتم کنترلی میباشد.

۱-۴. انگیزه تحقیق

با مدنظر قرار دادن معایب روشهای مختلف در جدول ۱-۳، به نظر میرسد ترکیب طرحهای کنترلی رویداد تحریک و خود تحریک، طرح کنترلی مناسبی را به دست دهد که در آن مزایای هر یک از این دو طرح، نقاط ضعف طرح دیگر را پوشش میدهد. در شرایطی که اغتشاشهای متوالی به سیستم وارد شود، در صورتی که تنها از الگوریتم خود تحریک استفاده کنیم، ممکن است در فاصله لحظات مختلف نمونه برداری اغتشاشهای متعدد به سیستم وارد شوند و از آنجا که در این الگوریتم بین لحظات نمونه برداری متوالی هیچگونه نظارتی بر مقدار متغیرهای سیستم صورت نمیگیرد، ممکن است سیستم به سرعت ناپایدار شود و یا آنقدر از نقطه تعادل خود دور شود که برای بازگرداندن سیستم به عملکرد مطلوب نیازمند اعمال سیگنال کنترلی بزرگ و صرف هزینه زیادی باشیم. در صورتی هم که تنها از الگوریتم رویداد تحریک استفاده کنیم در فاصله میان اغتشاشها که پاسخ سیستم در حالت پایدار است، بررسی پیوسته مقادیر متغیرهای سیستم صورت میگیرد که منجر به صرف انرژی زیادی از منابع سیستم خواهد شد در صورتی که در شرایطی که سیستم در حالت پایدار به سر میبرد نیازی به این بررسی پیوسته نیست.

در حقیقت ایده پایه ای در روش کلی ارائه شده در این رساله، استفاده از هر یک از این طرحها بسته به نوع پاسخ سیستم در هر بازه زمانی است. زمانی که سیستم در حالت گذرا قرار دارد متغیرهای سیستم تغییرات زیادی دارند. در این حالت برای حفظ پایداری سیستم لازم است متغیرهای سیستم متناوباً نمونه برداری شوند و در صورت ضروری تشخیص دادن ارسال داده نمونه برداری شده جدید، ارسال صورت گیرد. به این ترتیب استفاده از الگوریتم کنترلی رویداد تحریک در زمانهایی که سیستم در حالت گذرا قرار دارد و تغییرات متغیرهای سیستم زیاد است، مناسب به نظر میرسد.

از آن سو زمانی که سیستم در حالت ماندگار قرار دارد متغیرهای سیستم تغییرات زیادی ندارند و نیازی نیست که به صورت متناوب عمل نمونه برداری را انجام دهیم. به همین دلیل استفاده از الگوریتم کنترلی خود تحریک برای زمانهایی که سیستم در حالت ماندگار قرار دارد مناسب به نظر میرسد. چرا که در این الگوریتم در هر لحظه نمونه برداری، لحظه نمونه برداری بعدی تعیین میشود و در فاصله این دو لحظه سیستم به صورت حلقه باز عمل میکند. این رویکرد منجر به صرفه جویی قابل ملاحظه ای در منابع انرژی سیستم میشود چرا که نمونه برداری غیر ضروری انجام نمیشود.

ایده اصلی استفاده از یک الگوریتم کنترلی تلفیقی است که بین این دو الگوریتم تغییر وضعیت دهد. استفاده از روش کنترلی رویداد تحریک در زمان نوسانات پاسخ سیستم و سپس تغییر الگوریتم کنترلی به روش کنترلی خود تحریک در زمان اتمام حالت گذرا، ترکیبی است که منجر به بهینه استفاده بهینه از منابع انرژی سیستم میشود. سپس در صورتی که اغتشاش جدیدی به سیستم وارد شود الگوریتم کنترلی به روش کنترلی رویداد تحریک تغییر وضعیت میدهد و نمونه برداری به طور پیوسته توسط حسگرها انجام میگردد و سیگنال کنترلی مناسب بر مبنای این الگوریتم تعیین میشود که این امر منجر به رصد نمودن دقیقتر وضعیت سیستم در شرایط وارد شدن اغتشاش میگردد.

استفاده از این الگوریتم تلفیقی نسبت به زمانی که فقط از یکی از الگوریتمها استفاده کنیم، منجر به استفاده بهینه تری از منابع انرژی سیستم میشود. علاوه بر آن نسبت به حالتی که از الگوریتم کلاسیک ارسال متناوب زمانبندی شده استفاده کنیم تعداد داده بسیار کمتری ارسال میشود که منجر به استفاده کمتری از شبکه ارتباطی و نتیجتاً اثرگذاری کمتر شبکه بر روی داده ها میشود. به این ترتیب اثرات القایی ناشی از شبکه نیز کاهش میابد.

۱-۵. نوآوری رساله

با در نظر گرفتن نتایج خلاصه شده در جدولهای ۱-۱ و ۲-۱، نوآوریهای این رساله به شرح زیر است:

(۱) ارائه الگوریتم رویداد تحریک با در نظر گرفتن اغتشاش ورودی، تاخیر متغیر با زمان، از دست دادن و جابجایی بسته ها، محدودیت پهنای باند شبکه و منابع انرژی سیستم در دو حالت اغتشاش صفرشونده و اغتشاش با کران بالای ثابت مشخص.

(۲) ارائه الگوریتم کنترلی خود تحریک با در نظر گرفتن اغتشاش ورودی، تاخیر متغیر با زمان، از دست دادن و جابجایی بسته ها و محدودیت پهنای باند شبکه و منابع انرژی سیستم در دو حالت اغتشاش صفرشونده و اغتشاش با کران بالای ثابت مشخص.

(۳) ارائه الگوریتم تلفیقی با در نظر گرفتن اغتشاش ورودی، تاخیر متغیر با زمان، از دست دادن و جابجایی بسته ها و محدودیت پهنای باند شبکه و منابع انرژی سیستم در دو حالت اغتشاش صفرشونده و اغتشاش با کران بالای ثابت مشخص.

در کنار نوآوریهای ذکر شده در بالا، کلیه الگوریتمهای پیشنهاد شده در این رساله ویژگیهایی دارند که منجر به کاربردی تر شدن آنها شده است:

- (۱) ارائه الگوریتمها به نحوی که موضوع پدیده Zeno^{۱۳} حل شود.
- (۲) استفاده از کنترل کننده سوئیچ کننده که منجر به ساختاری منعطف تر نسبت به کنترل کننده های معمول با یک بهره ثابت میگردد.
- (۳) ارائه هر یک از الگوریتمهای پیشنهادی با دو مشاهده گر مرتبه کامل و مرتبه کاهش یافته.
- (۴) لحاظ کردن تاخیر متغیر با زمان در هر دو کانال اندازه گیری و محرک.
- (۵) در نظر گرفتن پاسخورد خروجی به جای پاسخورد حالت.
- (۶) در نظر گرفتن معادلات فضای حالت به صورت گسسته.

۱-۶. ساختار کلی

ساختار رساله حاضر به این صورت میباشد:

در فصل دوم الگوریتم پیشنهادی کنترل پیش بین رویداد تحریک ارائه شده است. موثر بودن این روش در پایداری سیستم و کاهش تعداد بسته های ارسال شده در عین حفظ عملکرد سیستم در حضور اغتشاش و نقایص شبکه به کمک نتایج شبیه سازی در پایان فصل نشان داده شده است. فصل سوم به معرفی الگوریتم پیشنهادی کنترل پیش بین خود تحریک اختصاص داده شده است. در این فصل نیز مشابه رویکرد فصل دو، موثر بودن روش پیشنهادی در پایداری سیستم و کاهش تعداد بسته های ارسال شده در عین حفظ عملکرد سیستم در حضور اغتشاش و نقایص شبکه با مثالهای مقایسه ای مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم با تلفیق دو الگوریتم کنترلی رویداد تحریک و خود تحریک، ساختار الگوریتم تلفیقی تبیین شده است. در این فصل قابلیت ساختار معرفی شده جهت پایداری و حفظ پهنای باند و منابع انرژی سیستم مانند فصول قبل با مثالهای مقایسه ای نشان داده شده است. فصل پنجم نیز به نتیجه گیری و معرفی رویکردهای آینده در راستای موضوع رساله اختصاص یافته است.

^{۱۳} Zeno phenomenon

فصل دوم

الگوریتم کنترل پیش بین رویداد تحریک

۲-۱. مقدمه

در این فصل به تشریح الگوریتم ETPC میپردازیم. برای این منظور در بخش اول ابتدا توصیف سیستم مورد بررسی و ساختار مدنظر برای پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی ارائه میگردد. در بخش دوم نتایج اصلی در دو زیر بخش ارائه میگردد و بسته به محدودیت در نظر گرفته شده برای اغتشاش سیستم به ترتیب قضایایی برای پایداری مجانبی سیستم و $UUB^{۱۴}$ بودن متغیرهای حالت سیستم بیان و اثبات شده است. بخش سوم موثر بودن الگوریتمهای پیشنهادی را از طریق مثالهای مقایسه ای نشان میدهد و بخش چهارم به نتیجه گیری این فصل اختصاص یافته است.

۲-۲. توصیف سیستم

در این فصل سیستم کنترل تحت شبکه به صورت زیر توصیف میشود:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + E_1 w_1(k) \quad (۱-۲)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (۲-۲)$$

$$x(\cdot) = x. \quad (۳-۲)$$

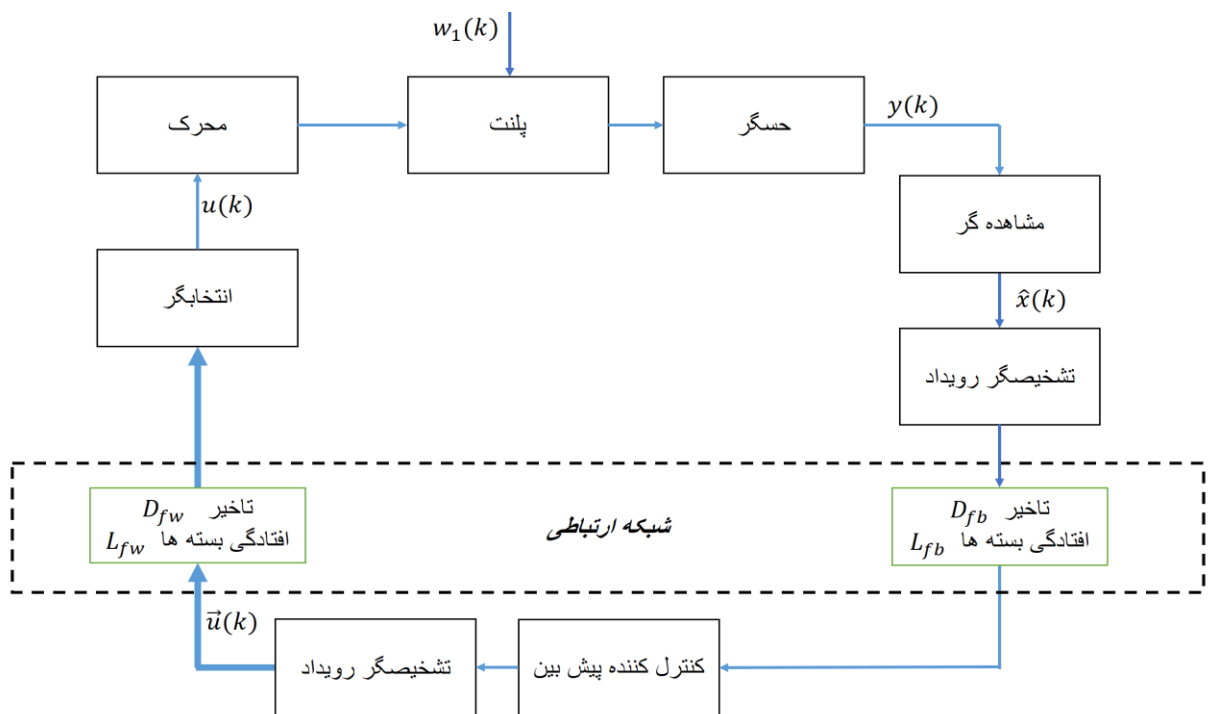
که در آن $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ و $y \in \mathbb{R}^l$ به ترتیب بردار حالت، ورودی کنترلی و خروجی سیستم را نشان میدهند. $w_1 \in \mathbb{R}^p$ بردار اغتشاش ورودی است که به فضای $L_2(0, +\infty)$ تعلق دارد. A, B, C, D و E_1 ماتریسهای ثابت مشخص با ابعاد مناسب هستند. مقدار اولیه بردار حالت سیستم با x نشان داده میشود.

در لحظه k ، $k \in \{1, 2, 3, \dots\}$ مشاهده گر حالت سیستم را بر اساس $y(k)$ نمونه برداری شده تخمین میزند. سپس تشخیصگر رویداد بررسی میکند که رویدادی اتفاق افتاده است یا خیر. اگر رویداد اتفاق افتاده باشد، $y(k)$ از طریق شبکه به کنترل کننده ارسال میشود، در غیراینصورت $y(k)$ نادیده گرفته میشود. کنترل کننده پیش بین براساس آخرین داده دریافت شده، یک دنباله از سیگنالهای کنترلی تولید میکند و دنباله را به محرک ارسال میکند. در سمت محرک، یک انتخابگر وجود دارد که سیگنال کنترلی مناسب را از بین سیگنالهای کنترل پیش بین دریافت شده؛ براساس تاخیر تحمیل شده به آخرین بسته داده دریافت شده؛ انتخاب و به پلنت اعمال میکند.

^{۱۴} Uniformly Ultimately Bounded

ساختار مورد نظر در این فصل برای NCS در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. فرضیات زیر برای این ساختار در نظر گرفته شده اند:

فرض ۱-۲. حسگر، کنترل کننده و محرک متناوباً با دوره های نمونه برداری یکسان T عمل میکنند و بسته های ارسال شده از طریق شبکه برچسب زمانی دارند.



شکل ۱-۲. ساختار پیشنهاد شده برای الگوریتم کنترل پیشبین رویداد تحریک در این رساله

فرض ۲-۲. تاخیر در کانالهای اندازه گیری و محرک به ترتیب با D_{fb} و D_{fw} نشان داده میشوند که هر دو مقادیری متغیر با زمان هستند. حد بالای D_{fb} و D_{fw} به ترتیب D_1 و D_2 است.

فرض ۳-۲. تعداد از دست دادن بسته ها در کانالهای اندازه گیری و محرک به ترتیب توسط L_{fb} و L_{fw} نشان داده میشوند که هر دو مقادیری متغیر با زمان هستند. حد بالای L_{fb} و L_{fw} به ترتیب L_1 و L_2 هستند.

براساس حالت های مختلف اغتشاش وارد شده به سیستم، عملکرد الگوریتم ETPC پیشنهادی در دو حالت بررسی شده است. ابتدا حالتی در نظر گرفته میشود که اغتشاش ورودی کران بالایی به صورت

$$\alpha_1 \|w_1(k)\|_2^2 \leq \beta_1 \|x(k)\|_2^2 \quad (4-2)$$

داشته باشند که در آن α_1 و β_1 مقادیر ثابت هستند. سپس حالتی بررسی میشود که کران بالای اغتشاش ورودی مقدار مشخص β باشد

$$\|w_1(k)\|_2 \leq \beta \quad (5-2)$$

لازم به ذکر است که به دلیل فرض ۱-۲ وقوع پدیده Zeno در ساختار پیشنهادی ممکن نخواهد بود. چرا که زمانی این پدیده رخ میدهد که کران پایینی برای طول بازه نمونه برداری وجود نداشته باشد و در فاصله زمانی کوتاهی بینهایت نمونه برداری انجام شود که از نظر فیزیکی امکانپذیر نخواهد بود. اما در ساختار پیشنهادی فواصل زمانی نمونه برداری و تحریک سیستم حداقل به اندازه T خواهد بود.

۲-۲-۱. مشاهده گر مرتبه کامل

۲-۲-۱-۱. تشخیصگر رویداد مبتنی بر مشاهده گر مرتبه کامل

مشاهده گر پیشنهاد شده در این رساله برای الگوریتم ETPC، مشاهده گر لوئبرگر است که به صورت زیر توصیف میشود:

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(y(k) - C\hat{x}(k)). \quad (6-2)$$

و در آن $\hat{x}(k)$ و $u(k)$ به ترتیب حالت مشاهده گر و ورودی مشاهده گر در لحظه k هستند. ماتریس L در مراحل بعد به گونه ای طراحی میشود که پایداری سیستم تضمین شود. به منظور تعیین ضرورت انتقال آخرین داده نمونه برداری شده، یک تشخیصگر رویداد در نظر گرفته میشود. تشخیصگر رویداد براساس معادله (۷-۲) لحظه مناسب برای ارسال جدیدترین داده نمونه برداری شده را تعیین میکند. به این ترتیب با استفاده از روش کنترلی رویداد تحریک، از اشغال غیر ضروری پهنای باند شبکه و اتلاف منابع انرژی جلوگیری میشود.

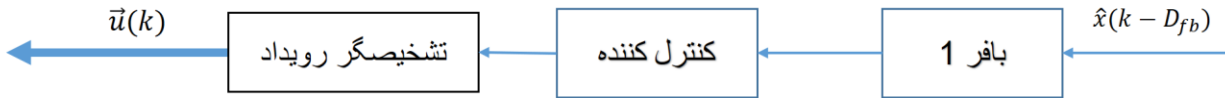
در معادله (۷-۲)، اگر k_i آخرین لحظه ای باشد که یک بسته داده از طریق شبکه ارسال شده است؛ شرط رویداد بیان میکند که پس از آنکه یک بسته داده در لحظه k_i ارسال شد، برای R_1 لحظه نامساوی بررسی میشود. اگر هیچ اعوجاجی در طول این R_1 لحظه رخ نداده باشد، جدیدترین داده نمونه برداری شده در لحظه $k_i + R_1 + 1$ ارسال میشود. بیان ریاضی این شرط به این صورت است

$$k_{i+1} = \min(\min\{k | (\hat{x}(k) - \hat{x}(k_i))^T \Phi_1 (\hat{x}(k) - \hat{x}(k_i)) > \hat{x}^T(k) \Phi_1 \hat{x}(k), k > k_i\}, k_i + R_1 + 1) \quad (7-2)$$

که در آن Φ_1 و Φ_2 ماتریسهای متقارن مثبت معین با مقادیر مشخص هستند.

۲-۱-۲-۲. کنترل کننده پیش بین

ساختار داخلی پیشنهادی کنترل کننده پیش بین در الگوریتم ETPC در شکل ۲-۲ نمایش داده شده است. بلوک “بافر ۱” برای ذخیره سازی آخرین بسته داده دریافت شده از طریق کانال اندازه گیری استفاده میشود. به منظور تعامل با جابجایی بسته ها، به محض دریافت بسته داده در سمت کنترل کننده، برچسب زمانی آن با برچسب زمانی آخرین بسته ذخیره شده در بافر مقایسه میشود. در صورتی که بسته داده دریافت شده جدیدتر از داده موجود در بافر باشد، داده موجود در بافر با داده جدیدتر جایگزین میشود و از این داده جدید برای محاسبه سیگنال کنترلی استفاده میشود. در غیر این صورت آخرین بسته داده دریافت شده نادیده گرفته میشود.



شکل ۲-۲. ساختار داخلی کنترل کننده پیش بین

برای سیستمی بدون تاخیر زمانی، سیگنال کنترلی براساس معادله زیر تولید میشود:

$$u(k_i) = K \cdot \hat{x}(k_i) \quad (۸-۲)$$

که در آن $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ماتریس بهره کنترلی است که بعداً طراحی میشود.

زمانی که داده ارسال شده توسط تاخیر و از دست دادن بسته ها تحت تاثیر قرار میگیرد، یک رویکرد مناسب برای تولید سیگنال کنترلی مناسب توسط کنترل کننده پیش بین، استفاده از کنترل کننده ای با بهره های ثابت متفاوت به صورت زیر است

$$u_{k+j|k-f} = K_{j+f} \hat{x}(k-f) \quad (۹-۲)$$

که در آن $f \in \{1, \dots, D_{fb} + L_{fb}\}$ ، $j = 0, 1, 2, \dots, D_2 + L_2$ سیگنال کنترل پیش بین تولید شده در لحظه k برای j لحظه بعدتر است که براساس داده موجود از لحظه $k-f$ محاسبه شده است. K_j بهره کنترل کننده مورد نظر به منظور پیش بینی سیگنال کنترلی به اندازه j گام جلوتر است.

از آنجایی که سیگنالهای کنترلی قرار است به محرک ارسال شوند و در معرض تاخیر و از دست دادن بسته ها در کانال محرک هستند، سیگنالهای کنترل پیش بین به منظور جبران سازی اثرات احتمالی کانال محرک بر سیگنال

کنترلی مورد نیاز است. در واقع یک سیگنال کنترلی تولید شده براساس بسته ارسال شده توسط تشخیصگر رویداد در لحظه k_i ممکن است در لحظه $(k_i + D_{fb} + L_{fb}(R_1 + 1) + D_{fw} + L_{fw}(R_2 + 1))$ در سمت محرک استفاده شود. به این ترتیب با قرار دادن $N = D_1 + L_1(R_1 + 1) + D_2 + L_2(R_2 + 1)$ ؛ $N + 1$ بهره کنترلی متفاوت باید در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است متغیر R_2 برای مشاهده گر سمت کنترل کننده، نقشی مشابه با متغیر R_1 برای مشاهده گر سمت سنسور دارد.

بسته کنترلی تولید شده توسط کنترل کننده پیش بین به صورت زیر است

$$\vec{u}(k) = [u_{k|k_i}^T \ u_{k+1|k_i}^T \ u_{k+2|k_i}^T \ \dots \ u_{k+l|k_i}^T]^T. \quad (10-2)$$

که در آن k_i لحظه ای را نشان می دهد که در آن جدیدترین داده $(\hat{x}(k_i))$ موجود در سمت کنترل کننده؛ توسط تشخیصگر رویداد ارسال شده بود و l به صورت $l = D_2 + L_2(R_2 + 1)$ است.

رابطه تشخیصگر رویداد در سمت کنترلر مشابه با رابطه بلوک مشابه در سمت مشاهده گر است. اگر k_c آخرین لحظه ای باشد که سیگنال کنترلی برای ارسال بر روی شبکه قرار داده شده است و k_s لحظه ای است که جدیدترین داده در سمت کنترل کننده دریافت شده است.

$$k_{c+1} = \min(\min\{k | (\max(\vec{u}(k_c)) - \min(\vec{u}(k_s)))^T \Phi_2 (\max(\vec{u}(k_c)) - \min(\vec{u}(k_s))) > \min(\vec{u}(k_c)) \Phi_2 \min(\vec{u}(k_c)), k > k_c\}, k_c + R_2 + 1) \quad (11-2)$$

که در آن Φ_2 و Φ_4 ماتریسهای متقارن مثبت معین با مقادیر مشخص هستند.

بنابراین معادلات فضای حالت سیستم را میتوان به صورت زیر بازنویسی نمود

$$x(k+1) = Ax(k) + BK_j \hat{x}(k-i) + E_1 w_1(k) \quad (12-2)$$

همچنین معادله مشاهده گر نیز به صورت زیر است

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + BK_j \hat{x}(k-i) + L(Cx(k) - C\hat{x}(k)) \\ &= (A - LC)\hat{x}(k) + BK_j \hat{x}(k-i) + LCx(k) \end{aligned} \quad (13-2)$$

بنابراین، معادلات فضای حالت مجتمع نتیجه شده NCS به صورت زیر هستند

$$\bar{x}(k+1) = \bar{A}_j \bar{x}(k) + \bar{E}_1 \bar{w}_1(k) \quad (14-2)$$

$$y(k) = \bar{C}\bar{x}(k) \quad (۱۵-۲)$$

که در آن

$$\bar{x}(k) = [x^T(k), x^T(k-1), \dots, x^T(k-N), \hat{x}^T(k), \hat{x}^T(k-1), \dots, \hat{x}^T(k-N)]^T$$

$$\bar{E}_1 = \begin{bmatrix} E_1 & \cdot_{(2N+1)n \times q} \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = [C \quad \cdot_{l \times (2N+1)n}], \quad \bar{w}_1(k) = \begin{bmatrix} w_1(k) \\ \cdot_{q \times 1} \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_j = \begin{bmatrix} A_1 & A_{1j} \\ A_r & A_{rj} \end{bmatrix}$$

و بلوکهای $\bar{A}_j$ به صورت زیر میباشند

$$A_1 = \begin{bmatrix} A & \cdot_{n \times Nn} \\ I_{Nn} & \cdot_{Nn \times n} \end{bmatrix}, \quad A_{1j} = \begin{bmatrix} \cdot_n & BK_j & \cdot_{n \times (N-1)} \\ \cdot_{(N+1)n \times (N+1)n} \end{bmatrix},$$

$$A_r = \begin{bmatrix} LC & \cdot_{n \times Nn} \\ \cdot_{Nn \times (N+1)n} \end{bmatrix}, \quad A_{rj} = \begin{bmatrix} A - LC & \cdot_{n \times (j-1)n} & BK_j & \cdot_{n \times (N-j)} \\ I_{Nn} & \cdot_{Nn \times n} \end{bmatrix}$$

۳-۱-۲-۲. انتخابگر

شکل ۳-۲ ساختار داخلی بلوک انتخابگر را نشان میدهد. بلوک "بافر ۲" برچسب زمانی بسته جدید دریافت شده از طریق کانال محرک را با برچسب بسته موجود در بافر مقایسه میکند. اگر بسته دریافت شده برچسب زمانی جدیدتری داشته باشد، در بافر ذخیره میشود و توسط محرک مورد استفاده قرار میگیرد. در غیر این صورت، نادیده گرفته میشود و بسته موجود در بافر توسط محرک مورد استفاده قرار میگیرد تا زمانی که بسته جدیدتری موجود گردد.



شکل ۳-۲. ساختار داخلی بلوک انتخابگر

انتخابگر سیگنال کنترلی، با توجه به تاخیر وارد شده به سیگنال در طول کانال محرک، سیگنال کنترلی مناسب را از بین عناصر مختلف بسته های دریافت شده توسط کنترل کننده انتخاب میکند.

۲-۲-۲. مشاهده گر مرتبه کاهش یافته

از آنجا که در اغلب سیستمها تعدادی از متغیرهای حالت سیستم را میتوان به کمک سنسور مستقیماً اندازه گیری کرد، نیازی به تخمین آنها نیست. در این سیستمها استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته به جای مشاهده گر مرتبه کامل پیشنهاد میشود. در این بخش روابط سیستم کنترل تحت شبکه با در نظر گرفتن مشاهده گر مرتبه کاهش یافته بازنویسی شده اند. لازم به ذکر است سایر بلوکهای حلقه بسته کاملاً مشابه با حالت قبل (مشاهده گر مرتبه کامل) میباشد.

به منظور تعیین مشاهده گر مرتبه کاهش یافته، بردار متغیرهای حالت سیستم را به صورت $x(k) = \begin{bmatrix} x_a(k) \\ x_b(k) \end{bmatrix}$ در نظر میگیریم. $x_a(k)$ متغیرهای حالتی هستند که از خروجی مستقیماً قابل دستیابی هستند، بنابراین نیازی به تخمین آنها نیست و $x_b(k)$ بردار حاوی سایر متغیرهای حالت سیستم است. به این ترتیب معادلات فضای حالت سیستم را میتوان به صورت زیر بازنویسی کرد

$$\begin{bmatrix} x_a(k+1) \\ x_b(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a(k) \\ x_b(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ B_b \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} E_{1a} \\ E_{1b} \end{bmatrix} w_1(k) \quad (۱۶-۲)$$

$$y(k) = C \begin{bmatrix} x_a(k) \\ x_b(k) \end{bmatrix} \quad (۱۷-۲)$$

که در آن $x_a \in \mathbb{R}^q$, $x_b \in \mathbb{R}^{n-q}$, $A_{aa} \in \mathbb{R}^{q \times q}$, $A_{ab} \in \mathbb{R}^{q \times (n-q)}$, $A_{ba} \in \mathbb{R}^{(n-q) \times q}$, $A_{bb} \in \mathbb{R}^{(n-q) \times (n-q)}$, $B_a \in \mathbb{R}^q$, $B_b \in \mathbb{R}^{n-q}$, $E_{1a} \in \mathbb{R}^q$ و $E_{1b} \in \mathbb{R}^{n-q}$ به ترتیب بردارهای معادلات (۱۶-۲) و (۱۷-۲) به تفکیک ارتباطشان با متغیرهای حالت $x_a(k)$ و $x_b(k)$ هستند. با توجه به معادلات مربوط به دو دسته مختلف متغیرهای حالت،

$$x_a(k+1) - A_{aa}x_a(k) - B_a u(k) - E_{1a}w_1(k) = A_{ab}x_b(k)$$

$$x_b(k+1) - A_{ba}x_a(k) - B_b u(k) - E_{1b}w_1(k) = A_{bb}x_b(k)$$

$$x_b(k+1) = A_{bb}x_b(k) + A_{ba}x_a(k) + B_b u(k) + E_{1b}w_1(k)$$

معادله مربوط به مشاهده گر مرتبه کاهش یافته به صورت زیر در نظر گرفته میشود

$$\hat{x}_b(k+1) = A_{bb}\hat{x}_b(k) + A_{ba}Cx_a(k) + B_b u(k) + L_{ro}C(x_b(k) - \hat{x}_b(k)) \quad (۱۸-۲)$$

که در آن باید ماتریس بهره مشاهده گر L_{ro} به گونه ای تعیین گردد که پایداری سیستم تضمین شود. بازنویسی معادله (۱۸-۲)، معادله (۱۹-۲) را نتیجه میدهد

$$\hat{x}_b(k+1) = (A_{bb} - L_{ro}C)\hat{x}_b(k) + L_{ro}Cx_b(k) + A_{ba}Cx_a(k) + B_bu(k) \quad (۱۹-۲)$$

به منظور به دست آوردن معادله مجتمع فضای حالتی مشابه با معادلات (۱۴-۲) و (۱۵-۲) معادله (۱۹-۲) را به صورت زیر در نظر میگیریم

$$\hat{x}_b(k+1) = (A_{bb} - L_{ro})\hat{x}_b(k) + [A_{ba} \ L_{ro}]Cx(k) + B_b[K_{ja} \ K_{jb}] \begin{bmatrix} x_a(k-i) \\ \hat{x}_b(k-i) \end{bmatrix}$$

که در مرحله بعد داریم

$$\hat{x}_b(k+1) = (A_{bb} - L_{ro})\hat{x}_b(k) + [A_{ba} \ L_{ro}]Cx(k) + B_bK_{ja}x_a(k-i) + B_bK_{jb}\hat{x}_b(k-i) \quad (۲۰-۲)$$

حال با تطبیق معادلات (۱۳-۲) و (۲۰-۲) با یکدیگر، معادلات مجتمع فضای حالت سیستم با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته به صورت زیر به دست می آید:

$$\bar{x}_{ro}(k+1) = \bar{A}_{j-ro}\bar{x}_{ro}(k) + \bar{E}_1\bar{w}_1(k) \quad (۲۱-۲)$$

$$y(k) = \bar{C}\bar{x}_{ro}(k) \quad (۲۲-۲)$$

که در آن

$$\bar{x}_{ro}(k) = [x^T(k), x^T(k-1), \dots, x^T(k-N), \hat{x}_b^T(k), \hat{x}_b^T(k-1), \dots, \hat{x}_b^T(k-N)]^T$$

$$\bar{E}_1 = \begin{bmatrix} E_1 & \cdot_{(2N+1)n \times q} \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = [C \quad \cdot_{l \times (2N+1)n}], \quad \bar{w}_1(k) = \begin{bmatrix} w_1(k) \\ \cdot_{q \times 1} \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_{j-ro} = \begin{bmatrix} A_1 & A_{1j-ro} \\ A_{r-ro} & A_{rj-ro} \end{bmatrix}$$

که بلوکهای ماتریس $\bar{A}_{j-ro}$ به صورت زیر میباشدند

$$A_1 = \begin{bmatrix} A & \cdot_{n \times Nn} \\ I_{Nn} & \cdot_{Nn \times n} \end{bmatrix}, \quad A_{1j-ro} = \begin{bmatrix} n & [B_bK_{ja} \ B_bK_{jb}] & \cdot_{n \times (N-1)} \\ \cdot_{(N+1)n \times (N+1)n} \end{bmatrix},$$

$$A_{r-ro} = \begin{bmatrix} [A_{ba}C \ L_{ro}C] & \cdot_{n \times (j-1)n} & [B_bK_{ja} \ \cdot_{n \times (n-q)}] & \cdot_{n \times (N-j)n} \\ \cdot_{Nn \times (N+1)n} \end{bmatrix},$$

$$A_{\epsilon j-ro} = \begin{bmatrix} A_{bb} - L_{ro} & \cdot_{n \times (j-1)n} & B_b K_{jb} & \cdot_{n \times (N-j)n} \\ I_{Nn} & \cdot_{Nn \times n} & & \end{bmatrix}$$

۳-۲. نتایج اصلی

لم ۲-۱. [۴۳] (متمم شور) برای یک ماتریس متقارن به صورت $L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{12}^T & L_{22} \end{bmatrix}$ ، عبارات زیر معادل هستند:

$$(۱) L < 0.$$

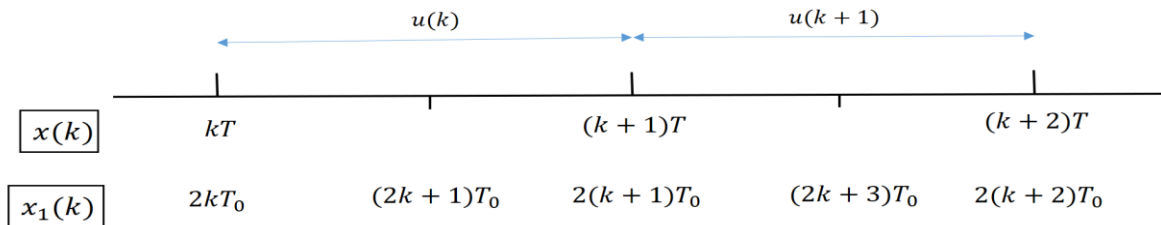
$$(۲) L_{11} < 0, L_{22} - L_{12}^T L_{11}^{-1} L_{12} < 0.$$

$$(۳) L_{22} < 0, L_{11} - L_{12} L_{22}^{-1} L_{12}^T < 0.$$

در این بخش هر یک از حالت‌هایی که بهره متفاوتی از کنترل کننده برای محاسبه سیگنال کنترلی مورد استفاده قرار گرفته باشد، به عنوان یک زیر سیستم برای سیستم اصلی در نظر گرفته شده است و نماد $\sigma(k)$ به معنی زیر سیستم فعال در لحظه k است. در قضایای ارائه شده در ادامه، ابتدا پایداری هریک از زیر سیستم‌ها به تنهایی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس پایداری در زمان تغییر زیر سیستم‌ها هم مدنظر قرار داده شده است. به منظور اثبات برقراری پایداری در لحظات تغییر وضعیت میان زیر سیستم‌ها، از معادلات فضای حالت (۲-۱) تا (۳-۲) در سیستم جدیدی استخراج شده است که مقادیر سیستم اصلی را نیز دربردارد. در این حالت طبق لم ۲-۲ در صورت همگرایی مقادیر متغیرهای سیستم جدید به نقطه پایداری، مقادیر متغیرهای سیستم اولیه هم لزوماً به همان نقطه پایداری همگرا میشوند.

لم ۲-۲. [۳۹] اگر یک دنباله به حد مشخصی همگرا شود، هر زیردنباله آن نیز به همان حد همگرا میشود.

در این حالت نیازمند روابط بین بازه ای برای متغیرهای حالت سیستم هستیم. به این منظور نمودار زمانی زیر را در نظر بگیرید:



شکل ۴-۲. رابطه میان متغیرهای حالت x و x_1

در شکل ۴-۲ $x(k)$ بردار متغیرهای حالت سیستم است که روابط (۱-۲) تا (۳-۲) براساس آن نوشته شده اند. با توجه به تغییرات $x(k)$ ، $x_1(k)$ را به نحوی تعریف میکنیم که در لحظات kT ($k = 0, 1, 2, \dots$) مقدار آن با $x(k)$ یکسان باشد. تفاوت $x_1(k)$ با $x(k)$ در دوره تناوب آنهاست که برای $x_1(k)$ نصف $x(k)$ است یعنی $T = 2T$.

