

توسعه روش برخط مبتنی بر منطق فازی برای مواجهه‌ی همزمان با تأخیر زمانی و از دست رفتن بسته در سامانه‌های کنترل از طریق شبکه

پویا حاجبی^۱، سید محمدتقی المدرسی^۲

^۱دانشجوی دکتری مهندسی برق مخابرات، دانشگاه یزد، Hajeji@stu.yazd.ac.ir

^۲استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۱

چکیده

سامانه‌های کنترل از طریق شبکه برای کنترل یک فرآیند از راه دور و از طریق شبکه‌های داده مخابراتی به کار می‌روند. دو چالش بسیار مهم در این سامانه‌ها، تأخیر زمانی تصادفی و از دست رفتن بسته در شبکه مخابراتی می‌باشد. کنترل‌گرهای منطق فازی به خاطر ماهیت غیرخطی شان می‌تواند گزینه خوبی برای کنترل کردن فرآیند باشد. در این مقاله یک کنترل‌گر منطق فازی ارائه شده است که توسط یک سامانه غیرخطی دیگر یعنی یک شبکه عصبی با تأخیرهای زمانی تطبیق می‌یابد. جدول قوانین کنترل‌گر فازی بر اساس یک رابطه غیرخطی مبتنی بر تأخیر تخمینی شبکه، می‌چرخد. مقدار چرخش توسط شبکه عصبی محاسبه می‌گردد. علی‌رغم کارهای مشابه دیگر که از مدل برنولی برای بررسی از دست رفتن بسته استفاده می‌شود و تنها می‌تواند از دست رفتن بسته را به صورت یکنواخت مدل نماید، در این مقاله از مدل فرآیند مارکف استفاده می‌شود تا بتوان اثر از دست رفتن بسته‌ها را به‌طور متوالی بر روی عملکرد کنترل‌گر پیشنهادی بررسی نمود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد در تأخیرهای حدود ۶۰۰ میلی‌ثانیه و در شرایطی که از دست رفتن بسته به صورت متوالی با نرخ ۷۰ درصد رخ می‌دهد، شاخص عملکرد کنترل‌گر پیشنهادی نسبت به شاخص عملکردهای پیشگوگر اسمیت و کنترل‌گر منطق فازی معمولی به ترتیب حدود ۳ و ۷ برابر بهتر شده است.

کلیدواژه

از دست رفتن بسته، تأخیر زمانی شبکه، زنجیر مارکف، سامانه‌های کنترل از طریق شبکه، کنترل‌گر تطبیقی منطق فازی.

مقدمه

شبکه را ناپایدار کند [۱۲]. نشان داده شده است هنگامی که تأخیر زمانی از زمان نمونه‌برداری کوچکتر باشد، این تأخیر زمانی اثر محسوسی بر روی سامانه کنترلی نمی‌گذارد، با این وجود تأخیرهای بیش از زمان نمونه‌برداری می‌تواند عملکرد سامانه را دچار اختلال نماید [۱۳]. بسیاری از کنترل‌گرها نظیر کنترل‌گر تناسبی-انتگرالی سنتی و کنترل‌گر منطق فازی برای پایداری و کاهش خطا در سامانه کنترل از طریق شبکه به کار گرفته شده‌اند. پیشگوگر اسمیت^۱، یکی از کنترل‌گرهایی است که برای فرآیندهایی با تأخیر زمانی ثابت مناسب است [۱۳، ۱۴].

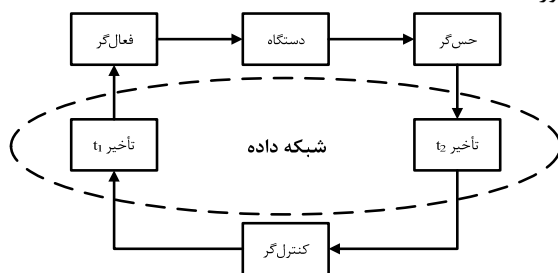
Hsu و Lai روشی برای بهبود پیشگوگر اسمیت نسبت به تأخیرهای تصادفی در سامانه‌های کنترل از طریق شبکه ارائه نموده‌اند، اما آن‌ها از مسأله از دست رفتن بسته کاملاً صرف‌نظر نموده‌اند [۱۴]، علاوه بر این، در روش آن‌ها مشکل وابستگی شدید دقت مدل به دقت تخمین تابع انتقال دستگاه، وجود دارد بدین معنی که تغییرات کوچکی در تابع انتقال دستگاه باعث ایجاد تغییر بزرگی در سامانه‌ی کنترلی می‌شود.

سامانه‌های کنترل از طریق شبکه، سامانه‌های توزیع‌شده مکانی هستند که در آن‌ها ارتباط بین حس‌گرها، فعال‌گرها و کنترل‌گرها از طریق شبکه‌ی مخابراتی دیجیتال باند محدود می‌باشد [۱، ۲]. این شبکه‌ی تسهیم‌شده که اجزاء سامانه کنترل را متصل می‌کند، یک ساختار انعطاف‌پذیر ایجاد می‌کند که هزینه‌های نصب، بهره‌برداری و نگهداری را کاهش می‌دهد. سامانه‌های کنترل از طریق شبکه، در زمینه‌های وسیعی مانند شبکه‌های حس‌گر متحرک [۳]، جراحی از راه دور [۴]، ارتباط لامسه‌ای از طریق اینترنت [۵-۷]، سامانه‌های خودکار بزرگراه‌ها، پهپادها و خودروهای بدون سرنشین کاربردهای فراوانی پیدا کرده‌اند [۸، ۹]. Murray و همکارانش در [۱۰] کنترل از طریق شبکه را به عنوان یکی از جهت‌های کلیدی در آینده مشخص کرده‌اند. با این حال استفاده از شبکه در مقایسه با استفاده از چندین ارتباط اختصاص‌یافته مستقل، چالش‌های جدیدی را به وجود می‌آورد. تأخیرهای تصادفی و از دست رفتن-بسته دو مشکل بزرگ در سامانه‌های کنترل از طریق شبکه می‌باشد [۱۱، ۱۲]. از دست رفتن بسته، تأخیر تصادفی و کوانتیزاسیون با تعداد سطوح کم می‌تواند سامانه کنترل از طریق

1. Smith Predictor

آموزش دیده است. نتایج نشان می‌دهد که کنترل‌گری که جدول قوانین آن توسط یک شبکه عصبی می‌چرخد، در مقایسه با سایر روش‌ها از عملکرد مناسب‌تری برخوردار است. در واقع در یک شبکه مخابراتی تأخیرهای ناشی از شبکه می‌تواند از ۲۰۰ میلی‌ثانیه فراتر رود (۶۰۰ میلی‌ثانیه). در حالی که نتایج در [۱۷، ۱۹] نشان می‌دهد که عملکرد سامانه کنترلی برای تأخیرهای بیش از ۲۰۰ میلی‌ثانیه خراب می‌شود اما در روش پیشنهادی این مقاله یک بهبود قابل ملاحظه هنگامی که تأخیر زمانی بیش از ۲۰۰ میلی‌ثانیه است مشاهده می‌شود. حتی در تأخیر زمانی ۶۰۰ میلی‌ثانیه، اختلالی در پاسخ پله سامانه دیده نمی‌شود. همچنین در این مقاله از زنجیر مارکف برای مدل نمودن از دست رفتن بسته‌ها استفاده می‌شود، سپس کنترل‌گر پیشنهادی در بدترین شرایط که هم از دست رفتن بسته‌ها به طور متوالی و با نرخ بالا رخ می‌دهد و هم تأخیر زمانی شبکه زیاد است، مورد آزمایش قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد عملکرد روش پیشنهادی نسبت به تأخیر زیاد و همین‌طور از دست رفتن بسته متوالی با نرخ بالا در مقایسه با سایر روش‌های دیگر بهبود یافته است و کنترل‌گر پیشنهادی از مقاومت بالاتری در برابر تأخیر و از دست رفتن تصادفی بسته در شبکه به طور همزمان برخوردار بوده است.

این مقاله علاوه بر این بخش شامل چهار بخش دیگر به شرح ذیل است؛ بخش دوم به معرفی دقیق سامانه کنترل از طریق شبکه، تأخیر زمانی و از دست رفتن بسته اختصاص داده شده است. در بخش سوم، ابتدا طراحی کنترل‌گر منطق فازی برای کنترل وضعیت یک سروموتور جریان متناوب ۴۰۰ وات ارائه می‌شود و سپس ایده چرخش جدول قوانین فازی آن با استفاده از شبکه عصبی برای مقابله با تأخیر شبکه مطرح می‌شود. در بخش چهارم شبیه‌سازی‌ها و نتایج عددی ارائه می‌شود و در پایان نتیجه‌گیری آورده شده است.



شکل ۱. سامانه تک ورودی- تک خروجی کنترل از طریق شبکه.

سامانه کنترل از طریق شبکه

با توجه به گسترش سامانه‌های مخابراتی دیجیتال مبتنی بر قرارداد ات‌رنِت^۲ و افزایش قابلیت اعتماد به این شبکه‌ها در سال‌های اخیر، معمول شده است که از این نوع کانال‌های مخابراتی برای

اخیراً Pan و همکارانش در [۱۵] و Zhao و همکارانش در [۱۶]، نشان داده‌اند که کنترل‌گرهای منطق فازی، عملکرد بهتری در مقابله با از دست رفتن بسته و تأخیر زمانی متغیر دارند و همین‌طور با فرآیندهای غیرخطی سازگارترند. W. Du و سایر همکارانش پیشگوگر اسمیتی را که با کنترل‌گر تناسبی-انتگرالی تطبیقی فازی آمیخته شده را برای سامانه کنترل از طریق شبکه بی‌سیم معرفی کردند [۱۷]. با این حال آن‌ها تأخیر برخط شبکه را اندازه‌گیری نکردند. آن‌ها سامانه منطق فازی را برای تنظیم ضرایب کنترل‌گر تناسبی-انتگرالی- مشتق‌گیر به کار بردند. آن‌ها دامنه تغییر تأخیر را حدود ۱۵۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفتند که در عمل می‌تواند تا ۶۰۰ میلی‌ثانیه هم افزایش یابد.

دومین مسأله مهم دیگر که باید در سامانه‌های کنترل از طریق شبکه مورد بررسی قرار گیرد، عملکرد سامانه در برابر از دست رفتن بسته‌ها در شبکه مخابراتی می‌باشد. بسیاری از پژوهشگران برای بررسی از دست رفتن بسته با دانستن نرخ از دست رفتن بسته از مدل برنولی استفاده کرده‌اند [۱]، با این حال در این روش الگوی از دست رفتن بسته‌ها یکنواخت است، در حالی که عملکرد سامانه-های کنترل از طریق شبکه زمانی تحت تأثیر شدید قرار می‌گیرد که از دست رفتن بسته به طور متوالی اتفاق بیفتد، زیرا نرسیدن بسته‌ها به حس‌گر یا کنترل‌گر به‌طور پیوسته باعث ناپایداری در پاسخ سامانه‌های کنترلی می‌شود. با استفاده از مدل زنجیر مارکف می‌توان غیر از نرخ از دست رفتن بسته، الگوی از دست رفتن بسته را هم مدل نمود.

بنابراین Li و Wen در [۱۸]، بر روی طول کمترین زنجیر مارکف برای مدل نمودن از دست رفتن بسته در یک کنترل‌گر تناسبی-انتگرالی در سامانه‌های کنترل از طریق شبکه مطالعه کرده‌اند و طی آن ثابت کرده‌اند که کمترین طول زنجیر برای بررسی اثر از دست رفتن بسته ارتباط مستقیمی با درجه کنترل‌گر و درجه دستگاه در سامانه کنترل از طریق شبکه دارد. با این حال آن‌ها هیچ کنترل‌گری جهت قرار دادن در سامانه‌های کنترل از طریق شبکه ارائه نکردند و همچنین مسأله تأخیر زمانی را هم در نظر نگرفتند و نتایج شبیه‌سازی از بررسی کار خود ارائه ندادند.

این مقاله ابتدا یک کنترل‌گر منطق فازی برای کنترل وضعیت یک سروموتور جریان متناوب ۴۰۰ وات از طریق ات‌رنِت ارائه می‌دهد، در قدم بعدی یک کنترل‌گر برخط تطبیقی فازی برای مقابله با اثرات ناشی از تأخیر شبکه و از دست رفتن بسته ارائه می‌شود. در این مقاله یک راهکار برای مقابله با تأخیر و از دست رفتن بسته با استفاده از چرخش جدول قوانین فازی در طول فرآیند کنترل، ارائه می‌شود. ابتدا تأخیر زمانی رفت و برگشت شبکه به‌طور برخط اندازه‌گیری می‌شود، سپس این مقدار توسط یک شبکه عصبی آموزش داده شده به یک زاویه نگاشت می‌شود. این شبکه عصبی توسط مقادیر مختلف تأخیر برای کنترل‌گر تطبیقی منطق فازی،

تأخیر زمانی در شبکه

در یک سامانه کنترل از طریق شبکه، دستورات کنترلی از طریق شبکه به صورت بسته ارسال می‌شود. از آنجا که بسته‌ها در شبکه می‌توانند از طریق مسیرهای مختلف به مقصد برسند، گاهی برخی بسته‌ها که زودتر ارسال شده‌اند، دیرتر به مقصد می‌رسند که باعث به وجود آمدن تأخیر متغیر^۴ می‌شود. این پدیده باعث ایجاد اثرات نامطلوبی در عملکرد سامانه کنترلی می‌شود. برای بررسی اثرات تأخیر زمانی، ابتدا تأخیرهای زمانی در سامانه کنترلی به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شود؛ تأخیر زمانی مخابراتی بین کنترل‌گر و فعال‌گر (t_1)، تأخیر زمانی بین حس‌گر و کنترل‌گر (t_2) و زمان محاسبات در کنترل‌گر (t_3). تمرکز اصلی این مقاله بر روی تأخیر زمانی مخابراتی بین کنترل‌گر و فعال‌گر و همچنین تأخیر زمانی بین حس‌گر و کنترل‌گر است، زیرا تأخیر زمانی محاسباتی در کنترل‌گر از شبکه ناشی نمی‌شود و ماهیت تصادفی ندارد و معمولاً مقداری ناچیز است. مجموع تأخیر زمانی در مسیر رفت (از کنترل‌گر به فعال‌گر) و مسیر بازگشت (از حس‌گر به کنترل‌گر) به عنوان تأخیر شبکه در سامانه کنترلی تعریف می‌گردد. تأخیر زمانی در حلقه کنترلی اثرات مخربی بر روی عملکرد سامانه کنترلی از طریق شبکه می‌گذارد. تأخیر زمانی شبکه یک فرآیند تصادفی است و این تأخیرها می‌تواند به‌طور مستقیم بر روی عملکرد سامانه کنترلی تأثیر گذارد. محدوده دامنه تغییرات تأخیر زمانی عامل مهم دیگری است که به‌طور مستقیم بر روی عملکرد سامانه کنترلی از طریق شبکه تأثیر می‌گذارد. D_u و دیگران در [۱۷] فرض کردند که بیشترین مقدار تأخیر زمانی در حدود ۱۵۰ میلی‌ثانیه باشد، همچنین در [۱۵] بازه تأخیر زمانی بین ۰ تا ۲۰۰ میلی‌ثانیه است. به‌طور عملی دامنه تغییرات تأخیر می‌تواند به حدود ۶۰۰ میلی‌ثانیه نیز برسد [۱۴]. در این مقاله تأخیر زمانی به صورت یک فرآیند تصادفی با توزیع یکنواخت فرض شده است به طوری که به صورت پله‌ای با اندازه‌های مختلف جهش می‌یابد، به صورتی که حدود تأخیرهای شبکه به ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌ثانیه می‌رسد.

از دست رفتن بسته در شبکه

مدل متداول از دست رفتن بسته در شبکه، استفاده از توزیع برنولی است [۱] که با داشتن نرخ از دست رفتن بسته، مدل‌سازی از دست رفتن بسته‌ها انجام می‌گیرد، با این حال این نوع مدل‌سازی نمی‌تواند رفتار از دست رفتن بسته‌ها را به‌طور دقیق بیان کند. در برخی موارد مانند انتقال سیگنال صوت یا سیگنال تصویر یا سیگنال کنترلی به صورت بلادرنگ از طریق شبکه، اگر در بعضی موارد سیگنال به‌طور غیرمتوالی به مقصد نرسد مشکل اساسی ایجاد نمی‌نماید، اما در صورتی که همین سیگنال‌ها به‌طور متوالی

انتقال سیگنال‌های حس‌گر و کنترل‌گر استفاده شود که این روش، کاهش چشم‌گیری در هزینه سیم‌کشی و نگهداری از سیم‌های اختصاص‌یافته دارد [۱۵]. علاوه بر این امکان اجرای سامانه‌های کنترلی گسترده در مکان، انعطاف‌پذیر و اجزاء متحرک را به وجود آورده است. با این حال، سامانه‌های کنترلی از طریق شبکه، مشکلات خاص خود نظیر تأخیر زمانی متغیر و از دست رفتن بسته را دارد [۱۲، ۱۵] که موجب تضعیف عملکرد آن‌ها می‌شود. در شکل (۱) ساختار یک سامانه‌ی کنترلی از طریق شبکه تک ورودی-تک خروجی نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است t_1 و t_2 به ترتیب زمان‌های تأخیر شبکه در مسیر کنترل‌گر به فعال‌گر و در مسیر حس‌گر به کنترل‌گر می‌باشد.

به‌طور کلی تأخیر ایجادشده در شبکه، بر اساس بار شبکه، نحوه برنامه‌ریزی شبکه، تعداد گره‌های شبکه و پروتکل‌های مختلف تغییر می‌کند. مشخصه متغیر تأخیر زمانی این سامانه‌ها، طراحی و مدل‌سازی این سامانه‌ها را پیچیده می‌کند. مجموع کل تأخیر زمانی رفت و برگشت بر اساس این که در کجا ایجاد شود به سه دسته تقسیم می‌شود. گره سرور، کانال شبکه و گره کاربر [۲۰]. به‌علاوه اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت برای به دست آوردن تخمین دقیق تأخیر به‌طور متناوب مورد نیاز است [۲۲-۲۰]. RTT^3 به عنوان مجموع تأخیر مسیر رفت و برگشت شبکه در یک سامانه کنترلی از طریق شبکه تک ورودی-تک خروجی تعریف می‌شود. به‌طور کلی هرچه مسیر طولانی‌تر شود، تأخیر زمانی ناشی از شبکه به علت افزایش تعداد گره‌ها، افزایش می‌یابد و نهایتاً منجر به افزایش RTT می‌گردد. t_m پارامتری کلیدی در پیشگوگر اسمیت می‌باشد که برای جبران تأخیر ثابت مسیر در نظر گرفته می‌شود. در طراحی ساختار پیشگوگر اسمیت کلاسیک مقدار t_m معمولاً ثابت در نظر گرفته می‌شود و این مقدار برابر متوسط تقریبی تأخیر زمانی بین آن دو گره شبکه است. مقدار RTT می‌تواند به کنترل‌گر منطق فازی برای جبران تأخیر متغیر اعمال شود. به صورت معمول و مرسوم جدول قوانین فازی در کنترل‌گر منطق فازی در حین فرآیند کنترل ثابت است که در این مقاله با استفاده از مقدار RTT، زاویه‌ای برای چرخش قوانین فازی به دست می‌آید که با اعمال آن بر کنترل‌گر منطق فازی و چرخش قوانین فازی می‌توان با اثر تأخیر مقابله نمود.