در صورتی که رابطه مربوط به سیستم دوم را به صورت

$$x_1(k+1) = A_1 x_1(k) + B_1 u_1(k) + E_1 w_1(k) \quad (23-2)$$

$$y_1(k+1) = C_1 x_1(k+1) \quad (24-2)$$

در نظر بگیریم از آنجایی که $x_1(k+1)$ در واقع به صورت $x_1((k+1)T)$ است، زمانی که بخواهیم مقدار $x(k)$ و $x_1(k)$ در لحظات kT یکسان باشند در واقع باید داشته باشیم

$$x_1(2k) = x(k). \quad (25-2)$$

در این صورت میتوان نوشت

$$x_1(2k+2) = A_1 x_1(2k+1) + B_1 u_1(2k+1) + E_1 w_1(2k+1) \quad (26-2)$$

با استفاده از رابطه بازگشتی خواهیم داشت

$$x_1(2k+2) = A_1^2 x_1(2k) + (A_1 + I)B_1 u_1(2k) + A_1 E_1 w_1(2k) + E_1 w_1(2k+1) \quad (27-2)$$

با فرض آنکه $w_1(2k+1) = w_1(2k) = w_1(k)$ به منظور برقراری رابطه (۲۵-۲) باید داشته باشیم

$$A_1^2 = A, (A_1 + I)B_1 = B, A_1 E_1 + E_1 = E_1 \quad (28-2)$$

با فرض معکوس پذیری ماتریس $(A_1 + I)$ و مربع کامل بودن ماتریس A خواهیم داشت

$$A_1 = \sqrt{A}, B_1 = (A_1 + I)^{-1} B, E_1 = (A_1 + I)^{-1} E \quad (29-2)$$

در سیستم مورد بررسی برای تعیین سیگنال کنترلی از رابطه

$$u_1(2k) = K_j \hat{x}_1(2k - 2j) \quad (30-2)$$

بهره میبریم. همچنین داریم

$$u_1(2k+1) = u_1(2k) \quad (31-2)$$

به این ترتیب رابطه (۲-۲۵) برقرار میشود. حال براساس رابطه به دست آمده برای x_1 ، میتوان نوشت

$$\begin{aligned} x_1(2k+1) &= A_1^T x_1(2k-1) + A_1 B_1 u_1(2k-1) + B_1 u_1(2k) + A_1 E_1 w_1(2k-1) \\ x_1(2k+1) &= A_1^T x_1(2k-1) + A_1 B_1 K_{\sigma(k-1)} \hat{x}_1(2k-2-2i) + B_1 K_{\sigma(k)} \hat{x}_1(2k-2-2l) + \\ &\quad A_1 E_1 w_1(2k-1) \end{aligned} \quad (32-2)$$

حال نوبت به تطبیق مشاهده گر برای سیستم جدید میرسد:

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + BK_j \hat{x}(k-i) + L(Cx(k) - C\hat{x}(k))$$

$$\hat{x}_1(2k+2) = (A - LC)\hat{x}_1(2k) + BK_j \hat{x}_1(2k-2i) + LCx_1(2k) \quad (33-2)$$

$$\hat{x}_1(2k+2) = (\hat{A}_1 - \hat{L}_1 \hat{C}_1) \hat{x}_1(2k+1) + \hat{B}_1 u_1(2k+1) + \hat{L}_1 \hat{C}_1 x_1(2k)$$

$$\hat{x}_1(2k+1) = (\hat{A}_1 - \hat{L}_1 \hat{C}_1) \hat{x}_1(2k) + \hat{B}_1 u_1(2k) + \hat{L}_1 \hat{C}_1 x_1(2k)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_1(2k+2) &= (\hat{A}_1 - \hat{L}_1 \hat{C}_1) \left((\hat{A}_1 - \hat{L}_1 \hat{C}_1) \hat{x}_1(2k) + \hat{B}_1 u_1(2k) + \hat{L}_1 \hat{C}_1 x_1(2k) \right) + \hat{B}_1 u_1(2k+1) \\ &\quad + \hat{L}_1 \hat{C}_1 x_1(2k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_1(2k+2) &= (\hat{A}_1 - \hat{L}_1 \hat{C}_1)^T \hat{x}_1(2k) + \left((\hat{A}_1 - \hat{L}_1 \hat{C}_1) \hat{L}_1 \hat{C}_1 + \hat{L}_1 \hat{C}_1 \right) x_1(2k) \\ &\quad + \left((\hat{A}_1 - \hat{L}_1 \hat{C}_1) \hat{B}_1 \right) u_1(2k) + \hat{B}_1 u_1(2k+1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= (\hat{A}_1 - \hat{L}_1 \hat{C}_1)^T \hat{x}_1(2k) + \left((\hat{A}_1 - \hat{L}_1 \hat{C}_1) \hat{L}_1 \hat{C}_1 + \hat{L}_1 \hat{C}_1 \right) x_1(2k) + \left((\hat{A}_1 - \hat{L}_1 \hat{C}_1) \hat{B}_1 + \hat{B}_1 \right) u_1(2k) \\ &\quad (34-2) \end{aligned}$$

برای آنکه داشته باشیم

$$\hat{x}_1(2k) = \hat{x}(2k) \quad (35-2)$$

با تطبیق روابط (۲-۳۳) و (۲-۳۴) باید داشته باشیم

$$(\hat{A}_1 - \hat{L}_1 \hat{C}_1)^T = A - LC, \quad (\hat{A}_1 - \hat{L}_1 \hat{C}_1) \hat{L}_1 \hat{C}_1 + \hat{L}_1 \hat{C}_1 = LC, \quad (\hat{A}_1 - \hat{L}_1 \hat{C}_1) \hat{B}_1 + \hat{B}_1 = B$$

در صورتی که ماتریسهایی با ابعاد مناسب وجود داشته باشند که روابط بالا برقرار شوند؛ آنگاه تطبیق مشاهده گرها هم محقق میشود. لازم به ذکر است از روابط گذشته تساوی $\hat{C}_1 = C_1 = C$ به دست می آید.

حال با در دست داشتن روابط مربوط به سیستم $\mathcal{X}_1$ معادلات مجتمع فضای حالت این سیستم را مینویسیم.

$$x_1(rk - 1) = A_1 x_1(rk - 2) + B_1 K_{\sigma(k-r)} \hat{x}_1(rk - 2 - r\sigma(k - r)) + E_r w_r(rk - 2)$$

$$x_1(rk) = A_1 x_1(rk - 1) + B_1 K_{\sigma(k-r)} \hat{x}_1(rk - 2 - r\sigma(k - 1)) + E_r w_r(rk - 2)$$

$$\Rightarrow x_1(k + 1) = A_1 x_1(k) + B_1 K_{\sigma(\rho_k)} \hat{x}_1(\omega_k) + E_r w_r(\varphi_k),$$

$$\rho_k = \left\lfloor \frac{k-1}{r} \right\rfloor, \varphi_k = k - \text{mod}(k, r), \omega_k = \varphi_k - r\sigma(\rho_k)$$

$$\hat{x}_1(rk) = (A - LC) \hat{x}_1(rk - r) + BK_{\sigma(\rho_k)} \hat{x}_1(rk - r\sigma(\rho_k) - r) + LC x_1(rk - r)$$

$$y_1(k) = C_1 x_1(k)$$

$$\bar{x}_1(k + 1) = \bar{A}_{\sigma(\rho_k)} \bar{x}_1(k) + \bar{E}_r \bar{w}_r(k) \quad (36-2)$$

$$\bar{y}_1(k + 1) = \bar{C} \bar{x}_1(k + 1) \quad (37-2)$$

که در آن با قرار دادن $k_m = k + \text{mod}(k, r)$ خواهیم داشت

$$\bar{x}_1(k + 1) = [x_1^T(k + 1), x_1^T(k_m - r), \hat{x}_1^T(k_m), \hat{x}_1^T(k_m - r), \dots, \hat{x}_1^T(k_m - rN)]^T.$$

$$\bar{E}_r = \begin{bmatrix} E_r \\ E_r \\ \vdots \end{bmatrix}_{(rN+1)n \times q}^T, \quad \bar{C} = [\hat{C}_1 \quad \vdots]_{l \times (rN+1)n}, \quad \bar{w}_r(k) = \begin{bmatrix} w_r(\varphi_k) \\ w_r(\varphi_{k_m-r}) \\ \vdots \end{bmatrix}_{q \times 1}.$$

$$\bar{y}_1(k + 1) = [y_1(k + 1)]$$

$$\bar{A}_{\sigma(\rho_k)} = \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \bar{A}_{r\sigma(\rho_k)} \\ \bar{A}_r & \bar{A}_{r\sigma(\rho_k)} \end{bmatrix}$$

که در آن

$$\bar{A}_1 = \begin{bmatrix} A_1 & \vdots \\ \vdots & A_1^{-\text{mod}(k)} \end{bmatrix}_{n \times n}, \bar{A}_{r\sigma(\rho_k)} = \begin{bmatrix} \vdots & B_1 K_{\sigma(\rho_k)} & \vdots \\ \vdots & B_1 K_{\sigma(\rho_k)} \times (1 - \text{mod}(k)) & \vdots \end{bmatrix}_{n \times (N - \omega_{k-r-1})n}.$$

$$\bar{A}_r = \begin{bmatrix} LC(1 - \text{mod}(k)) & \vdots \\ \vdots & Nn \times rn \end{bmatrix}_{n \times n}.$$

$$\bar{A}_{\sigma(\rho_k)} = \begin{bmatrix} (A - LC)^{(\cdot - \text{mod}(k))} & \cdot_{n \times (\sigma(\rho_k) - \cdot)n} & BK_{\sigma(\rho_k)} \times (\cdot - \text{mod}(k)) & \cdot_{n \times (N - \sigma(\rho_k))} \\ I_{n \times n}(\cdot - \text{mod}(k)) & I_{n \times n} \times \text{mod}(k) & \cdot & 0 \\ \cdot & I_{n \times n}(\cdot - \text{mod}(k)) & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & I_{n \times n} \times \text{mod}(k) & 0 \\ 0 & 0 & I_{n \times n}(\cdot - \text{mod}(k)) & I_{n \times n} \times \text{mod}(k) \end{bmatrix}$$

لازم به ذکر است $\sigma(i)$ نشان دهنده زیر سیستم فعال در لحظه i ام است.

مشابه با روشی که در بخش قبل به منظور به دست آوردن معادلات مجتمع فضای حالت سیستم با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته شرح داده شد؛ در این بخش هم معادلات مجتمع فضای حالت سیستم x_1 را با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته مینویسیم و متغیرهای حالت این سیستم را x_{1-ro} مینامیم.

$$\bar{x}_{1-ro}(k+1) = \bar{A}_{\sigma(\rho_k)-ro} \bar{x}_{1-ro}(k) + \bar{E}_r \bar{w}_r(k) \quad (38-2)$$

$$\bar{y}_1(k+1) = \bar{C} \bar{x}_{1-ro}(k+1) \quad (39-2)$$

که در آن با قرار دادن $k_m = k + \text{mod}(k, 2)$ خواهیم داشت

$$\bar{x}_1(k+1) = [x_1^T(k+1) x_1^T(k_m - 2), \hat{x}_1^T(k_m), \hat{x}_{1b}^T(k_m - 2), \dots, \hat{x}_{1b}^T(k_m - 2N)]^T,$$

$$\bar{A}_{\sigma(\rho_k)-ro} = \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \bar{A}_{r_{\sigma(\rho_k)}-ro} \\ \bar{A}_{r-ro} & \bar{A}_{\sigma(\rho_k)-ro} \end{bmatrix}$$

که در آن

$$\bar{A}_1 = \begin{bmatrix} A_1 & \cdot_{n \times n} \\ A_1 & \cdot_{n \times n} \end{bmatrix}, \bar{A}_{r_{\sigma(\rho_k)}-ro} = \begin{bmatrix} \cdot_n & [B_{1b} K_{\sigma(\rho_k)a} & B_{1b} K_{\sigma(\rho_k)b}] & \cdot_{n \times (N-1)} \\ \cdot_{n \times (N+1)n} & \cdot_{n \times (N+1)n} \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_{r-ro} = \begin{bmatrix} \cdot_{n \times n} & [A_{ba}C + B_b K_{\sigma(\rho_k)} & L_{ro}C] \\ \cdot_{2Nn \times 2n} & \cdot_{2Nn \times 2n} \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_{\sigma(\rho_k)-ro} = \begin{bmatrix} A_{bb} - L_{ro} & \cdot_{n \times (\sigma(\rho_k) - \cdot)n} & B_b K_{\sigma(\rho_k)b} & \cdot_{n \times (N - \sigma(\rho_k))} \\ I_{Nn} & \cdot_{Nn \times n} & \cdot_{Nn \times n} & \cdot_{Nn \times n} \end{bmatrix}$$

در ادامه قضایایی برای محاسبه بهره های کنترل کننده و مشاهده گر بیان و اثبات میشود به نحوی که پایداری سیستم تضمین شود. حالت اول شرایطی را بررسی میکند که کران بالای اغتشاش ورودی براساس رابطه (۴-۲) تعیین میشود و حالت دوم شرایطی است که کران بالای اغتشاش ورودی براساس رابطه (۵-۲) مقداری ثابت و مشخص است.

۲-۳-۱. حالت اول اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کامل

قضیه ۱-۲. اگر $\lambda < 1$ مقدار ثابت مثبت مشخص باشد و ماتریسهای K_j و L ($j \in \bar{N} = \{0, 1, 2, \dots, N\}$) و ماتریسهای متقارن مثبت معین P_j و Q_j با ابعاد مناسب موجود باشند به گونه ای که

$$\begin{bmatrix} Q_j - \lambda^\gamma P_j + \frac{\beta_1}{\alpha_1} I & * & * & * \\ 0 & -\lambda^\gamma Q_j & * & * \\ 0 & \cdot & -I & * \\ \bar{A}_{\sigma(\rho_k)} & 0 & \bar{E}_\gamma & -P_j \end{bmatrix} < 0. \quad (40-2)$$

و

$$, \mu Q_r \geq Q_s, \mu P_r \geq P_s; \quad r, s \in \bar{N} \quad (41-2)$$

آنگاه سیستم توصیف شده توسط معادلات (۱-۳) و (۲-۳) و (۳-۳) کنترل کننده پیش بین (۳-۳) به صورت نمایی با نرخ کاهش نمایی $\vartheta = \lambda \mu^{\frac{1}{\tau}}$ پایدار است که در آن τ زمان سکون متوسط است که در رابطه $\tau > \frac{\ln \mu}{\gamma \ln \lambda^{-1}}$ صدق میکند.

اثبات. تابع لیاپانوف چندگانه به صورت

$$V_j(k) = \bar{x}_1^T(k) P_j \bar{x}_1(k) + \bar{x}_1^T(k-1) Q_j \bar{x}_1(k-1) \quad (42-2)$$

را انتخاب میکنیم که در آن $V_j(k)$ زمانی است که سیستم در i مین بازه کنترلی با K_j به عنوان اولین بهره کنترلی فعال است. از روابط (۲-۳۳) و (۲-۳۴) داریم

$$\begin{aligned} V_j(k+1) - \lambda^\gamma V_j(k) &= \bar{x}_1^T(k+1) P_j \bar{x}_1(k+1) + \bar{x}_1^T(k) (Q_j - \lambda^\gamma P_j) \bar{x}_1(k) - \lambda^\gamma \bar{x}_1^T(k-1) Q_j \bar{x}_1(k-1) \\ &= [\bar{A}_{\sigma(\rho_k)} \bar{x}_1(k) + \bar{E}_\gamma \bar{w}_\gamma(k)]^T P_j [\bar{A}_{\sigma(\rho_k)} \bar{x}_1(k) + \bar{E}_\gamma \bar{w}_\gamma(k)] \\ &\quad + \bar{x}_1^T(k) (Q_j - \lambda^\gamma P_j) \bar{x}_1(k) - \lambda^\gamma \bar{x}_1^T(k-1) Q_j \bar{x}_1(k-1) \end{aligned}$$

با استفاده از رابطه (۴-۲) داریم

$$\begin{aligned}
 & V_j(k+1) - \lambda^r V_j(k) \\
 & \leq [\bar{A}_{\sigma(\rho_k)} \bar{x}_\lambda(k) + \bar{E}_r \bar{w}_r(k)]^T P_j [\bar{A}_{\sigma(\rho_k)} \bar{x}_\lambda(k) + \bar{E}_r \bar{w}_r(k)] \\
 & + \bar{x}_\lambda^T(k) (Q_j - \lambda^r P_j) \bar{x}_\lambda(k) - \lambda^r \bar{x}_\lambda^T(k-1) Q_j \bar{x}_\lambda(k-1) - \|\bar{w}_r(k)\|_r^2 + \frac{\beta_\lambda}{\alpha_\lambda} \|\bar{x}_\lambda(k)\|_r^2 \\
 & = \begin{bmatrix} \bar{x}_\lambda(k)^T \\ \bar{x}_\lambda(k-1)^T \\ \bar{w}_r(k)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{A}_{\sigma(\rho_k)}^T P_j \bar{A}_{\sigma(\rho_k)} + Q_j - \lambda^r P_j + \frac{\beta_\lambda}{\alpha_\lambda} I & \cdot & \bar{A}_{\sigma(\rho_k)}^T P_j \bar{E}_r \\ * & -\lambda^r Q_j & \cdot \\ * & * & \bar{E}_r^T P_j \bar{E}_r - I \end{bmatrix} \times \\
 & [\bar{x}_\lambda(k) \quad \bar{x}_\lambda(k-1) \quad \bar{w}_r(k)]
 \end{aligned}$$

با استفاده از لم ۱-۲ و ضرب کردن ماتریسهای مناسب از چپ و راست داریم

$$\begin{aligned}
 V_j(k+1) - \lambda^r V_j(k) & \leq \begin{bmatrix} Q_j - \lambda^r P_j + \frac{\beta_\lambda}{\alpha_\lambda} I & * & * \\ \cdot & -\lambda^r Q_j & * \\ \cdot & \cdot & -I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{A}_{\sigma(\rho_k)}^T P_j \\ \cdot \\ \bar{E}_r^T P_j \end{bmatrix} P_j^{-1} [P_j \bar{A}_{\sigma(\rho_k)} \quad \cdot \quad P_j \bar{E}_r] \\
 & = \begin{bmatrix} Q_j - \lambda^r P_j + \frac{\beta_\lambda}{\alpha_\lambda} I & * & * & * \\ 0 & -\lambda^r Q_j & * & * \\ 0 & \cdot & -I & * \\ P_j \bar{A}_{\sigma(\rho_k)} & 0 & P_j \bar{E}_r & -P_j \end{bmatrix} \\
 V_j(k+1) - \lambda^r V_j(k) & \leq \begin{bmatrix} Q_j - \lambda^r P_j + \frac{\beta_\lambda}{\alpha_\lambda} I & * & * & * \\ 0 & -\lambda^r Q_j & * & * \\ 0 & \cdot & -I & * \\ \bar{A}_{\sigma(\rho_k)} & 0 & \bar{E}_r & -P_j \end{bmatrix} \quad (۴۳-۲)
 \end{aligned}$$

بنابراین اگر نامساوی (۴۰-۲) برقرار باشد داریم

$$V_j(k+1) - \lambda^r V_j(k) < \cdot \quad (۴۴-۲)$$

این رابطه نشان میدهد که $V_j(k)$ همواره به صورت نمایی کاهش میابد و برای هر $k \in [k_i, k_{i+1})$

$$V_{\sigma(k)}(k) < \lambda^{r(k-k_i)} V_{\sigma(k_i)}(k_i). \quad (۴۵-۲)$$

از آنجایی که در متغیرهای حالت سیستم در لحظات سوئیچینگ پرش رخ نمیدهد با استفاده از (۴۱-۲) داریم

$$V_{\sigma(k_i)}(k_i) \leq \mu V_{\sigma(k_i^-)}(k_i^-) \quad (46-2)$$

بنابراین خواهیم داشت

$$\begin{aligned} V_{\sigma(k)}(k) &= V_{\sigma(k_i)}(k) \\ &\leq \lambda^{\tau(k-k_i)} V_{\sigma(k_i)}(k_i) \\ &< \mu \lambda^{\tau(k-k_i)} V_{\sigma(k_i^-)}(k_i^-) \\ &\leq \mu \lambda^{\tau(k-k_{i-1})} V_{\sigma(k_{i-1})}(k_{i-1}) \\ &\leq \mu^{\tau} \lambda^{\tau(k-k_i)} \lambda^{\tau(k_i-k_{i-2})} V_{\sigma(k_{i-2})}(k_{i-2}) \\ &\vdots \\ &\leq \mu^i \lambda^{\tau(k-k_i)} \lambda^{\tau(k_i-k_{i-2})} \dots \lambda^{\tau(k_1-k_0)} V_{\sigma(k_0)}(k_0) \\ &\leq \mu^{\frac{k-k_0}{\tau}} \lambda^{\tau(k-k_0)} V_{\sigma(k_0)}(k_0) \\ &= \vartheta^{\tau(k-k_0)} V_{\sigma(k_0)}(k_0) \end{aligned} \quad (47-2)$$

با تعریف متغیرهای $\varepsilon_{\tau} = \min_i \{\lambda_{\min}(Q_i)\}$ و $\varepsilon_{\tau} = \max_i \{\lambda_{\max}(P_i)\}$ ، $\varepsilon_1 = \min_i \{\lambda_{\min}(P_i)\}$ داریم

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 \|x_1(\tau k)\|^{\tau} + \varepsilon_1 \|x_1(\tau k - 1)\|^{\tau} &\leq \varepsilon_1 \|\bar{x}_1(k+1)\|^{\tau} + \varepsilon_{\tau} \|\bar{x}_1(k)\|^{\tau} \leq V_{\sigma(k)}(k) \\ &< \varepsilon_{\tau} \vartheta^{\tau(k-k_0)} \|\bar{x}_1(k_0+1)\|^{\tau} \end{aligned}$$

با استفاده از معادلات زیر کران بالایی برای $\|\bar{x}(k)\|^{\tau}$ به دست می آید.

$$\|\bar{x}_1(k_0+1)\|^{\tau} = \|x_1(\tau k_0+1)\|^{\tau} + \|\hat{x}_1(\tau k_0+1)\|^{\tau} \quad (48-2)$$

$$Cx_1(\tau k_0+1) = y_1(\tau k_0+1)$$

$$\|x_1(\tau k_0+1)\| = \frac{1}{\|C\|} \|y_1(\tau k_0+1)\|$$

$$\Rightarrow \|\bar{x}_1(k_0+1)\|^{\tau} \leq \|\hat{x}_1(\tau k_0+1)\|^{\tau} + \frac{1}{\|C\|} \|y_1(\tau k_0+1)\| \quad (49-2)$$

آنگاه

$$\varepsilon_1 \|x_1(k)\|^2 \leq \varepsilon_1 \vartheta^{2(k-k_0)} (\|\hat{x}_1(2k_0+1)\|^2 + \frac{1}{\|c\|} \|y_1(2k_0+1)\|) \quad (50-2)$$

از آنجایی که $\vartheta < 1$ ، اثبات کامل میشود.

■

۲-۳-۲. حالت دوم اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کامل

اکنون حالتی را بررسی میکنیم که کران بالای نرم اغتشاش ورودی مقداری ثابت فرض شده است که به صورت رابطه (۵-۲) نشان داده میشود. قضیه ۲-۲ روشی برای تعیین بهره های کنترل کننده و مشاهده گر نشان میدهد به گونه ای که پایداری UUB متغیرهای سیستم تضمین شود.

قضیه ۲-۲. اگر $\lambda < 1$ و $\mu \geq 1$ دو مقدار ثابت مثبت مشخص باشند و ماتریسهای K_j ($j \in \bar{N} = \{0, 1, \dots, N\}$) و L و ماتریس متقارن مثبت معین P با ابعاد مناسب موجود باشند به گونه ای که

$$\begin{bmatrix} -(1-\delta)P & * & * \\ \cdot & -I & * \\ P\bar{A}_{\sigma(\rho_k)} & P\bar{E}_1 & -P \end{bmatrix} < 0. \quad (51-2)$$

آنگاه متغیرهای سیستم توصیف شده توسط معادلات (۳۶-۲) و (۳۷-۲) و کنترل کننده پیش بین (۹-۲) پایدار UUB هستند.

اثبات. تابع لیاپانوف چندگانه به صورت

$$V_j(k) = \bar{x}_1^T(k+1)P\bar{x}_1(k+1)$$

را انتخاب میکنیم که در آن $V_j(k)$ زمانی است که سیستم در $\bar{A}_{\sigma(\rho_k)}$ با K_j به عنوان بهره کنترلی فعال است. در این صورت

$$\begin{aligned} V_j(k+1) - V_j(k) &= \bar{x}_1^T(k+1)P\bar{x}_1(k+1) - \bar{x}_1^T(k)P\bar{x}_1(k) \\ &= [\bar{A}_{\sigma(\rho_k)}\bar{x}_1(k) + \bar{E}_1\bar{w}_1(k)]^T P [\bar{A}_{\sigma(\rho_k)}\bar{x}_1(k) + \bar{E}_1\bar{w}_1(k)] - \bar{x}_1^T(k)P\bar{x}_1(k) \\ &= [\bar{A}_{\sigma(\rho_k)}\bar{x}_1(k) + \bar{E}_1\bar{w}_1(k)]^T P [\bar{A}_{\sigma(\rho_k)}\bar{x}_1(k) + \bar{E}_1\bar{w}_1(k)] + \bar{x}_1^T(k)(\delta-1)P\bar{x}_1(k) \\ &\quad - \delta\bar{x}_1^T(k)P\bar{x}_1(k) - \|\bar{w}_1(k)\|_1^2 + \beta \\ &= [\bar{A}_{\sigma(\rho_k)}\bar{x}_1(k) + \bar{E}_1\bar{w}_1(k)]^T P [\bar{A}_{\sigma(\rho_k)}\bar{x}_1(k) + \bar{E}_1\bar{w}_1(k)] + \bar{x}_1^T(k)(\delta-1)P\bar{x}_1(k) \\ &\quad - \|\bar{w}_1(k)\|_1^2 - \delta V_j(k) + \beta \end{aligned} \quad (52-2)$$

از آنجا که

$$\begin{aligned} & [\bar{A}_{\sigma(\rho_k)} \bar{x}_1(k) + \bar{E}_\gamma \bar{w}_\gamma(k)]^T P [\bar{A}_{\sigma(\rho_k)} \bar{x}_1(k) + \bar{E}_\gamma \bar{w}_\gamma(k)] - \bar{x}^T(k) (\mathbf{1} - \delta) P \bar{x}_1(k) - \|\bar{w}_\gamma(k)\|_\gamma^2 \\ &= \begin{bmatrix} \bar{x}_1(k)^T \\ \bar{w}_\gamma(k)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{A}_{\sigma(\rho_k)}^T P \bar{A}_{\sigma(\rho_k)} - (\mathbf{1} - \delta) P & \bar{A}_{\sigma(\rho_k)}^T P \bar{E}_\gamma \\ * & \bar{E}_\gamma^T P \bar{E}_\gamma - I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_1(k) \\ \bar{w}_\gamma(k) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

با استفاده از لم ۱-۲ داریم

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \bar{A}_{\sigma(\rho_k)}^T P \bar{A}_{\sigma(\rho_k)} - (\mathbf{1} - \delta) P & \bar{A}_{\sigma(\rho_k)}^T P \bar{E}_\gamma \\ * & \bar{E}_\gamma^T P \bar{E}_\gamma - I \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -(\mathbf{1} - \delta) P & \cdot \\ * & -I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{A}_{\sigma(\rho_k)}^T P \\ \bar{E}_\gamma^T P \end{bmatrix} P^{-1} \begin{bmatrix} P \bar{A}_{\sigma(\rho_k)} & P \bar{E}_\gamma \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -(\mathbf{1} - \delta) P & * & * \\ \cdot & -I & * \\ P \bar{A}_{\sigma(\rho_k)} & P \bar{E}_\gamma & -P \end{bmatrix} \quad (53-2) \end{aligned}$$

منفی معین بودن ماتریس (53-2) معادل برقراری رابطه (51-2) است. بر مبنای روابط (52-2) و (5-2) نتیجه میگیریم $\Delta V_j(k) < -\delta V_j(k) + \beta$ بنابراین

$$V_j(k+1) < V_j(k) - \delta V_j(k) + \beta = (\mathbf{1} - \delta) V_j(k) + \beta \quad (54-2)$$

برای هر $k \in [k_i, k_{i+1})$

$$V_{\sigma(k_i)}(k) < (\mathbf{1} - \delta)^{k-k_i} V_{\sigma(k_i)}(k_i) + \sum_{l=\cdot}^{k-k_i-1} (\mathbf{1} - \delta)^l \beta \quad (55-2)$$

از آنجا که $V_{\sigma(k)}(k) = V_{\sigma(k_i)}(k)$

$$V_{\sigma(k)}(k) < (\mathbf{1} - \delta)^{k-k_i} V_{\sigma(k_i)}(k_i) + \sum_{l=\cdot}^{k-k_i-1} (\mathbf{1} - \delta)^l \beta$$

در متغیرهای حالت سیستم در لحظات سوئیچینگ پرش رخ نمیدهد بنابراین

$$V_{\sigma(k_i)}(k_i) = V_{\sigma(k_i^-)}(k_i^-)$$

به این ترتیب میتوان نوشت

$$V_{\sigma(k)}(k) = V_{\sigma(k_i)}(k)$$

$$\begin{aligned}
&< (1 - \delta)^{k-k_i} V_{\sigma(k_i)}(k_i) + \sum_{l=.}^{k-k_i-1} (1 - \delta)^l \beta \\
&= (1 - \delta)^{k-k_i} V_{\sigma(k_i^-)}(k_i^-) + \sum_{l=.}^{k-k_i-1} (1 - \delta)^l \beta \\
&< (1 - \delta)^{k-k_{i-1}} V_{\sigma(k_{i-1})}(k_{i-1}) + \sum_{l=.}^{k-k_{i-1}-1} (1 - \delta)^l \beta \\
&\vdots \\
&< (1 - \delta)^{k-k.} V.(k.) + \sum_{l=.}^{k-k.-1} (1 - \delta)^l \beta
\end{aligned} \tag{56-2}$$

معادل رابطه (56-2) را میتوان به صورت زیر نوشت

$$V_{\sigma(k)}(k) < (1 - \delta)^{k-k.} V.(k.) + \frac{\beta}{\delta} \tag{57-2}$$

با تعریف متغیرهای $\varepsilon_r = \min_i \{\lambda_{\min}(Q_i)\}$ و $\varepsilon_r = \max_i \{\lambda_{\max}(P_i)\}$ ، $\varepsilon_1 = \min_i \{\lambda_{\min}(P_i)\}$ داریم

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 \|x_1(rk)\|^r + \varepsilon_1 \|x_1(rk-1)\|^r &\leq \varepsilon_1 \|\bar{x}_1(k+1)\|^r + \varepsilon_r \|\bar{x}_1(k)\|^r \leq V_{\sigma(k)}(k) < \\
&\varepsilon_r \vartheta^{r(k-k.)} \|\bar{x}_1(k.+1)\|^r + \frac{\beta}{\delta}
\end{aligned} \tag{58-2}$$

با استفاده از معادلات زیر کران بالایی برای $\|\bar{x}(rk.+1)\|^r$ به دست می آید.

$$\|\bar{x}_1(k.+1)\|^r = \|x_1(rk.+1)\|^r + \|\hat{x}_1(rk.+1)\|^r \tag{59-2}$$

از طرفی از رابطه (2-2) داریم

$$Cx_1(rk.+1) = y_1(rk.+1)$$

$$\|x_1(rk.+1)\| = \frac{1}{\|C\|} \|y_1(rk.+1)\|$$

$$\Rightarrow \|\bar{x}_1(k.+1)\|^r \leq \|\hat{x}_1(rk.+1)\|^r + \frac{1}{\|C\|} \|y_1(rk.+1)\| \tag{60-2}$$

آنگاه

$$\varepsilon_1 \|x_1(k)\|^r \leq \varepsilon_r \vartheta^{r(k-k.)} (\|\hat{x}_1(rk.+1)\|^r + \frac{1}{\|C\|} \|y_1(rk.+1)\|) + \frac{\beta}{\delta} \tag{61-2}$$

از آنجایی که $\vartheta < 1$ ، اثبات کامل میشود.

■

۳-۳-۲. حالت اول اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته

قضیه ۳-۲. اگر $\lambda < 1$ مقدار ثابت مثبت مشخص باشد و ماتریسهای K_j و L ($j \in \bar{N} = \{0, 1, 2, \dots, N\}$) و ماتریسهای متقارن مثبت معین P_j و Q_j با ابعاد مناسب موجود باشند به گونه ای که

$$\begin{bmatrix} Q_j - \lambda^\tau P_j + \frac{\beta_1}{\alpha_1} I & * & * & * \\ 0 & -\lambda^\tau Q_j & * & * \\ 0 & \cdot & -I & * \\ \bar{A}_{\sigma(\rho_k)-ro} & 0 & \bar{E}_\tau & -P_j \end{bmatrix} < 0. \quad (۶۲-۲)$$

و

$$\mu Q_r \geq Q_s, \mu P_r \geq P_s; \quad r, s \in \bar{N} \quad (۶۳-۲)$$

آنگاه سیستم توصیف شده توسط معادلات (۱-۳) و (۲-۳) و (۳-۳) کنترل کننده پیش بین (۳-۳) به صورت نمایی با نرخ کاهش نمایی $\vartheta = \lambda \mu^{\frac{1}{\tau}}$ پایدار است که در آن τ زمان سکون متوسط است که در رابطه $\tau > \frac{\ln \mu}{\frac{1}{\tau} \ln \lambda^{-1}}$ صدق میکند.

اثبات. اثبات این قضیه مشابه با اثبات قضیه ۱-۲ میباشد.

۴-۳-۲. حالت دوم اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته

قضیه ۴-۲. اگر $\lambda < 1$ و $\mu \geq 1$ دو مقدار ثابت مثبت مشخص باشند و ماتریسهای K_j ($j \in \bar{N} = \{0, 1, \dots, N\}$) و L و ماتریس متقارن مثبت معین P با ابعاد مناسب موجود باشند به گونه ای که

$$\begin{bmatrix} -(1 - \delta)P & * & * \\ \cdot & -I & * \\ P\bar{A}_{\sigma(\rho_k)-ro} & P\bar{E}_\tau & -P \end{bmatrix} < 0. \quad (۶۴-۲)$$

آنگاه متغیرهای سیستم توصیف شده توسط معادلات (۲-۴۵) و (۲-۴۶) و کنترل کننده پیش بین (۲-۹) پایدار UUB هستند.

اثبات. اثبات این قضیه مشابه با قضیه ۲-۲ می باشد.

۲-۴. شبیه سازی

۲-۴-۱. حالت اول اغتشاش

در این قسمت تاثیرگذاری طرح کنترلی پیشنهاد شده از طریق دو مثال نمایش داده شده است. در هر دو مثال سیستمها تحت تاثیر تاخیر، از دست دادن بسته ها، جابجایی بسته ها و اغتشاش ورودی قرار میگیرند. کران بالای اغتشاش ورودی وابسته به مقادیر متغیرهای حالت سیستم فرض شده است و در رابطه (۲-۴) صدق میکند.

مثال ۲-۱. در این مثال پلنتی مشابه با پلنت مورد بررسی در مقاله [۳۷] در نظر گرفته شده است و پایداری سیستم تحت نقصهای شبکه و اغتشاش مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم پیشنهاد شده در این رساله و نیز الگوریتم پیشنهاد شده در [۳۷] هر دو به سیستم اعمال میشوند و نتایج به دست آمده از دیدگاه پایداری سیستم مورد مقایسه قرار گرفته اند. مقاله [۳۷] مشابه با روش پیشنهادی در این رساله از کنترل کننده سوئیچ کننده استفاده کرده است و تاخیر، از دست دادن بسته ها و اغتشاش ورودی را در ساختار مورد بررسی خود لحاظ کرده است.

معادلات فضای حالت سیستم به صورت زیر هستند

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + E_1 w_1(k)$$

$$y(k) = Cx(k)$$

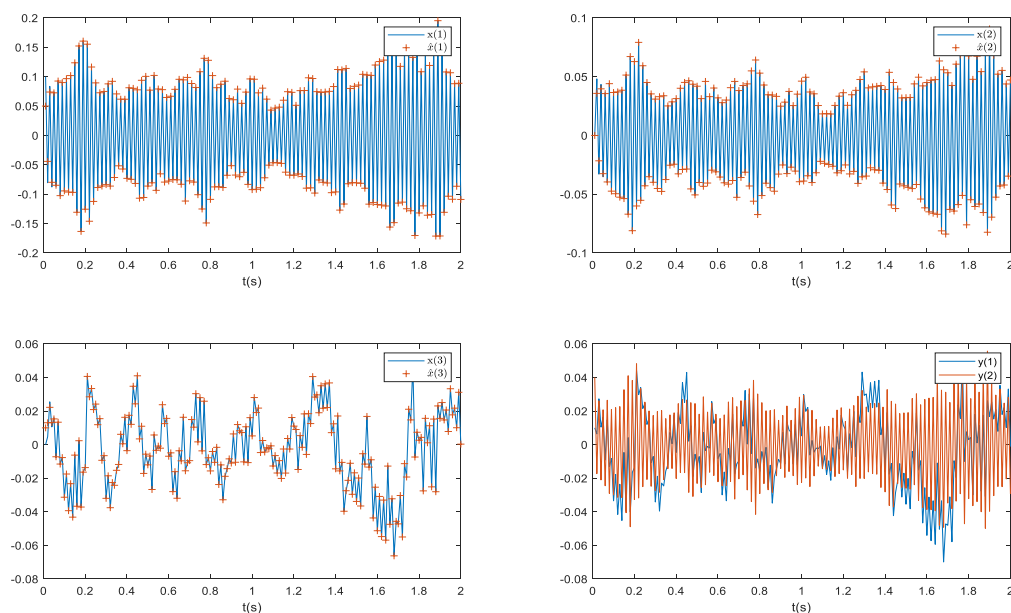
که در آن ماتریسها به صورت زیر در نظر گرفته میشوند

$$A = \begin{bmatrix} -0.85 & 0.271 & -0.488 \\ 0.482 & 0.1 & 0.24 \\ -0.002 & -0.3681 & 0.707 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & -0.4 \\ 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 1 \\ 0.4 & 0.3 & 0.1 \end{bmatrix}, E_1 = I_{3 \times 3}$$

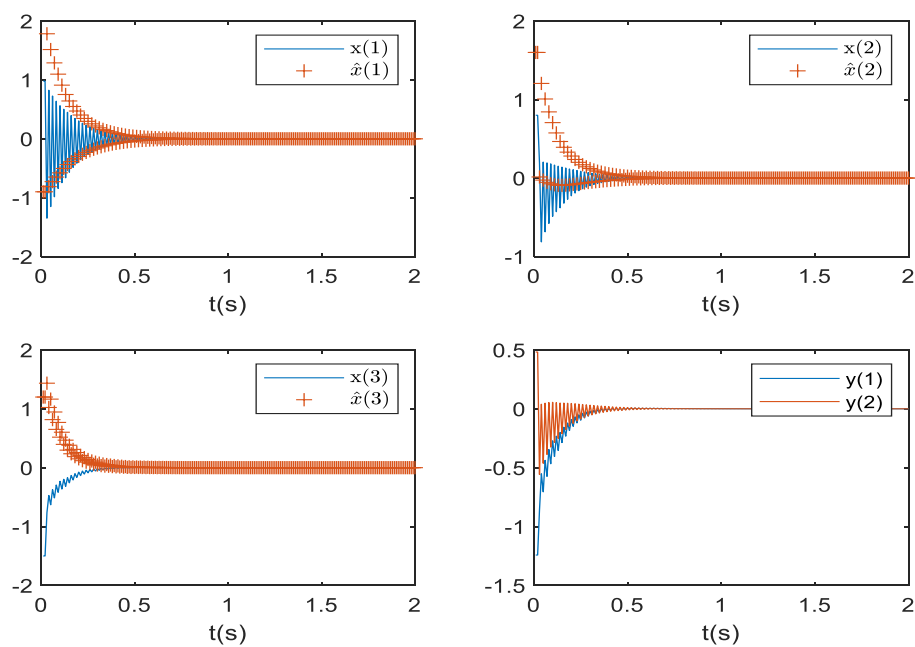
ثوابت در نظر گرفته شده در رابطه (۲-۴) به صورت $\alpha_1 = 1$ و $\beta_1 = 0.01$ انتخاب میشوند و بازه نمونه برداری به صورت $T = 0.01$ در نظر گرفته میشود. حد بالای تاخیرهای انتقال و از دست دادن بسته های متوالی در کانالهای اندازه گیری و محرک به صورت $D_1 = 2T, D_2 = T, L_1 = 2$ و $L_2 = 2$ قرار داده میشوند. حالت های اولیه سیستم و مشاهده گر به ترتیب به صورت $x(0) = [0.98, 0.8, -1.5]^T$ و $\hat{x}(0) = [-0.9, 1.6, 1.2]^T$ هستند. برای

تشخیص رخ دادن رویداد در هر لحظه نمونه برداری از رابطه (۷-۲) با قرار دادن $\Phi_1 = I_{3 \times 3}$ ، $\Phi_2 = I_{3 \times 3}$ و $R_1 = 3T$ استفاده میشود.