به علت وجود تأخیر و از دست رفتن بسته در شبکه مخابراتی، کنترل‌گر و دستگاه نمی‌توانند به‌ترتیب به آخرین سیگنال‌های فعال‌گر و آخرین سیگنال‌های کنترلی دست یابند، بنابراین دانستن نوع تأخیر و مدل از دست رفتن بسته می‌تواند در بررسی عملکرد سامانه‌های کنترلی از طریق شبکه کمک فزاینده نماید. دو زیربخش پایین به بررسی مدل تأخیر زمانی و از دست رفتن بسته در سامانه‌های کنترلی از طریق شبکه می‌پردازد.

می‌شود. این مبدل‌های دیجیتال به آنالوگ و آنالوگ به دیجیتال به عنوان نگهدارنده مرتبه صفر کار می‌کنند. از آنجایی که نگهدارنده مرتبه صفر از ورودی نمونه‌برداری می‌کند و آن را تا لحظه نمونه‌برداری بعدی نگه می‌دارد، یک تأخیر به اندازه یک بازه نمونه‌برداری در سامانه کنترل ایجاد می‌شود. این بدین معنی است که تا لحظه بعدی نمونه‌برداری، ورودی جدیدی به سامانه اعمال نخواهد شد. این امر می‌تواند در تابع انتقال سامانه منعکس شود، به این صورت که توان z در صورت هر تابع انتقال همیشه حداقل یک واحد نسبت به مخرج کمتر است. یعنی b_n در تابع انتقال صفر است. بر این اساس می‌توان رابطه تابع انتقال را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$G(z) = \frac{C(z)}{R(z)} = \frac{b_0 z^{-n} + b_1 z^{-n+1} + \dots + b_{n-1} z^{-1}}{a_0 z^{-n} + a_1 z^{-n+1} + \dots + a_n} \quad (3)$$

اگر آن را به صورت فرم معادله دیفرانس نشان دهیم، داریم

$$C(k) = \frac{1}{a_n} [b_{n-1} r(k-1) + \dots + b_0 r(k-n) - a_{n-1} c(k-1) - a_{n-2} c(k-2) - \dots - a_0 c(k-n)] \quad (4)$$

که n درجه سامانه کنترل است. از معادله دیفرانس بالا، دیده می‌شود که n سیگنال ورودی قبلی و n سیگنال خروجی قبلی به طور مستقیم بر خروجی سامانه تأثیر می‌گذارد. برای رسیدن به عملکرد خوب یک الگوریتم کنترل، باید کنترل‌گر قادر باشد به همه اطلاعات بالا دسترسی داشته باشد. بنابراین برای مقاصد کنترلی باید حداقل n اندازه‌گیری قبل در نظر گرفته شود. این اندازه‌گیری‌ها مربوط به n بسته قبلی متوالی از حس‌گر مربوط است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کوتاه‌ترین طول دنباله بسته، n است که مساوی درجه سامانه کنترلی است. برای مثال در یک سامانه درجه دوم تنها نیاز است به دو بسته متوالی نگاه شود. هر کدام از این دو بسته متوالی می‌تواند یا دریافت شود یا از دست برود. که $2^2 = 4$ حالت را نتیجه می‌دهد و می‌توان از زنجیر مارکف 4 حالتی برای نمایش دنباله‌های کمینه از دست رفتن بسته استفاده نمود.

مدل زنجیر مارکف برای دنباله از دست رفتن بسته

فرض کنید، بسته‌های ارسال شده توسط یک حس‌گر شامل مقدار اندازه‌گیری بردار حالت دستگاه باشد و برای محاسبه خروجی کنترل در گره‌های کنترل‌گر استفاده شود. با در نظر گرفتن حس‌گر k ، زنجیر مارکف به صورت یک فرآیند تصادفی گسسته با m حالت با $X(m)$ برای $m=0, 1, \dots, M-1, M \geq 2$ نشان داده می‌شود. احتمال انتقال از یک حالت $X(i)$ به حالت $X(j)$ دیگر مربوط به احتمالی است که بسته بعدی از دست می‌رود یا احتمالی که بسته بعدی دریافت می‌شود.

برای نشان دادن دنباله از دست رفتن بسته با هر حالت، هر حالت با یک دنباله‌ی خاص بیت‌های وضعیت حس‌گر S_{ij}, S_{ij} مرتبط

به مقصد نرسد باعث ایجاد اختلال در صوت یا تصویر یا سامانه کنترلی می‌شود، از این رو به غیر از نرخ از دست رفتن بسته، الگوی از دست رفتن بسته هم از نکات بسیار مهم در بررسی عملکرد سامانه‌های کنترل از طریق شبکه می‌باشد. همان‌گونه که اشاره شد، معروف‌ترین پارامتر برای بیان پدیده از دست رفتن بسته، نرخ از دست رفتن بسته می‌باشد که بیان‌گر متوسط از دست رفتن‌های بسته‌ها است. نرخ از دست رفتن بسته به صورت نسبت درصد بسته‌های از دست رفته به کل بسته‌ها تعریف می‌شود. با این تعریف تنها نرخ از دست رفتن بسته‌ها معلوم می‌شود و توزیع از دست رفتن بسته‌ها نامعلوم است. در حالی که توزیع و الگوی از دست رفتن بسته‌های شبکه، نقشی حیاتی در کاربردهای بلادرنگ نظیر کنترل از طریق شبکه یا انتقال صدا و تصویر از طریق شبکه بازی می‌کند. هر دنباله‌ی از دست رفتن بسته می‌تواند احتمال متفاوتی داشته باشد که این الگوها در مدل برنولی دیده نمی‌شود. Basar و Yuksel در [23]، یک مدل زنجیر مارکف را برای حالت‌های محتمل از دست رفتن بسته در نظر گرفته‌اند. Li و Wen در [18]، تنها دنباله از دست رفتن بسته را برای کنترل‌گر تناسبی-انتگرالی ساده در نظر گرفتند و برای آن مدل زنجیر مارکف با کمترین طول را ارائه دادند اما مسأله تأخیر تصادفی شبکه را نادیده گرفته‌اند. آن‌ها هیچ کنترل‌گری برای مقابله با اثرات تأخیر شبکه ارائه نکردند و نتایج شبیه‌سازی یا عملی از کار خود ارائه ندادند. کمترین تعداد حالت‌های محتمل بیت‌ها برای مدل از دست رفتن بسته در یک زنجیر مارکف از روی تابع انتقال کنترل‌گر و دستگاه به دست می‌آید. در این‌جا با در نظر گرفتن پویایی یک سامانه کنترل و اینکه چگونه اندازه‌گیری کنونی و اطلاعات قبلی بر دینامیک سامانه تأثیر می‌گذارد به بررسی یک سامانه کنترل از طریق شبکه پرداخته می‌شود؛ با داشتن سامانه کنترل زمان-گسسته زیر،

(1)

$$X(k+1) = A(k)X(k) + Bu(k)$$

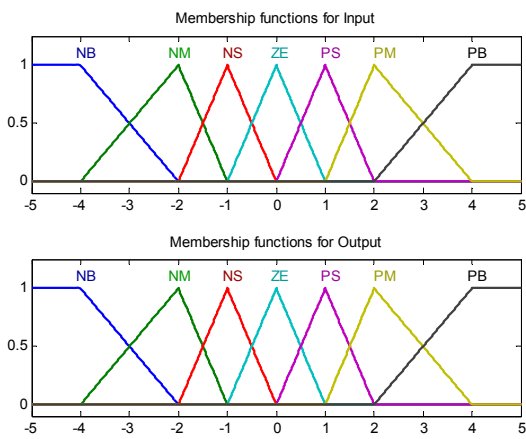
$$y(k) = CX(k)$$

که $X(k)$ ، یک بردار حالت $n \times 1$ ، $y(k)$ خروجی است، A ماتریس $n \times n$ سامانه است، B بردار $n \times 1$ و C بردار اتصال $1 \times n$ است. می‌توان این معادله‌ها را به صورت تابع انتقال (2) بازنویسی نمود.

$$G(z) = \frac{C(z)}{R(z)} = \frac{b_0 z^{-n} + b_1 z^{-n+1} + \dots + b_n}{a_0 z^{-n} + a_1 z^{-n+1} + \dots + a_n} \quad (2)$$

در یک سامانه گسسته-زمان، معمولاً چند نگهدارنده مرتبه صفر وجود دارد که توابع نمونه‌برداری را پیاده‌سازی می‌کند. برای مثال، در یک مدار از مبدل آنالوگ به دیجیتال برای نمونه‌برداری سیگنال ورودی آنالوگ، و یک مبدل دیجیتال به آنالوگ برای تبدیل خروجی سیگنال دیجیتال به یک سیگنال آنالوگ استفاده

منطق فازی هستند. در این مقاله، دستگاه تحت کنترل یک سروموتور جریان متناوب ۴۰۰ وات است که وضعیت آن توسط یک رمزگذار با بهره ۱۰^۴ اندازه‌گیری می‌شود. چنانچه این دستگاه توسط یک کنترل‌گر تناسبی-انتگرالی کنترل شود، ضرایب آن $K_p=0.0001$ و $K_i=0.00000001$ می‌باشد [۱۴]. تابع انتقال (وضعیت حلقه باز) از رابطه (۶) به دست می‌آید. روابط (۷) و (۸) فرم فضای حالت پیوسته تابع انتقال تعریف شده در (۶) است. در این روابط $G_p(s)$ تابع انتقال دستگاه، \dot{x} مشتق بردار حالت و y خروجی می‌باشد. در شکل (۵) هفت تابع عضویت مثلثی برای ورودی (خطا و مشتق خطا) و خروجی معرفی شده است. در شکل (۵) متغیرهای زبانی فازی ("NB"، "NM"، "NS"، "ZE"، "PS"، "PM"، "PB") به ترتیب منفی بزرگ، منفی متوسط، منفی کوچک، صفر، مثبت کوچک، مثبت متوسط و مثبت بزرگ هستند. در کنترل وضعیت، خروجی ورودی را تعقیب می‌کند، بنابراین فرض شده است که توابع عضویت ورودی و خروجی یکسان باشند. در اینجا برخی از پارامترهای سامانه منطق فازی که در این مقاله به کار رفته معرفی می‌شود؛ (۱) استنتاج فازی به کار رفته در طراحی از نوع ممدانی می‌باشد [۲۴]. (۲) عملگر "و" منطقی بر اساس مینیمم است. روش استدلال منطقی بر اساس مینیمم و جمع‌آوری براساس ماکزیمم است. (۳) خروجی سامانه فازی توسط روش مرکز ثقل به دست می‌آید. (۴) قوانین فازی توسط جدول (۲) به دست می‌آید که شامل ۴۹ قانون است. (۵) به علت بهره بالای رمزگذار (۱۰^۴) در دستگاه، ضریب مقیاس خروجی فازی ۱۰^{-۴} می‌باشد.



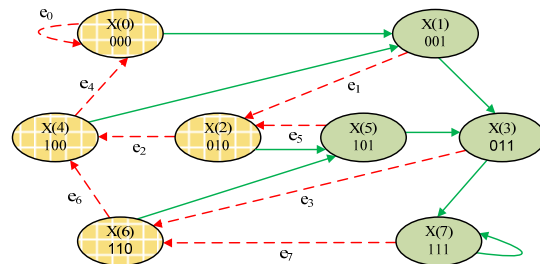
شکل ۵. توابع عضویت ورودی و خروجی.

$$G_p(s) = \frac{10^4(0.058s + 3.221)}{s(0.0001s^2 + 0.019s + 1)} \quad (۶)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -190 & -78.125 & 0 \\ 128 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 2048 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (۷)$$

احتمال پیشین از دست رفتن بسته‌ها نسبت به هم نباشد، آن‌ها را مساوی در نظر می‌گیرند.

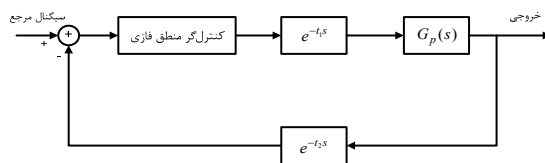
$$T_8 = \begin{bmatrix} e_0 & 1-e_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e_1 & 1-e_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_2 & 1-e_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_3 & 1-e_3 \\ e_4 & 1-e_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e_5 & 1-e_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_6 & 1-e_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_7 & 1-e_7 \end{bmatrix} \quad (۵)$$



شکل ۳. مدل زنجیر مارکف هشت حالت برای دنباله از دست رفتن بسته.

کنترل‌گر منطق فازی با استفاده از جدول قوانین چرخان

همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد، کنترل‌گر منطق فازی می‌تواند، راه حلی برای مقابله با مسأله تأخیر زمانی در سامانه‌های کنترل از طریق شبکه باشد، با این حال تا کنون بیشتر از کنترل‌گرهای تناسبی-انتگرالی و یا تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر برای کنترل این سامانه‌ها استفاده می‌شود که عملکرد محدودتری مخصوصاً در فرآیندهای غیرخطی دارند. اخیراً ثابت شده است که کنترل‌گر منطق فازی گزینه بهتری در فرآیندهای غیرخطی است و همچنین عملکرد بهتری در مقابل تأخیر زمانی دارد [۱۵، ۱۶]. در این بخش ابتدا، کنترل‌گر منطق فازی طراحی می‌شود، سپس این کنترل‌گر طراحی شده در پیشگوگر اسمیت استفاده می‌شود. در پایان کنترل‌گر تطبیقی فازی پیشنهادی با جدول قوانین فازی چرخان ارائه می‌شود.



شکل ۴. کنترل‌گر منطق فازی.

طراحی کنترل‌گر منطق فازی

شکل (۴) بلوک دیاگرام یک کنترل‌گر منطق فازی را نشان می‌دهد. در این سامانه، ابتدا خروجی دستگاه اندازه‌گیری می‌شود و سپس با سیگنال مرجع مقایسه می‌شود، تا سیگنال خطا به دست آید. سیگنال خطا و مشتق آن، دو ورودی برای کنترل‌گر

ناپایداری سامانه و میزان خطای پاسخ خروجی افزایش می‌یابد. خطای تخمین یکی از مشکلات مهم در ساختار پیشگوگر اسمیت می‌باشد. در این مقاله فرض شده است، تابع انتقال دستگاه و تخمین تابع انتقال دستگاه یکسان باشد، همچنین قوانین کنترل گر فازی بر طبق قوانین جدول (۲) انتخاب می‌شود.

طراحی کنترل گر منطق فازی برخط تطبیقی با جدول قوانین چرخان

برای پیاده‌سازی این روش، ابتدا RTT تخمین زده می‌شود [۲۰] و سپس این مقدار به کنترل گر منطق فازی تطبیقی اعمال می‌شود. کنترل گر منطق فازی طراحی شده در این بخش با یک ساختار شبکه عصبی ترکیب شده است. مقدار زمان رفت و برگشت اندازه‌گیری شده‌ی بسته (RTT)، به مثابه‌ی تخمینی از تأخیر، در کنترل گر فازی پیشنهادی اعمال می‌شود و میزان زاویه چرخش از طریق همین مقدار RTT و به کمک شبکه عصبی استخراج می‌گردد. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد در این مقاله از کنترل گر منطق فازی برای تنظیم ضرایب کنترل گر تناسبی-انتگرالی یا تناسبی-انتگرالی- مشتق‌گیر استفاده نشده است، بلکه به طور مستقیم از خود کنترل گر منطق فازی جهت کنترل فرآیند استفاده شده است. کنترل گر غیرخطی منطق فازی این توانایی را دارد که فرآیندهای غیرخطی و پیچیده را کنترل کند و در برابر تغییرات جزئی دستگاه در حین فرآیند کنترل، عملکرد بهتری نسبت به سایر کنترل گرها داشته باشد. در طول یک فرآیند کنترلی که در آن تأخیر وجود ندارد، با گذشت زمان، سیگنال خطا و مشتق خطا در یک مسیر دایره‌ای شکل روی قوانین فازی حرکت می‌کند. تأخیرهای زمانی باعث می‌شود که سیگنال خطا و مشتق خطا در جای صحیح خود اعمال نشود، بنابراین در این مقاله یک روش کنترلی ارائه می‌شود که یک کنترل گر منطق فازی را با یک شبکه عصبی ترکیب می‌کند. شکل (۷)، ساختار کنترل گر پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این شکل، مقدار RTT توسط شبکه عصبی به یک زاویه نگاشت می‌شود.

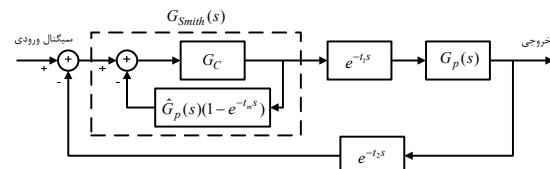
$$y = [0 \quad 22.13 \quad 1228.7]x \quad (۸)$$

پیشگوگر اسمیت با کنترل گر منطق فازی

پیشگوگر اسمیت کلاسیک یکی از کنترل گرهای است که برای فرآیندهایی با تأخیر زمانی ثابت مناسب می‌باشد [۱۳، ۱۴]. در اینجا یک پیشگوگر اسمیت طراحی می‌شود تا نتایج آن با نتایج کنترل گر منطق فازی مقایسه شود. در این پیشگوگر اسمیت که در شکل (۶) ترسیم شده است، بلوک G_C کنترل گر منطق فازی، که در بخش قبلی طراحی آن توضیح داده شده را نشان می‌دهد. G_P تابع انتقال دستگاه است. \hat{G}_P تخمین تابع انتقال دستگاه است. t_m تخمین مجموع کل تأخیر زمانی کنترل گر به دستگاه و دستگاه به کنترل گر می‌باشد. اگر t_m تخمین مناسبی از تأخیر کلی شبکه باشد، عملکرد سامانه بهبود می‌یابد. در این مقاله، مقدار t_m برابر ۲۰۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است.