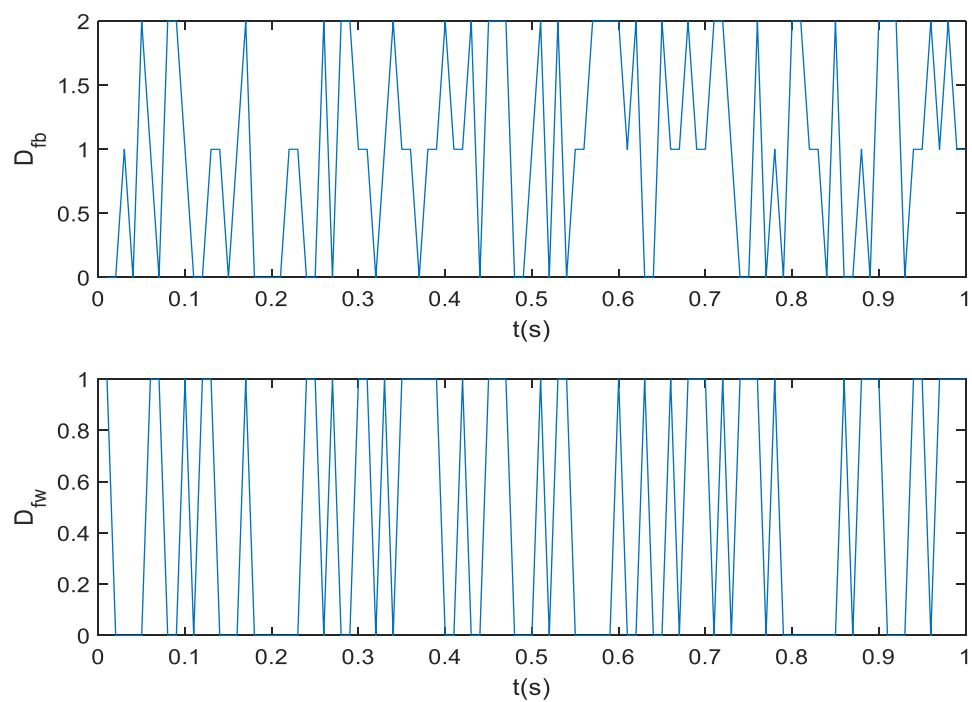
ابتدا پایداری سیستم تحت الگوریتم پیشنهاد شده در مقاله [۳۷] مورد بررسی قرار میگیرد. شکل ۲-۵ ناپایداری نمودارهای متغیرهای حالت سیستم و نمودار خروجی سیستم را در حضور تاخیر و از دست دادن بسته ها تحت الگوریتم [۳۷] نمایش میدهند. نمودارها نشانگر ضعف الگوریتم [۳۷] در پایدارسازی سیستم در حضور نقایص شبکه است. در شکل ۲-۶ نمودارهای متغیرهای حالت سیستم و نمودار خروجی سیستم با استفاده از روش پیشنهاد شده در این رساله ترسیم شده است. این نمودارهای زمانی تاثیرگذاری روش پیشنهاد شده در این رساله را در جبرانسازی تاخیر و از دست دادن بسته ها و همگرایی سریع حالت‌های سیستم به سمت پایداری نشان میدهند. انطباق نمودارهای مقادیر واقعی و مقادیر تخمینی متغیرهای حالت سیستم در شکل ۲-۶ دقت تخمینهای مشاهده گر را نشان میدهد که موید انتخاب مناسب مشاهده گر و دقت محاسبه بهره آن به روش LMI است. تعداد داده های قرار گرفته بر روی شبکه نشان میدهد که تشخیصگر رویداد از میان ۲۰۰ لحظه نمونه برداری تنها داده های مربوط به ۵۸ لحظه را ارسال میکند که به معنی کاهش ۷۰ درصدی داده های ارسال شده با استفاده از طرح کنترلی پیشنهاد شده در این رساله است.



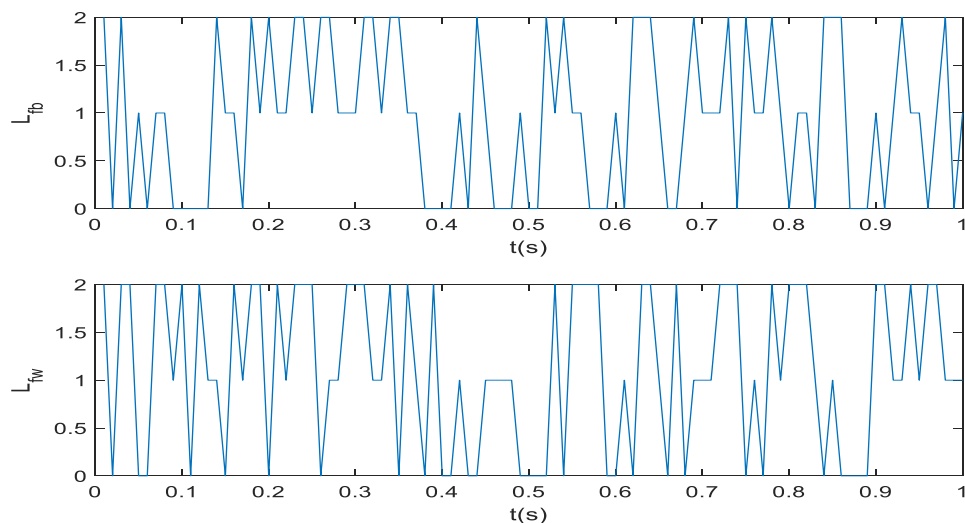
شکل ۲-۵. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم ETPC پیشنهاد شده در [۳۷] برای مثال ۲-۱.



شکل ۶-۲. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم ETPC پیشنهاد شده در این مقاله برای مثال ۱-۲.

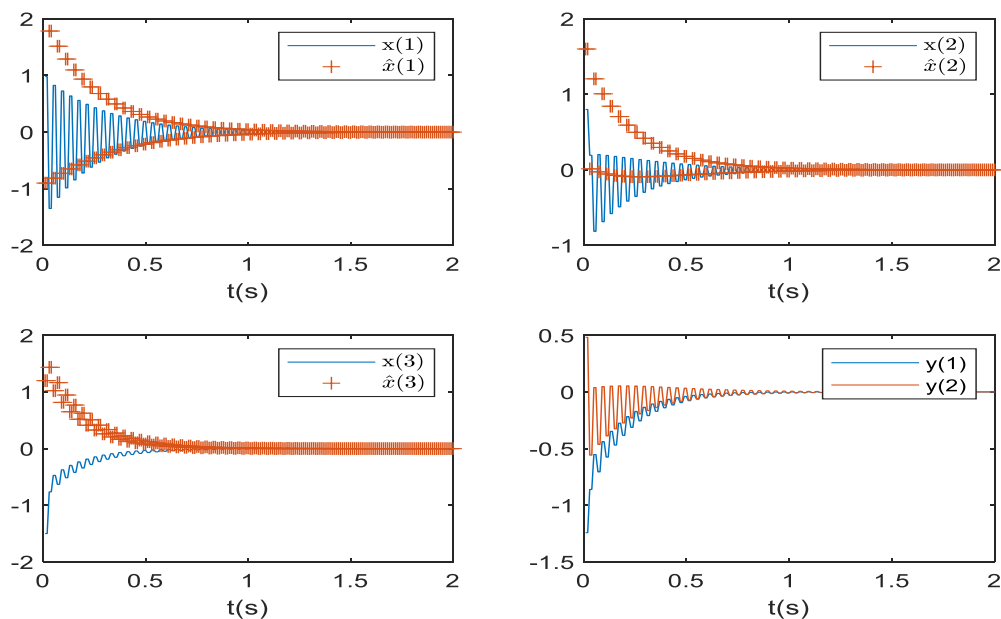


شکل ۷-۲. توزیع متغیر با زمان تاخیر در کانال اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی برای مثال ۱-۲.



شکل ۸-۲. توزیع متغیر با زمان از دست دادن بسته ها در کانال اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی برای مثال ۱-۲.

شکلهای ۷-۲ و ۸-۲ به ترتیب متغیر با زمان بودن وقوع تاخیر و از دست دادن بسته ها را در هر دو کانال اندازه گیری و محرک نشان میدهند. این شکلهای نشان میدهند که اکثر بسته های ارسالی در معرض تاخیر و از دست دادن بسته ها هستند که در حقیقت یکی از بدترین شرایط ممکن برای سیستم است.



شکل ۹-۲. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم ETPC پیشنهاد شده در این مقاله در حضور نویز سنسور برای مثال ۱-۲.

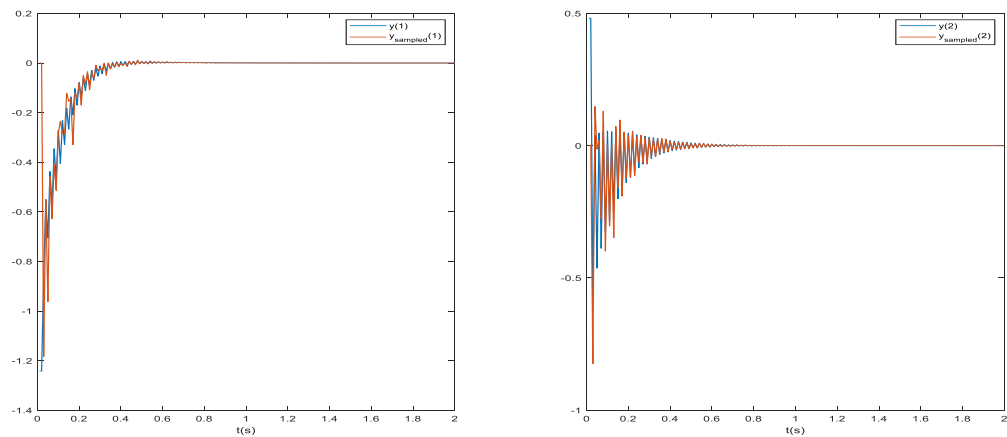
در مرحله بعد عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حضور نویز سنسور مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نویز سنسور به صورت نویز سفید اضافه شونده در نظر گرفته شده است. نمودارهای شکل ۲-۹ نشان میدهند که در حضور نویز سنسور هم الگوریتم پیشنهادی به خوبی عمل میکند و تمام متغیرها همگرا شده اند. نمودارهای شکل ۲-۱۰ خروجیهای سیستم را به تفکیک مقادیر واقعی و مقادیر نویزی اندازه گیری شده توسط سنسور نشان میدهد و بیانگر میزان موثر بودن نویز بر مقدار اندازه گیری شده خروجی است که توسط مشاهده گر برای تعیین سیگنال کنترلی مورد استفاده قرار میگیرد.

در شکل ۲-۱۱ متغیرهای سیستم تحت تاثیر تاخیر تصادفی با توزیع برنولی مورد بررسی قرار گرفته اند. رابطه مربوط به پیاده سازی تاخیر به صورت

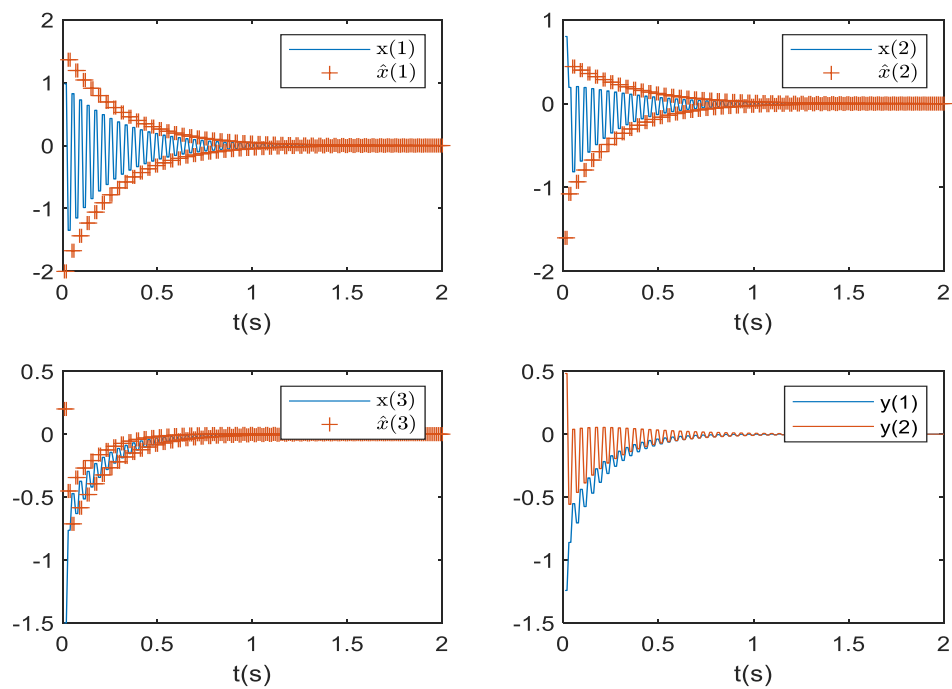
$$x_c(k) = x(k - \epsilon_k D_{fb})$$

در نظر گرفته شده است که در آن $x_c(k)$ متغیر حالت دریافت شده در سمت کنترل کننده در لحظه k است و ϵ_k نیز متغیر تصادفی با توزیع برنولی است که تعیین کننده وقوع یا عدم وقوع تاخیر در کانال پسخورد است و احتمال عدم وقوع ۰,۲۵ در نظر گرفته شده است. به طور مشابه رابطه ای تصادفی با متغیر تصادفی مستقل از ϵ_k وقوع تاخیر در کانال پیشخورد را تعیین میکند. نمودارهای شکل ۲-۱۱ نشان میدهند که متغیرهای سیستم در حضور تاخیر تصادفی در هر دو کانال پیشخورد و پسخورد با استفاده از الگوریتم ETPC پیشنهادی همگرا میشوند.

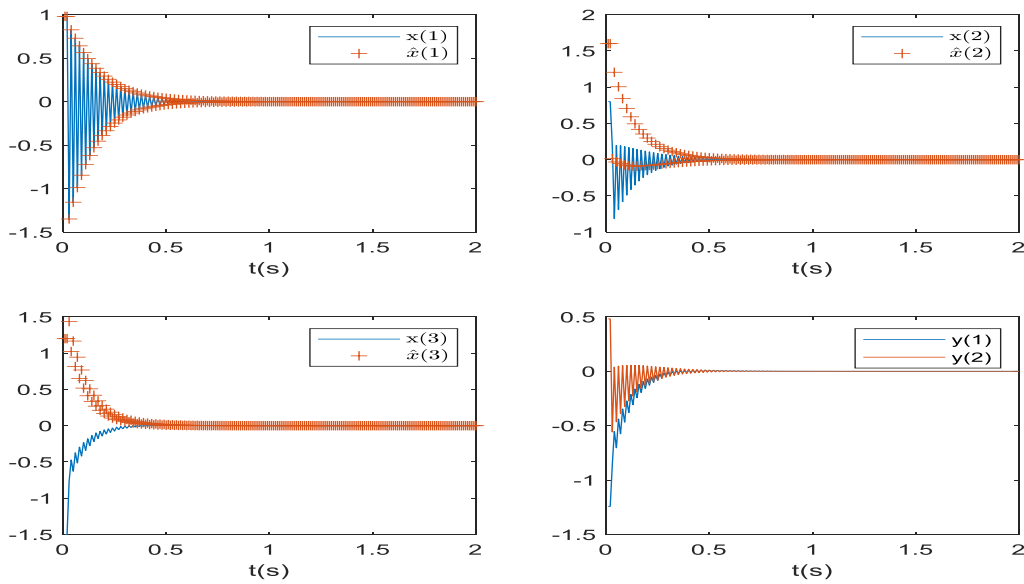
شکل ۲-۱۲ نشانگر تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم ETPC پیشنهادی رساله با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته است. در این شبیه سازی فرض شده است اولین متغیر حالت $(x(1))$ مستقیماً قابل اندازه گیری است و مشاهده گر متغیرهای حالت دیگر را تخمین میزند. نمودارها نشان میدهند که مقادیر واقعی و تخمینی دیگر متغیرهای حالت سیستم اندک تفاوتی دارند اما الگوریتم پیشنهادی به خوبی قادر به همگرا کردن متغیرهای حالت به نقطه پایداری را داشته است. مقایسه نمودارهای شکل ۲-۱۲ با نمودارهای شکل ۲-۶ نشان میدهد که سرعت همگرایی متغیرهای سیستم با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته و مشاهده گر مرتبه کامل بسیار به یکدیگر نزدیک است که نشان از انتخاب مناسب نوع مشاهده گر و محاسبه بهره مشاهده گر دارد. تعداد داده های قرار گرفته بر روی شبکه نشان میدهد که تشخیصگر رویداد از میان ۲۰۰ لحظه نمونه برداری تنها داده های مربوط به ۵۰ لحظه را ارسال میکند که به معنی کاهش ۷۵ درصدی داده های ارسال شده با استفاده از طرح کنترلی پیشنهاد شده در این رساله است.



شکل ۲-۱۰. خروجی واقعی و نمونه برداری شده سیستم در حضور نویز سنسور برای مثال ۲-۱.



شکل ۲-۱۱. متغیرهای سیستم با استفاده از الگوریتم ETPC پیشنهادی در رساله در حضور تاخیر تصادفی برای مثال ۲-۱.



شکل ۲-۱۲. متغیرهای سیستم با استفاده از الگوریتم ETPC پیشنهادی رساله با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته برای مثال ۲-۱.

مثال ۲-۲. در این مثال، تاثیرگذاری الگوریتم پیشنهاد شده در این رساله بر روی سیستم مشابه با مقاله [۳۱] بررسی شده است. معادلات فضای حالت این سیستم مشابه با سیستم مقاله [۳۷] میباشد که در مثال ۲-۱ مورد بررسی قرار گرفت اما الگوریتم پیشنهادی [۳۱] متفاوت میباشد. معادلات فضای حالت سیستم به صورت زیر هستند:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + E_1 w_1(k)$$

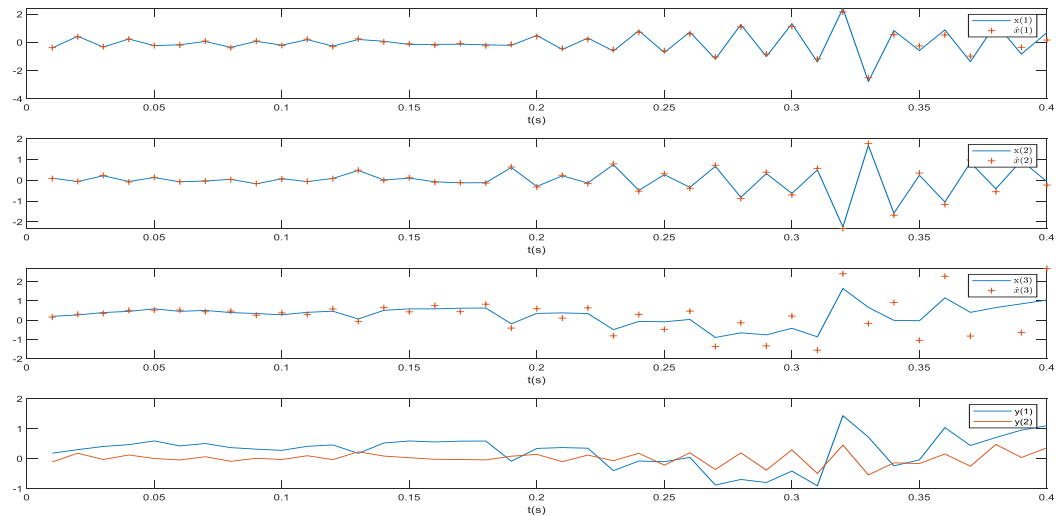
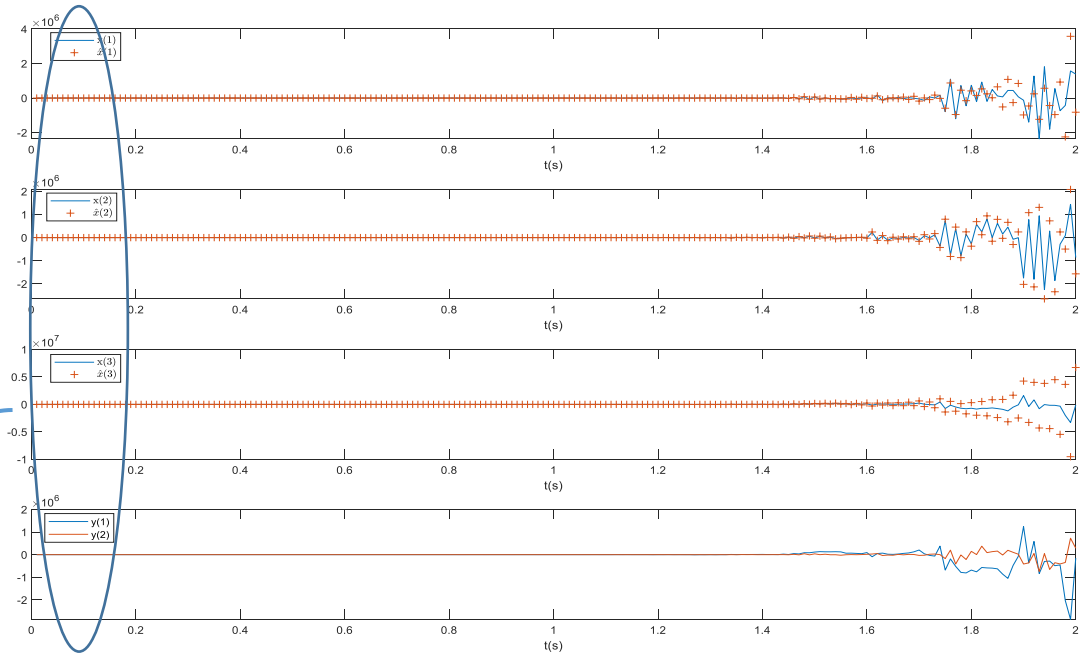
$$y(k) = Cx(k)$$

که در آن ماتریسها به صورت زیر در نظر گرفته میشوند

$$A = \begin{bmatrix} -0.85 & 0.271 & -0.488 \\ 0.482 & 0.1 & 0.24 \\ -0.002 & -0.3681 & 0.707 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & -0.4 \\ 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 1 \\ 0.4 & 0.3 & 0.1 \end{bmatrix}, E_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ثوابت در نظر گرفته شده در فرض ۲-۲، مشابه با مثال ۲-۱، به صورت $\alpha_1 = 1$ و $\beta_1 = 0.01$ انتخاب میشوند و بازه نمونه برداری به صورت $T = 0.01$ در نظر گرفته میشود. حد بالای تاخیرهای انتقال و از دست دادن بسته های متوالی در کانالهای اندازه گیری و محرک به صورت $D_1 = T, D_2 = T, L_1 = 1$ و $L_2 = 1$ قرار داده میشوند. حالت های اولیه سیستم و مشاهده گر به ترتیب به صورت $x(0) = [-0.4, 0.1, 0.2]^T$ و $\hat{x}(0) = [-0.6, 0.2, 0.08]^T$

هستند. برای تشخیص رخ دادن رویداد در هر لحظه نمونه برداری از رابطه (۷-۲) با قرار دادن $\Phi_1 = I_{3 \times 3}$ ، $R_1 = 3T$ و $\Phi_2 = I_{3 \times 3}$ استفاده میشود.

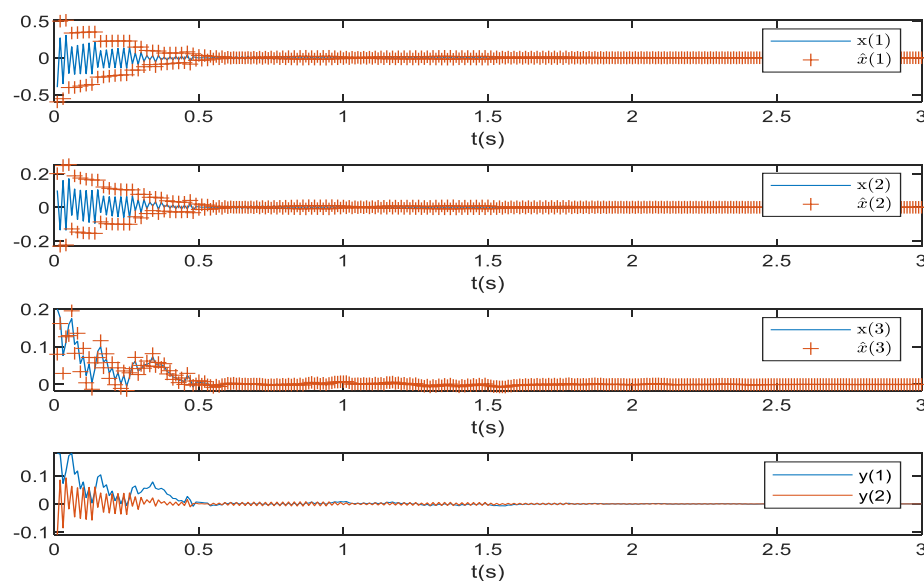


شکل ۲-۱۳. متغیرهای حالت سیستم و تخمین آنها تحت الگوریتم ETPC پیشنهاد شده در [۳۱] برای مثال ۲-۲.

شکل ۲-۱۳ پایداری متغیرهای حالت و خروجیهای سیستم را در حضور نقایص شبکه و اغتشاش ورودی تحت الگوریتم ETPC مقاله [۳۱] بررسی میکند. نمودارهای شکل ۲-۱۳ نشان میدهند که الگوریتم پیشنهادی [۳۱] قادر به پایدارسازی سیستم نیست و به دلیل ضعف این الگوریتم حالت‌های سیستم و خروجی سیستم واگرا میشوند.

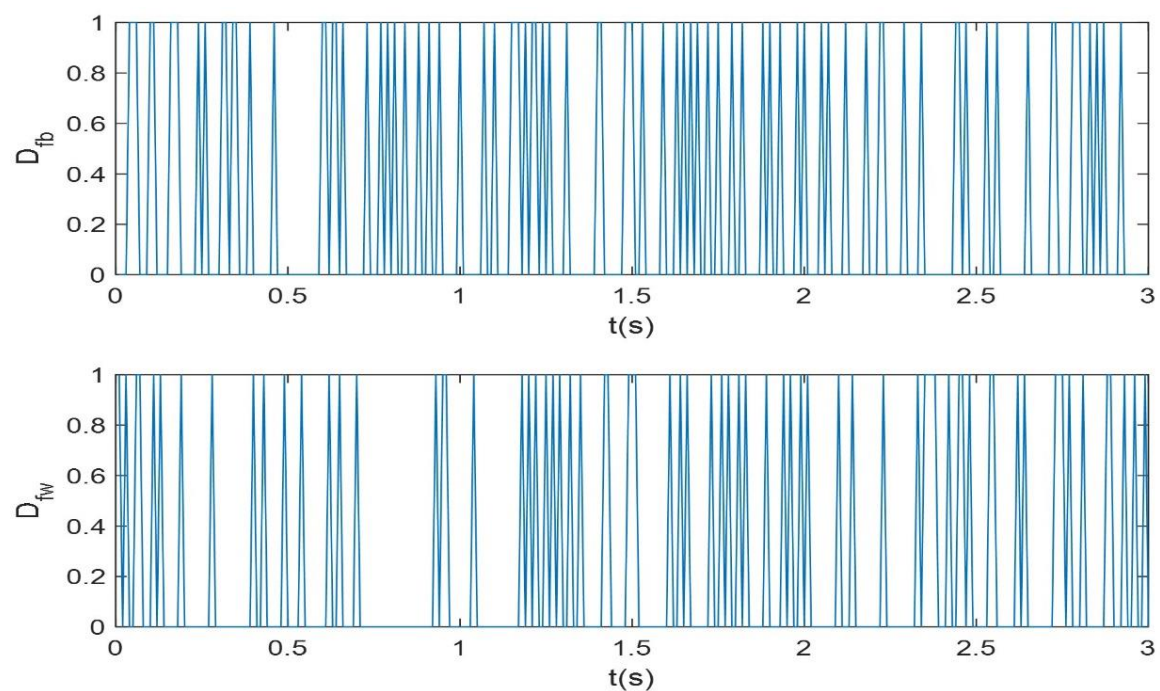
شکل ۲-۱۴ تاثیرگذاری الگوریتم پیشنهادی در این رساله را بر پایدارسازی سیستم تحت تاثیر نقایص شبکه و اغتشاشها نشان میدهند. نمودارهای این شکل همگرایی سریع حالت‌های سیستم و خروجی سیستم را نشان میدهند که تصریح میکنند نقایص شبکه به میزان زیادی توسط الگوریتم پیشنهاد شده در این مقاله جبران میشوند. براساس شکل ۲-۱۴، از آنجا که مسیر حرکت نمودارهای تخمین حالت‌های سیستم مسیر حرکت حالت‌های سیستم را دنبال میکنند، انتخاب مناسب مشاهده گر و دقت بهره مشاهده گر محاسبه شده تایید میشود.

تعداد لحظات تحریک نشان میدهد که تشخیصگر رویداد ۱۵۵ بار از میان ۳۰۰ لحظه نمونه برداری داده ارسال میکند. کاهش حدوداً ۵۰ درصدی در تعداد بسته های ارسال شده با استفاده از طرح کنترلی پیشنهاد شده در این مقاله، تاثیرگذاری بالای این طرح کنترلی را در حفظ پهنای باند شبکه و منابع انرژی سیستم نشان میدهد.

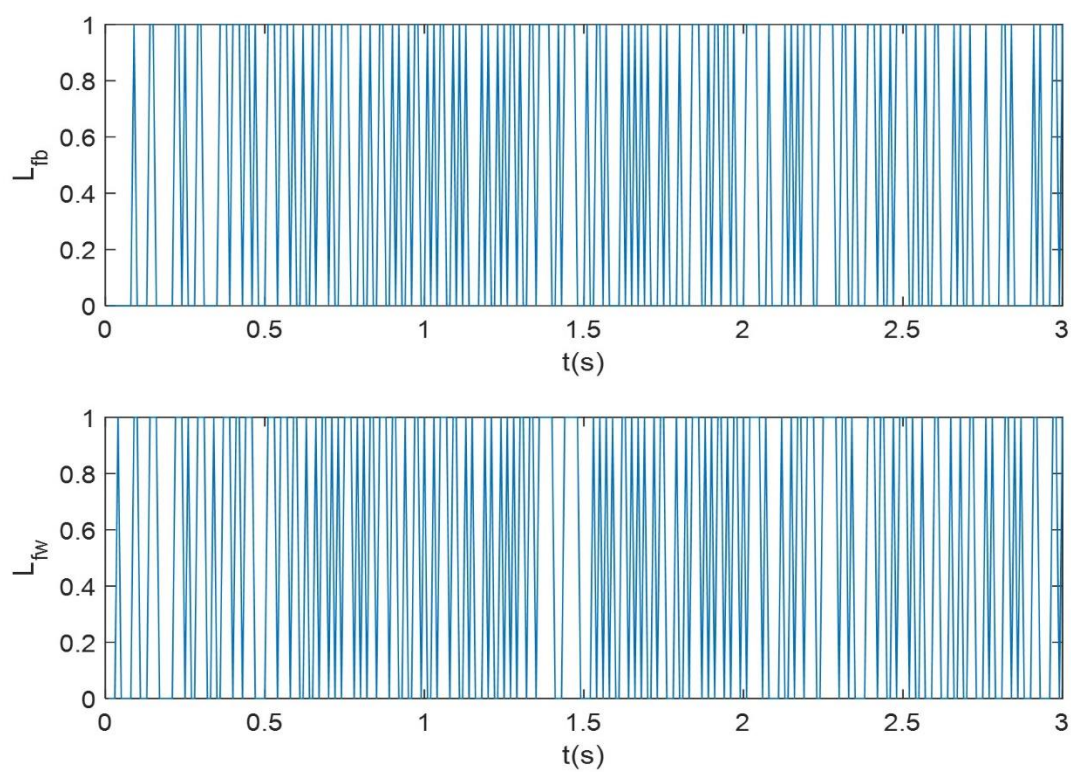


شکل ۲-۱۴. متغیرهای حالت سیستم و تخمین آنها توسط مشاهده گر تحت الگوریتم ETPC پیشنهاد شده در این رساله برای

مثال ۲-۲.



شکل ۲-۱۵. وقوع متغیر با زمان تاخیر در کانالهای اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی در مثال ۲-۲.



شکل ۲-۱۶. وقوع متغیر با زمان از دست دادن بسته ها در کانالهای اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی برای مثال ۲-۲.

شکلهای ۱۵-۲ و ۱۶-۲ به ترتیب متغیر با زمان بودن وقوع تاخیر و از دست دادن بسته ها را در هر دو کانال اندازه گیری و محرک نشان میدهند. این شکلهای نشان میدهند که سیستم شبیه سازی شده در یکی از بدترین شرایط ممکن مورد بررسی قرار گرفته است که در آن اکثر داده های ارسالی تحت تاثیر تاخیر و از دست دادن بسته ها در کانالهای اندازه گیری و محرک هستند.

۲-۴-۲. حالت دوم اغتشاش

در این قسمت سیستم مورد بررسی تحت تاثیر تاخیر، از دست دادن بسته ها، جابجایی بسته ها و اغتشاش های ورودی و خروجی قرار میگیرد با این تفاوت که بردار اغتشاش ورودی دارای کران بالای ثابت و مشخصی است و در رابطه (۵-۲) صدق میکند.

مثال ۲-۳. در این مثال پلنت مشابه با مقاله [۳۷] در نظر گرفته شده است و پایداری سیستم تحت نقصهای شبکه و اغتشاشها مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم پیشنهاد شده در این رساله و نیز الگوریتم پیشنهاد شده در [۳۷] هر دو به سیستم اعمال میشوند و نتایج به دست آمده از دیدگاه پایداری سیستم مورد مقایسه قرار گرفته اند. مقاله [۳۷] مشابه با روش پیشنهادی در این رساله از کنترل کننده سوئیچ کننده استفاده کرده است و تاخیر، از دست دادن بسته ها و اغتشاش خروجی را در ساختار مورد بررسی خود لحاظ کرده است.