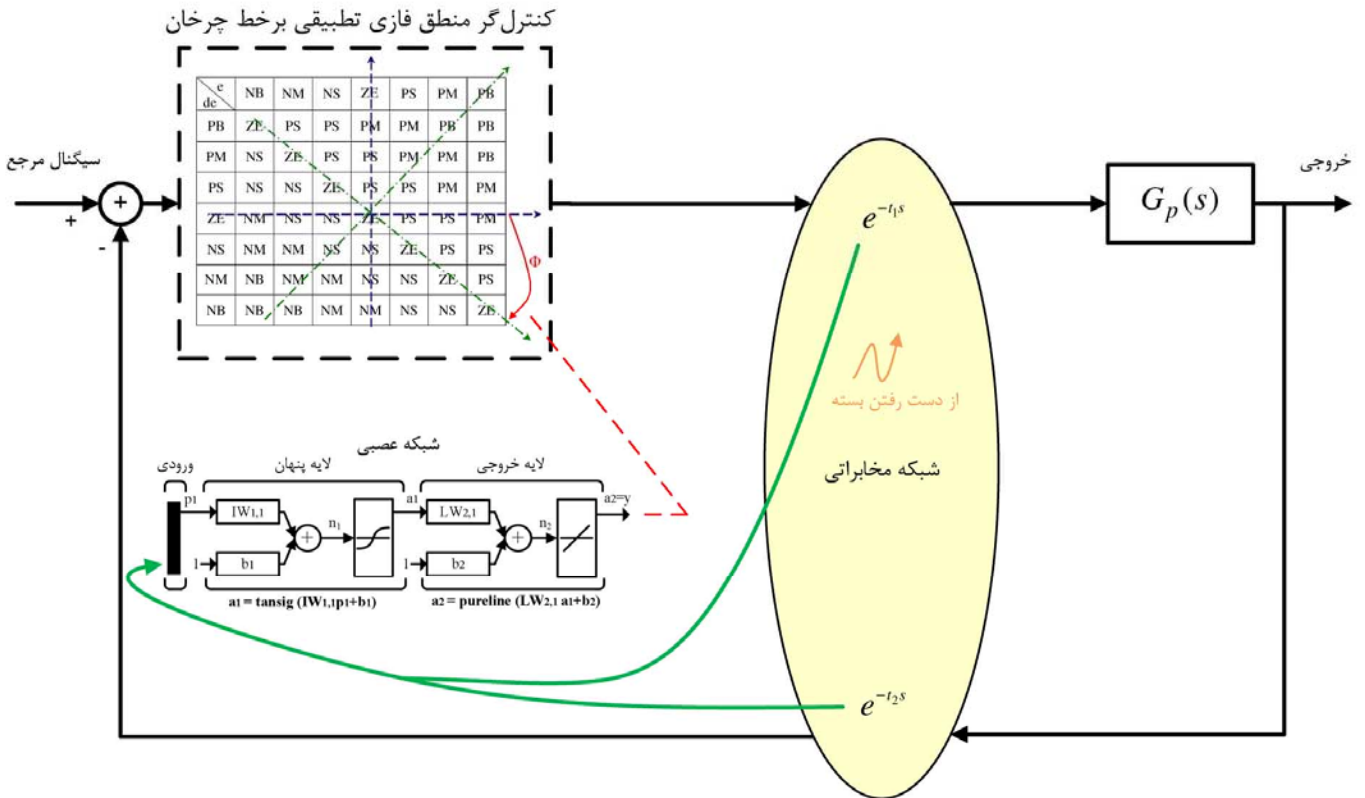
جدول ۲. جدول قوانین فازی برای خطا، مشتق خطا و خروجی (بدون استفاده از روش چرخش).

e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
de	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB



شکل ۶. ساختار کنترلی پیشگوگر اسمیت

عملاً \hat{G}_P کمی متفاوت از G_P است، زیرا دقت هیچ تخمینی بی‌نهایت نیست. هرچه میزان تفاوت G_P و \hat{G}_P بیشتر باشد،



شکل ۷. ساختار کنترل گر منطق فازی تطبیقی بر خط با استفاده از شبکه عصبی

جدول ۳. جدول قوانین فازی برای خطا، مشتق خطا و خروجی (با استفاده از روش چرخش).

e \ de	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE

e \ de	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE

شکل ۸. چرخش قوانین فازی

ساختار شبکه عصبی به صورت یک شبکه عصبی پیشخور^۶ می‌باشد که دو لایه دارد. در ابتدا شبکه عصبی توسط مجموعه‌ای از داده‌ها بر اساس تأخیرهای مختلف آموزش می‌بیند، به این صورت که میزان چرخش برای چندین تأخیر مختلف به دست می‌آید، سپس این مقادیر به یک شبکه عصبی داده می‌شود تا آموزش ببیند. میزان زاویه چرخش جدول قوانین فازی در کنترل گر منطق فازی متناسباً براساس مقدار RTT تغییر می‌کند. قوانین فازی استفاده شده در این قسمت براساس جدول (۳) می‌باشد، ولی سایر پارامترها (توابع عضویت، عملگرهای منطق فازی و روش منطق فازی) با پارامترهای قسمت قبلی یکسان می‌باشد. رابطه (۹) رابطه نگاشت بین خطا و مشتق خطا را در مختصات جدید نشان می‌دهد. رابطه (۱۰) ماتریس دوران چرخش محورهای مختصات به اندازه ϕ رادیان را نشان می‌دهد. ساختار جدول قوانین در حال چرخش در شکل (۸) نشان داده شده است.

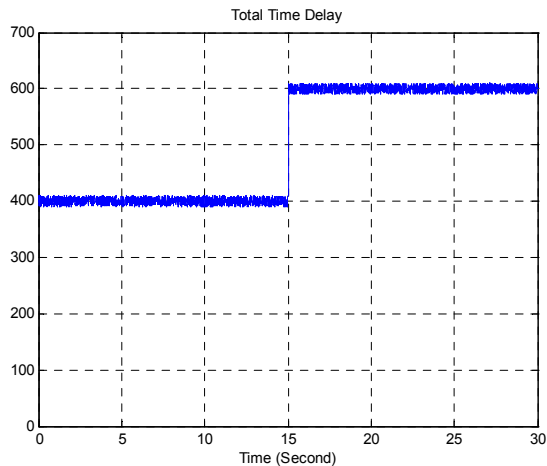
$$\begin{bmatrix} e_{new} \\ \dot{e}_{new} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (10)$$

(۱۹) شکل ریاضی این دو تابع را نشان می‌دهد، همچنین در شکل (۱۰) این دو تابع ترسیم شده‌اند.

جدول ۴. مقادیر وزن‌ها و بایاس‌های شبکه عصبی

$IW_{1,1} = \begin{bmatrix} -0.0057 \\ -0.2547 \end{bmatrix}$	$LW_{2,1} = [0.3566 \quad 0.8011]$
$b_1 = \begin{bmatrix} 1.1243 \\ 24.6125 \end{bmatrix}$	$b_2 = 0.5684$

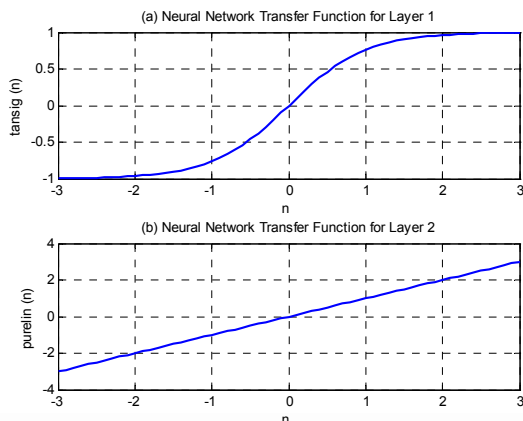


شکل ۹. یک نمونه‌ای از تأخیر تصادفی شبکه

$$\text{tansig}(n) = \frac{2}{1 + e^{-2n}} - 1 \quad (18)$$

$$\text{purelin}(n) = n \quad (19)$$

زمان نمونه‌برداری ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است و همچنین مدل‌سازی سامانه کنترل از طریق شبکه بر اساس مدلی است که در [۲۵] معرفی شده است. در این مقاله شبیه‌سازی‌ها و مقایسه بین پاسخ پله سامانه برای سه کنترل‌گر انجام شده است؛ (۱) کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی برخط، (۲) پیش‌گوگر اسمیت با کنترل‌گر منطق فازی، (۳) کنترل‌گر منطق فازی معمولی. کنترل‌گر منطق فازی این مقاله بر اساس یک کنترل‌گر تناسبی - انتگرالی طراحی شده است و از دو ورودی خطا و مشتق خطا



شکل ۱۰. توابع انتقال شبکه عصبی: الف) لایه اول؛ ب) لایه دوم.

شبیه‌سازی و نتایج عددی

سامانه کنترل از طریق شبکه حلقه بسته این مقاله؛ شامل بخش‌های کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی برخط، دستگاه و شبکه مخابرات داده می‌باشد. به منظور تجزیه و تحلیل کل سامانه، هر بخش باید به طور مجزا مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. از فضای حالت برای شبیه‌سازی و رسم پاسخ سامانه به ورودی استفاده شده است. در مرحله اول، تابع انتقال دستگاه به فضای حالت انتقال می‌یابد. چون اطلاعات کنترلی از طریق خطوط داده دیجیتال انتقال می‌یابند، لازم است که از معادلات فضای حالت گسسته برای شبیه‌سازی فرآیند استفاده شود. رابطه (۱۱)، شکل فضای حالت گسسته فرآیند را نشان می‌دهد، که ماتریس‌های A, B, C و D ماتریس‌های فضای پیوسته هستند و ماتریس‌های A_d, B_d, C_d و D_d ماتریس‌های نظیر معادل آن در فضای گسسته می‌باشند و از روابط (۱۲) تا (۱۵) استخراج می‌شوند و T زمان نمونه برداری است. با فرض زمان نمونه برداری برابر ۰/۰۱ ثانیه و قرار دادن روابط (۷) و (۸) در روابط (۱۱) تا (۱۵)، معادلات فضای حالت گسسته دستگاه استخراج می‌شود که در روابط (۱۶) و (۱۷) نمایش داده شده است.