معادلات فضای حالت سیستم به صورت زیر هستند

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + E_1 w_1(k)$$

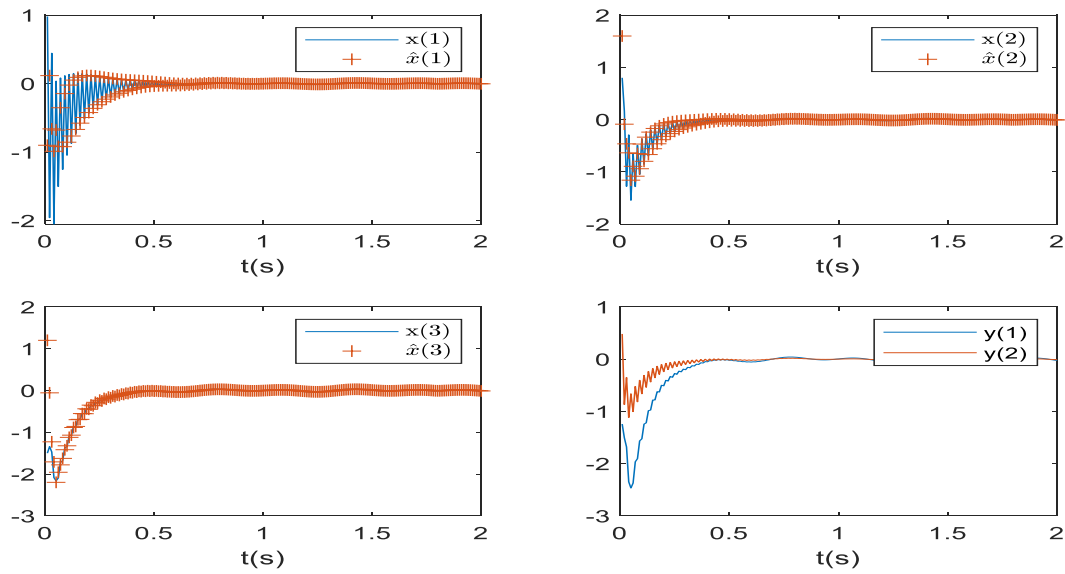
$$y(k) = Cx(k)$$

که در آن ماتریسها به صورت زیر در نظر گرفته میشوند

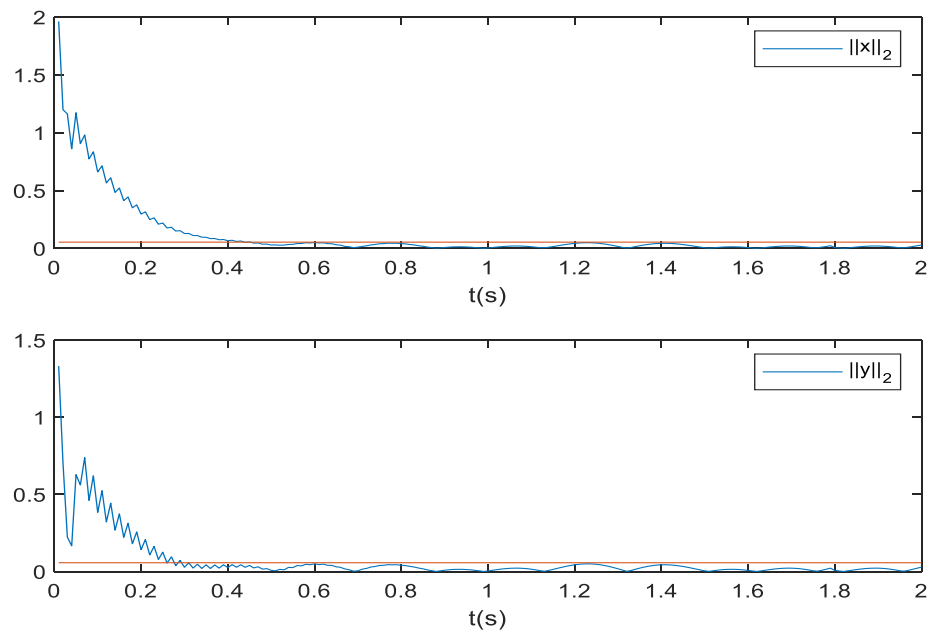
$$A = \begin{bmatrix} -0.85 & 0.271 & -0.488 \\ 0.482 & 0.1 & 0.24 \\ -0.002 & -0.3681 & 0.707 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & -0.4 \\ 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 1 \\ 0.4 & 0.3 & 0.1 \end{bmatrix}, E_1 = I_{3 \times 3}$$

ثوابت در نظر گرفته شده در فرض ۲-۲ به صورت $\alpha_1 = 1$ و $\beta_1 = 0.01$ انتخاب میشوند و بازه نمونه برداری به صورت $T = 0.01$ در نظر گرفته میشود. حد بالای تاخیرهای انتقال و از دست دادن بسته های متوالی در کانالهای اندازه گیری و محرک به صورت $D_1 = 2T, D_2 = T, L_1 = 2$ و $L_2 = 2$ قرار داده میشوند. حالتهای اولیه سیستم و مشاهده گر به ترتیب به صورت $x(0) = [0.98, 0.8, -1.5]^T$ و $\hat{x}(0) = [-0.9, 1.6, 1.2]^T$ هستند. برای

تشخیص رخ دادن رویداد در هر لحظه نمونه برداری از رابطه (۷-۲) با قرار دادن $\Phi_1 = I_{3 \times 3}$ ، $\Phi_2 = I_{3 \times 3}$ و $R_1 = 3T$ استفاده میشود.



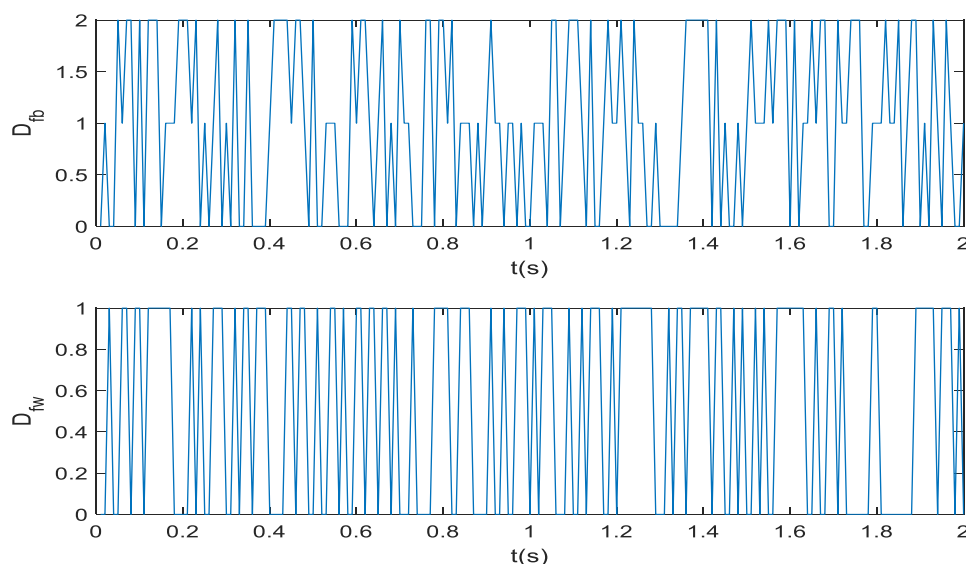
شکل ۲-۱۷. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم ETPC پیشنهاد شده در رساله برای مثال ۲-۳.



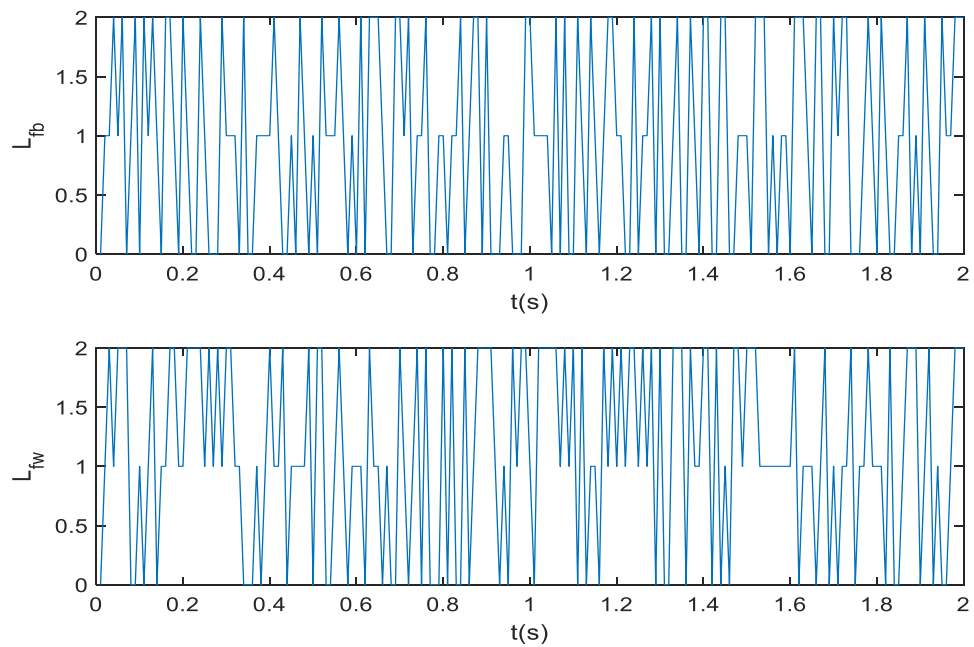
شکل ۲-۱۸. تغییرات نرم ۲ی متغیرهای حالت و خروجیهای سیستم برای مثال ۲-۳.

نمودارهای شکل ۲-۱۷ همگرایی متغیرهای سیستم و خروجیهای سیستم را تحت الگوریتم ETPC پیشنهادی رساله نشان میدهند. نمودارها موید این مطلب هستند که در حالتی که اغتشاش ورودی سیستم کران بالای ثابتی دارد هم الگوریتم پیشنهادی به خوبی قادر به جبرانسازی تاخیر و از دست دادن و جابجایی بسته ها است و پایداری UUB سیستم را به خوبی تامین میکند. انطباق نمودارهای مقادیر تخمینی و واقعی سیستم نشانگر انتخاب مناسب بهره های کنترل کننده و مشاهده گر توسط الگوریتم پیشنهادی است. شکل ۲-۱۸ نشانگر قرار گرفتن تغییرات نرم ۲ی بردارهای حالت و خروجی سیستم در بازه پیشبینی شده در الگوریتم پیشنهادی است. پس از نوسانات اولیه، هر دو نرم به سمت بازه تعیین شده حرکت میکنند و در همان بازه باقی میمانند.

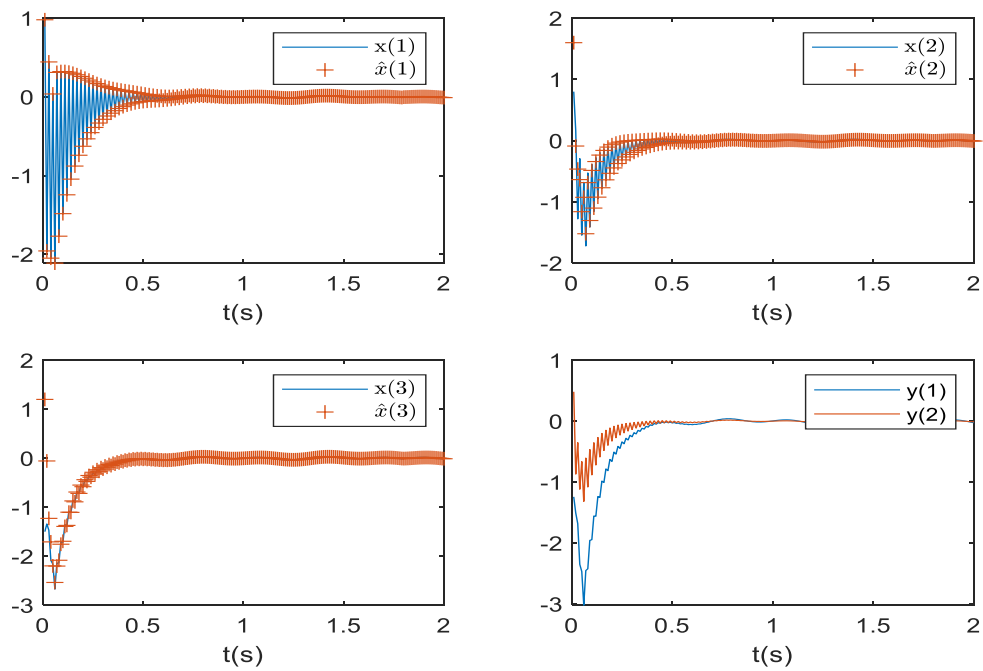
تعداد بسته های ارسال شده برای پایدارسازی سیستم برابر با ۶۳ بسته از میان ۲۰۰ داده نمونه برداری شده است که نشانگر کاهش حدودا ۷۰ درصدی تعداد بسته های ارسال شده است که قابلیت الگوریتم پیشنهادی را در پایدارسازی سیستم در حضور اغتشاش صفرنشونده در عین کاهش تعداد بسته های داده نشان میدهد. شکلهای ۲-۱۹ و ۲-۲۰ هم به ترتیب وقوع متغیر با زمان تاخیر و از دست دادن بسته ها را نشان میدهند که نشانگر آن است که تقریبا تمام داده ها تحت تاثیر تاخیر و از دست دادن بسته ها در هر دو کانال هستند که یکی از بدترین حالتیهای ممکن برای داده ها را نشان میدهد.



شکل ۲-۱۹. وقوع متغیر با زمان تاخیر در کانالهای اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی در مثال ۲-۳.



شکل ۲-۲۰. وقوع متغیر با زمان از دست دادن بسته ها در کانالهای اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی در مثال ۲-۳.



شکل ۲-۲۱. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم ETPC پیشنهادی رساله با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته برای مثال ۲-۳.

شکل ۲-۲۱ تغییرات متغیرهای حالت سیستم را تحت الگوریتم ETPC پیشنهادی با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته نشان میدهد. نمودارها نشان میدهند با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته تمامی متغیرهای تخمینی و همینطور خروجیهای سیستم محدود شده اند و با مقایسه با شکل ۲-۱۷ در می یابیم که سرعت همگرایی متغیرهای سیستم با هر دو مشاهده گر مرتبه کامل و مرتبه کاهش یافته تقریباً یکی است که نشان از انتخاب مناسب مشاهده گر و ماتریس بهره مشاهده گر است. تعداد بسته های ارسال شده برای پایداری سازی سیستم برابر با ۵۰ بسته از میان ۲۰۰ داده نمونه برداری شده است که نشانگر کاهش ۷۵ درصدی تعداد بسته های ارسال شده است.

۲-۵. نتیجه گیری

در این فصل، مساله طراحی یک ETPC پایدار برای سیستمهای کنترل تحت شبکه با پسخورد خروجی بررسی شد. ساختار NCS مورد نظر در معرض اغتشاش ورودی خارجی و نیز نقصهای شبکه شامل تاخیر، از دست دادن و جابجایی بسته ها و محدودیت پهنای باند و منابع شبکه در نظر گرفته شد. یک تشخیصگر خطا بر پایه مشاهده گر برای محدود کردن بسته های داده ها به آնهایی که اساساً برای پایداری سازی سیستم ضروری هستند؛ مورد استفاده قرار گرفت. به این ترتیب منابع شبکه و پهنای باند آن حفظ میشوند و تاثیر شبکه بر روی داده های ارسال شده به میزان زیادی کاهش میابد. در الگوریتمهای ارائه شده دو حالت مختلف برای مشاهده گر در نظر گرفته شد: مشاهده گر مرتبه کامل و مشاهده گر مرتبه کاهش یافته. در بررسی اغتشاش ورودی سیستم نیز دو حالت مجزا بررسی شد. حالت اول زمانی است که کران بالای نرم اغتشاش ورودی وابسته به نرم بردار متغیرهای حالت سیستم است. حالت دوم زمانی است که کران بالای نرم اغتشاش ورودی برابر با مقداری ثابت و مشخص است.

استفاده از کنترل کننده پیش بین سوئیچ کننده با بهره های چندگانه در ساختار پیشنهادی، منجر به کنترل کننده های منعطف تری نسبت به کنترل کننده های مرسوم با یک بهره ثابت میشود. با به دست آوردن یک نمایش مجتمع جدید از معادلات فضای حالت سیستم، بهره مشاهده گر و بهره های کنترل کننده از طریق حل LMI ها محاسبه شدند، به گونه ای که پایداری سیستم براساس قضیه تابع لیاپانوف تضمین شود. در حالت اول اغتشاش، قضایای ارائه شده پایداری مجانبی سیستم را تضمین میکنند. در حالت دوم قضایای ارائه شده پایداری UUB سیستم را تضمین میکنند.

به منظور نشان دادن تاثیرگذاری روش ETPC پیشنهاد شده، سه مثال مورد بررسی قرار گرفتند. هر سه سیستم شبیه سازی شده در یکی از بدترین حالتهاشان در نظر گرفته شدند که در آن اکثر بسته ها در معرض تاخیر

متغیر با زمان و از دست دادن بسته های متغیر با زمان در شبکه مخابراتی هستند. نتایج شبیه سازی همگرایی سریع خروجیها و حالت های سیستم را در هر سه مثال با پیاده سازی الگوریتم ETPC پیشنهادی در این رساله نشان دادند در حالی که حالت های سیستم و خروجیهای سیستم تحت الگوریتمهای پیشنهاد شده در [۳۷] و [۳۱] واگرا میشدند. تعداد بسته های ارسال شده از طریق شبکه در مقایسه با کنترل کننده های معمول مبتنی بر زمان نیز در مثال اول با مشاهده گر مرتبه کامل ۷۰ درصد و با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته ۷۵ درصد، در مثال دوم حدود ۵۰ درصد و در مثال سوم با مشاهده گر مرتبه کامل حدود ۷۰ درصد و با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته ۷۵ درصد کاهش یافتند. این میزان کاهش تبادل داده ها منجر به حفظ پهنای باند شبکه و منابع شبکه به میزان قابل ملاحظه ای میشود. همچنین اثرات القایی شبکه بر روی داده های ارسال شده و نتیجتاً عملکرد سیستم به همین میزان کاهش می یابد. در مثال اول همچنین عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حضور نویز سفید اضافه شونده در سنسور و نیز در حضور تاخیر تصادفی با توزیع برنولی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی در این حالتها نشانگر همگرایی متغیرهای حالت سیستم تحت الگوریتم پیشنهادی بودند.

فصل سوم

الگوریتم کنترل پیش بین خود تحریک

۳-۱. مقدمه

در این فصل به تشریح الگوریتم کنترل پیش بین خود تحریک در این رساله میپردازیم. برای این منظور در بخش اول ابتدا توصیف سیستم مورد بررسی و ساختار مدنظر برای پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی ارائه میگردد. در بخش دوم نتایج اصلی در رابطه با تعیین بهره های کنترل کننده و مشاهده گر و نیز چگونگی تعیین زمان نمونه برداری بعدی در دو حالت مجزا با دو رویکرد پایداری مجانبی و پایداری UUB تبیین میگردد. بخش سوم موثر بودن الگوریتم پیشنهادی را از طریق سه مثال مقایسه ای نشان میدهد و بخش چهارم به نتیجه گیری این فصل اختصاص یافته است.

۳-۲. توصیف سیستم

مشابه فصل قبل، در این فصل نیز سیستم کنترل تحت شبکه به صورت زیر توصیف میشود:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + E_1 w_1(k) \quad (1-3)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (2-3)$$

$$x(0) = x. \quad (3-3)$$

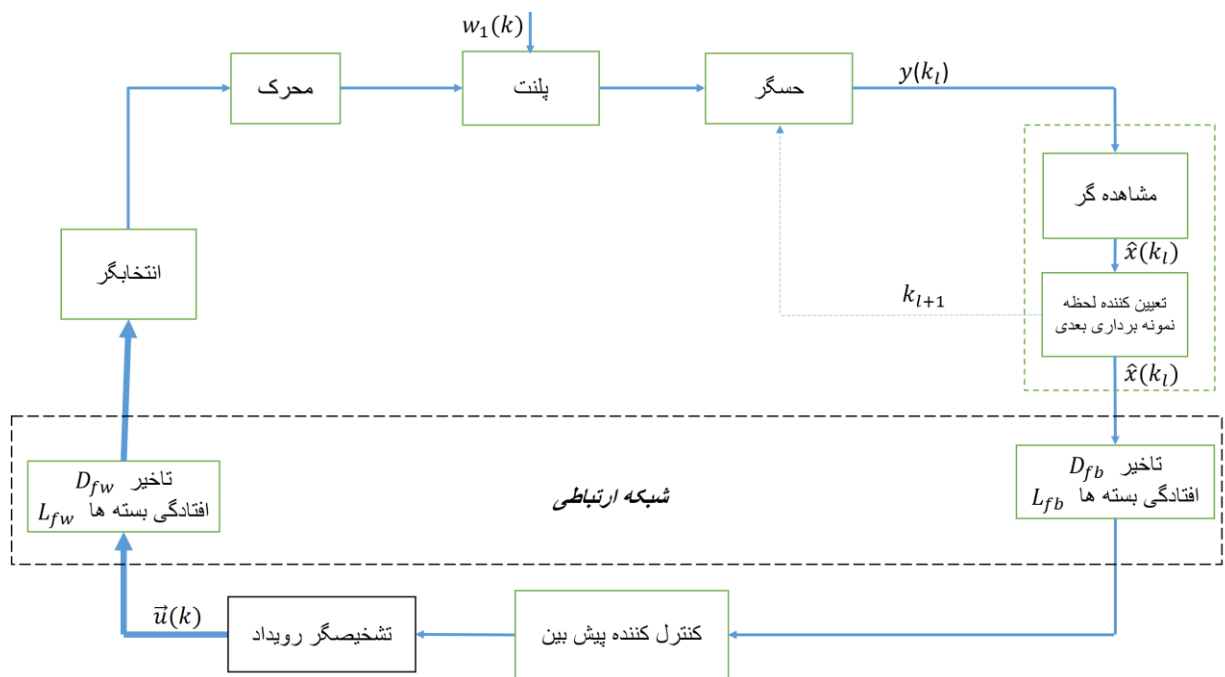
که در آن $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ و $y \in \mathbb{R}^l$ به ترتیب بردار حالت، ورودی کنترلی و خروجی سیستم را نشان میدهند. $w_1 \in \mathbb{R}^p$ اغتشاش ورودی میباشد که به فضای $L_2(0, +\infty)$ تعلق دارد. A, B, C, D و E_1 ماتریسهای ثابت مشخص با ابعاد مناسب هستند. مقدار اولیه بردار حالت سیستم با x_0 نشان داده میشود.

در هر لحظه نمونه برداری، مشاهده گر براساس داده نمونه برداری شده حالت سیستم را تخمین میزند. بلوک "تعیین کننده لحظه نمونه برداری بعدی" ابتدا براساس داده تخمینی، لحظه نمونه برداری بعدی را تعیین و آن را به حسگر ارسال میکند؛ سپس داده تخمینی برای ارسال به کنترل کننده بر روی شبکه قرار داده میشود. کنترل کننده پیش بین براساس آخرین داده دریافت شده، یک دنباله از سیگنالهای کنترلی تولید میکند و دنباله را به محرک ارسال میکند. در سمت محرک، یک انتخابگر وجود دارد که سیگنال کنترلی مناسب را از بین سیگنالهای کنترل پیش بین دریافت شده؛ براساس تاخیر تحمیل شده به آخرین بسته داده دریافت شده؛ انتخاب میکند و علاوه بر اعمال آن به سیستم، مقدار آن را به حسگر نیز اطلاع میدهد که در ادامه محاسبات مورد استفاده قرار گیرد.

ساختار مورد نظر در این رساله برای الگوریتم کنترل پیش بین خود تحریک در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. فرضیات زیر برای این ساختار در نظر گرفته شده اند:

فرض ۳-۱. حسگر، کنترل کننده و محرک متناوباً با دوره های نمونه برداری یکسان T عمل میکنند و بسته های ارسال شده از طریق شبکه برچسب زمانی دارند.

فرض ۳-۲. تاخیر در کانالهای اندازه گیری و محرک به ترتیب با D_{fb} و D_{fw} نشان داده میشوند که هر دو مقادیری متغیر با زمان هستند. حد بالای D_{fb} و D_{fw} به ترتیب D_1 و D_2 است.



شکل ۳-۱. ساختار پیشنهاد شده برای سیستم کنترل تحت شبکه با کنترل پیشبین خود تحریک در این رساله

فرض ۳-۳. تعداد از دست دادن بسته ها در کانالهای اندازه گیری و محرک به ترتیب توسط L_{fb} و L_{fw} نشان داده میشوند که هر دو مقادیری متغیر با زمان هستند. حد بالای L_{fb} و L_{fw} به ترتیب L_1 و L_2 هستند.

براساس حالت های مختلف اغتشاش های وارد شده به سیستم، عملکرد الگوریتم STPC پیشنهادی در دو حالت بررسی شده است. ابتدا حالتی که اغتشاش ورودی کران بالایی به صورت

$$\alpha_1 \|w_1(k)\|_2^2 \leq \beta_1 \|x(k)\|_2^2 \quad (4-3)$$

داشته باشد که در آن α_1 و β_1 مقادیر ثابت هستند مورد بررسی قرار میگیرد. سپس حالتی که کران بالای اغتشاش ورودی به صورت

$$\|w_1(k)\|_2 \leq \beta \quad (5-3)$$

باشد در نظر گرفته میشود.

در این فصل نیز الگوریتمهای ارائه شده با استدلالی مشابه با فصل قبل دچار پدیده Zeno نخواهند شد.

۳-۲-۱. تعیین کننده لحظه نمونه برداری بعدی مبتنی بر مشاهده گر

مشاهده گر پیشنهاد شده برای الگوریتم STPC، مشابه با ساختار پیشنهاد شده برای الگوریتم ETPC در فصل دو، مشاهده گر لوئبرگر است که به صورت زیر توصیف میشود:

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(y(k) - C\hat{x}(k)). \quad (6-3)$$

و در آن $\hat{x}(k)$ و $u(k)$ به ترتیب حالت مشاهده گر و ورودی مشاهده گر در لحظه k هستند. ماتریس L به روش پیشنهاد شده در فصل دو به گونه ای طراحی میشود که پایداری سیستم تضمین شود. به منظور کاهش انتقال داده های غیر ضروری در شبکه پسخورد، یک بلوک "تعیین کننده لحظه نمونه برداری بعدی" در نظر گرفته میشود که در هر لحظه نمونه برداری، لحظه نمونه برداری بعدی را پیش بینی میکند. قاعده تعیین لحظه نمونه برداری بعدی به صورت زیر میباشد:

اگر k_i آخرین لحظه ای باشد که نمونه برداری و ارسال صورت گرفته است؛ رابطه (۷-۳) بیان میکند که پس از آنکه یک بسته داده در لحظه k_i ارسال شد، برای R_1 لحظه نامساوی (۱۸-۳) بررسی میشود. اگر هیچ اعوجاجی در طول این R_1 لحظه رخ نداده باشد، جدیدترین داده نمونه برداری شده در لحظه $k_i + R_1 + 1$ ارسال میشود، چه اعوجاجی رخ داده باشد چه نه. بیان ریاضی این شرط به این صورت است

$$k_{i+1} = \begin{cases} \text{رابطه (۱۸-۳)} , & k < k_i + R_1 + 1 \\ k_i + R_1 + 1, & k \geq k_i + R_1 + 1 \end{cases} \quad (7-3)$$

رابطه (۱۸-۳) در بخش نتایج اصلی، قضیه ۳-۱ آورده شده است. به این ترتیب با استفاده از طرح کنترلی خود تحریک، پهنای باند شبکه و منابع انرژی به خوبی حفظ میشوند.

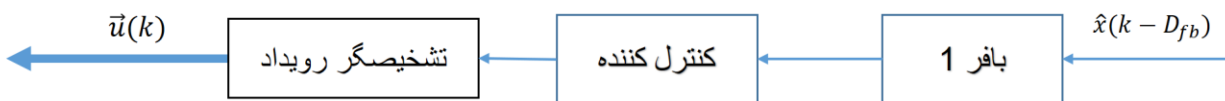
۲-۲-۳. کنترل کننده پیش بین

ساختار داخلی کنترل کننده پیش بین در الگوریتم STPC در شکل ۲-۳ نمایش داده شده است. بلوک "بافر ۱" برای ذخیره سازی آخرین بسته داده دریافت شده از طریق کانال اندازه گیری استفاده میشود. به دلیل وجود احتمال جابجایی بسته ها، به محض دریافت بسته داده در سمت کنترل کننده، برچسب زمانی آن با برچسب زمانی آخرین بسته ذخیره شده در بافر مقایسه میشود. در صورتی که بسته داده دریافت شده جدیدتر از داده موجود در بافر باشد، داده موجود در بافر با داده جدیدتر جایگزین میشود و از این داده جدید برای محاسبه سیگنال کنترلی استفاده میشود. در غیر این صورت آخرین بسته داده دریافت شده نادیده گرفته میشود.

برای سیستمی بدون تاخیر زمانی، سیگنال کنترلی براساس معادله زیر تولید میشود:

$$u(k_i) = K.\hat{x}(k_i) \quad (۸-۳)$$

که در آن $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ماتریس بهره کنترلی است که بعداً طراحی میشود.



شکل ۲-۳. ساختار داخلی کنترل کننده پیش بین در الگوریتم STPC

زمانی که داده ارسال شده توسط تاخیر تحت تاثیر قرار میگیرد، یک رویکرد مناسب برای تولید سیگنال کنترلی مناسب توسط کنترل کننده پیش بین، استفاده از کنترل کننده ای با بهره های ثابت متفاوت به صورت زیر است

$$u_{k+j|k-f} = K_{j+f}\hat{x}(k-f) \quad (۹-۳)$$

که در آن $f \in \{1, \dots, D_{fb} + L_{fb}\}$ ، $j = 0, 1, 2, \dots, D_r + L_r$ ، سیگنال کنترل پیش بین تولید شده در لحظه k برای j لحظه بعدتر است که براساس داده موجود از لحظه $k-f$ محاسبه شده است. K_j بهره کنترلی کننده مورد نظر به منظور پیش بینی سیگنال کنترلی به اندازه j گام جلوتر است.

از آنجایی که سیگنالهای کنترلی قرار است به محرک ارسال شوند و در معرض تاخیر و از دست دادن بسته ها در کانال محرک هستند، سیگنالهای کنترلی پیش بین به منظور جبران سازی اثرات احتمالی کانال محرک بر سیگنال کنترلی مورد نیاز است. در واقع یک سیگنال کنترلی تولید شده براساس بسته ارسال شده توسط تشخیصگر رویداد در لحظه k_i ممکن است در لحظه $(k_i + D_{fb} + L_{fb}(R_r + 1) + D_{fw} + L_{fw}(R_1 + 1))$ در سمت محرک

استفاده شود. به این ترتیب با قرار دادن $N = D_1 + L_1(R_1 + 1) + D_1 + L_1(R_1 + 1)$ ؛ $N + 1$ بهره کنترلی متفاوت باید در نظر گرفته شود.

بسته کنترلی تولید شده توسط کنترل کننده پیش بین به صورت زیر است

$$\vec{u}(k) = [u_{k|k_i}^T \ u_{k+1|k_i}^T \ u_{k+2|k_i}^T \ \dots \ u_{k+l|k_i}^T]^T. \quad (10-3)$$

که در آن k_i لحظه ای را نشان می دهد که در آن جدیدترین داده $(\hat{x}(k_i))$ موجود در سمت کنترل کننده؛ از سمت پلنت ارسال شده بود و l به صورت $l = D_1 + L_1(R_1 + 1)$ است.

رابطه تشخیصگر رویداد در سمت کنترلر مشابه با رابطه بلوک مشابه در سمت مشاهده گر است. اگر k_c آخرین لحظه ای باشد که سیگنال کنترلی برای ارسال بر روی شبکه قرار داده شده است و k_s لحظه ای است که جدیدترین داده در سمت کنترل کننده دریافت شده است.

$$k_{c+1} = \min(\min\{k | (\max(\vec{u}(k_c)) - \min(\vec{u}(k_s)))^T \Phi_1 (\max(\vec{u}(k_c)) - \min(\vec{u}(k_s))) > \min(\vec{u}(k_c)) \Phi_1 \min(\vec{u}(k_c)), k > k_c\}, k_c + R_1 + 1) \quad (11-3)$$

که در آن Φ_1 و Φ_2 ماتریسهای مقارن مثبت معین با مقادیر مشخص هستند.

معادلات مجتمع فضای حالت در هر دو حالت مشاهده گر مرتبه کامل و نیز مشاهده گر مرتبه کاهش یافته، مشابه با معادلات به دست آمده در فصل ۲ هستند که به منظور رعایت اختصار از تکرار آنها اجتناب شده است.

۳-۲-۳. انتخابگر

شکل ۳-۳ ساختار داخلی بلوک انتخابگر را نشان می دهد. بلوک "بافر ۲" برچسب زمانی بسته جدید دریافت شده از طریق کانال محرک را با برچسب بسته موجود در بافر مقایسه میکند. اگر بسته دریافت شده برچسب زمانی جدیدتری داشته باشد، در بافر ذخیره میشود و توسط محرک مورد استفاده قرار میگیرد. در غیر این صورت، نادیده گرفته میشود و بسته موجود در بافر توسط محرک مورد استفاده قرار میگیرد تا زمانی که بسته جدیدتری موجود گردد.

انتخابگر سیگنال کنترلی، با توجه به تاخیر وارد شده به سیگنال در طول کانال محرک، سیگنال کنترلی مناسب را از بین عناصر مختلف بسته های دریافت شده توسط کنترل کننده انتخاب میکند.



شکل ۳-۳. ساختار داخلی بلوک انتخابگر در الگوریتم STPC

۳-۳. نتایج اصلی

در این قسمت قضایایی برای محاسبه بهره های کنترل کننده و مشاهده گر و نیز محاسبه لحظه نمونه برداری بعدی بیان و اثبات میشود به نحوی که پایداری سیستم تضمین شود. حالت اول شرایطی را بررسی میکند که کران بالای اغتشاش ورودی براساس رابطه (۳-۴) تعیین میشود و حالت دوم شرایطی است که کران بالای اغتشاش ورودی براساس رابطه (۳-۵) مقداری ثابت و مشخص است.

۳-۳-۱. حالت اول اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کامل

در این حالت به منظور محاسبه بهره های کنترل کننده و مشاهده گر همان روابط مربوط به قضیه ۱-۲ مورد استفاده قرار میگیرد. برای تکمیل ساختار روش STPC پیشنهادی در قضایای ۱-۳ و ۲-۳ نحوه پیش بینی لحظه نمونه برداری بعدی و تعیین سیگنال کنترلی به نحوی که پایداری نمایی سیستم برقرار بماند تشریح میشود.

قضیه ۱-۳. سیستم توصیف شده توسط معادلات (۱-۳) و (۲-۳) و (۳-۳) کنترل کننده پیش بین (۳-۹) تحت الگوریتم STPC پایدار نمایی با نرخ کاهش $\vartheta = \lambda \mu^{\frac{1}{\tau}}$ خواهد بود اگر لحظه نمونه برداری بعدی با استفاده از رابطه زیر تعیین شود

$$k_{i+1} = k_i + \max\{1, \left\lceil \log_{\Delta_1} \left(1 - \frac{(1-\Delta_1)\|\hat{x}(k_i)\|}{\Xi(k_i)}\right) \right\rceil\} \quad (12-3)$$

که در آن

$$\Delta_1 = \max_j \{\|\bar{A}_j\|\}, \quad \Delta_2 = \max_j \{\|\bar{A}_j - I\|\},$$

$$\Theta(k) = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \vartheta^{2(k-k_0)} (\|\hat{x}(k_0)\|^2 + \frac{1}{\|C\|} \|y(k_0)\|)}$$

$$\Xi(k_i) = \Delta_2 \|\hat{x}(k_i)\| + \|\bar{E}_1\| \sqrt{\frac{\beta_1}{\alpha_1}} \Theta(k_i) + \Delta_2 \Theta(k_i).$$

اثبات. بر اساس نمایش مجتمع معادلات سیستم و با استفاده از قضیه ۳-۱ در فاصله میان دو لحظه نمونه برداری متوالی $[k_i, k_{i+1})$ داریم

$$\begin{aligned}\bar{e}(k+1) &= \bar{x}(k+1) - \bar{x}(k_i) = \bar{A}_j \bar{x}(k) + \bar{E}_1 \bar{w}_1(k) - \bar{x}(k_i) \\ &= \bar{A}_j \bar{e}(k) + \bar{E}_1 \bar{w}_1(k) + (\bar{A}_j - I) \bar{x}(k_i)\end{aligned}\quad (13-3)$$

$$\begin{aligned}\|\bar{e}(k+1)\| &\leq \|\bar{A}_j\| \|\bar{e}(k)\| + \|\bar{E}_1\| \|\bar{w}_1(k)\| + \|\bar{A}_j - I\| \|\bar{x}(k_i)\| \\ &\leq \|\bar{A}_j\| \|\bar{e}(k)\| + \|\bar{E}_1\| \|\bar{w}_1(k)\| + \Delta_r \|\bar{x}(k_i)\| \\ &\leq \|\bar{A}_j\| \|\bar{e}(k)\| + \|\bar{E}_1\| \|\bar{w}_1(k)\| + \Delta_r (\|\hat{x}(k_i)\| + \|x(k_i)\|) \\ &\leq \Delta_1 \|\bar{e}(k)\| + \|\bar{E}_1\| \sqrt{\frac{\beta_1}{\alpha_1}} \|x(k)\| + \Delta_r (\|\hat{x}(k_i)\| + \|x(k_i)\|) \\ &\leq \Delta_1 \|\bar{e}(k)\| + \Delta_r \|\hat{x}(k_i)\| + \|\bar{E}_1\| \sqrt{\frac{\beta_1}{\alpha_1}} \Theta(k_i) + \Delta_r \Theta(k_i)\end{aligned}$$

$$\|\bar{e}(k+1)\| \leq \Delta_1 \|\bar{e}(k)\| + \Xi(k_i) \quad (14-3)$$

$$\|\bar{e}(k)\| \leq \Delta_1^{k-b_k} \|\bar{e}(k_i)\| + \frac{1-\Delta_1^{k-b_k}}{1-\Delta_1} \Xi(k_i) = \frac{1-\Delta_1^{k-b_k}}{1-\Delta_1} \Xi(k_i) \quad (15-3)$$

از آنجایی که نمیخواهیم $x(k)$ و $\hat{x}(k)$ بیش از مقدار مشخصی از آخرین مقدار نمونه برداری شده منحرف شود، میخواهیم مطمئن شویم $\|\bar{e}(k)\| \leq \|\hat{x}(k_i)\|$ تضمین شده است. بنابراین داریم

$$\begin{aligned}\frac{1-\Delta_1^{k-b_k}}{1-\Delta_1} \Xi(k_i) &\leq \|\hat{x}(k_i)\| \\ \frac{1-\Delta_1^{T_k}}{1-\Delta_1} \Xi(k_i) &= \|\hat{x}(k_i)\|\end{aligned}$$

که در آن

$$.T_k = \log_{\Delta_1} \left(1 - \frac{(1-\Delta_1) \|\hat{x}(k_i)\|}{\Xi(k_i)} \right)$$

و اثبات کامل میشود.

■

به منظور کامل کردن الگوریتم STPC نیازمند تعیین چگونگی محاسبه سیگنال کنترلی هستیم. کنترل کننده پیش بین نیاز به مقدار $\hat{x}(k)$ دارد و برای محاسبه $\hat{x}(k)$ مقدار $y(k)$ نیاز است. از آنجایی که در الگوریتم STPC در میان بازه ارسال نمونه برداری انجام نمیشود، نیازمند تخمین مقدار $y(k)$ هستیم. باید تخمین را براساس دو مقدار نمونه برداری شده $y(k_i)$ و $y(k_{i+1})$ انجام دهیم.