(۱۱)

$$\begin{cases} x[k+1] = A_d x[k] + B_d u[k] \\ y[k] = C_d x[k] + D_d u[k] \end{cases}$$

$$A_d = e^{AT} \quad (12)$$

$$B_d = \left(\int_0^T e^{A\tau} d\tau \right) B \quad (13)$$

$$C_d = C \quad (14)$$

$$D_d = D \quad (15)$$

$$x[k+1] = \begin{bmatrix} 0.0066 & -0.2973 & 0 \\ 0.4870 & 0.7295 & 0 \\ 0.0035 & 0.0089 & 1 \end{bmatrix} x[k] \quad (16)$$

$$+ \begin{bmatrix} 7.7924 \\ 7.0909 \\ 0.0277 \end{bmatrix} u[k]$$

$$y[k] = [0 \quad 22.13 \quad 1228.7] x[k] \quad (17)$$

در شبیه‌سازی‌ها یک تأخیر زمانی تصادفی به سامانه اعمال می‌شود تا اثر شبکه در سامانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. مجموع تأخیر مسیر رفت (t_1) و مسیر برگشت (t_2)، تأخیر زمانی کلی شبکه را تشکیل می‌دهد. تأخیر زمانی کل در شکل (۹) نشان داده شده است. پس از آموزش شبکه عصبی، مقادیر وزن‌ها و بایاس‌ها استخراج می‌شود که در جدول (۴) این مقادیر آورده شده است. تابع انتقال شبکه عصبی در لایه اول (لایه مخفی) و لایه دوم (لایه خروجی) به ترتیب "tansig" و "purelin" است. روابط (۱۸) و

$$T_{50\%Neq} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 & 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{70\%Neq} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 & 0 \end{bmatrix}$$

برای ساختن خروجی کنترلی استفاده می‌کند که با توجه به اینکه مشتق خطا اختلاف سیگنال لحظه کنونی و پیشین آن است، دو ورودی آخر (کنونی و قبلی) کنترل‌گر بر روی خروجی کنترلی آن تأثیر می‌گذارد. از طرفی تابع انتقال دستگاه مورد بررسی یک تابع درج سه می‌باشد، بنابراین مرتبه مدل زنجیر مارکف، برابر حداکثر این دو مقدار می‌باشد که عدد ۳ است. پس ابعاد ماتریس انتقال حالت این زنجیر مارکف ۸ در ۸ می‌باشد. برای آن که شرایط متفاوت مدل از دست رفتن بسته برای کنترل‌گر پیشنهادی بررسی گردد، در این جا شش ماتریس مختلف انتقال حالت مارکف به صورت زیر معرفی می‌گردد. نرخ از دست رفتن بسته در ماتریس‌های $T_{20\%Eq}$ ، $T_{50\%Eq}$ و $T_{70\%Eq}$ به ترتیب ۲۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ می‌باشد، همچنین احتمال‌های از دست رفتن بسته (رخداد الگوها) در این ماتریس‌ها برای زنجیر مارکف، یکسان می‌باشد.

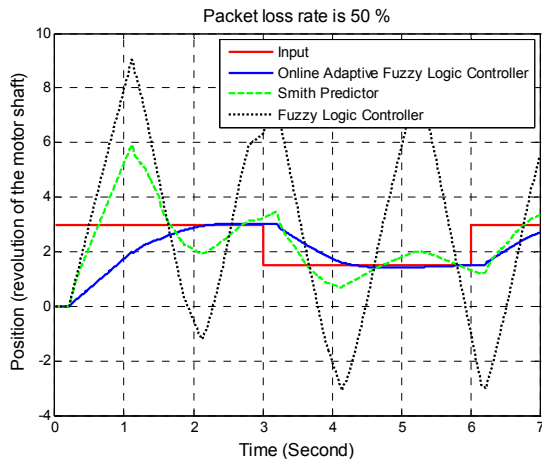
هستند زمانی که نرخ از دست رفتن بسته به ترتیب ۲۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ باشد و احتمال از دست رفتن بسته هر الگو با الگوی دیگر در زنجیر مارکف، متفاوت باشد. این مقادیر احتمالاتی متفاوت متناظر با مقادیر درایه‌های ماتریس مربوطه می‌باشد. به این صورت در این وضعیت‌ها احتمال رخداد بعضی از الگوهای خاص بیشتر از سایر الگوهای می‌باشد. یک نمونه دنباله از دست رفتن بسته در مسیر مستقیم کنترل‌گر به دستگاه و همچنین برای مسیر پسخور دستگاه به کنترل‌گر به ترتیب به صورت شکل ۱۱-الف و ۱۱-ب می‌باشد که در این شکل‌ها نرخ از دست رفتن بسته برابر ۵۰ درصد و احتمال رخ دادن الگوها یکسان است. زمانی که دنباله مقدار صفر دارد نشان‌گر آن است که بسته ارسالی از دست رفته است و وقتی مقدار دنباله یک باشد نمایان‌گر دریافت موفقیت آمیز بسته می‌باشد. شکل ۱۲-الف و ۱۲-ب دنباله تولید شده مشابهی است که نرخ از دست رفتن بسته در آن‌ها همان ۵۰ درصد می‌باشد، با این تفاوت که احتمال رخ دادن الگوها یکسان نیست و بر اساس ماتریس انتقال حالت $T_{50\%Neq}$ استخراج شده است که بعضی الگوهای از دست رفتن بسته بیشتر اتفاق افتاده و سایر الگوها کمتر رخ داده‌اند. با توجه به ماتریس $T_{50\%Neq}$ به طور خاص الگوهایی که در آن‌ها از دست رفتن بسته متوالی رخ داده‌است احتمال بیشتری نسبت به الگوهایی دارد که از دست رفتن بسته‌ها غیر متوالی صورت گرفته است. متعاقباً این گونه از دست رفتن بسته روی عملکرد سامانه کنترل از طریق شبکه تأثیر بیشتری می‌گذارد چرا که برای لحظاتی از زمان سیگنال کنترلی / سیگنال پسخور به دستگاه / کنترل‌گر به طور متوالی نرسیده‌اند. در این حالت کنترل‌گری بهتر عمل می‌کند که بتواند با اثر این نوع از دست رفتن بسته مقابله کند.

$$T_{20\%Eq} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}$$

$$T_{50\%Eq} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{70\%Eq} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

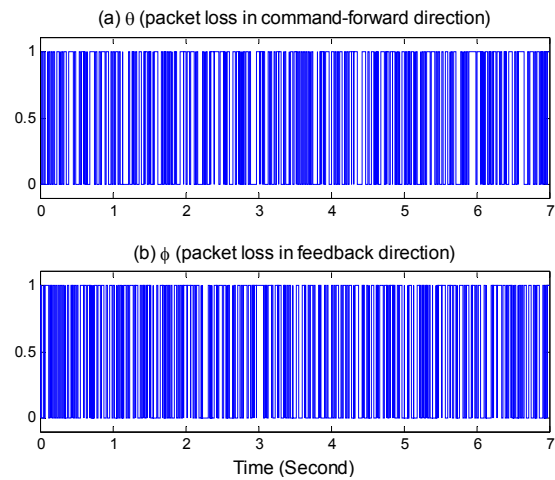
$$T_{20\%Neq} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{bmatrix}$$



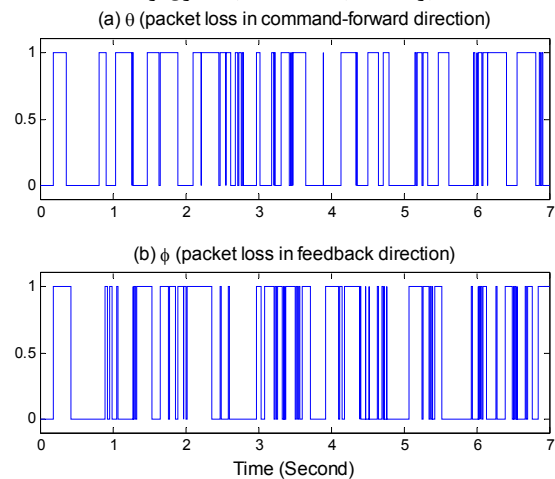
شکل ۱۴. مقایسه کنترل وضعیت (چرخش شافت موتور) سه کنترلر مختلف (ماتریس انتقال مارکف $T_{50\%Eq}$ می باشد).

شکل ۱۳ و شکل ۱۴ به ترتیب، نتایج شبیه‌سازی برای سه نوع کنترلر بر اساس دنباله از دست رفتن بسته شکل‌های ۱۱ و ۱۲ می‌باشد. در این دو شبیه‌سازی تأخیر شبکه حدود ۴۰۰ میلی‌ثانیه با یک اعوجاج ۱۰ میلی‌ثانیه‌ای با توزیع یکنواخت بوده است (۷ ثانیه اول شکل ۹). این شکل‌ها عملکرد سامانه کنترل از طریق شبکه برای کنترل وضعیت دستگاه را نشان می‌دهد (وضعیت چرخش شافت موتور). در این حالت هدف آن است که خروجی با دقت بالاتری ورودی را دنبال کند. همچنین فرض شده است چنانچه بسته‌ای که قرار بوده به دستگاه یا کنترلر برسد در مسیر گم شود، تا رسیدن بسته‌ی جدید، دستگاه یا کنترلر گر از آخرین بسته‌ی رسیده قبلی به جای بسته‌های گم شده استفاده کند. همان‌گونه که در هر کدام از شکل‌ها مشخص است، کنترلر پیشنهادی و رویی را به خوبی و بدون هیچ فراجهدی دنبال می‌کند. نکته مهم دیگر آن است که در حالتی که احتمال رخ دادن هر الگو یکسان نیست (شکل ۱۴)، اولین قله پیشگوگر اسمیت بیشتر از ۵ شده است و پاسخ آن هم دچار اعوجاج شده است که این مقدار در حالتی که احتمال الگوها یکسان است کمتر از ۵ می‌باشد و پاسخ نیز اعوجاجی ندارد. کنترلر گر منطق فازی در هر دو حالت از دست رفتن بسته یکنواخت و متوالی ناپایدار شده است.

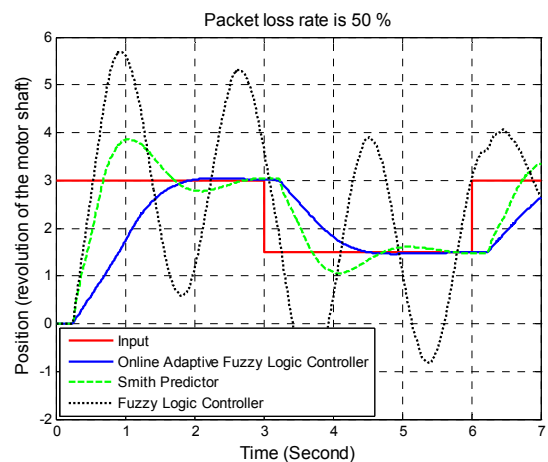
Du و همکارانش پیشگوگر اسمیتی را پیشنهاد دادند که با کنترلر فازی-تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر برای سامانه کنترل از طریق شبکه در [۱۷] بسط داده شده است. با این وجود آن‌ها از تأخیر برخط شبکه استفاده نکرده‌اند. آن‌ها فقط برای تنظیم ضرایب کنترلر گر تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر، کنترلر منطق فازی را اعمال کردند، که در این حالت کنترلر گر به صورت برون-خط کار می‌کرد. آن‌ها همچنین یک کنترلر با شبکه عصبی RBF به همراه پیشگوگر اسمیت برای سامانه کنترل از طریق شبکه طراحی کردند که برون‌خط کار می‌کند. آن‌ها در این روش اثر از دست رفتن بسته در شبکه را نادیده گرفتند. در یک شبکه



شکل ۱۱. دنباله از دست رفتن بسته بر اساس مدل زنجیر مارکف (ماتریس انتقال مارکف $T_{50\%Eq}$ می باشد): الف) از دست رفتن بسته در مسیر مستقیم شبکه (کنترلر گر به دستگاه)؛ ب) از دست رفتن بسته در مسیر برگشت شبکه (دستگاه به کنترلر گر).



شکل ۱۲. دنباله از دست رفتن بسته بر اساس مدل زنجیر مارکف (ماتریس انتقال مارکف $T_{50\%Eq}$ می باشد): الف) از دست رفتن بسته در مسیر مستقیم شبکه (کنترلر گر به دستگاه)؛ ب) از دست رفتن بسته در مسیر برگشت شبکه (دستگاه به کنترلر گر).



شکل ۱۳. مقایسه کنترل وضعیت (چرخش شافت موتور) سه کنترلر مختلف (ماتریس انتقال مارکف $T_{50\%Eq}$ می باشد).

دو شاخص دیگر برای ارزیابی سامانه کنترلی و مقایسه نتایج، زمان خیز و درصد فراجشش (P.O.) است. زمان خیز زمانی است که طول می‌کشد تا پاسخ پله کنترل‌گر از ۱۰ درصد مقدار نهائی به ۹۰ درصد مقدار نهائی‌اش برسد. درصد فراجشش بر اساس (۲۱) به دست می‌آید که در آن برای یک پله واحد، M_{pt} مقدار اولین قله در پاسخ زمانی سامانه و f_v مقدار نهائی پاسخ است که معمولاً f_v برابر اندازه ورودی است.

$$P.O. = \frac{M_{pt} - f_v}{f_v} \times 100 \% \quad (21)$$

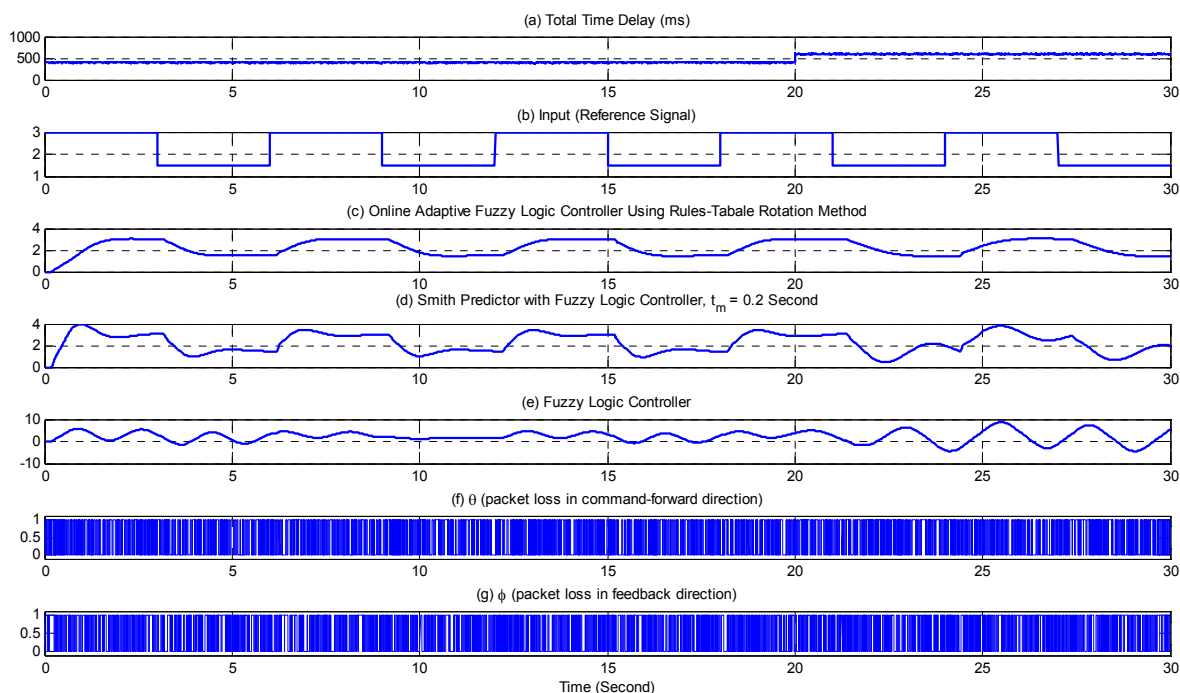
زمان قله، زمانی است که طول می‌کشد تا خروجی دستگاه به مقدار قله خود برسد. هرچه مقادیر M_{pt} و P.O. کمتر باشد، عملکرد سامانه مطلوب‌تر است. جدول (۵) مقایسه نتایج سه کنترل‌گر مختلف را در تأخیرهای مختلف و نرخ از دست رفتن بسته‌های متفاوت نشان می‌دهد. نتایج این جدول مربوط به هنگامی است که توزیع از دست رفتن بسته به طور یکنواخت می‌باشد. این جدول نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مجموع، فراجشش کمتری دارد. چون پیشگوگر اسمیت در این مقاله برای تأخیر ۲۰۰ میلی‌ثانیه تنظیم شده است، در تأخیر ۲۰۰ میلی‌ثانیه نتیجه بهتری از خود نشان می‌دهد، با این وجود برای سایر تأخیرها عملکردش کاهش می‌یابد. کنترل‌گر فازی معمولی برای حالت بدون تأخیر تنظیم شده است و برای سایر تأخیرها، نسبت به دو کنترل‌گر دیگر عملکرد ضعیف‌تری دارد. جدول (۶) نتایج سه کنترل‌گر مختلف همانند جدول (۵) است با این تفاوت که در این جدول توزیع از دست رفتن بسته‌ها به صورت متوالی و بر اساس ماتریس‌های انتقال حالت مارکف $T_{20\%Neq}$ ، $T_{50\%Neq}$ و $T_{70\%Neq}$ در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج جدول (۵) و جدول (۶) نشان می‌دهد که کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی بر خط نسبت به دو کنترل‌گر دیگر چه در حالت از دست رفتن بسته با توزیع یکنواخت و چه در حالت از دست رفتن بسته به طور متوالی نتیجه مطلوب‌تری دارد. برای مقایسه دقیق‌تر، انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطا برای سه کنترل‌گر مختلف در شکل‌های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) به ترتیب برای نرخ از دست رفتن بسته ۲۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ و در هر دو حالت توزیع از دست رفتن بسته به طور یکنواخت و متوالی رسم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش تأخیر زمانی شبکه، روش کنترل‌گر پیشنهادی از مقدار انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطای کمتری نسبت به دو کنترل‌گر دیگر برخوردار است.

مخابراتی، تأخیرها می‌تواند فراتر از ۲۰۰ میلی‌ثانیه نیز برود (مثلاً حدود ۴۰۰ یا ۶۰۰ میلی‌ثانیه). همچنین بسته‌های شبکه می‌تواند به صورت یکنواخت یا متوالی در شبکه از دست برود. نتایج [۱۷، ۱۹] نشان می‌دهد که پاسخ سامانه در تأخیرهای بیش از ۲۰۰ میلی‌ثانیه خراب می‌شود. در این مراجع، بیشینه تأخیر، حدود ۲۰۰ میلی‌ثانیه فرض شده است و این تأخیر به صورت گسسته اعمال شده است. در روش پیشنهادی ما تأخیرها بیش از ۲۰۰ میلی‌ثانیه فرض شده‌اند. به این منظور و جهت ارزیابی دقیق‌تر سامانه کنترل از طریق شبکه، شبیه‌سازی‌ها در زمانی که تأخیر شبکه با واحدهای پله‌ای تغییر می‌یابد و به ۶۰۰ میلی‌ثانیه نیز می‌رسد انجام شده است و نتایج آن در شکل (۱۵) برای زمانی که ماتریس از دست رفتن بسته $T_{50\%Eq}$ است و همچنین در شکل (۱۶) برای زمانی که احتمال الگوها یکسان نیست و از ماتریس $T_{50\%Neq}$ برای مدل از دست رفتن بسته استفاده شده، رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد کنترل‌گر منطق فازی چرخان عملکرد بهتری در مقایسه با دو کنترل‌گر دیگر دارد. زمانی که احتمال الگوها متفاوت است اثر از دست رفتن بسته با افزایش تأخیر شبکه بر روی پیشگوگر اسمیت و کنترل‌گر منطق فازی بیشتر است (شکل (۱۶)). در تمامی این شکل‌ها، پاسخ روش کنترل‌گر منطق فازی چرخان فراجشش کمتر و پاسخ سریع‌تری در مقایسه با کنترل‌گرهای دیگر دارد. بنابراین، استفاده از این کنترل‌گر در سامانه‌های کنترل از طریق شبکه مناسب‌تر است. نتایج در [۱۹] نشان می‌دهد پاسخ سامانه کنترل از طریق شبکه علی‌رغم در نظر نگرفتن مسأله از دست رفتن بسته، با تأخیرهای حدود ۲۰۰ میلی‌ثانیه که به صورت گسسته اعمال شده‌اند دچار اعوجاج شده است. روش پیشنهادی در این مقاله باعث بهبود پاسخ در تأخیرهای بیش از ۲۰۰ میلی‌ثانیه با در نظر گرفتن مسأله از دست رفتن بسته با نرخ بالا شده است. در این مقاله که سامانه، کار کنترل وضعیت فرآیند را انجام می‌دهد، هدف آن است که پاسخ خروجی، ورودی را دنبال کند. هرچه پاسخ خروجی به ورودی نزدیک‌تر باشد، عملکرد سامانه بهتر و دقت کنترل‌گر مورد استفاده، بالاتر است، بنابراین انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطا^۷ می‌تواند به عنوان معیاری برای شاخص عملکرد سامانه بیان شود.