گزینه های مختلف برای تابع تخمینی وجود دارند اما هر تابعی که به کار گرفته شود پایداری سیستم باید تضمین شود. در اینجا ما از تابع خطی به عنوان تابع تخمین استفاده میکنیم. براساس این تابع برای هر $k \in [k_i, k_{i+1})$ داریم

$$y(k) = \frac{y(k_{i+1}) - y(k_i)}{k_{i+1} - k_i} (k - k_i) + y(k_i)$$

اکنون با در نظر گرفتن تابع تخمین، یک بار دیگر نمایش مجتمع معادلات حالت سیستم را به دست می آوریم.

$$x(k+1) = Ax(k) + BK_j \hat{x}(k-i) + E_1 w_1(k) \quad (۱۶-۳)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + BK_j \hat{x}(k-i) + L(y(k) - C\hat{x}(k)) \\ &= (A - LC)\hat{x}(k) + BK_j \hat{x}(k-i) + Ly(k) \end{aligned} \quad (۱۷-۳)$$

بنابراین معادلات فضای حالت مجتمع به دست آمده به صورت زیر خواهد بود

$$\tilde{x}(k+1) = \tilde{A}_j \tilde{x}(k) + \tilde{L} \tilde{Y}(k) + \tilde{E}_1 \tilde{W}_1(k) \quad , j = 1, \dots, N \quad (۱۸-۳)$$

$$y(k) = \frac{y(k_{i+1}) - y(k_i)}{k_{i+1} - k_i} (k - k_i) + y(k_i) \quad k \in [k_i, k_{i+1}), \quad (۱۹-۳)$$

که در آن

$$\tilde{x}(k) = [x^T(k) x^T(k-1) \dots x^T(k-N) \hat{x}^T(k) \hat{x}^T(k-1) \dots \hat{x}^T(k-N)]^T$$

$$\tilde{E}_1 = \begin{bmatrix} E_1 & & \\ \vdots & \ddots & \\ \vdots & & \vdots \end{bmatrix}_{(N+1)n \times q}, \quad \tilde{L} = [\underbrace{\vdots}_{1 \times (N+1)n} \quad L \quad L \quad \dots \quad L]_{(N+1)n \times (N+1)n}$$

$$\tilde{w}_1(k) = \begin{bmatrix} w_1(k) \\ \vdots \end{bmatrix}_{1 \times q}, \quad \tilde{Y}(k) = [\underbrace{\vdots}_{1 \times (N+1)n} \quad y(k) \quad y(k-1) \quad \dots \quad y(k-N)]_{(N+1)n \times 1}$$

$$\check{A}_j = \begin{bmatrix} A_{\lambda} & A_{\lambda j} \\ A_{\lambda} & A_{\lambda j} \end{bmatrix}$$

که تشکیل شده است از

$$A_{\lambda} = \begin{bmatrix} A & \cdot_{n \times Nn} \\ I_{Nn} & \cdot_{Nn \times n} \end{bmatrix}, \quad A_{\lambda j} = \begin{bmatrix} \cdot_n & BK_j & \cdot_{n \times (N-j)} \\ \cdot_{(N+1)n \times (N+1)n} \end{bmatrix}, \quad A_{\lambda} = \begin{bmatrix} LC & \cdot_{n \times Nn} \\ \cdot_{Nn \times (N+1)n} \end{bmatrix},$$

$$A_{\lambda j} = \begin{bmatrix} A - LC & \cdot_{n \times (j-1)n} & BK_j & \cdot_{n \times (N-j)} \\ & I_{Nn} & \cdot_{Nn \times n} \end{bmatrix}$$

قضیه ۳-۲. $\check{\lambda} < 1$ و $\check{\mu} \geq 1$ دو مقدار ثابت مشخص هستند و ماتریسهای K_j و L ماتریسهای به دست آمده از قضیه ۱-۲ هستند. اگر ماتریسهای متقارن مثبت معین $\check{P}_j$ و $\check{Q}_j$ ($j \in \bar{N} = \{0, 1, \dots, N\}$) موجود باشند به گونه ای که

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{\lambda} & -\check{A}_j & \check{A}_j^T \check{P}_j \check{L} & \check{A}_j^T \check{P}_j \check{E}_{\lambda} & -\check{E}_{\lambda} \\ * & \Sigma_{\lambda} & \cdot & \cdot & \check{A}_j^T \check{E}_{\lambda} \\ * & * & \Sigma_{\lambda} & \check{L}^T \check{P}_j \check{E}_{\lambda} & \cdot \\ * & * & * & \Sigma_{\lambda} & 0 \\ * & * & * & * & \Sigma_{\Delta} \end{bmatrix} < \cdot. \quad (20-3)$$

$$\Sigma_{\lambda} = \check{A}_j^T \check{P}_j \check{A}_j + \check{Q}_j - \lambda^* \check{P}_j + \frac{\beta_{\lambda}}{\alpha_{\lambda}} I, \quad \Sigma_{\lambda} = \check{A}_j^T \check{A}_j - \lambda^* \check{Q}_j + \frac{\beta_{\lambda}}{\alpha_{\lambda}} I$$

$$\Sigma_{\lambda} = \check{L}^T \check{P}_j \check{L} - \frac{\|\check{L}\|^2}{\check{\rho}^*} I, \quad \Sigma_{\lambda} = \check{E}_{\lambda}^T \check{P}_j \check{E}_{\lambda} - I, \quad \Sigma_{\Delta} = \check{E}_{\lambda}^T \check{E}_{\lambda} - I$$

و

$$\check{\mu} \check{P}_i \geq \check{P}_j \quad \check{\mu} \check{Q}_i \geq \check{Q}_j, i, j \in \bar{N} \quad (21-3)$$

آنگاه سیستم توصیف شده توسط معادلات (۱-۳) و (۲-۳) و (۳-۳) و کنترل کننده پیش بین (۹-۳) و معادلات تخمین (۱۸-۳) و (۱۹-۳) پایدار نمایی میباشد.

اثبات. با انتخاب تابع لیاپانوف چندگانه به صورت

$$\check{V}_j(k) = \check{x}^T(k) \check{P}_j \check{x}(k) + \check{x}^T(k-1) \check{Q}_j \check{x}(k-1) \quad (22-3)$$

و در نظر گرفتن تغییرات $\check{V}_j(k)$ زمانی که سیستم در i مین باره نمونه برداری است و K_j بهره فعال کنترل کننده است، خواهیم داشت

$$\begin{aligned} \check{V}_j(k+1) - \check{\lambda}^r \check{V}_j(k) &= \check{x}^T(k+1) \check{P}_j \check{x}(k+1) + \check{x}^T(k) (\check{Q}_j - \check{\lambda}^r \check{P}_j) \check{x}(k) - \check{\lambda}^r \check{x}^T(k-1) \check{Q}_j \check{x}(k-1) \\ &= [\check{A}_j \check{x}(k) + \check{L} \check{Y}(k) + \check{E}_\backslash \check{W}_\backslash(k)]^T \check{P}_j [\check{A}_j \check{x}(k) + \check{L} \check{Y}(k) + \check{E}_\backslash \check{W}_\backslash(k)] + \check{x}^T(k) (\check{Q}_j - \check{\lambda}^r \check{P}_j) \check{x}(k) - \check{\lambda}^r \check{x}^T(k-1) \check{Q}_j \check{x}(k-1) \end{aligned} \quad (23-3)$$

در مرحله بعد کران بالایی برای نسبت مقادیر $y(k)$ در دو لحظه متوالی به دست می آوریم. با در نظر گرفتن تخمین خطی $y(k)$ به صورت $y(k) = mk + y(k_i)$ که در آن m شیب خط مورد نظر است خواهیم داشت

$$\frac{\|y(k+1)\|}{\|y(k)\|} = \frac{\|m(k+1)+y(k_i)\|}{\|mk+y(k_i)\|} \leq 1 + \frac{\|m\|}{\|mk+y(k_i)\|} \quad (24-3)$$

$$\frac{\|y(k+1)\|}{\|y(k)\|} \leq 1 + \frac{\|m\|}{\min\{y(k_i), y(k_{i+1})\}} \quad (3-25)$$

$$\check{\rho} = 1 + \frac{\|m\|}{\min\{y(k_i), y(k_{i+1})\}} \quad (26-3)$$

$$\frac{\|y(k+1)\|}{\|y(k)\|} \leq \check{\rho} \quad (27-3)$$

یک بردار است میتوان گفت $\check{Y}(k)$ از آنجا که

$$\frac{\|\check{Y}(k)\|}{\|\check{Y}(k-1)\|} \leq \check{\rho} \quad (28-3)$$

در سوی دیگر از معادله (۱۸-۳) داریم

$$\check{L} \check{Y}(k-1) = \check{x}(k) - \check{A}_j \check{x}(k-1) - \check{E}_\backslash \check{W}_\backslash(k-1) \quad (29-3)$$

$$\|\check{L}\|^r \|\check{Y}(k-1)\|^r = \|\check{x}(k) - \check{A}_j \check{x}(k-1) - \check{E}_\backslash \check{W}_\backslash(k-1)\|^r \quad (30-3)$$

$$\frac{\|\check{L}\|^r}{\check{\rho}^r} \|\check{Y}(k)\|^r \leq \|\check{x}(k) - \check{A}_j \check{x}(k-1) - \check{E}_\backslash \check{W}_\backslash(k-1)\|^r \quad (31-3)$$

با استفاده از رابطه (۴-۳) و معادله (۲۳-۳) داریم

$$\begin{aligned} \check{V}_j(k+1) - \check{\lambda}^r \check{V}_j(k) &\leq [\check{A}_j \check{x}(k) + \check{L} \check{Y}(k) + \check{E}_\backslash \check{W}_\backslash(k)]^T \check{P}_j [\check{A}_j \check{x}(k) + \check{L} \check{Y}(k) + \check{E}_\backslash \check{W}_\backslash(k)] + \\ &\check{x}^T(k) (\check{Q}_j - \check{\lambda}^r \check{P}_j) \check{x}(k) - \check{\lambda}^r \check{x}^T(k-1) \check{Q}_j \check{x}(k-1) - \|\check{W}_\backslash(k)\|_\gamma^r + \frac{\beta_\gamma}{\alpha_\gamma} \|\check{x}(k)\|_\gamma^r - \frac{\|\check{L}\|^r}{\check{\rho}^r} \|\check{Y}(k)\|^r + \end{aligned}$$

$$\|\tilde{x}(k) - \check{A}_j \tilde{x}(k-1) - \check{E}_j \check{W}_j(k-1)\|^2 - \|\check{W}_j(k-1)\|_{\check{\gamma}}^2 + \frac{\beta_j}{\alpha_j} \|\tilde{x}(k-1)\|_{\check{\gamma}}^2$$

$$= \begin{bmatrix} \tilde{x}(k)^T \\ \tilde{x}(k-1)^T \\ \check{Y}(k)^T \\ \check{W}_j(k)^T \\ \check{W}_j(k-1)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_j & -\check{A}_j & \check{A}_j^T \check{P}_j \check{L} & \check{A}_j^T \check{P}_j \check{E}_j & -\check{E}_j \\ * & \Sigma_{\check{\gamma}} & \cdot & \cdot & \check{A}_j^T \check{E}_j \\ * & * & \Sigma_{\check{\gamma}} & \check{L}^T \check{P}_j \check{E}_j & \cdot \\ * & * & * & \Sigma_{\check{\gamma}} & 0 \\ * & * & * & * & \Sigma_{\Delta} \end{bmatrix} [\tilde{x}(k) \quad \tilde{x}(k-1) \quad \check{Y}(k) \quad \check{W}_j(k) \quad \check{W}_j(k-1)]$$

بنابراین اگر معادله (۳۰-۳) برقرار باشد آنگاه

$$\check{V}_j(k+1) - \lambda^2 \check{V}_j(k) < \cdot \quad (۳۲-۳)$$

به این ترتیب اثبات کامل میشود.

■

۳-۳-۲. حالت دوم اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کامل

در این قسمت حالتی را در نظر میگیریم که کران بالای اغتشاش به کمک رابطه (۵-۳) مشخص شود. در این حالت به منظور محاسبه بهره های کنترل کننده و مشاهده گر از قضیه ۲-۲ بهره میبریم. سپس برای تعیین لحظه نمونه برداری بعدی از قضایایی مشابه با قضایای ۱-۳ و ۲-۳ استفاده میکنیم با این تفاوت که در جریان اثبات قضایا رابطه (۴-۳) را با رابطه (۵-۳) جایگزین میکنیم.

قضیه ۳-۳. سیستم توصیف شده توسط معادلات (۱-۳) و (۲-۳) و (۳-۳) با کنترل کننده پیش بین (۹-۳) تحت الگوریتم STPC پایدار نمایی با نرخ کاهش $\vartheta = \lambda \mu^{\frac{1}{\check{\gamma}}}$ خواهد بود اگر لحظه نمونه برداری بعدی با استفاده از رابطه زیر تعیین شود

$$k_{i+1} = k_i + \max\{1, \left\lceil \log_{\Delta_j} \left(1 - \frac{(1-\Delta_j)\|\hat{x}(k_i)\|}{\Xi(k_i)}\right) \right\rceil\} \quad (۳۳-۳)$$

که در آن

$$\Delta_j = \max_j \{\|\bar{A}_j\|\}, \quad \Delta_{\check{\gamma}} = \max_j \{\|\bar{A}_j - I\|\},$$

$$\Theta(k) = \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_1} \vartheta^{\tau(k-k_*)} (\|\hat{x}(k_*)\|^2 + \frac{1}{\|C\|} \|y(k_*)\|) + \frac{\beta}{\varepsilon_1 \delta}}$$

$$\Xi(k_i) = \Delta_r \|\hat{x}(k_i)\| + \|\bar{E}_1\| \beta + \Delta_r \Theta(k_i)$$

اثبات. اثبات مشابه با روش قضیه ۲-۲ میباشد با این تفاوت که کران بالای اغتشاش از رابطه ۵-۳ جایگزین میشود.

قضیه ۴-۳. ماتریسهای K_j ($j \in \bar{N} = \{0, 1, \dots, N\}$) و L ماتریسهای به دست آمده از قضیه ۲-۲ هستند.

اگر ماتریسهای متقارن مثبت معین $\check{P}$ و $\check{Q}$ با ابعاد مناسب موجود باشند به گونه ای که

$$\begin{bmatrix} \Sigma_1 & -\check{A}_j & \check{A}_j^T \check{P} \check{L} & \check{A}_j^T \check{P} \check{E}_1 & -\check{E}_1 \\ * & \Sigma_r & \cdot & \cdot & \check{A}_j^T \check{E}_1 \\ * & * & \Sigma_r & \check{L}^T \check{P} \check{E}_1 & \cdot \\ * & * & * & \Sigma_r & 0 \\ * & * & * & * & \Sigma_\Delta \end{bmatrix} < \cdot. \quad (34-3)$$

$$\Sigma_1 = \check{A}_j^T \check{P} \check{A}_j + \check{Q} - (1 - \delta) \check{P} + I, \quad \Sigma_r = \check{A}_j^T \check{A}_j - (1 - \delta) \check{Q}$$

$$\Sigma_r = \check{L}^T \check{P} \check{L} - \frac{\|\check{L}\|^2}{\check{\rho}^2} I, \quad \Sigma_r = \check{E}_1^T \check{P} \check{E}_1 - I, \quad \Sigma_\Delta = \check{E}_1^T \check{E}_1 - I$$

آنگاه متغیرهای سیستم توصیف شده توسط معادلات (۱-۳) و (۲-۳) و (۳-۳) با کنترل کننده پیش بین (۹-۳) و معادلات تخمین (۳۰-۳) و (۳۱-۳) به صورت UUB پایدار میباشد.

اثبات. اثبات مشابه با قضیه ۲-۳ است با در نظر گرفتن این نکته که تمام P_j و Q_j ها مساوی در نظر گرفته شده اند و کران بالای اغتشاش از رابطه (۵-۳) تعیین میشود.

۳-۳-۳. حالت اول اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته

قضیه ۵-۳. سیستم توصیف شده توسط معادلات (۱-۳) و (۲-۳) و (۳-۳) کنترل کننده پیش بین (۹-۳) تحت

الگوریتم STPC پایدار نمایی با نرخ کاهش $\vartheta = \lambda \mu^{\frac{1}{\tau}}$ خواهد بود اگر لحظه نمونه برداری بعدی با استفاده از رابطه زیر تعیین شود

$$k_{i+1} = k_i + \max\{1, \left\lfloor \log_{\Delta_1} \left(1 - \frac{(1-\Delta_1) \|\hat{x}_b(k_i)\|}{\Xi(k_i)}\right) \right\rfloor\} \quad (35-3)$$

که در آن

$$\Delta_{\gamma} = \max_j \{\|\bar{A}_{j-ro}\|\}, \quad \Delta_{\gamma} = \max_j \{\|\bar{A}_{j-ro} - I\|\},$$

$$\Theta(k) = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\gamma}}{\varepsilon_{\gamma}} \vartheta^{\gamma(k-k_{\gamma})} (\|\hat{x}_b(k_{\gamma})\|^{\gamma} + \frac{1}{\|C\|} \|y(k_{\gamma})\|)}$$

$$\Xi(k_i) = \Delta_{\gamma} \|\hat{x}_b(k_i)\| + \|\bar{E}_{\gamma}\| \sqrt{\frac{\beta_{\gamma}}{\alpha_{\gamma}}} \Theta(k_i) + \Delta_{\gamma} \Theta(k_i)$$

اثبات. اثبات این قضیه مشابه با اثبات قضیه ۱-۳ می باشد.

قضیه ۳-۶. $\lambda < 1$ و $\mu \geq 1$ دو مقدار ثابت مشخص هستند و ماتریسهای K_j و L ماتریسهای به دست آمده از قضیه ۱-۲ هستند. اگر ماتریسهای متقارن مثبت معین $\check{P}_j$ و $\check{Q}_j$ ($j \in \bar{N} = \{0, 1, \dots, N\}$) موجود باشند به گونه ای که

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{\gamma} & -\check{A}_{j-ro} & \check{A}_{j-ro}^T \check{P}_j \check{L} & \check{A}_{j-ro}^T \check{P}_j \check{E}_{\gamma} & -\check{E}_{\gamma} \\ * & \Sigma_{\gamma} & \cdot & \cdot & \check{A}_{j-ro}^T \check{E}_{\gamma} \\ * & * & \Sigma_{\gamma} & \check{L}^T \check{P}_j \check{E}_{\gamma} & \cdot \\ * & * & * & \Sigma_{\gamma} & 0 \\ * & * & * & * & \Sigma_{\delta} \end{bmatrix} < \cdot \quad (36-3)$$

$$\Sigma_{\gamma} = \check{A}_{j-ro}^T \check{P}_j \check{A}_{j-ro} + \check{Q}_j - \lambda^{\gamma} \check{P}_j + \frac{\beta_{\gamma}}{\alpha_{\gamma}} I, \quad \Sigma_{\gamma} = \check{A}_{j-ro}^T \check{A}_{j-ro} - \lambda^{\gamma} \check{Q}_j + \frac{\beta_{\gamma}}{\alpha_{\gamma}} I$$

$$\Sigma_{\gamma} = \check{L}^T \check{P}_j \check{L} - \frac{\|\check{L}\|^{\gamma}}{\check{\rho}^{\gamma}} I, \quad \Sigma_{\gamma} = \check{E}_{\gamma}^T \check{P}_j \check{E}_{\gamma} - I, \quad \Sigma_{\delta} = \check{E}_{\gamma}^T \check{E}_{\gamma} - I$$

و

$$\mu \check{P}_i \geq \check{P}_j \quad \mu \check{Q}_i \geq \check{Q}_j, i, j \in \bar{N} \quad (37-3)$$

آنگاه سیستم توصیف شده توسط معادلات (۱-۳) و (۲-۳) و (۳-۳) و کنترل کننده پیش بین (۹-۳) و معادلات تخمین (۱۸-۳) و (۱۹-۳) پایدار نمایی می باشد.

اثبات. اثبات این قضیه مشابه با قضیه ۲-۳ می باشد با ذکر این نکته که این بار $\check{\rho}$ که در رابطه (۲۷-۳) تعیین شد، ماکسیمم تمام $\check{\rho}$ ها برای تمام بازه های قبلی نمونه برداری در نظر گرفته میشود.

۳-۳-۴. حالت دوم اغتشاش با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته

قضیه ۳-۷. سیستم توصیف شده توسط معادلات (۱-۳) و (۲-۳) و (۳-۳) با کنترل کننده پیش بین (۳-۹) تحت الگوریتم STPC پایدار نمایی با نرخ کاهش $\vartheta = \lambda \mu^{\frac{1}{\gamma}}$ خواهد بود اگر لحظه نمونه برداری بعدی با استفاده از رابطه زیر تعیین شود

$$k_{i+1} = k_i + \max\{1, \left\lfloor \log_{\Delta_1} \left(1 - \frac{(1-\Delta_1)\|\hat{x}(k_i)\|}{\Xi(k_i)}\right) \right\rfloor\} \quad (38-3)$$

که در آن

$$\Delta_1 = \max_j \{\|\bar{A}_{j-ro}\|\}, \quad \Delta_\gamma = \max_j \{\|\bar{A}_{j-ro} - I\|\},$$

$$\Theta(k) = \sqrt{\frac{\varepsilon_\gamma}{\varepsilon_1} \vartheta^{\gamma(k-k_*)} (\|\hat{x}_b(k_*)\|^2 + \frac{1}{\|C\|} \|y(k_*)\|) + \frac{\beta}{\varepsilon_1 \delta}}$$

$$\Xi(k_i) = \Delta_\gamma \|\hat{x}_b(k_i)\| + \|\bar{E}_1\| \beta + \Delta_\gamma \Theta(k_i)$$

اثبات. اثبات مشابه با روش قضیه ۳-۳ میباشد.

قضیه ۳-۸. ماتریسهای K_j ($j \in \bar{N} = \{0, 1, \dots, N\}$) و L ماتریسهای به دست آمده از قضیه ۲-۲ هستند. اگر ماتریسهای متقارن مثبت معین $\check{P}$ و $\check{Q}$ با ابعاد مناسب موجود باشند به گونه ای که

$$\begin{bmatrix} \Sigma_1 & -\check{A}_{j-ro} & \check{A}_{j-ro}^T \check{P} \check{L} & \check{A}_{j-ro}^T \check{P} \check{E}_1 & -\check{E}_1 \\ * & \Sigma_\gamma & \cdot & \cdot & \check{A}_{j-ro}^T \check{E}_1 \\ * & * & \Sigma_\gamma & \check{L}^T \check{P} \check{E}_1 & \cdot \\ * & * & * & \Sigma_\gamma & 0 \\ * & * & * & * & \Sigma_\delta \end{bmatrix} < 0. \quad (39-3)$$

$$\Sigma_1 = \check{A}_{j-ro}^T \check{P} \check{A}_{j-ro} + \check{Q} - (1 - \delta) \check{P} + I, \quad \Sigma_\gamma = \check{A}_{j-ro}^T \check{A}_{j-ro} - (1 - \delta) \check{Q}$$

$$\Sigma_\gamma = \check{L}^T \check{P} \check{L} - \frac{\|\check{L}\|^2}{\check{\rho}^\gamma} I, \quad \Sigma_\gamma = \check{E}_1^T \check{P} \check{E}_1 - I, \quad \Sigma_\delta = \check{E}_1^T \check{E}_1 - I$$

آنگاه متغیرهای سیستم توصیف شده توسط معادلات (۱-۳) و (۲-۳) و (۳-۳) با کنترل کننده پیش بین (۳-۹) و معادلات تخمین (۳۰-۳) و (۳۱-۳) به صورت UUB پایدار میباشد.

اثبات. اثبات مشابه با قضیه ۳-۴ است.

۳-۴. نتایج شبیه سازی

در این قسمت موثر بودن طرح کنترلی پیشنهاد شده از طریق دو مثال نشان داده شده است. هر دو سیستم تحت تاثیر تاخیر متغیر با زمان، جابجایی بسته ها و اغتشاش ورودی قرار میگیرند. الگوریتمهای پیشنهاد شده در این رساله به سیستمهای مورد نظر اعمال میشوند و نتایج به دست آمده در هر دو حالت اغتشاش ورودی از نظر پایداری سیستم و تعداد بسته های ارسال شده از طریق شبکه تشریح میشوند.

۳-۴-۱. حالت اول اغتشاش

ابتدا حالتی را بررسی میکنیم که اغتشاش ورودی سیستم در رابطه (۳-۴) صدق کند.

مثال ۳-۱. در این مثال، تاثیرگذاری الگوریتم کنترلی خود تحریک پیشنهاد شده در این رساله بر روی سیستم مشابه مقاله [۳۷] بررسی شده است. از آنجا که این سیستم در فصل دو نیز مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت در فصل چهار تصمیم به تلفیق هر دو الگوریتم فصول دو و سه بر روی یک سیستم داریم، در این مثال نیز همان سیستم مورد بررسی قرار گرفته است.

معادلات فضای حالت سیستم به صورت زیر هستند:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + E_1 w_1(k)$$

$$y(k) = Cx(k)$$

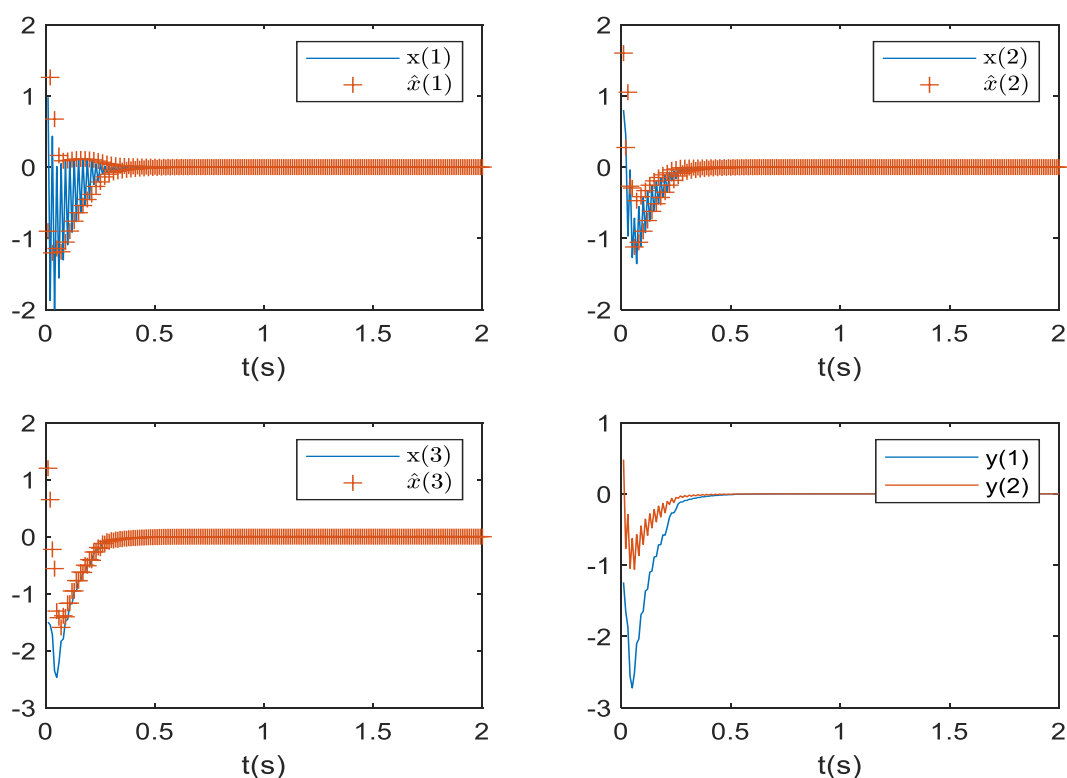
که در آن ماتریسها به صورت زیر در نظر گرفته میشوند

$$A = \begin{bmatrix} -0.85 & 0.271 & -0.488 \\ 0.482 & 0.1 & 0.24 \\ -0.002 & -0.3681 & 0.707 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & -0.4 \\ 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 1 \\ 0.4 & 0.3 & 0.1 \end{bmatrix}, E_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

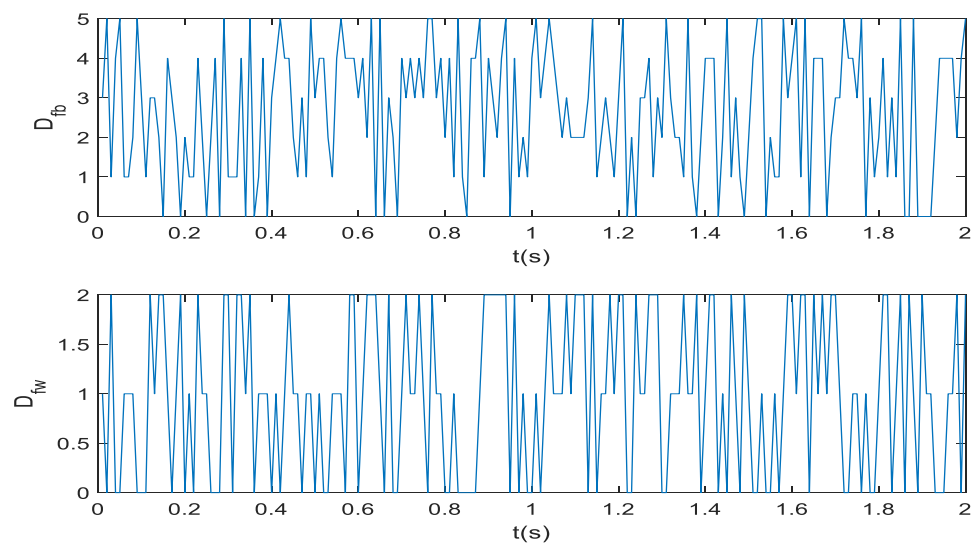
ثوابت در نظر گرفته شده در فرض ۳-۲ به صورت $\alpha_1 = 1$ و $\beta_1 = 0.01$ انتخاب میشوند و بازه نمونه برداری به صورت $T = 0.01$ در نظر گرفته میشود. حد بالای تاخیرهای انتقال و از دست دادن بسته های متوالی در کانالهای اندازه گیری و محرک به صورت $D_1 = 5T$ و $D_2 = 2T$ قرار داده میشوند. حالتیهای اولیه سیستم و مشاهده گر به ترتیب به صورت $x(0) = [0.98, 0.8, -1.5]^T$ و $\hat{x}(0) = [-0.9, 1.6, 1.2]^T$ هستند و کران بالای عدم ارسال نیز به صورت $R_1 = 3T$ قرار داده میشود.

ابتدا پایداری سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهاد شده در این رساله مورد بررسی قرار میگیرد. در شکل ۳-۴ نمودارهای مقادیر واقعی و تخمینی متغیرهای حالت سیستم و نمودار خروجیهای سیستم با استفاده از روش STPC پیشنهاد شده در این رساله ترسیم شده است. نمودارهای زمانی این شکل تاثیرگذاری روش پیشنهادی این رساله در جبرانسازی تاخیر و همگرایی سریع متغیرهای حالت سیستم به سمت پایداری را نشان میدهند.

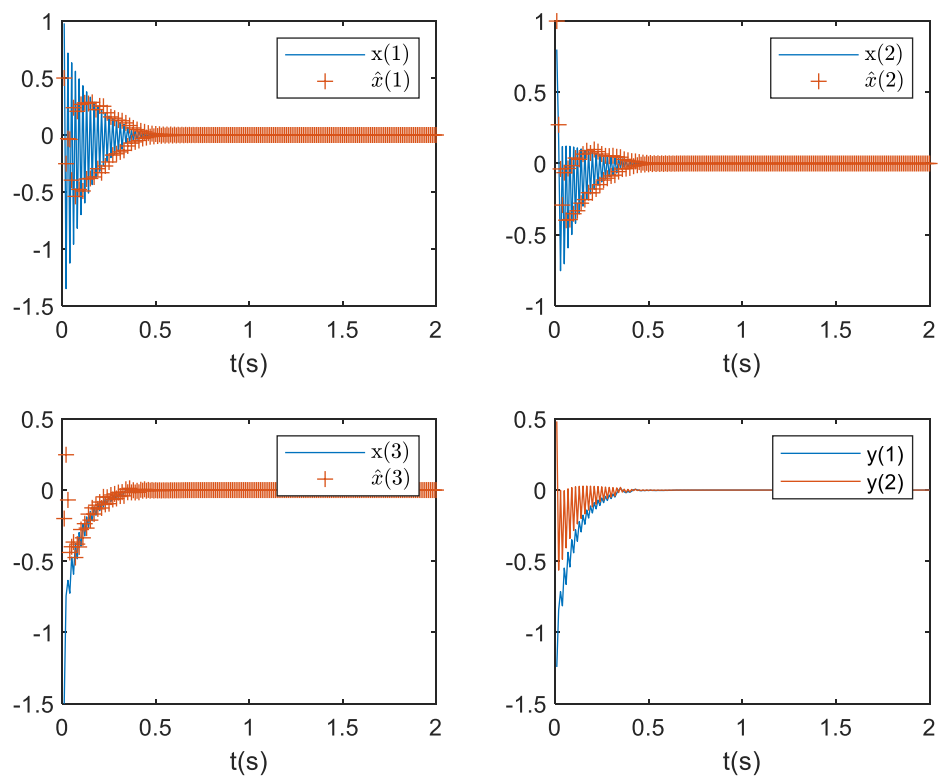
مقایسه نمودارهای مقادیر واقعی و تخمینی متغیرهای حالت سیستم در شکل ۳-۴ اندکی تفاوت را میان این نمودارها نشان میدهد. این تفاوت به دلیل استفاده از مقدار تخمینی خروجیهای سیستم در مشاهده گر برای محاسبه مقادیر تخمینی متغیرهای حالت میباشد. تعداد داده های قرار گرفته بر روی شبکه نشان میدهد که تشخیصگر رویداد از میان ۱۰۰ بازه ممکن نمونه برداری تنها در ۳۴ لحظه نمونه برداری و ارسال داده ها را انجام میدهد که به معنی کاهش حدوداً ۶۵ درصدی داده های ارسال شده با استفاده از طرح کنترلی STPC پیشنهاد شده در این رساله است.



شکل ۳-۴. تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله برای مثال ۳-۱.



شکل ۳-۵. تاخیر متغیر با زمان در کانال اندازه گیری و محرک شبکه مخابراتی برای مثال ۳-۱.



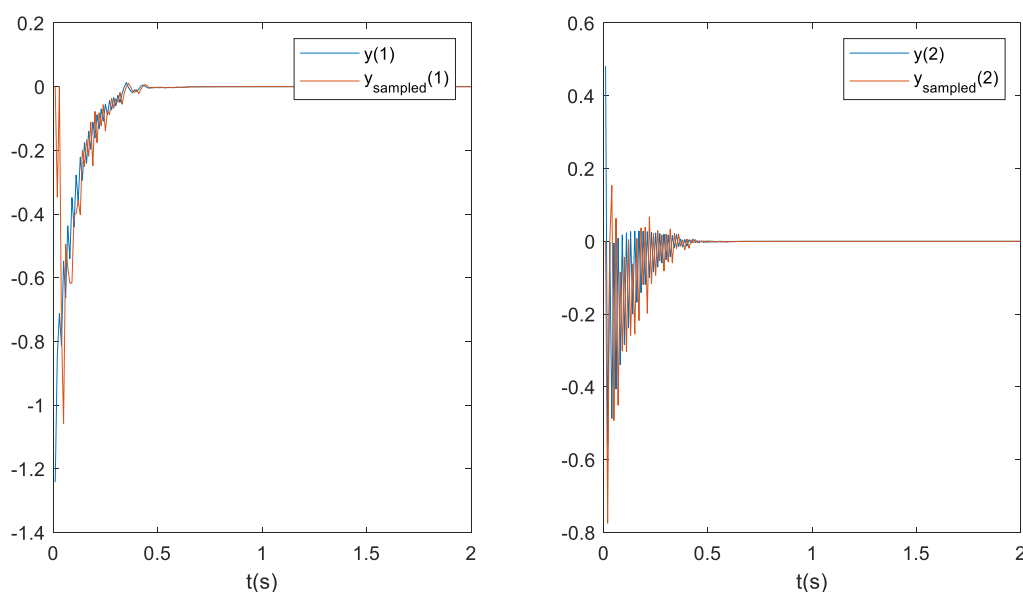
شکل ۳-۶. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله در حضور نویز سنسور برای مثال ۳-۱.

در مرحله بعد عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حضور نویز سنسور مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نویز سنسور به صورت نویز سفید اضافه شونده در نظر گرفته شده است. نمودارهای شکل ۳-۶ نشان میدهند که در حضور نویز سنسور هم الگوریتم پیشنهادی به خوبی عمل میکند و تمام متغیرها همگرا شده اند. شکل ۳-۷ میزان تاثیر نویز اندازه گیری را بر روی سیگنال خروجی نشان میدهد و تفاوت میان سیگنال خروجی واقعی و سیگنال خروجی اندازه گیری شده توسط سنسور را نشان میدهد.

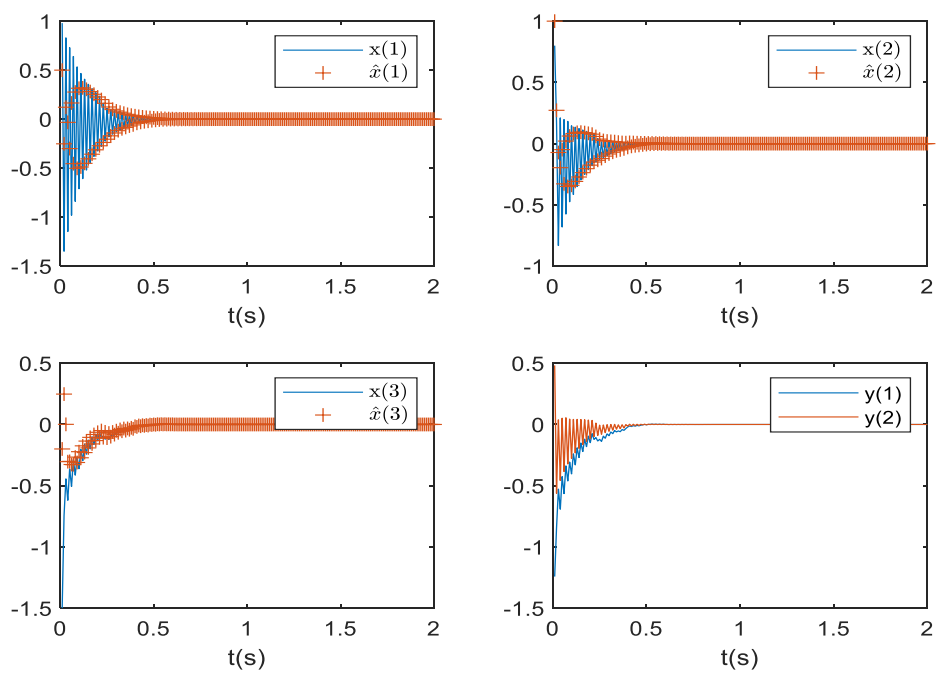
در شکل ۳-۸ متغیرهای سیستم تحت تاثیر تاخیر تصادفی با توزیع برنولی مورد بررسی قرار گرفته اند. مانند مثال ۲-۱ رابطه مربوط به پیاده سازی تاخیر به صورت

$$x_c(k) = x(k - \epsilon_k D_{fb})$$

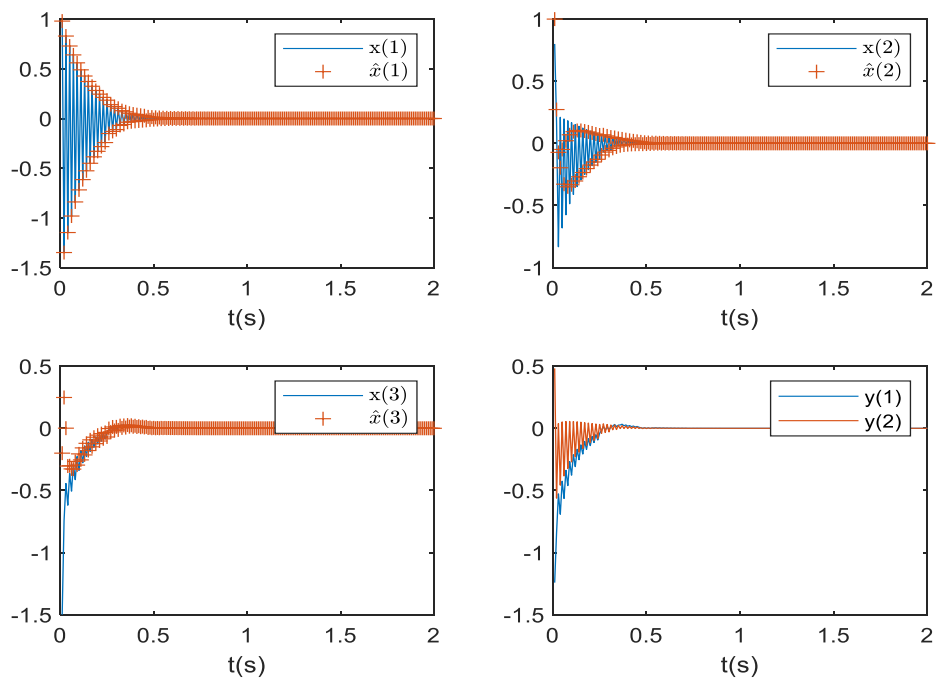
در نظر گرفته شده است که در آن $x_c(k)$ متغیر حالت دریافت شده در سمت کنترل کننده در لحظه k است و ϵ_k نیز متغیر تصادفی با توزیع برنولی است که تعیین کننده وقوع یا عدم وقوع تاخیر در کانال پسخورد است و احتمال عدم وقوع ۰,۲۵ در نظر گرفته شده است. به طور مشابه رابطه ای تصادفی با متغیر تصادفی مستقل از ϵ_k وقوع تاخیر در کانال پیشخورد را تعیین میکند. نمودارهای شکل ۳-۸ نشان میدهند که متغیرهای سیستم در حضور تاخیر تصادفی در هر دو کانال پیشخورد و پسخورد با استفاده از الگوریتم ETPC پیشنهادی همگرا میشوند.



شکل ۳-۷. خروجیهای سیستم در حضور نویز سنسور در مثال ۳-۱.



شکل ۸-۳. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله در حضور تاخیر تصادفی برای مثال ۱-۳.



شکل ۹-۳. متغیرهای حالت سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته برای مثال ۱-۳.

در شکل ۳-۹ تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته نشان داده شده است. نمودارها نشان میدهند با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته نیز متغیرهای سیستم با سرعتی مشابه با مشاهده گر مرتبه کامل همگرا شده اند که نشانگر انتخاب مناسب مشاهده گر و محاسبه دقیق ماتریس مشاهده گر است. تعداد داده های قرار گرفته بر روی شبکه نشان میدهد که تشخیصگر رویداد از میان ۱۰۰ بازه ممکن نمونه برداری تنها در ۲۹ لحظه نمونه برداری و ارسال داده ها را انجام میدهد که به معنی کاهش حدوداً ۷۰ درصدی داده های ارسال شده با استفاده از طرح کنترلی STPC پیشنهاد شده در این رساله است.

جدول ۳-۱. تعداد بسته های ارسال شده در الگوریتم STPC پیشنهاد شده در رساله با استفاده از مشاهده گر مرتبه کامل برای مثال ۳-۲ به ازاء مقادیر مختلف D_1 و D_2 .

D_1	۵	۴	۳	۲	۲	۲
D_2	۲	۲	۲	۲	۳	۵
تعداد بسته های ارسال شده	۳۴	۵۱	۶۰	۶۸	۶۲	۵۱

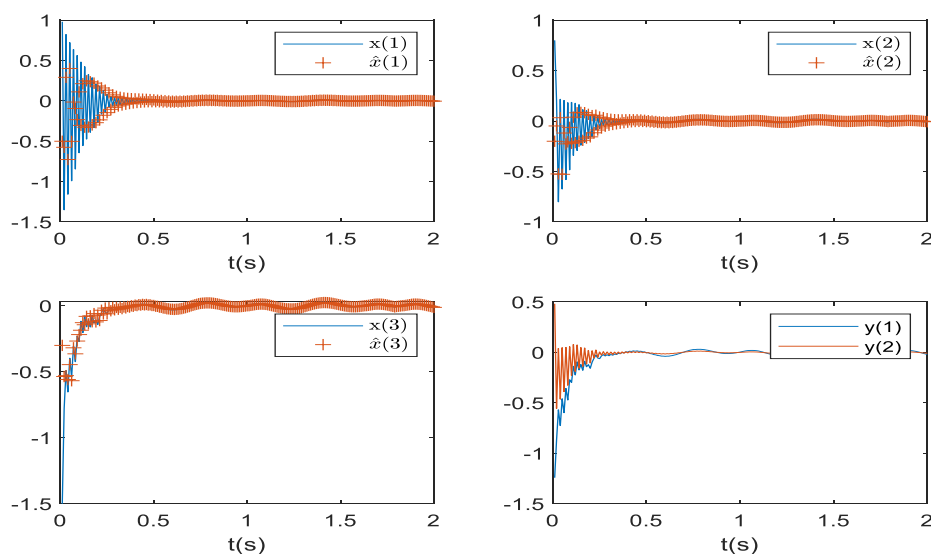
جدول ۳-۱ نشانگر تاثیر مقادیر مختلف حد بالای تاخیر مجاز در کانالهای اندازه گیری و محرک بر روی تعداد بسته های ارسال شده از طریق شبکه مخابراتی در طول زمان است. مقادیر موجود در جدول نشان میدهد جابجایی مقادیر D_1 و D_2 با یکدیگر منجر به تفاوت قابل ملاحظه ای در تعداد بسته های ارسال شده در سیستم نمیشود. تفاوت جزئی ایجاد شده به دلیل تفاوت در زمانهای به روزرسانی سیگنال کنترلی و طبیعتاً تفاوت جزئی در رفتار متغیرهای سیستم است.

۳-۴-۲. حالت دوم اغتشاش

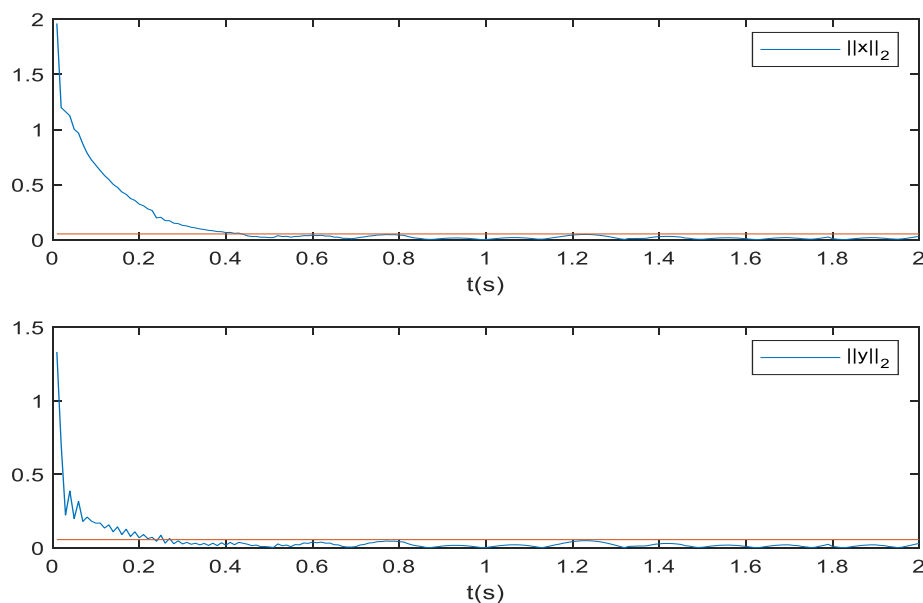
در این قسمت حالتی را بررسی میکنیم که بردار اغتشاش ورودی سیستم در رابطه (۳-۵) صدق میکند.

مثال ۳-۲. سیستم مورد بررسی در این مثال همان سیستم مثال ۳-۱ است با این تفاوت که کران بالای اغتشاش ورودی مقدار ثابت و مشخص در نظر گرفته میشود. شکل ۳-۱۰ تغییرات متغیرهای سیستم را تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله نشان میدهد. نمودارها به خوبی کراندار شدن مقادیر متغیرهای سیستم را نشان میدهند.

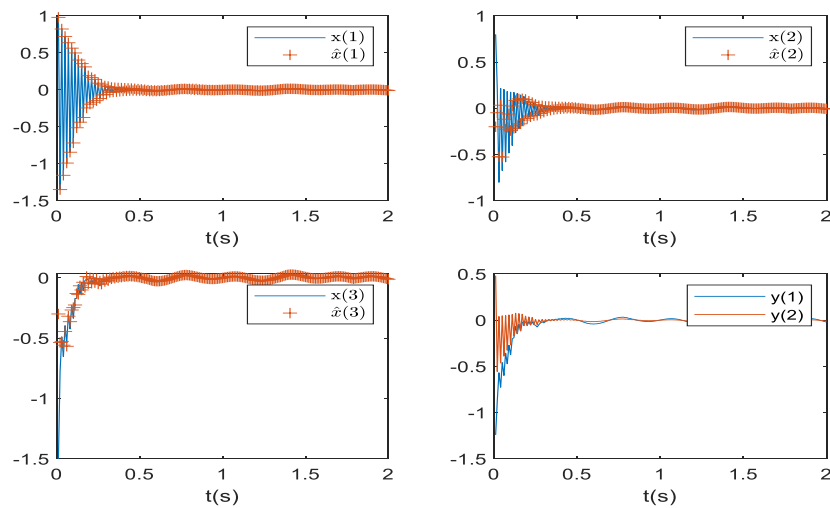
همانطور که انتظار میرفت میان نمودارهای مقادیر واقعی و تخمینی متغیرهای حالت سیستم اختلافی وجود دارد که به دلیل استفاده از مقدار تخمینی برای خروجی سیستم در مشاهده گر میباشد. نمودارها نشان میدهند استفاده از مقدار تخمینی به خوبی منجر به محدود شدن متغیرهای سیستم شده است.



شکل ۳-۱۰. تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله برای مثال ۳-۲.



شکل ۳-۱۱. تغییرات نرم ۲ی متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله برای مثال ۳-۲.



شکل ۳-۱۲. تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته برای مثال ۳-۲.

شکل ۳-۱۱ تغییرات نرم ۲ی بردار متغیرهای حالت سیستم و بردار خروجیهای سیستم را نشان میدهد. همانطور که انتظار داشتیم نرم ۲ی بردارها پس از گذشت زمانی اندک در باند مشخصی قرار میگیرند که نشان از محدود شدن مقادیر متغیرهای سیستم دارد. بررسی تعداد بسته های ارسال شده از طریق شبکه نشان میدهد از میان ۲۰۰ لحظه ممکن برای نمونه برداری در الگوریتم STPC ۱۴۰ بسته داده ارسال شده است که نشانگر کاهش ۳۰ درصدی در تعداد بسته های ارسال شده نسبت به الگوریتم ارسال زمانبندی شده دارد.

شکل ۳-۱۲ نشانگر تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته است. نمودارها نشانگر همگرایی تمام متغیرهای سیستم با سرعتی مشابه با مشاهده گر مرتبه کامل هستند که بیانگر انتخاب مناسب مشاهده گر و محاسبه دقیق ماتریس مشاهده گر است. بررسی تعداد بسته داده های ارسال شده از طریق شبکه نشان میدهد از میان ۲۰۰ لحظه نمونه برداری ممکن، ۱۲۹ بسته داده ارسال شده است که نشانگر کاهش ۳۵ درصدی در تعداد بسته های ارسال شده نسبت به الگوریتم ارسال زمانبندی شده است.

۳-۵. نتیجه گیری

در این فصل، مساله طراحی یک STPC پایدار برای سیستمهای کنترل تحت شبکه با پسخورد خروجی بررسی شد. ساختار NCS مورد نظر در معرض اغتشاش ورودی و محدودیتهای ناشی از حضور شبکه شامل تاخیر، جابجایی

بسته ها و محدودیت پهنای باند و منابع شبکه در نظر گرفته شد. یک بلوک تعیین کننده لحظه نمونه برداری بعدی مبتنی بر مشاهده گر برای محدود کردن تعداد دفعات نمونه برداری و نیز بسته های داده ارسال شده به آنهایی که اساسا برای پایداری سازی سیستم ضروری هستند مورد استفاده قرار گرفت. به این ترتیب منابع شبکه و پهنای باند آن حفظ میشوند و تاثیر شبکه بر روی داده های ارسال شده به میزان زیادی کاهش میابد.

استفاده از کنترل کننده پیش بین سوئیچ کننده با بهره های چندگانه در ساختار پیشنهادی، منجر به کنترل کننده منعطف تری نسبت به کنترل کننده های مرسوم با یک بهره ثابت میشود. دو انتخابگر همچنین در سمت کنترل کننده و سمت محرک برای مقابله با جابجایی بسته ها به کار گرفته شدند. دو حالت مختلف برای مشاهده گر در نظر گرفته شد: مشاهده گر مرتبه کامل و مشاهده گر مرتبه کاهش یافته. اغتشاش ورودی سیستم در دو حالت مجزا مورد بررسی قرار گرفت. حالت اول زمانی است که کران بالای بردار اغتشاش وابسته به مقادیر متغیرهای حالت سیستم باشد. در این حالت قضایای ارائه شده پایداری مجانبی سیستم را تضمین میکنند. حالت دوم زمانی است که کران بالای بردار اغتشاش ورودی مقدار ثابت مشخصی باشد. در این حالت قضایای ارائه شده پایداری UUB سیستم را تضمین میکنند.

به منظور نشان دادن تاثیرگذاری روش STPC پیشنهاد شده، دو مثال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی همگرایی سریع مقادیر واقعی و تخمینی متغیرهای حالت و خروجیهای سیستم را با پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی STPC در این رساله نشان دادند. در مثال ۱-۳ که حالت اول اغتشاش در نظر گرفته شده بود؛ تعداد بسته های ارسال شده از طریق شبکه در مقایسه با الگوریتم ارسال زمانبندی شده برای حالت مشاهده گر مرتبه کامل ۶۵ درصد و برای حالت مشاهده گر مرتبه کاهش یافته ۷۰ درصد کاهش یافتند. در این مثال همچنین عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حضور نویز سفید اضافه شونده سنسور و در حضور تاخیر تصادفی با توزیع برنولی بررسی شد. شبیه سازیها بیانگر همگرایی متغیرهای سیستم با استفاده از الگوریتمهای پیشنهادی بودند. در مثال ۲-۳ که حالت دوم اغتشاش در نظر گرفته شده بود؛ تعداد بسته های آرسالی نسبت به کنترل کننده های معمول مبتنی بر زمان، با استفاده از مشاهده گر مرتبه کامل ۳۰ درصد و با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته ۳۵ درصد کاهش یافتند که این میزان کاهش تبادل داده ها منجر به حفظ پهنای باند شبکه و منابع شبکه به میزان قابل توجهی میشود.

فصل چهارم

الگوریتم کنترل سوئیچ کننده تلفیقی

۴-۱. مقدمه

این فصل به تشریح الگوریتم کنترلی تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله و ارائه نتایج شبیه سازی مربوط به این الگوریتم اختصاص دارد. این الگوریتم ترکیبی از دو الگوریتم کنترلی رویداد تحریک و خود تحریک است. در این فصل ابتدا الگوریتم پیشنهادی تشریح میشود. سپس بلوک دیاگرام ساختار پیشنهادی به همراه توضیحات مربوطه مطرح شده است. در بخش سوم توصیف سیستم مورد بررسی و ساختار مدنظر برای پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی ارائه میگردد. بخش چهارم موثر بودن الگوریتم پیشنهادی را از طریق سه مثال نشان میدهد و بخش پنجم به نتیجه گیری این فصل اختصاص یافته است.

۴-۲. الگوریتم پیشنهادی

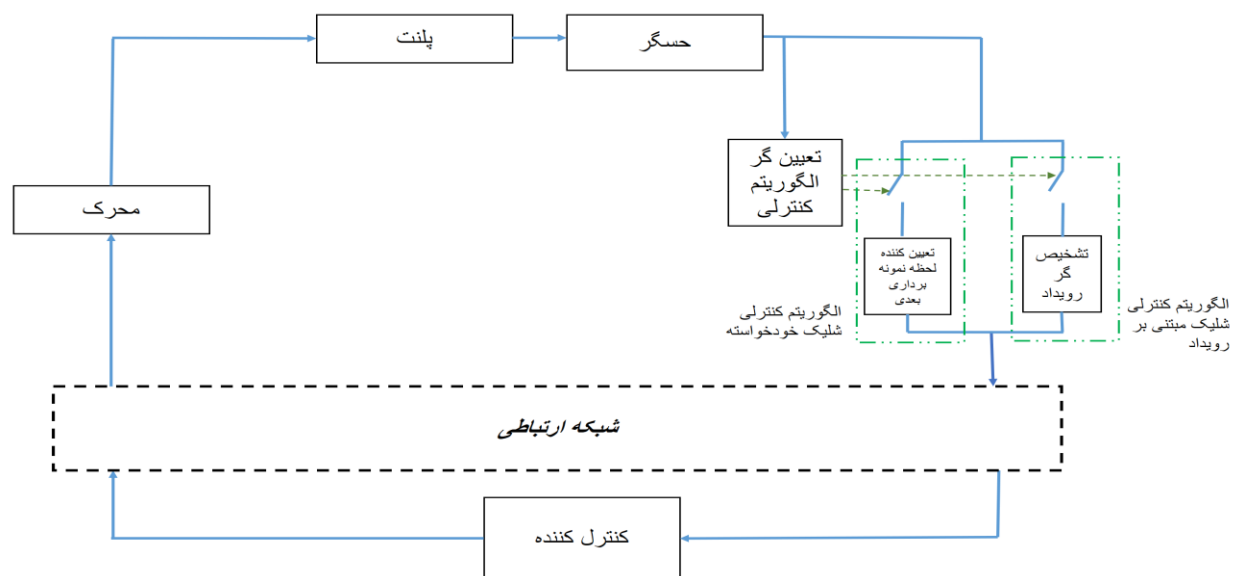
ایده پایه ای در روش کلی ارائه شده در این رساله استفاده از هر یک از الگوریتمهای کنترلی رویداد تحریک و خود تحریک بسته به نوع پاسخ سیستم در هر بازه زمانی است. به این ترتیب میتوانیم همواره از الگوریتم مناسبتر بهره ببریم. پاسخ زمانی هر سیستمی همواره از دو بخش پاسخ حالت گذرا و پاسخ حالت ماندگار تشکیل شده است. در بخش پاسخ گذرا سیگنال خروجی تغییرات شدیدی را نشان میدهد و بالعکس در بخش حالت ماندگار تغییرات اندکی را شاهد هستیم. از سوی دیگر ویژگی بارز الگوریتم کنترلی رویداد تحریک؛ همانطور که در فصل دو شرح داده شد؛ این است که نمونه برداری به طور متناوب صورت میگیرد و در صورت تشخیص ضروری بودن داده نمونه برداری جدید برای به روز رسانی سیگنال کنترلی، ارسال آن به کنترل کننده صورت میگیرد. به دلیل انجام نمونه برداری متناوب، این الگوریتم برای دنبال کردن تغییرات سریع پاسخ سیستم بسیار مناسب است. از سوی دیگر، ویژگی بارز الگوریتم کنترلی خود تحریک این است که در هر لحظه نمونه برداری، لحظه نمونه برداری بعدی تعیین میشود و در فاصله دو لحظه نمونه برداری، هیچ نمونه برداری ای صورت نمیگیرد و تمام داده های نمونه برداری شده نیز به کنترل کننده ارسال میشوند. از آنجا که نمونه برداری متناوباً انجام نمیشود و سیستم در فاصله بین دو لحظه نمونه برداری در واقع به صورت حلقه باز عمل میکند؛ در صورت وجود تغییرات سریع در پاسخ سیستم در فواصل نمونه برداریهای متوالی، قادر به تشخیص آن و ارسال داده مناسب به کنترل کننده نیست. از طرفی زمانی که پاسخ سیستم در بخش حالت ماندگار است و تغییرات شدیدی در آن وجود ندارد، انجام نمونه برداری منظم منجر به اتلاف منابع انرژی سیستم میشود. در این حالت استفاده از الگوریتم کنترلی خود تحریک مناسب به نظر میرسد.

به این ترتیب استفاده از روش کنترلی رویداد تحریک در زمان نوسانات پاسخ سیستم و سپس تغییر الگوریتم کنترلی به روش کنترلی خود تحریک در زمان اتمام حالت گذرا، ترکیبی است که منجر به استفاده بهینه تری از منابع انرژی سیستم میشود. سپس در صورتی که اغتشاش جدیدی به سیستم وارد شود الگوریتم کنترلی به روش کنترلی رویداد تحریک تغییر وضعیت میدهد و نمونه برداری به طور پیوسته توسط حسگرها انجام میگردد و سیگنال کنترلی مناسب بر مبنای این الگوریتم تعیین میشود که این امر منجر به رصد نمودن دقیقتر وضعیت سیستم در شرایط وارد شدن اغتشاش میگردد.

تعیین لحظه مناسب برای تغییر الگوریتم کنترلی نیز از طریق یک معیار سوئیچینگ انجام میشود که در بخش ۴-۴-۱ به تفصیل شرح داده شده است.

۴-۳. ساختار پیشنهادی

شکل ۴-۱ ساختار پیشنهادی برای پیاده سازی الگوریتم تلفیقی پیشنهادی را نشان میدهد. این ساختار در حقیقت از تلفیق ساختارهای الگوریتمهای کنترلی رویداد تحریک و خود تحریک به دست آمده است. نکته ای که در این بین وجود دارد آن است که در شکل ۴-۱ نیازمند تعیین زمان مناسب برای تغییر وضعیت میان دو الگوریتم کنترلی هستیم که این کار توسط بلوک "تعیین گر الگوریتم کنترلی" انجام میگردد. براساس خروجی این بلوک، الگوریتم کنترلی مناسب با شرایط فعلی سیستم فعال میشود.



شکل ۴-۱. ساختار پیشنهادی برای پیاده سازی الگوریتم تلفیقی پیشنهادی در این رساله.

۴-۳-۱. بلوک "تعیین گر الگوریتم کنترلی"

وظیفه بلوک "تعیین گر الگوریتم کنترلی" بررسی این موضوع است که در هر لحظه سیستم در حالت گذرا قرار دارد یا ماندگار؛ و با توجه به آن الگوریتم کنترلی مناسب را تعیین کند. همانطور که ذکر شد این کار با توجه به میزان نوسانات پاسخ سیستم صورت میگیرد. برای این منظور در هر لحظه نمونه برداری، جدیدترین داده نمونه برداری شده را با آخرین داده نمونه برداری شده قبل از آن مقایسه میکنیم. در صورتی که میزان تغییرات داده جدید نسبت به داده قبل از آن از آستانه مشخصی بیشتر باشد، نتیجه میگیریم سیستم در حالت گذرا قرار دارد و الگوریتم کنترلی رویداد تحریک باید فعال گردد. در صورتی که عکس آن اتفاق بیفتد نتیجه میگیریم سیستم در حالت ماندگار قرار دارد و الگوریتم کنترلی خود تحریک باید فعال گردد.

بر این مبنا بلوک "تعیین گر الگوریتم کنترلی" پس از تشخیص الگوریتم کنترلی مناسب، فرمان فعال شدن آن الگوریتم را صادر میکند و در لحظات بعد از آن از الگوریتم جدید جهت تصمیمگیری برای نمونه برداری و ارسال داده ها استفاده میشود. آستانه مشخصی که تغییرات را نسبت به آن میسنجیم وابسته به سیستم مورد استفاده است و توسط طراح تصمیمگیری میشود. در دو مثالی که در قسمت ۴-۵ آورده شده اند دو رابطه متفاوت جهت تصمیم گیری در رابطه با تغییر الگوریتم پیشنهاد شده اند.

۴-۳-۲. پایداری

از آنجا که اساس الگوریتم پیشنهادی تغییر وضعیت میان دو الگوریتم متفاوت در لحظات مقتضی است؛ لازم است موضوع پایداری سیستم به طور خاص مورد بررسی قرار گیرد.

نکته پایه ای در این خصوص آن است که بهره مشاهده گر و بهره های کنترل کننده در هر دو الگوریتم به گونه ای محاسبه شده اند که پایداری سیستم را با شروع از هر مقدار اولیه متغیرهای حالت، تضمین کنند. در طراحی بلوک "تعیین گر الگوریتم کنترلی"، لحظات تغییر وضعیت همان لحظات نمونه برداری در نظر گرفته شده اند و در فاصله میان دو لحظه نمونه برداری، الگوریتم تغییر نمیکند. در لحظات نمونه برداری مقدار جدید متغیر خروجی اندازه گیری شده است و مقدار مشاهده گر نیز به روزرسانی میشود. این رویکرد به این معنی است که از لحظه تغییر وضعیت به بعد، میخواهیم رفتار سیستم را با در دست داشتن مقدار اولیه جدیدی برای متغیرهای مورد نیاز، مورد بررسی قرار دهیم و همانطور که ذکر شد از آنجا که همگرایی هر یک از الگوریتمها تضمین شده است، سیگنال کنترلی در هر حالت به گونه ای تعیین میشود که سیستم در جهت همگرایی حرکت کند.

در بخش بعد الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در بالا، به طور خاص بر پایه الگوریتمهای ETPC و STPC فصول دو و سه مطرح میشود.

۴-۴. توصیف سیستم

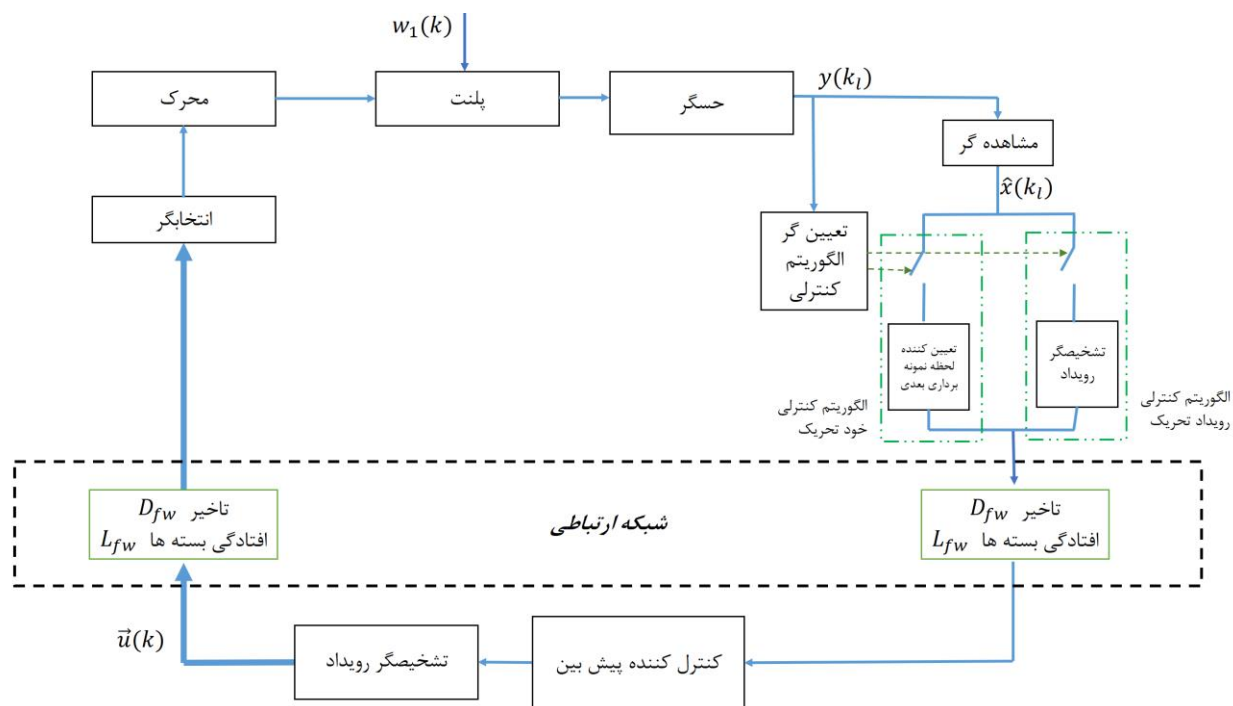
مشابه دو فصل قبل، در این فصل نیز سیستم کنترل تحت شبکه به صورت زیر توصیف میشود:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + E_1 w_1(k) \quad (۱-۴)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (۲-۴)$$

$$x(0) = x. \quad (۳-۴)$$

که در آن $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ و $y \in \mathbb{R}^l$ به ترتیب بردار حالت، ورودی کنترلی و خروجی سیستم را نشان میدهند. $w_1 \in \mathbb{R}^p$ بردار اغتشاش ورودی است که به فضای $L_2(0, +\infty)$ تعلق دارد. A, B, C, D و ماتریسهای ثابت مشخص با ابعاد مناسب هستند. مقدار اولیه بردار حالت سیستم با x_0 نشان داده میشود.



شکل ۴-۲. ساختار پیشنهاد شده برای الگوریتم کنترلی تلفیقی بر پایه ETPC و STPC پیشنهاد شده در این رساله

ساختار مورد نظر بر پایه ETPC و STPC مطرح شده در این رساله برای NCS در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. مانند فصول دو و سه، فرضیات زیر برای این ساختار در نظر گرفته شده اند:

فرض ۴-۱. حسگر، کنترل کننده و محرک متناوباً با دوره های نمونه برداری یکسان T عمل میکنند و بسته های ارسال شده از طریق شبکه برچسب زمانی دارند.

فرض ۴-۲. تاخیر در کانالهای اندازه گیری و محرک به ترتیب با D_{fb} و D_{fw} نشان داده میشوند که هر دو مقادیری متغیر با زمان هستند. حد بالای D_{fb} و D_{fw} به ترتیب D_1 و D_2 است.

فرض ۴-۳. تعداد از دست دادن بسته ها در کانالهای اندازه گیری و محرک به ترتیب توسط L_{fb} و L_{fw} نشان داده میشوند که هر دو مقادیری متغیر با زمان هستند. حد بالای L_{fb} و L_{fw} به ترتیب L_1 و L_2 هستند.

مانند فصول دو و سه براساس حالت های مختلف اغتشاش های وارد شده به سیستم، عملکرد الگوریتم تلفیقی پیشنهادی در دو حالت کلی بررسی شده است. ابتدا حالتی که اغتشاش ورودی کران بالایی به صورت

$$\alpha_1 \|w_1(k)\|_2^2 \leq \beta_1 \|x(k)\|_2^2 \quad (4-4)$$

داشته باشد که در آن α_1 و β_1 مقادیر ثابت هستند بررسی میشود. سپس حالتی که کران بالای اغتشاش ورودی برابر با مقدار ثابت مشخصی به صورت

$$\|w_1(k)\|_2^2 \leq \beta \quad (4-5)$$

باشد در نظر گرفته میشود.

ساختار ارائه شده در شکل ۴-۲ از کنار یکدیگر قرار دادن ساختارهای مطرح شده در فصول دو و سه برای الگوریتم های ETPC و STPC به دست آمده است. بلوک "تعیین گر الگوریتم کنترلی" همانطور که در بخش ۴-۳-۱ تشریح شد؛ در صورت نیاز الگوریتم کنترلی مورد استفاده در سیستم را تغییر میدهد. همچنین با استدلالی مشابه با استدلال مطرح شده در دو فصل گذشته، پدیده Zeno در الگوریتم پیشنهادی این فصل نیز رخ نمیدهد.

۴-۵. نتایج شبیه سازی

در این قسمت میخواهیم عملکرد ساختار تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله را به کمک نتایج شبیه سازی بررسی کنیم. انگیزه اصلی برای پیشنهاد این ساختار تلفیقی پوشش دادن نقاط ضعف هر یک از الگوریتم های رویداد

تحریک و خود تحریک به کمک دیگری است. به این ترتیب تشخیص میزان موفقیت ساختار تلفیقی پیشنهادی در بهبود عملکرد سیستم زمانی میسر میشود که آن را به صورت مجزا با هر یک از الگوریتمهای مزبور مقایسه کنیم. برای این منظور در این بخش، سه الگوریتم تلفیقی متفاوت به صورت جداگانه با الگوریتمهای مجزای مربوط به خودشان مقایسه شده اند. الگوریتم تلفیقی اول، مرکب از الگوریتمهای ETPC و STPC پیشنهاد شده در فصول دو و سه میباشد که با الگوریتمهای مجزای ETPC و STPC مذکور در حالتی که اغتشاش ورودی در رابطه (۴-۴) صدق میکند مقایسه میشود. الگوریتم تلفیقی دوم، مرکب از الگوریتمهای کنترلی رویداد تحریک و خود تحریک پیشنهاد شده در مقاله [۳۸] است که با الگوریتمهای مجزای مطرح شده در این مقاله مقایسه میشود. در آخرین الگوریتم تلفیقی، الگوریتم مرکب از الگوریتمهای ETPC و STPC پیشنهاد شده در فصول دو و سه میباشد که با الگوریتمهای مجزای ETPC و STPC مذکور در حالتی که اغتشاش ورودی در رابطه (۴-۵) صدق میکند مقایسه میشود.

۴-۵-۱. الگوریتم تلفیقی اول

در این قسمت سیستم مطرح شده در [۳۱] را مورد بررسی قرار میدهم که در فصل های دو و سه به طور جداگانه تحت الگوریتمهای ETPC و STPC قرار گرفته بود. این سیستم تحت تاثیر اغتشاشهای ورودی و خروجی؛ تاخیر متغیر با زمان و جابجایی بسته ها در هر دو کانال محرک و اندازه گیری در نظر گرفته شده است.

به منظور یادآوری؛ معادلات فضای حالت سیستم به صورت زیر هستند:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + E_1 w_1(k)$$

$$y(k) = Cx(k)$$

که در آن ماتریسها به صورت زیر در نظر گرفته میشوند

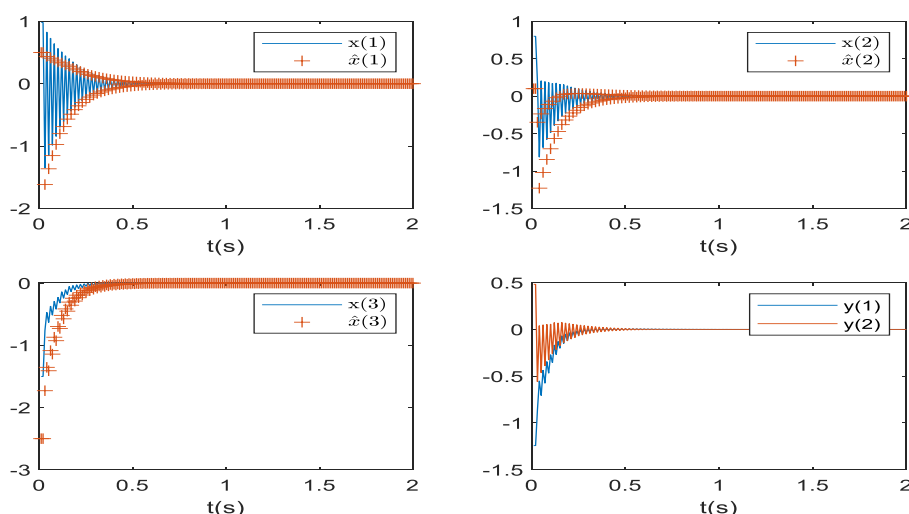
$$A = \begin{bmatrix} -0.85 & 0.271 & -0.488 \\ 0.482 & 0.1 & 0.24 \\ -0.002 & -0.3681 & 0.707 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & -0.4 \\ 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 1 \\ 0.4 & 0.3 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$E_1 = \begin{bmatrix} 1 & \\ & 1 \end{bmatrix}.$$

ثوابت در نظر گرفته شده در فرض ۴-۲، به صورت $\alpha_1 = 1$ ، و $\beta_1 = 0.01$ انتخاب میشوند و بازه نمونه برداری به صورت $T = 0.01$ در نظر گرفته میشود. حد بالای تاخیرهای انتقال در کانالهای اندازه گیری و محرک به صورت

$D_2 = T$ و $D_1 = 2T$ قرار داده میشوند. حالت‌های اولیه سیستم و مشاهده گر به ترتیب به صورت $x(\cdot) = [0.98 \ 0.8 \ -1.5]^T$ و $\hat{x}(\cdot) = [0.5 \ 0.1 \ -2.5]^T$ هستند و کران بالای عدم ارسال نیز به صورت $R=3T$ قرار داده میشود.

با توجه به توضیحات بخش ۴-۴-۱ در الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده نیاز به یک رابطه نامساوی برای مقایسه تغییرات داده های نمونه برداری شده با یک حد مشخص داریم که براساس آن در صورت لزوم الگوریتم کنترلی مورد استفاده را تغییر دهیم. در این مثال رابطه نامساوی مورد استفاده به صورت $\frac{\|y(k_l) - y(k_{l-1})\|}{\|y(k_l)\|} \leq \bar{\delta}$ میباشد که عبارت $\frac{\|y(k_l) - y(k_{l-1})\|}{\|y(k_l)\|}$ در حقیقت نسبت تغییرات متغیر خروجی سیستم در دو لحظه نمونه برداری متوالی نسبت به آخرین متغیر خروجی نمونه برداری شده است. $\bar{\delta}$ نیز همان حد مشخصی است که در ۴-۴-۱ ذکر شد و در این مثال برابر با ۱ در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۳. تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای فصول دو و سه برای مثال ۴-۱.

شکل ۴-۳ تاثیرگذاری الگوریتم تلفیقی پیشنهادی در این رساله را بر پایداری سیستم تحت تاثیر نقایص شبکه و اغتشاش ورودی نشان میدهد. نمودارهای این شکلها همگرایی سریع مقادیر واقعی و تخمینی متغیرهای حالت سیستم و نیز خروجی های سیستم را نشان میدهند که تصریح میکنند نقایص شبکه به خوبی توسط الگوریتم پیشنهاد شده در این رساله جبران میشوند. انطباق مسیر حرکت نمودارهای مقادیر تخمینی و واقعی متغیرهای حالت سیستم در شکل ۴-۳ انتخاب مناسب مشاهده گر و دقت بهره مشاهده گر محاسبه شده را تایید میکند.

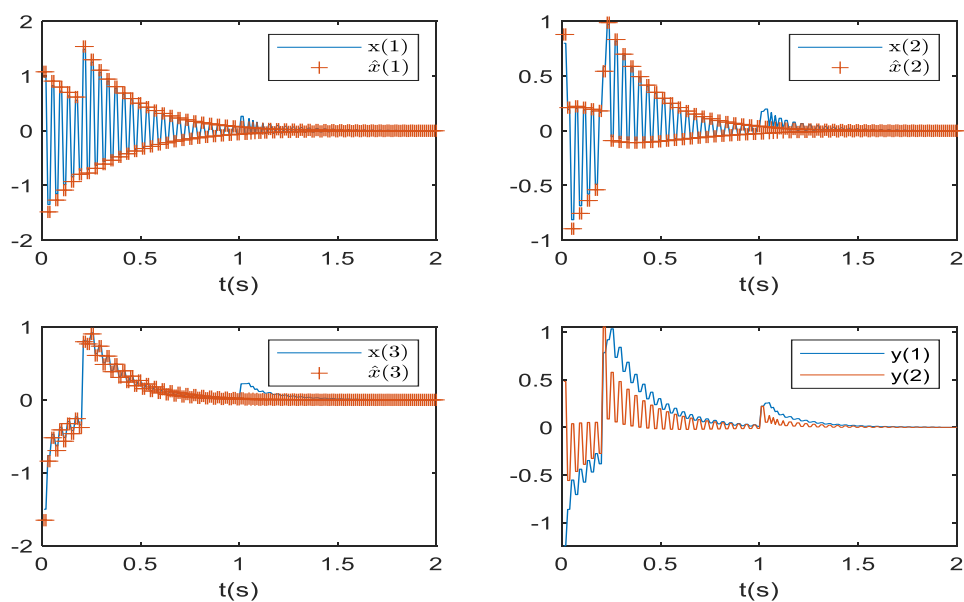
تعداد لحظات تحریک نشان می‌دهد از میان ۲۰۰ لحظه نمونه برداری ممکن تنها در ۹۰ لحظه ارسال داده ها صورت گرفته است و این به معنی کاهش ۵۵٪ داده های ارسال شده نسبت به الگوریتم کنترلی ارسال زمانبندی شده است. بررسی الگوریتمهای مورد استفاده نشان می‌دهد که تا حدود لحظه ۱،۱۷ ثانیه که سیستم در حالت گذرا قرار دارد؛ تقریباً تمام مدت الگوریتم کنترلی الگوریتم ETPC است، تنها یکبار به الگوریتم STPC تغییر وضعیت می‌دهد، که علت آن کند شدن سرعت تغییرات خروجیهای سیستم در یک بازه کوتاه است. در حالی که پس از لحظه ۱،۱۷ ثانیه، تماماً از الگوریتم STPC استفاده میکند که به دلیل قرار گرفتن سیستم در حالت ماندگار میباشد.

جدول ۴-۱. تعداد بسته های ارسالی از طریق هر یک از دو الگوریتم ETPC و STPC در الگوریتم تلفیقی به ازاء مقادیر مختلف $\bar{\delta}$

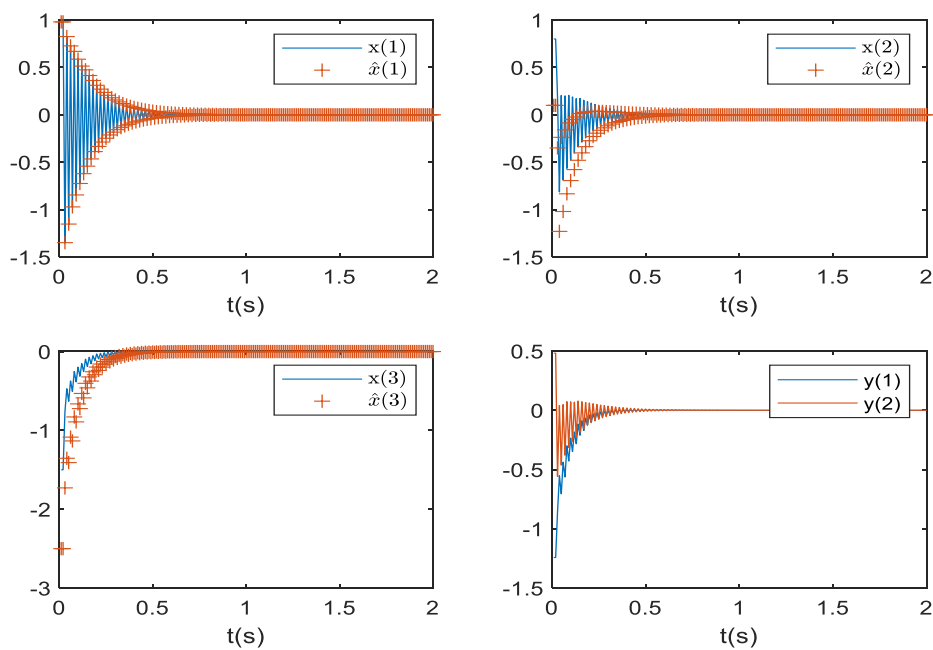
$\bar{\delta}$	۰،۵	۰،۷	۰،۸	۰،۹	۱	۱،۱	۱،۲	۱،۳	۱،۵	۱،۷۵	۲
تعداد بسته های ارسالی از طریق ETPC	۹۲	۸۶	۸۰	۷۳	۶۱	۴۸	۳۳	۲۰	۱۳	۶	۰
تعداد بسته های ارسالی از طریق STPC	۰	۵	۱۱	۱۹	۳۰	۴۵	۵۴	۶۶	۷۶	۸۴	۹۷

جدول ۴-۱ تاثیر انتخاب مقدار $\bar{\delta}$ در الگوریتم تلفیقی بر تعداد بسته های ارسال شده از طریق هر یک از دو الگوریتم ETPC و STPC را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار میرفت کاهش مقدار $\bar{\delta}$ حساسیت الگوریتم تلفیقی نسبت به تغییرات متغیر نمونه برداری شده را افزایش می‌دهد و با تصور آنکه سیستم مدت بیشتری در حالت گذرا قرار دارد؛ بیشتر از الگوریتم ETPC استفاده میشود. در حالیکه افزایش مقدار $\bar{\delta}$ حساسیت الگوریتم تلفیقی نسبت به تغییرات متغیر نمونه برداری شده را کاهش می‌دهد و با تصور آنکه سیستم مدت بیشتری در حالت ماندگار قرار دارد؛ بیشتر از الگوریتم STPC استفاده میکند.

شکل ۴-۴ تغییرات مقادیر واقعی و تخمینی متغیرهای حالت سیستم و خروجیهای سیستم را در شرایطی که سیستم تحت تاثیر اغتشاشهای خارجی باشد نشان می‌دهند. اغتشاشها در لحظات ۰،۲۵ ثانیه و ۱،۱ ثانیه به سیستم وارد میشوند و نمودارهای مذکور نشان می‌دهند ساختار تلفیقی پیشنهاد شده براساس الگوریتمهای ETPC و STPC ارائه شده در فصول دو و سه به خوبی قادر به پایدارسازی متغیرهای سیستم میباشد.



شکل ۴-۴. تغییرات متغیرهای سیستم در حضور اغتشاش، تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای فصول دو و سه برای مثال ۴-۱.



شکل ۴-۵. تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای فصول دو و سه با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته برای مثال ۴-۱.

تعداد لحظات تحریک نشان میدهد از میان ۲۰۰ لحظه نمونه برداری ممکن تنها در ۱۰۰ لحظه ارسال داده ها صورت گرفته است و این به معنی کاهش ۵۰٪ داده های ارسال شده نسبت به الگوریتم کنترلی ارسال زمانبندی شده است. بررسی الگوریتمهای مورد استفاده نشان میدهد که تا حدود لحظه ۱،۵ ثانیه که سیستم در حالت گذرا قرار دارد؛ تمام مدت الگوریتم کنترلی الگوریتم ETPC است. پس از آن از آنجا که سیستم وارد حالت ماندگار میشود به الگوریتم STPC تغییر وضعیت میدهد.

شکل ۴-۵ نشانگر تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته است. نمودارها نشانگر همگرایی تمام متغیرهای سیستم با سرعتی مشابه با مشاهده گر مرتبه کامل هستند که بیانگر انتخاب مناسب مشاهده گر و محاسبه دقیق ماتریس مشاهده گر است. بررسی تعداد بسته داده های ارسال شده از طریق شبکه نشان میدهد از میان ۲۰۰ لحظه نمونه برداری ممکن، ۸۱ بسته داده ارسال شده است که نشانگر کاهش ۶۰ درصدی در تعداد بسته های ارسال شده نسبت به الگوریتم ارسال زمانبندی شده است.

۴-۵-۱-۱. مقایسه الگوریتم تلفیقی اول با الگوریتمهای مجزا

در این قسمت مقایسه عملکرد الگوریتم تلفیقی با الگوریتمهای مجزا صورت میگیرد. برای این منظور حالتی را در نظر میگیریم که به جای الگوریتم تلفیقی تنها از یکی از الگوریتمهای ETPC یا STPC استفاده کنیم. از آنجا که نمودارهای مربوط به این حالت در فصلهای دو و سه آورده شده اند، به جهت رعایت اختصار از تکرار آنها اجتناب شده است. برای انجام مقایسه از زاویه ای دیگر؛ میخواهیم سرعت همگرایی متغیر خروجی سیستم را با در نظر گرفتن میزان مصرف منابع انرژی سیستم و نیز پهنای باند شبکه لحاظ کنیم.

برای آنکه بتوانیم بهبود روند ارسال داده ها را با استفاده از الگوریتم پیشنهادی نسبت به زمانی که تنها از هر یک از الگوریتمهای ETPC و STPC استفاده شود مقایسه کنیم؛ فاکتور Ψ را به صورت زیر تعریف میکنیم:

$$\Psi = \gamma_1 \|y\| + \gamma_2 (\text{No. Sampling}) + \gamma_3 (\text{No. Transmission}) \quad (۴-۶)$$

و مقدار آن را برای هر سه حالت ممکن به دست می آوریم. هدف از لحاظ کردن $\|y\|$ در عبارت مربوط به Ψ ، وارد کردن سرعت همگرایی خروجی سیستم بوده است. دو جمله بعدی یعنی (No. Sampling) و (No. Transmission) به ترتیب تعداد داده های نمونه برداری شده و تعداد داده های ارسال شده از طریق شبکه هستند که هدف از لحاظ کردن آنها در عبارت مربوط به Ψ ، بررسی میزان مصرف منابع انرژی سیستم برای نمونه برداری و نیز مصرف پهنای باند شبکه برای ارسال داده ها میباشد. γ_1 ، γ_2 و γ_3 سه مقدار ثابت هستند که جهت

وزندهی جملات لحاظ شده اند. مقدار Ψ برای هر سه حالت در جدول ۲-۴ آمده است. مقادیر جدول ۲-۴ برتری الگوریتم تلفیقی نسبت به هر یک از الگوریتمهای مجزا را از منظر مصرف انرژی و سرعت همگرایی به خوبی نشان میدهند.

جدول ۲-۴. مقدار Ψ برای الگوریتمهای پیشنهاد شده در فصول دو، سه و چهار برای مثال ۱-۴.

الگوریتم تلفیقی	الگوریتم ETPC	الگوریتم STPC	Ψ
۶,۸۳۷۱۵۳	۲,۶۰۷۲۵۴	۱,۸۲۶۲۵۴	

۴-۵-۲. الگوریتم تلفیقی دوم

در این قسمت حالتی را در نظر میگیریم که در ساختار الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده، به جای الگوریتمهای ETPC و STPC ارائه شده در فصول دو و سه، از الگوریتمهای ETPC و STPC پیشنهاد شده در [۳۸] استفاده کنیم. در این حالت نیز عملکرد سیستم در حضور اغتشاشهای ورودی و خروجی و نیز تاخیر متغیر با زمان بررسی میگردد. همانطور که در جدول ۱-۲ نیز مقاله [۳۸] مورد بررسی قرار گرفت، سیستم مورد بررسی در این مقاله یک سیستم زمان گسسته با فیدبک حالت است که در معرض تاخیر میباشد. علت انتخاب این مقاله در این قسمت این موضوع بوده است که در بین مقالات جدول ۱-۲ تنها مقاله ای است که یک سیستم همراه با تاخیر را در نظر گرفته است.

سیستم مورد بررسی در مقاله [۴۰] یک پاندول معکوس است که معادلات فضای حالت خطی سازی شده آن به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & \dot{\cdot} \\ \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & -mg/M & \dot{\cdot} \\ \dot{\cdot} & \dot{\cdot} & g/l & \dot{\cdot} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} \dot{\cdot}/M \\ \dot{\cdot} \\ -1/(Ml) \end{bmatrix} u(t)$$

که در آن M جرم گاری، m جرم گلوله پاندول، l طول بازوی پاندول و g شتاب گرانش است و مقادیر آنها به صورت $M=10$ ، $m=1$ ، $l=3$ و $g=10$ قرار داده میشود. بردار حالت سیستم به صورت $x = [y \ \dot{y} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$ میباشد که در آن y موقعیت مکانی گاری و θ زاویه گلوله پاندول نسبت به افق میباشد. مقدار اولیه متغیر حالت سیستم به صورت $x = [0.98 \ 0 \ 0.2 \ 0]^T$ در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش پیشنهادی در [۳۸] و با حل معادله ریکاتی مربوطه بهره کنترل کننده به صورت $K = [2 \ 12 \ 378 \ 210]$ به دست می آید. بازه نمونه

برداری به طول $T = 1e-5$ در نظر گرفته میشود و از آنجا که طبق الگوریتم ارائه شده در [۳۸] کران بالای تاخیر در لحظات مختلف متغیر در نظر گرفته شده است؛ در شبیه سازی انجام شده در تمام لحظات حداکثر مقدار تاخیر به عنوان تاخیر موثر در کانالهای اندازه گیری و محرک لحاظ شده است.

با توجه به توضیحات بخش ۴-۴-۱ در الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده نیاز به یک رابطه نامساوی برای مقایسه تغییرات داده های نمونه برداری شده با یک حد مشخص داریم که براساس آن در صورت لزوم الگوریتم کنترلی مورد استفاده را تغییر دهیم. در این مثال رابطه نامساوی مورد استفاده به صورت $\|x(k_l) - x(k_{l-1})\| \leq \bar{\delta}$ میباشد که عبارت $\|x(k_l) - x(k_{l-1})\|$ تغییرات متغیر حالت سیستم در دو لحظه نمونه برداری متوالی میباشد. $\bar{\delta}$ نیز همان حد مشخصی است که در ۴-۴-۱ ذکر شد و در این مثال برابر با $4e-2$ در نظر گرفته شده است.

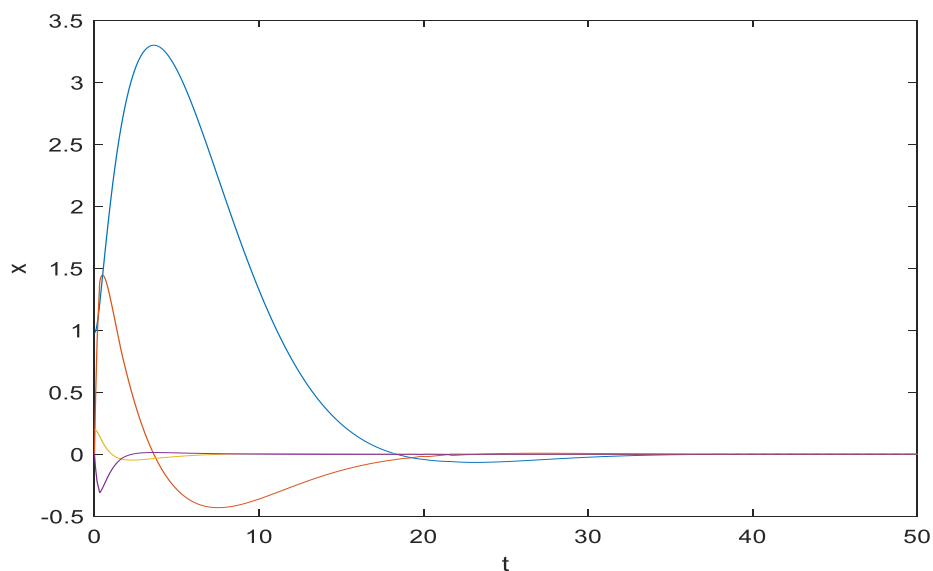
شکل ۴-۶ تاثیرگذاری الگوریتم تلفیقی پیشنهادی در این رساله را بر پایداری سازی سیستم تحت تاثیر نقایص شبکه و اغتشاشها نشان میدهد. این شکل نشانگر همگرایی سریع متغیرهای حالت سیستم است که نشان میدهد نقایص شبکه به خوبی توسط الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله جبران میشوند. تعداد لحظات تحریک نشان میدهد از میان ۵۰۰۰۰۰۰ لحظه نمونه برداری ممکن تنها در ۳۱۴۱۴۰ لحظه ارسال داده ها صورت گرفته است و این به معنی کاهش بیش از ۹۳٪ داده های ارسال شده نسبت به الگوریتم کنترلی ارسال زمانبندی شده است.

بررسی الگوریتمهای مورد استفاده نشان میدهد که تا حدود لحظه ۱۹ ثانیه که سیستم در حالت گذرا قرار دارد؛ تمام مدت الگوریتم کنترلی الگوریتم ETC است. پس از آن برای مدت کوتاهی به الگوریتم STC تغییر وضعیت میدهد. سپس تغییرات مقادیر متغیر حالت سیستم افزایش میابد و سیستم مجدداً وارد حالت گذرا میشود. همین امر موجب میشود بلوک "تعیین گر الگوریتم کنترلی" الگوریتم را به ETC تغییر دهد تا حدود لحظه ۳۰ ثانیه که مجدداً سیستم وارد حالت ماندگار میشود و الگوریتم مورد استفاده STC میگردد.

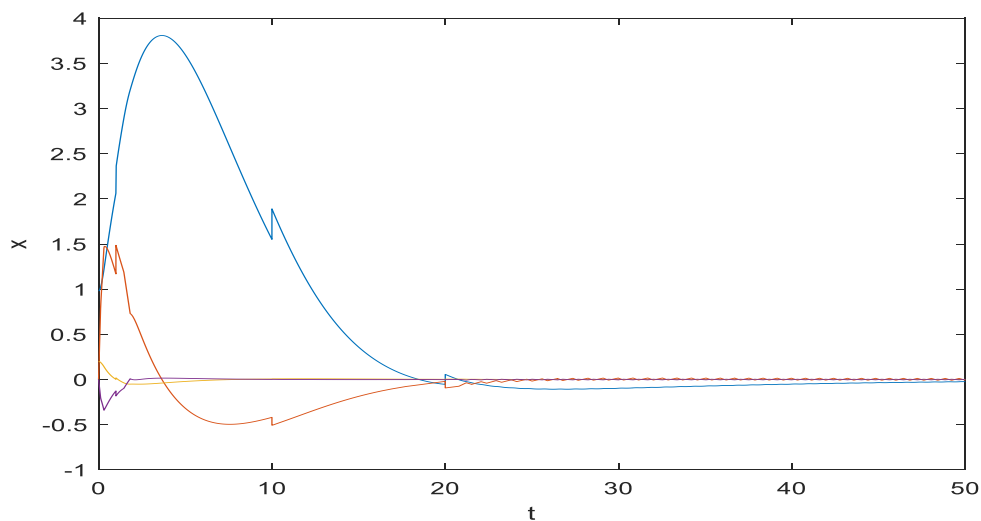
شکل ۴-۷ تغییرات مقادیر متغیرهای حالت سیستم را در شرایطی که سیستم تحت تاثیر اغتشاشهای خارجی باشد نشان میدهد. اغتشاشها در لحظات ۱ ثانیه، ۱۰ ثانیه و ۲۰ ثانیه به سیستم وارد میشوند و شکل ۴-۷ نشان میدهد ساختار تلفیقی پیشنهاد شده براساس الگوریتمهای ETC و STC ارائه شده در [۳۸] به خوبی قادر به پایداری سازی متغیرهای سیستم میباشد.

تعداد لحظات تحریک نشان میدهد از میان ۵۰۰۰۰۰۰ لحظه نمونه برداری ممکن تنها در ۵۱۶۵۷۲ لحظه ارسال داده ها صورت گرفته است و این به معنی کاهش بیش از ۸۹٪ داده های ارسال شده نسبت به الگوریتم کنترلی

ارسال زمانبندی شده است. به دلیل اثرگذاری اغتشاشهای خارجی بر سیستم، برای پایداریسازی سیستم نسبت به شکل ۴-۶ به ارسال داده های بیشتری نیاز است. بررسی الگوریتمهای مورد استفاده نشان میدهد که تا حدود



شکل ۴-۶. مقادیر متغیرهای حالت سیستم تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای [۳۸] برای مثال ۴-۲.



شکل ۴-۷. مقادیر متغیرهای حالت سیستم در حضور اغتشاش تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای [۳۸] برای مثال ۴-۲.

لحظه ۴۳ ثانیه که سیستم در حالت گذرا قرار دارد؛ تمام مدت الگوریتم کنترلی الگوریتم ETC است. تنها در بازه ای کوتاه نزدیک به لحظه ۲۰ ثانیه که تغییرات مقادیر متغیر حالت سیستم کند میشود، به الگوریتم STC تغییر وضعیت میدهد. بعد از لحظه ۴۳ ثانیه، پس از عبور از حالت گذرا مجدداً به الگوریتم STC تغییر وضعیت میدهد.

۴-۵-۲-۱. مقایسه الگوریتم تلفیقی دوم با الگوریتمهای مجزا

در این قسمت مشابه با قسمت ۴-۵-۱-۱ مقایسه عملکرد الگوریتم تلفیقی با الگوریتمهای مجزا صورت میگیرد یعنی حالتی را در نظر میگیریم که به جای الگوریتم تلفیقی تنها از یکی از الگوریتمهای ETC یا STC ارائه شده در [۳۸] استفاده کنیم و برای انجام مقایسه؛ با محاسبه فاکتور Ψ سرعت همگرایی متغیر حالت سیستم را با در نظر گرفتن میزان مصرف انرژی سیستم و نیز پهنای باند شبکه بررسی میکنیم.

جدول ۴-۳. مقدار Ψ برای الگوریتمهای پیشنهاد شده در فصول دو، سه و چهار برای مثال ۴-۲.

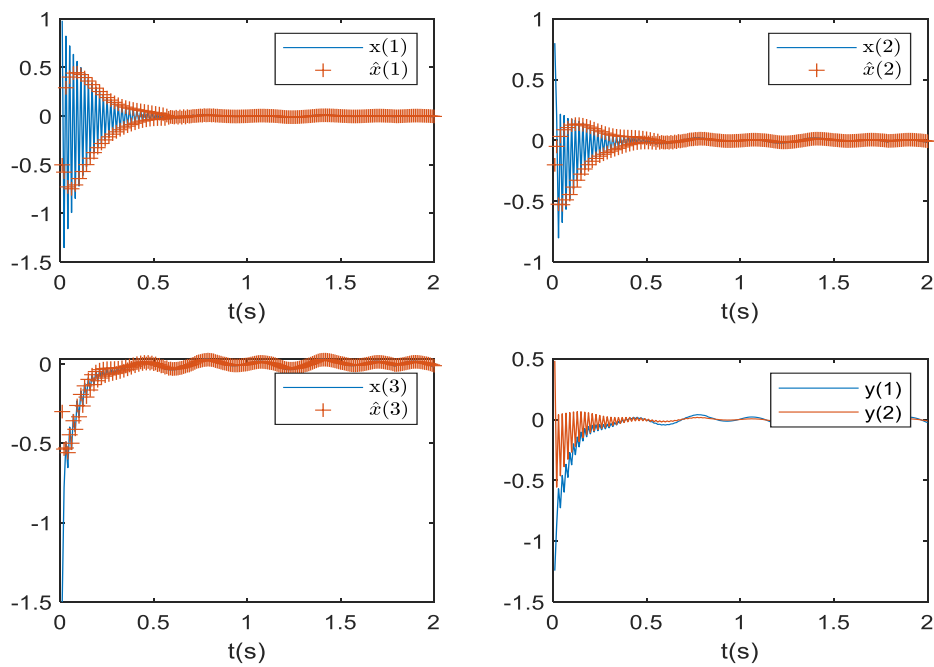
الگوریتم STC	الگوریتم ETC	الگوریتم تلفیقی	
۵۴۴,۵۳۹	۵۴۴,۲۰۴	۵۴۳,۹۱۸	Ψ

مقدار Ψ برای هر سه حالت در جدول ۴-۳ آمده است. مقادیر جدول ۴-۳ برتری الگوریتم تلفیقی نسبت به هر یک از الگوریتمهای مجزا را از منظر مصرف انرژی و سرعت همگرایی به وضوح نشان میدهند.

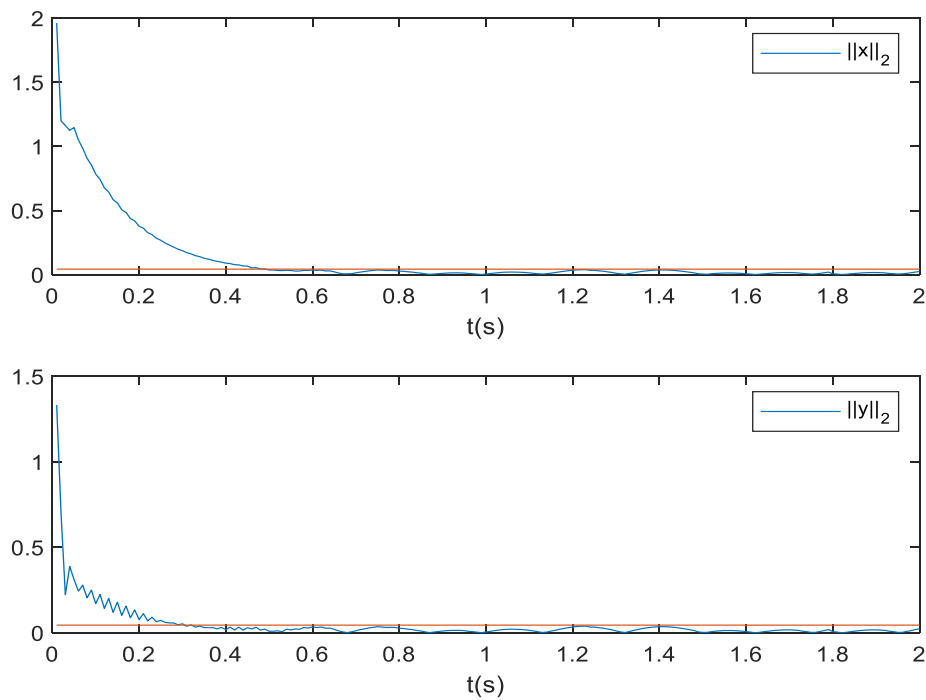
۴-۵-۳. الگوریتم تلفیقی سوم

در این قسمت مانند قسمت ۴-۵-۱ سیستم مطرح شده در [۳۱] را مورد بررسی قرار میدهیم که در فصل های دو و سه به طور جداگانه تحت الگوریتمهای ETPC و STPC قرار گرفته بود. با این تفاوت که این بار اغتشاش ورودی سیستم در رابطه (۴-۵) صدق میکند. ثوابت سیستم در این قسمت نیز مشابه با قسمت ۴-۵-۱ قرار داده شده است.

شکل ۴-۸ تاثیرگذاری الگوریتم تلفیقی پیشنهادی در این رساله را بر پایداری سیستم تحت تاثیر نقایص شبکه و اغتشاش ورودی نشان میدهد. نمودارهای این شکلها همگرایی سریع مقادیر واقعی و تخمینی متغیرهای حالت سیستم و نیز خروجی های سیستم را نشان میدهند که تصریح میکنند نقایص شبکه به خوبی توسط الگوریتم



شکل ۴-۸. تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله برای مثال ۴-۳.

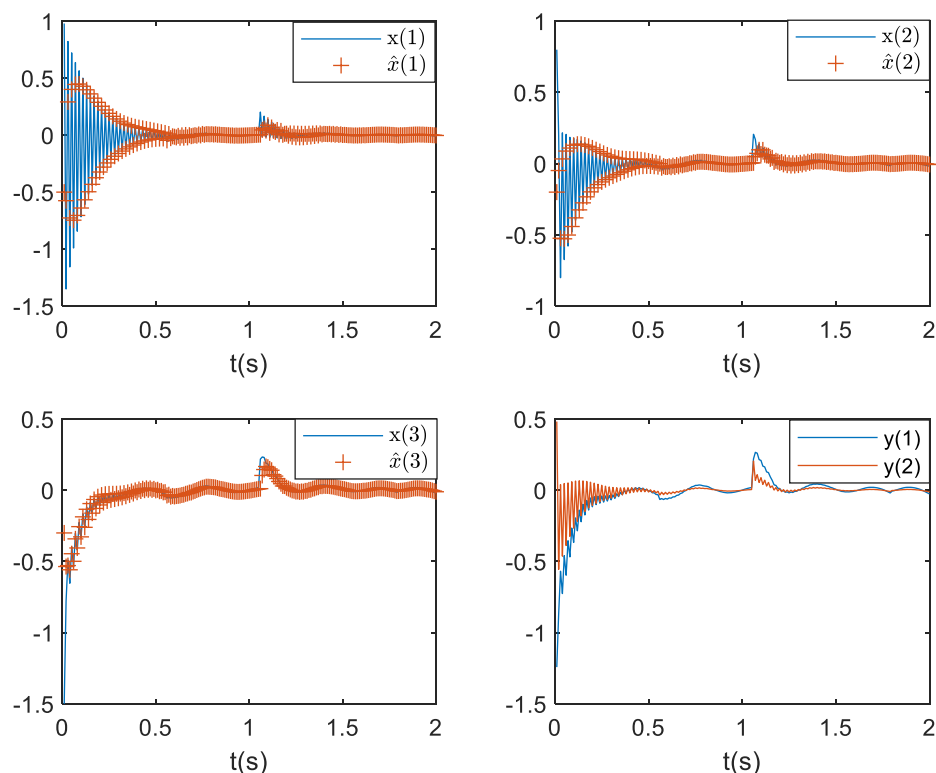


شکل ۴-۹. تغییرات نرم متغیرهای سیستم تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله برای مثال ۴-۳.

پیشنهاد شده در این رساله جبران میشوند. انطباق مسیر حرکت نمودارهای مقادیر تخمینی و واقعی متغیرهای حالت سیستم در شکل ۴-۸ انتخاب مناسب مشاهده گر و دقت بهره مشاهده گر محاسبه شده را تایید میکند.

تعداد لحظات تحریک نشان میدهد از میان ۲۰۰ لحظه نمونه برداری ممکن تنها در ۹۶ لحظه ارسال داده ها صورت گرفته است و این به معنی کاهش ۵۰ درصدی داده های ارسال شده نسبت به الگوریتم کنترلی ارسال زمانبندی شده است. بررسی الگوریتمهای استفاده شده نشان میدهد که تا حدود ۰,۵ ثانیه که سیستم در حالت گذرا قرار دارد الگوریتم ETPC مورد استفاده قرار میگیرد. پس از آن سیستم وارد حالت ماندگار میشود و الگوریتم مورد استفاده به الگوریتم STPC تغییر وضعیت میدهد.

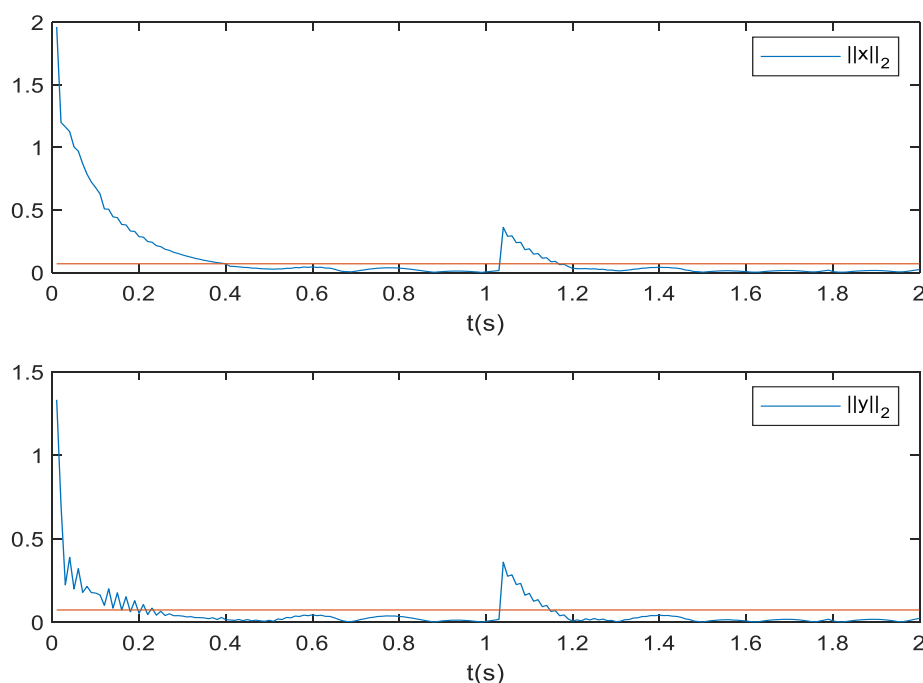
نمودارهای شکل ۴-۹ نشان میدهند که نرم ۲ی بردارهای متغیرهای حالت سیستم و خروجیهای سیستم به خوبی توسط الگوریتم پیشنهاد شده محدود شده است که پایداری UUB سیستم را تحت الگوریتم پیشنهادی نشان میدهد.



شکل ۴-۱۰. تغییرات متغیرهای سیستم در حضور اغتشاش، تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای فصول دو و سه برای مثال ۴-۳.

شکل ۴-۱۰ تغییرات مقادیر واقعی و تخمینی متغیرهای حالت سیستم و خروجیهای سیستم را در شرایطی که سیستم تحت تاثیر اغتشاشهای خارجی باشد نشان میدهد. اغتشاشها در لحظات ۰,۲ ثانیه و ۰,۸ ثانیه به سیستم وارد میشوند و نمودارهای مذکور نشان میدهند ساختار تلفیقی پیشنهاد شده براساس الگوریتمهای ETPC و STPC ارائه شده در فصول دو و سه به خوبی قادر به پایدارسازی متغیرهای سیستم میباشد. بررسی تعداد بسته های ارسال شده در این حالت نشان میدهد از میان ۲۰۰ لحظه ممکن برای نمونه برداری و ارسال داده ها، در ۱۲۹ لحظه ارسال داده ها صورت گرفته است که نشانگر کاهش حدوداً ۳۵ درصدی در تعداد بسته های ارسال شده نسبت به الگوریتم کنترلی ارسال زمانبندی شده است.

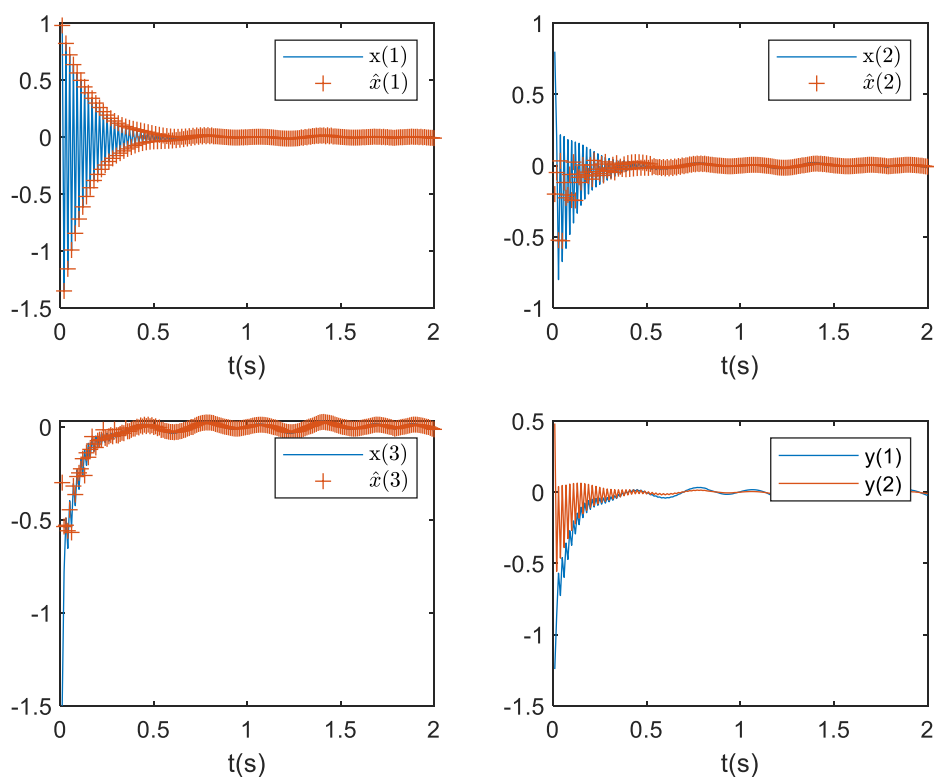
بررسی الگوریتمهای مورد استفاده نشان میدهد که تا حدود لحظه ۰,۵ ثانیه که سیستم در حالت گذرا قرار دارد؛ تقریباً تمام مدت الگوریتم کنترلی الگوریتم ETPC است، تنها یکبار به الگوریتم STPC تغییر وضعیت میدهد و آن زمانی است که تغییرات متغیرهای سیستم کند شده است. پس از لحظه ۰,۵ ثانیه تا حدود ۱,۱ ثانیه که اغتشاش بعدی وارد میشود از الگوریتم STPC استفاده میکند. حدود ۱,۱ ثانیه در بازه ای کوتاه به الگوریتم ETPC تغییر وضعیت میدهد و پس از آن از الگوریتم STPC بهره میبرد.



شکل ۴-۱۱. تغییرات نرم دوی بردار متغیرهای حالت و بردار خروجیهای سیستم در حضور اغتشاش، تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهاد شده در این رساله با ترکیب الگوریتمهای فصول دو و سه برای مثال ۴-۳.

شکل ۴-۱۱ تغییرات نرم ۲ی بردار متغیرهای حالت و بردار خروجیهای سیستم را در حضور اغتشاش خارجی نشان میدهد. همانطور که در نمودارهای این شکل دیده میشود چه در ابتدای نمودار و چه در حدود لحظه ۰,۸ ثانیه که اغتشاش خارجی به سیستم وارد میشود که بازه هایی هستند که سیستم در حالت گذرا قرار دارد، نرم ۲ی بردارهای متغیرهای سیستم کمی از حد تعیین شده فراتر میرود ولی با گذشت لحظاتی کوتاه، با ورود سیستم به حالت ماندگار نرم ۲ نیز وارد محدوده مورد انتظار میشود.

شکل ۴-۱۲ نشانگر تغییرات متغیرهای سیستم تحت الگوریتم STPC پیشنهادی رساله با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته است. نمودارها نشانگر همگرایی تمام متغیرهای سیستم با سرعتی مشابه با مشاهده گر مرتبه کامل هستند که بیانگر انتخاب مناسب مشاهده گر و محاسبه دقیق ماتریس مشاهده گر است. بررسی تعداد بسته داده های ارسال شده از طریق شبکه نشان میدهد از میان ۲۰۰ لحظه نمونه برداری ممکن، ۸۵ بسته داده ارسال شده است که نشانگر کاهش حدوداً ۶۰ درصدی در تعداد بسته های ارسال شده نسبت به الگوریتم ارسال زمانبندی شده است.



شکل ۴-۱۲. متغیرهای سیستم تحت الگوریتم تلفیقی سوم با مشاهده گر مرتبه کاهش یافته برای مثال ۴-۱.

۴-۵-۳-۱. مقایسه الگوریتم تلفیقی سوم با الگوریتمهای مجزا

در این قسمت مشابه با قسمت ۴-۵-۱-۱ مقایسه عملکرد الگوریتم تلفیقی با الگوریتمهای مجزا صورت میگیرد یعنی حالتی را در نظر میگیریم که به جای الگوریتم تلفیقی تنها از یکی از الگوریتمهای ETPC یا STPC ارائه شده در فصول ۲ و ۳ استفاده کنیم و برای انجام مقایسه؛ با محاسبه فاکتور Ψ سرعت همگرایی متغیر حالت سیستم را با در نظر گرفتن میزان مصرف منابع انرژی سیستم و نیز پهنای باند شبکه بررسی میکنیم.

جدول ۴-۴. مقدار Ψ برای الگوریتمهای پیشنهاد شده در فصول دو، سه و چهار برای مثال ۴-۳.

الگوریتم تلفیقی	الگوریتم ETPC	الگوریتم STPC	
۲۴۰,۸۴۳	۳۰۴,۰۱۸	۳۳۸,۳۵۰	Ψ

مقدار Ψ برای هر سه حالت در جدول ۴-۴ آمده است. مقادیر جدول ۴-۴ برتری الگوریتم تلفیقی نسبت به هر یک از الگوریتمهای مجزا را از منظر مصرف انرژی و سرعت همگرایی به وضوح نشان میدهند.

۴-۶. نتیجه گیری

در این فصل، مساله طراحی یک الگوریتم تلفیقی پایدار برای سیستمهای کنترل تحت شبکه با پسخورد خروجی بررسی شد. ساختار NCS مورد نظر در معرض اغتشاش ورودی خارجی و نقصهای شبکه شامل تاخیر، جابجایی بسته ها و محدودیت پهنای باند و منابع شبکه در نظر گرفته شد.

الگوریتم تلفیقی پیشنهادی به صورت ترکیب الگوریتمهای کنترلی رویداد تحریک و خود تحریک مطرح شد. به این صورت که زمانی که سیستم در حالت گذرا قرار دارد از الگوریتم رویداد تحریک استفاده کند که متناوبا عمل نمونه برداری را انجام میدهد؛ و زمانی که سیستم در حالت ماندگار قرار دارد از الگوریتم خود تحریک بهره ببرد که لحظه نمونه برداری بعدی را پیش بینی میکند و متناوبا نمونه برداری را انجام نمیدهد.

همانطور که در ساختار پیشنهادی الگوریتم تلفیقی در شکل ۴-۱ نشان داده شده است؛ این ساختار از کنار هم قرار دادن ساختارهای رویداد تحریک و خود تحریک حاصل شده است. یک بلوک “تعیین گر الگوریتم کنترلی” نیز لحاظ شده است که در هر لحظه تعیین میکند کدام الگوریتم کنترلی باید مورد استفاده قرار گیرد و در مواقع لزوم تغییر الگوریتم کنترلی صورت گیرد. برای این منظور بلوک مزبور از رابطه ای استفاده میکند که میزان

تغییرات داده های نمونه برداری شده را نسبت به یک حد مشخص میسجد و بسته به آنکه میزان تغییرات کمتر یا بیشتر از آن حد باشد در رابطه با نوع الگوریتم کنترلی مورد استفاده تصمیم میگیرد.

سپس کیفیت عملکرد الگوریتم تلفیقی پیشنهادی از طریق نتایج شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که هدف از ارائه الگوریتم تلفیقی بهبود الگوریتم کنترلی نسبت به هر یک از الگوریتمهای رویداد تحریک و خود تحریک بوده است؛ در بخش شبیه سازی نیز در سه مثال نتایج شبیه سازی الگوریتم تلفیقی نسبت به الگوریتمهای مذکور مورد بررسی قرار گرفت.

در مثال اول که در بخش ۴-۵-۱ آورده شده است، الگوریتمهای ETPC و STPC مطرح شده در فصول دو و سه رساله به عنوان الگوریتمهای پایه ای الگوریتم تلفیقی مورد استفاده قرار گرفت و کران بالای اغتشاش براساس رابطه (۴-۴) فرض شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که الگوریتم تلفیقی به دست آمده به خوبی قادر به همگرا کردن متغیرهای حالت سیستم و خروجی سیستم در حضور اغتشاش ورودی و نقایص شبکه میباشد و این در حالی است که تعداد داده های ارسال شده از طریق شبکه در این روش نسبت به روش ارسال زمانبندی شده، با استفاده از مشاهده گر مرتبه کامل ۵۵٪ و با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته ۶۰٪ کاهش یافته است.

در مرحله بعد الگوریتم تلفیقی پیشنهادی در حضور اغتشاشهای خارجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد الگوریتم پیشنهادی ضمن کاهش ۵۰٪ ارسال داده ها نسبت به روش ارسال زمانبندی شده، به خوبی قادر به پایدارسازی سیستم میباشد. سپس با استفاده از متغیر Ψ مقایسه میان الگوریتم تلفیقی و الگوریتمهای پایه آن انجام شد. نتایج جدول ۴-۲ نشان داد که از منظر حفظ منابع انرژی سیستم و پهنای باند شبکه نیز الگوریتم تلفیقی به میزان قابل ملاحظه ای از الگوریتمهای پایه ای خود بهتر عمل میکند.

در مثال دوم در بخش ۴-۵-۲ الگوریتمهای رویداد تحریک و خود تحریک مطرح شده در مقاله [۳۸] به عنوان الگوریتمهای پایه ای الگوریتم تلفیقی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج شبیه سازی در این مثال نیز مانند مثال اول نشان داد الگوریتم تلفیقی به دست آمده ضمن کاهش ۹۳٪ ارسال داده ها نسبت به روش ارسال زمانبندی شده، به خوبی قادر به همگرا کردن متغیرهای حالت سیستم در حضور تاخیر متغیر با زمان شبکه میباشد.

پس از آن سیستم مورد بررسی تحت الگوریتم تلفیقی پیشنهادی، در معرض اغتشاشهای خارجی قرار گرفت. براساس نتایج شبیه سازی، الگوریتم پیشنهادی به خوبی قادر به پایدارسازی سیستم بوده و تعداد بسته های ارسال شده در این روش نسبت به روش کنترل زمانبندی شده ۸۹٪ کاهش داشته است. مقایسه میان الگوریتم تلفیقی و الگوریتمهای پایه ای آن با استفاده از متغیر Ψ نشان میدهد که باز هم الگوریتم تلفیقی بهتر از الگوریتمهای پایه

ای خود قادر به حفظ منابع انرژی سیستم و پهنای باند شبکه می باشد. نتایج مربوط به این مقایسه در جدول ۴-۳ آورده شده است.

در مثال سوم در بخش ۴-۵-۳ مانند مثال اول الگوریتمهای پیشنهادی در این رساله در فصول دو و سه به عنوان الگوریتمهای پایه ای الگوریتم تلفیقی مورد استفاده قرار گرفتند با این تفاوت که کران بالای اغتشاش براساس رابطه (۴-۵) در نظر گرفته شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که الگوریتم تلفیقی قادر به محدود نگه داشتن متغیرهای سیستم و پایداری UUB در حضور اغتشاش ورودی و نقایص شبکه هستند و این در حالی است که تعداد داده های ارسال شده از طریق شبکه در این روش نسبت به روش ارسال زمانبندی شده، با استفاده از مشاهده گر مرتبه کامل بیش از ۵۰٪ و با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته ۶۰٪ کاهش یافته است.

در مرحله بعد الگوریتم تلفیقی پیشنهادی در حضور اغتشاشهای خارجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد الگوریتم پیشنهادی ضمن کاهش حدوداً ۳۵٪ ارسال داده ها نسبت به روش ارسال زمانبندی شده، به خوبی قادر به پایداری UUB سیستم می باشد. سپس با استفاده از متغیر Ψ مقایسه میان الگوریتم تلفیقی و الگوریتمهای پایه آن انجام شد. نتایج جدول ۴-۳ نشان داد که از منظر حفظ منابع انرژی سیستم و پهنای باند شبکه نیز الگوریتم تلفیقی به میزان قابل ملاحظه ای از الگوریتمهای پایه ای خود بهتر عمل میکند.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱. نتیجه گیری

طی سالهای اخیر سیستمهای کنترل تحت شبکه به دلیل مزایای متعدد نسبت به سیستمهای کنترلی کلاسیک کاربردهای روزافزون یافته اند. به همین دلیل بررسی چالشهای مربوط به این سیستمها اهمیتی روزافزون یافته است. این چالشها به دلیل حضور شبکه مخابراتی در ساختار سیستم به وجود می آیند و مهمترین آنها عبارتند از تاخیر، از دست دادن و جابجایی بسته های داده ها، محدودیت پهنای باند شبکه و نیز منابع انرژی سیستم. در این رساله از طریق دو رویکرد به مقابله با این چالشها پرداخته شده است. رویکرد اول مربوط به قبل از ارسال داده ها از طریق شبکه میشود. در این رویکرد برای اجتناب از اثرات القایی شبکه بر روی داده ها؛ با استفاده از الگوریتمهای زمانبندی ارسال داده ها؛ تنها اقدام به ارسال داده هایی میشود که برای پایدارسازی و عملکرد مناسب سیستم ضروری هستند. رویکرد دوم مربوط به جبران اثرات القایی شبکه بر روی داده های منتقل شده از طریق شبکه میشود. در این رویکرد برای جبران اثرات شبکه بر روی داده های ارسال شده از کنترل کننده پیش بین استفاده میشود. علاوه بر این، از آنجا که اندازه گیری متغیرهای حالت سیستم در بسیاری از سیستمها امکانپذیر نیست، ساختار سیستم مورد بررسی در این رساله به صورت پسخورد خروجی در نظر گرفته شده است و برای تخمین متغیرهای حالت از یک مشاهده گر لوئنبرگر بهره برده ایم.

پس از آنکه سالها تنها روش کلاسیک ارسال متناوب زمانبندی شده در سیستمهای کنترل تحت شبکه مورد استفاده قرار میگرفت، دو روش رویداد تحریک و خود تحریک مطرح شد. هر یک از این روشها به تنهایی، در کنار مزایایشان، معایبی دارند که نقاط ضعف آنها محسوب میشود. ویژگی روش رویداد تحریک، نمونه برداری متناوب میباشد و در صورت ضروری تشخیص دادن داده جدید برای حفظ عملکرد سیستم، این داده برای ارسال به کنترل کننده بر روی شبکه قرار میگردد. نمونه برداری متناوب داده ها در زمان تغییرات شدید پاسخ سیستم یعنی زمانی که سیستم در حالت گذرا قرار دارد منجر به رصد دقیق تغییرات سیستم و صدور سیگنال کنترلی متناسب با این تغییرات توسط کنترل کننده میشود. اما زمانی که سیستم از حالت گذرا عبور میکند و وارد حالت ماندگار میشود؛ نمونه برداری متناوب داده ها ضرورتی برای حفظ عملکرد سیستم ندارد و تنها منجر به اتلاف منابع انرژی سیستم میشود.

از دیگر سو، ویژگی روش خود تحریک آن است که هر داده نمونه برداری شده برای ارسال بر روی شبکه قرار میگیرد و در هر لحظه نمونه برداری، لحظه نمونه برداری و ارسال بعدی نیز مشخص میشود و در فاصله بین این دو لحظه، در واقع سیستم به صورت حلقه باز عمل میکند. در شرایطی که سیستم در حالت ماندگار قرار دارد و

تغییرات زیادی را تجربه نمیکند، عدم انجام نمونه برداری از مزایای این الگوریتم کنترلی محسوب میشود چرا که منابع انرژی سیستم تلف نمیشود. اما زمانی که سیستم در حالت گذرا قرار دارد، حلقه باز بودن سیستم میتواند منجر به عدم پایداری سیستم شود.

ایده اساسی این رساله به این صورت بوده است که دو روش رویداد تحریک و خود تحریک با یکدیگر تلفیق شوند. به این ترتیب ضمن بهره مندی از مزایای هر یک از روشها، نقاط ضعفشان نیز پوشش داده میشود. زمانی که سیستم در حالت گذرا قرار دارد و نیاز به رصد دقیق متغیرهای سیستم میباشد، از الگوریتم رویداد تحریک استفاده میکنیم که به صورت متناوب نمونه برداری داده ها را انجام میدهد. زمانی که سیستم به حالت ماندگار میرسد، دیگر نیازی به رصد منظم متغیرهای سیستم نیست. به همین دلیل از الگوریتم خود تحریک استفاده میکنیم که در فاصله بین دو لحظه ارسال، به صورت حلقه باز عمل میکند و به این ترتیب منابع انرژی سیستم به خوبی حفظ میشوند.

تبیین ایده رساله و ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترلی مرتبط با آن در چهار فصل به صورت زیر انجام شد:

فصل اول شامل مقدمه ای بر سیستمهای کنترل تحت شبکه و چالشهای مرتبط با آن و اهمیت زمانبندی مناسب ارسال داده ها بود. دو الگوریتم پایه ای برای زمانبندی ارسال داده ها یعنی الگوریتم کنترلی رویداد تحریک و الگوریتم کنترلی خود تحریک تشریح شدند. از آنجا که الگوریتمهای کنترلی مورد بررسی در این رساله ETPC و STPC میباشد؛ مقالات مرتبط با این دو الگوریتم به طور ویژه مورد بررسی قرار گرفتند. سپس با توجه به نقاط ضعف هر یک از الگوریتمهای زمانبندی ارسال داده ها؛ انگیزه نگارش رساله شرح داده شد و در انتها نوآوریهای رساله تبیین شدند.

در فصل دو یک الگوریتم ETPC جدید پیشنهاد شد که از کنترل کننده ای چند بهره ای استفاده میکند. برای طراحی این کنترل کننده از روش نامساوی ماتریسی استفاده شد و در فرایند طراحی کنترل کننده یک نمایش مجتمع جدید از معادلات حالت سیستم به دست آمده است که به دلیل آنکه به طور همزمان شامل اغتشاش ورودی، تاخیر متغیر با زمان و از دست دادن و جابجایی متغیر با زمان بسته های داده ها در هر دو کانال اندازه گیری و محرک؛ و نیز ساختار مبتنی بر مشاهده گر و کنترل کننده چند بهره ای است، از نوآوریهای رساله محسوب میشود. در الگوریتمهای پیشنهادی مشاهده گر در دو حالت مختلف مشاهده گر مرتبه کامل و مشاهده گر مرتبه کاهش یافته در نظر گرفته شده است. در اولین الگوریتم پیشنهادی که نرم بردار اغتشاش ورودی سیستم را وابسته به نرم بردار حالت سیستم فرض کرده است؛ بهره های کنترل کننده و مشاهده گر با استفاده از روش تابع لیاپانوف

به گونه ای تعیین میشوند که پایداری مجانبی سیستم در حضور تاخیر، از دست دادن و جابجایی بسته ها تضمین شود. در دومین الگوریتم پیشنهادی که کران بالای نرم بردار اغتشاش ورودی سیستم را مقداری ثابت و مشخص فرض کرده است؛ قضایای مطرح شده پایداری UUB سیستم را تضمین میکنند. در دو الگوریتم پیشنهادی بعدی مشاهده گر مرتبه کاهش یافته جایگزین مشاهده گر مرتبه کامل شده است.

کارایی روش ETPC پیشنهادی نسبت به روشهای کنترلی رویداد تحریک موجود دیگر به کمک سه مثال بررسی شد. نتایج شبیه سازی نشان دادند که روشهای مورد استفاده در هیچ یک از دو مقاله مورد بررسی در مثالها؛ قادر به پایدارسازی سیستم نبودند. در حالی که الگوریتم ETPC پیشنهادی رساله با استفاده از مشاهده گر مرتبه کامل تعداد بسته های داده های ارسالی را در مثال ۱-۲ بیش از ۷۵٪ و در مثال ۲-۲ بیش از ۵۰٪ و در مثال ۳-۲ حدود ۷۰٪ کاهش داد. با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته، در مثال ۱-۲ کاهش ۷۵٪ و در مثال ۳-۲ کاهش ۷۵٪ را شاهد بودیم. در مثال اول عملکرد الگوریتم پیشنهادی با استفاده از مشاهده گر مرتبه کامل در حضور نویز سفید اضافه شونده در سنسور و نیز در حضور تاخیر تصادفی با توزیع برنولی بررسی شد. نمودارهای ارائه شده در مثالهای مزبور به همراه کاهش بسیار زیاد داده های ارسال شده، نشانگر قابلیت بالای الگوریتم ETPC پیشنهادی رساله در بهبود ارسال داده ها و ارتقاء پایداری و عملکرد سیستم کنترلی در مقایسه با الگوریتمهای موجود میباشد.

در فصل سه یک الگوریتم STPC جدید پیشنهاد شد که ساختار کلی آن مشابه با ساختار پیشنهادی فصل دو شامل یک کنترل کننده چند بهره ای و یک مشاهده گر لوئبرگر است که بهره های کنترل کننده و مشاهده گر بر پایه تابع لیاپانوف به گونه ای به دست می آیند که پایداری مجانبی و پایداری UUB سیستم را بسته به نوع کران بالای نرم بردار اغتشاش ورودی در حضور تاخیر متغیر با زمان و جابجایی بسته ها در کانال اندازه گیری و کانال محرک تضمین شود. وجه تمایز این الگوریتم با الگوریتم فصل دو در تعیین زمان نمونه برداری بعدی است که براساس روابط به دست آمده از تابع لیاپانوف محاسبه میشود. در این مسیر به دلیل عدم دسترسی به مقدار دقیق متغیر خروجی سیستم در روش STPC از تخمین تابع خروجی استفاده میکنیم. در الگوریتمهای ارائه شده در این فصل نیز دو مشاهده گر مختلف مرتبه کامل و مرتبه کاهش یافته در نظر گرفته شده اند.

در ادامه، کارایی روش STPC پیشنهادی به کمک دو مثال عددی شبیه سازی شده بررسی شد. در مثال ۱-۳ سیستم مطرح شده در [۳۷] بررسی شد که نمودارهای ارائه شده نشان دادند الگوریتم STPC پیشنهادی به خوبی قادر به همگرا نمودن سیستم در حضور اغتشاشها و نقایص شبکه میباشد و این در حالی است که تعداد دفعات

نمونه برداری و ارسال داده ها در این روش نسبت به روش ارسال زمانبندی شده داده ها، با استفاده از مشاهده گر مرتبه کامل بیش از ۶۵٪ و با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته ۷۰٪ کاهش داشته است. در این مثال همچنین عملکرد الگوریتم پیشنهادی با استفاده از مشاهده گر مرتبه کامل در حضور نویز سفید اضافه شونده سنسور و نیز در حضور تاخیر تصادفی با توزیع برنولی بررسی شد. مانند فصل دو؛ نمودارهای ارائه شده در مثالهای مزبور به همراه کاهش قابل توجه داده های ارسال شده، نشانگر قابلیت بالای الگوریتم STPC پیشنهادی رساله در بهبود ارسال داده ها و ارتقاء پایداری و عملکرد سیستم کنترلی در مقایسه با الگوریتمهای موجود میباشد. در مثال ۲-۳ نیز سیستم مطرح شده در [۳۷] بررسی شد که نمودارهای ارائه شده نشان دادند که الگوریتم STPC پیشنهادی به خوبی قادر به محدود کردن متغیرهای سیستم در حضور اغتشاش ورودی با کران بالای ثابت و نقایص شبکه میباشد و این در حالی است که تعداد دفعات نمونه برداری و ارسال داده ها در این روش نسبت به روش ارسال زمانبندی شده داده ها، با استفاده از مشاهده گر مرتبه کامل ۳۰٪ و با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته ۳۵٪ کاهش داشته است.

فصل چهار به تبیین الگوریتم تلفیقی نهایی اختصاص داشت. الگوریتم تلفیقی بر پایه این ایده مطرح شد که در صورتی که سیستم در حالت گذرا باشد از الگوریتم کنترلی رویداد تحریک استفاده کنیم و در صورتی که سیستم در حالت ماندگار باشد از الگوریتم کنترلی خود تحریک بهره ببریم. ساختار تلفیقی پیشنهادی از ترکیب دو الگوریتم مذکور به دست می آید و تنها یک بلوک "تعیین گر الگوریتم کنترلی" اضافه شده است که در هر لحظه نمونه برداری تعیین میکند نیاز به تغییر الگوریتم کنترلی مورد استفاده هست یا خیر.

به منظور بررسی کارایی الگوریتم ارائه شده در این فصل، نتایج شبیه سازی در سه مثال متفاوت ارائه شد. در هر یک از مثالهای این فصل، میزان کارایی الگوریتم تلفیقی از دو منظر مورد بررسی قرار گرفت. در هر مثال ابتدا این شرایط بررسی شد که الگوریتم تلفیقی پیشنهادی تا چه میزان قادر به پایدارسازی سیستم میباشد. سپس بهبود عملکرد سیستم نسبت به هریک از الگوریتمهای کنترلی مجزا مورد بررسی قرار گرفت.

در این راستا، در مثال ۴-۱ الگوریتمهای ETPC و STPC ارائه شده در فصلهای دو و سه به عنوان الگوریتمهای پایه ای الگوریتم تلفیقی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج شبیه سازی نشان دادند الگوریتم تلفیقی ارائه شده به خوبی از عهده پایدارسازی سیستم در حضور اغتشاشها و نقایص شبکه برآمده است ضمن آنکه داده های ارسال شده از طریق شبکه نسبت به الگوریتم ارسال زمانبندی شده داده ها، در غیاب اغتشاش خارجی و در حضور آن با استفاده از مشاهده گر مرتبه کامل به ترتیب ۵۵٪ و ۵۰٪ کاهش یافته است. در غیاب اغتشاش خارجی با استفاده

از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته ۶۰٪ کاهش در داده های ارسالی را شاهد هستیم. سپس با استفاده از فاکتور Ψ میزان موفقیت الگوریتم تلفیقی در کاهش اتلاف منابع انرژی سیستم و اشغال پهنای باند شبکه بررسی شد. نتایج جدول ۴-۲ به وضوح قابلیت بالاتر الگوریتم تلفیقی نسبت به الگوریتمهای مجزا را در این رابطه نشان میدهد.

در مثال ۴-۲ الگوریتمهای ارائه شده در مقاله [۳۸] به عنوان الگوریتمهای پایه ای الگوریتم تلفیقی مورد استفاده قرار گرفتند. مانند مثال ۴-۱، نتایج شبیه سازی و نیز مقادیر فاکتور Ψ جدول ۴-۳ بهبود عملکرد سیستم از نظر پایداری و میزان مصرف منابع انرژی سیستم و اشغال پهنای باند شبکه نشان میدهند. نتایج شبیه سازی نشان دادند تعداد داده های ارسال شده در این روش نسبت به روش ارسال زمانبندی شده داده ها، در غیاب و در حضور اغتشاش خارجی به ترتیب ۹۳٪ و ۸۹٪ کاهش داده شده است.

در مثال ۴-۳ نیز مانند مثال ۴-۱ الگوریتمهای ETPC و STPC ارائه شده در فصلهای دو و سه به عنوان الگوریتمهای پایه ای الگوریتم تلفیقی مورد استفاده قرار گرفتند با این تفاوت که در این مثال کران بالای نرم ۲ی بردار اغتشاش ورودی مقداری ثابت و مشخص فرض شده است. نتایج شبیه سازی نشان دادند الگوریتم تلفیقی ارائه شده به خوبی از عهده پایدارسازی UUB سیستم در حضور اغتشاشها و نقایص شبکه برآمده است ضمن آنکه داده های ارسال شده از طریق شبکه نسبت به الگوریتم ارسال زمانبندی شده داده ها، در غیاب اغتشاش خارجی و در حضور آن با استفاده از مشاهده گر مرتبه کامل به ترتیب ۵۰٪ و ۳۵٪ کاهش یافته است. در غیاب اغتشاش خارجی با استفاده از مشاهده گر مرتبه کاهش یافته افت ۶۰٪ را در تعداد بسته های ارسالی شاهد هستیم. سپس با استفاده از فاکتور Ψ میزان موفقیت الگوریتم تلفیقی در کاهش اتلاف منابع انرژی سیستم و اشغال پهنای باند شبکه بررسی شد. نتایج جدول ۴-۳ به وضوح قابلیت بالاتر الگوریتم تلفیقی نسبت به الگوریتمهای مجزا را در این رابطه نشان میدهد.

۵-۲. پیشنهادات

تمرکز این رساله بر روی سیستمهای کنترل تحت شبکه با یک پلنت بوده است که در معرض اغتشاشهای ورودی و خروجی، تاخیر، محدودیت پهنای باند شبکه و منابع انرژی شبکه میباشد و فرض بر همزمانی عملکرد فرستنده/گیرنده و نیز وجود برچسب زمانی در بسته داده ها بوده است. به منظور کاربردی تر کردن نتایج به دست آمده میتوان به روشهای زیر الگوریتمهای جدیدی جهت زمانبندی ارسال داده ها به دست آورد:

- لحاظ کردن عدم قطعیت در مدل فضای حالت سیستم
- طراحی الگوریتم کنترل پیش بین رویداد تحریک با شرط ارسال داده تطبیقی

- طراحی الگوریتم کنترل پیش بین خود تحریک با شرط ارسال داده تطبیقی
- بسط دادن نتایج به سیستمهای کنترل تحت شبکه با تعداد بیشتری پلنت و کنترل کننده
- طراحی الگوریتمهای ETPC و STPC با فرض عدم همزمانی فرستنده/گیرنده و با تبیین دقیق روشهای هماهنگ کردن کلاکهای بخشهای مختلف سیستم جهت استفاده از برچسب زمانی

- [1] R. Aragues, J. Cortes, and C. Sagues, "Distributed consensus on robot networks for dynamically merging feature-based maps," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. ٢٨, No. ٤, pp. ٨٤٠–٨٥٤, Aug. ٢٠١٢.
- [2] F. Y. Wang, "Parallel control and management for intelligent transportation systems: Concepts, architectures, applications," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 11, No. 3, pp. 630–638, Sep. 2010.
- [3] C. A. Castro, A. Alqassis, S. Smith, T. Ketterl, Y. Sun, S. Ross, A. Rosemurgy, P. P. Savage, and R. D. Gitlin, "A wireless robot for networked laparoscopy," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 60, No. 4, pp. 930–936, Apr. 2013.
- [4] D. Ding, Q. -L. Han, Z. Wang, and X. Ge, "A Survey on Model-Based Distributed Control and Filtering for Industrial Cyber-Physical Systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 15, No. 5, pp. 2483–2499, May, 2019.
- [5] L. Ding, Q.-L. Han, L. Y. Wang, and E. Sindi, "Distributed cooperative optimal control of DC microgrids with communication delays," *IEEE Transactions on Industrial Information*, vol. 14, no. 9, pp. 3924–3935, Sep. 2018.
- [6] Y.-L. Wang and Q.-L. Han, "Network-based modelling and dynamic output feedback control for unmanned marine vehicles in network environments," *Automatica*, vol. 91, pp. 43–53, May 2018.
- [7] M. S. Mahmoud and M. M. Hamdan, "Fundamental issues in networked control systems," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 5, no. 5, pp. 902-922, September 2018.
- [8] X. Zhang et al., "Networked control systems: a survey of trends and techniques," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 7, no. 1, pp. 1-17, January 2020.

- [9] D. Zhang, P. Shi, Q. –G. Wang, L. Yu, “Analysis and synthesis of networked control systems: a survey of recent advances and challenges,” *ISA Transactions*, Vol. 66, pp. 376-392, Jan. 2017.
- [10] X. Ge, F. Yang, Q. –L. Han, “Distributed networked control systems: a brief overview,” *Information Sciences*, Vol. 380, pp. 117-131, Feb. 2017.
- [11] H. Zhang, Y. Shi, J. Wang and H. Chen, "A New Delay-Compensation Scheme for Networked Control Systems in Controller Area Networks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 9, pp. 7239-7247, Sept. 2018.
- [12] C. Tan, L. Li, H. Zhang, “Stabilization of networked control systems with both networked-induced delay and packet dropout,” *Automatica*, Vol. 59, pp. 194-199, Sep. 2015.
- [13] X. Zhang, Q. Han and X. Yu, "Survey on Recent Advances in Networked Control Systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 5, pp. 1740–1752, 2016.
- [14] K. Liu, A. Selivanov and E. Fridman, “Survey on time-delay approach to networked control,” *Annual Reviews in Control*, Vol. 48, pp. 57-79, 2019.
- [15] L. Zhang, Q. Wu and S. Xiong, "Robust stabilization of uncertain nonlinear networked control systems with packet dropouts and quantization," 2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), Hefei, 2017, pp. 525-530.
- [16] V. S. Dolk, W. P. M. H. Heemels, “Dynamic event-triggered control under packet losses: The case with acknowledgement”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013.
- [17] W. P. M. H. Heemels, M. C. F. Donkers and R. T. Andrew, “Periodic event-triggered control for linear systems”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 58, 2013, pp. 847–861, 2013.

- [18] W. P. M. H. Heemels, K. H. Johansson, P. Tabuada, “An introduction to event-triggered and self-triggered control”, 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2012.
- [19] C. Stocker, Event-based state-feedback control of physically interconnected systems, Logos Verlag Berlin GmbH, 2014.
- [20] C. Peng and F. Q. Li, “A survey on recent advances in event-triggered communication and control,” *Informaion Science*, vol. 457-458, pp. 113–125, Aug. 2018.
- [21] X.-M. Zhang, Q.-L. Han, and B.-L. Zhang, “An overview and deep investigation on sampled-data-based event-triggered control and filtering for networked systems,” *IEEE Transactions on Industrial Information*, vol. 13, no. 1, pp. 4–16, Feb. 2017.
- [22] L. Ding, Q.-L. Han, X. Ge, and X.-M. Zhang, “An overview of recent advances in event-triggered consensus of multiagent systems,” *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 48, no. 4, pp. 1110–1123, Apr. 2018.
- [23] Q. Hong, H. Zhang, “An introduction to event-based control for networked control systems”, 2014 IEEE Conference on System Science and Engineering (ICSSE), China, 2014.
- [24] D. Yue, X. Yin and S. Hu, "Event-triggered predictive control for networked systems with communication delays compensation," *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, TX, 2014, pp. 3662-3668.
- [25] X. Yin, D. Yue, S. Hu, C. Peng, Y. Xue, “Model-based event-triggered predictive control for networked systems with data dropout”, *SIAM Journal on Control and Optimization*, Vol. 54, No. 2, pp. 567-586, Mar. 2016.
- [26] R. Yang and W. X. Zheng, "Output-Based Event-Triggered Predictive Control for Networked Control Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 12, pp. 10631–10640, 2020.

- [27] D. Wu, X. Sun, C. Wen and W. Wang, "Redesigned Predictive Event-Triggered Controller for Networked Control System With Delays," IEEE Transactions on Cybernetics, vol. 46, no. 10, pp. 2195-2206, Oct. 2016.
- [28] V. Lechappe, E. Moulay, F. Plestan, Q. –L. Han, "Discrete predictor-based event-triggered control of networked control systems", Automatica, Vol. 107, pp. 281–288, 2019.
- [29] H. Yang, X. Guo, L. Dai, Y. Xia, "Event-triggered predictive control for networked control systems with network-induced delays and packet dropouts", International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 28, No. 4, Mar. 2018.
- [30] Y. Qi, P. Zeng and W. Bao, "Event-Triggered and Self-Triggered H_∞ Control of Uncertain Switched Linear Systems," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 50, no. 4, pp. 1442-1454, April 2020.
- [31] Fu, W., Yang, S.X., Huang, C. et al. "Predictive triggered control for networked control systems with event-triggered mechanism," Cluster Computing 22, pp. 10185–10195, 2019.
- [32] Y. Wang, Z. Jia, Z. Zuo, "Dynamic event-triggered and self-triggered output feedback control of networked switched linear systems", Neurocomputing, Vol. 314, pp. 39-47, Nov. 2018.
- [33] L. Lu, J. M. Maciejowski, "Self-triggered MPC with performance guarantee using relaxed dynamic programming", Automatica, Vol. 114, Apr. 2020.
- [34] J. Zhan, X. Li and Z. Jiang, "Self-triggered robust output feedback model predictive control of constrained linear systems," 2017 American Control Conference (ACC), Seattle, WA, 2017, pp. 3066-3071.
- [35] H. Li, W. Yan and Y. Shi, "Triggering and Control Codesign in Self-Triggered Model Predictive Control of Constrained Systems: With Guaranteed Performance," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 63, no. 11, pp. 4008-4015, Nov. 2018.
- [36] K. Hashimoto, S. Adachi, D. V. Dimarogonas, "Self-triggered nonlinear model predictive control for networked control systems", 2015 American Control Conference, USA, 2015.

[37] R. Wang, G. Liu, W. Wang, D. Rees and Y. Zhao, " H_∞ Control for Networked Predictive Control Systems Based on the Switched Lyapunov Function Method," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 10, pp. 3565-3571, Oct. 2010.

[38] X. Wang and M. D. Lemmon, "Self-Triggered Feedback Control Systems With Finite-Gain L_γ Stability," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 54, no. 3, pp. 452-467, March 2009.

[39] Rosen, D., Mullins, E. R. Probability and Calculus. Bogden & Quigley Press, 1971.

Abstract

The aim of this thesis is presenting a new algorithm for scheduling data transmission through network in networked control systems (NCSs) such that it leads to improvement of system's stability and performance. The investigated system is a discrete-time NCS with input disturbance exposed to time-varying delay and packet loss in both feedback and feedforward channels. For this reason, in the first step an event-triggered predictive control (ETPC) method and in the next step a self-triggered predictive control (STPC) method are presented. In each one of the mentioned methods, a structure based on a full-order Luenberger observer and a reduced-order Luenberger observer; and a multi-gain predictive controller is given. Designing the observer and the controller in each step is performed through Lyapunov function method and linear matrix inequality (LMI) method such that they are capable of stabilizing the system in presence of disturbances and network imperfections. Eventually, by designing a combined structure the final algorithm is presented which is based on event-triggered control (ETC) method and self-triggered control (STC) method. Based on simulation results the combined algorithm; using the combination of the given ETPC and STPC methods in this thesis and also the combination of ETC and STC methods presented in another paper; has better performance than each one of the individual algorithms. The improvement of the performance is investigated from two aspects. First aspect is stabilizing the system in presence of external disturbances while reducing the number of sent data packets; and the second aspect is reducing the usage of the system's energy resources and network bandwidth.

Keywords: networked control system, data transmission scheduling, predictive control, asymptotic stability, uniformly ultimately bounded control.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotics Engineering

Ph.D Thesis in Control Engineering

**Improvement of Data Transmission in order to Enhance Stability
and Performance of Networked Control Systems**

By:

Beheshte Sadeghi Sabzevari

Supervisor:

Dr. Mohammad Haddad Zarif

Advisor:

Dr. Seyed Kamal Hosseini Sani

October 2021