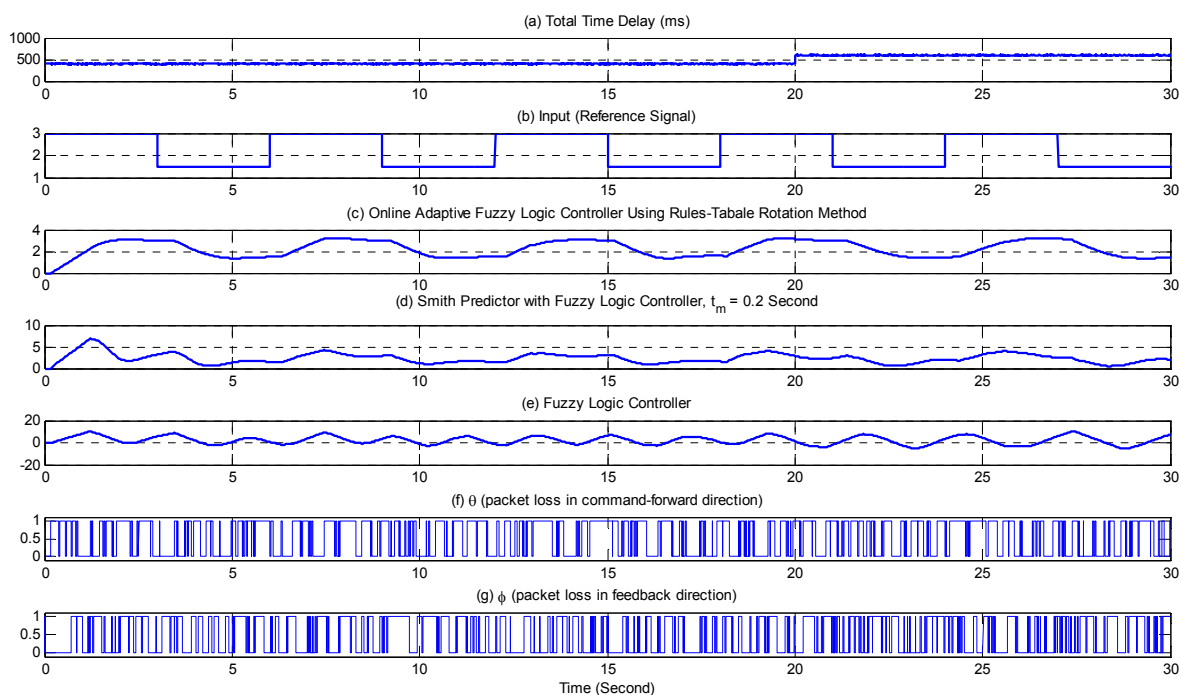
رابطه (۲۰)، شکل ریاضی انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطا را بیان می‌کند.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (20)$$

که t زمان و e خطای ناشی از تفاوت بین سیگنال مرجع و خروجی می‌باشد.



شکل ۱۵. نتایج شبیه‌سازی (ماتریس انتقال مارکف $T_{50\%Eq}$ می‌باشد): الف) تأخیر زمانی؛ ب) سیگنال مرجع؛ پ) وضعیت (چرخش شافت موتور) برای کنترل‌گر منطق فازی چرخان؛ ت) وضعیت (چرخش شافت موتور) برای پیشگوگر اسمیت؛ ث) وضعیت (چرخش شافت موتور) برای کنترل‌گر منطق فازی؛ ج) دنباله از دست رفتن بسته در مسیر مستقیم؛ چ) دنباله از دست رفتن بسته در مسیر پسخور.



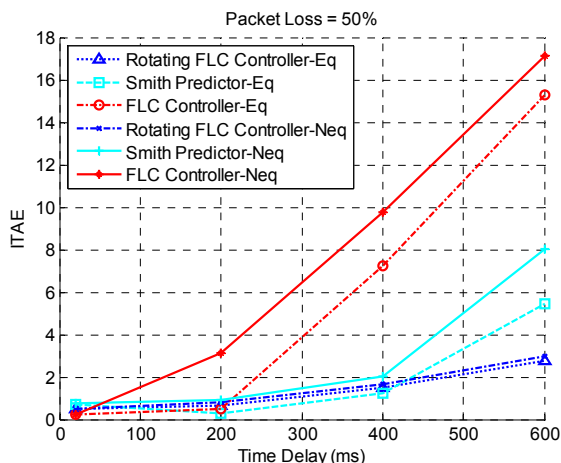
شکل ۱۶. نتایج شبیه‌سازی (ماتریس انتقال مارکف $T_{50\%Neq}$ می‌باشد): الف) تأخیر زمانی؛ ب) سیگنال مرجع؛ پ) وضعیت (چرخش شافت موتور) برای کنترل‌گر منطق فازی چرخان؛ ت) وضعیت (چرخش شافت موتور) برای پیشگوگر اسمیت؛ ث) وضعیت (چرخش شافت موتور) برای کنترل‌گر منطق فازی؛ ج) دنباله از دست رفتن بسته در مسیر مستقیم؛ چ) دنباله از دست رفتن بسته در مسیر پسخور.

پیشنهادی، نسبت به پیشگوگر اسمیت به ۰/۴۶ کاهش یافته و نسبت به کنترل‌گر منطق فازی به ۰/۱۷ کاهش یافته است. برای همین مقدار تأخیر و نرخ از دست رفتن بسته و حالتی که توزیع از دست رفتن بسته به صورت متوالی رخ داده است، انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطای کنترل‌گر پیشنهادی نسبت به پیشگوگر اسمیت به ۰/۳۵ کاهش یافته و در این حالت این مقدار نسبت به کنترل‌گر منطق فازی معمولی به ۰/۱۴ کاهش یافته است، همچنین در این شرایط برای کنترل‌گر پیشنهادی فراجش وجود ندارد.

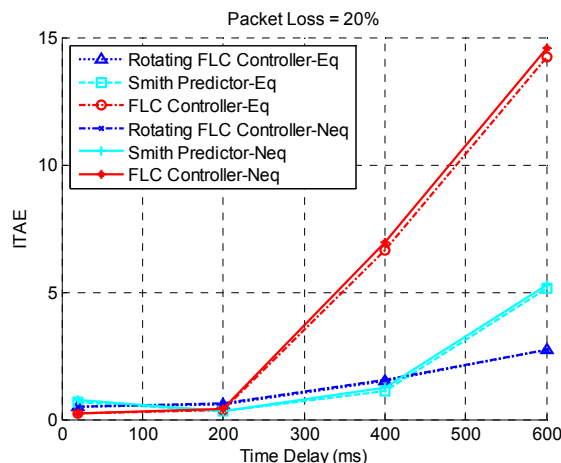
نکته مهم دیگر در هر سه شکل آن است که با افزایش تأخیر شبکه در پیشگوگر اسمیت و کنترل‌گر منطق فازی معمولی، اختلاف در حالت‌های بین توزیع یکنواخت و متوالی زیاد می‌شود، در حالی که اختلاف بین این دو مقدار در کنترل‌گر منطق فازی پیشنهادی بسیار ناچیز است که نشان می‌دهد کنترل‌گر منطق فازی پیشنهادی عملکرد بهتری در مقابله با از دست رفتن بسته‌های متوالی دارد. برای تأخیرهای زیاد حدود ۶۰۰ میلی‌ثانیه، در حالی که از دست رفتن بسته با نرخ ۷۰٪ و با توزیع یکنواخت رخ داده است، انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطای کنترل‌گر

جدول ۵. مقایسه نتایج با تأخیرهای مختلف و احتمال از دست رفتن بسته با ماتریس انتقال حالت مارکف یکنواخت.

مقدار تقریبی تأخیر	از دست رفتن بسته	روش کنترل	زمان خیز (ثانیه)	درصد فراجش	انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطا	زمان قله (ثانیه)
۲۰ میلی‌ثانیه	۲۰ درصد	کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی	۰/۸۲۷۹	۰	۰/۴۹۰۵	-
		پیشگوگر اسمیت	۱/۰۸۴۰	۰	۰/۶۹۴۴	-
		کنترل‌گر منطق فازی	۰/۵۷۷۸	۰	۰/۲۲۴۸	-
	۵۰ درصد	کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی	۰/۸۰۰۱	۰	۰/۴۹۱۷	-
		پیشگوگر اسمیت	۱/۰۶۱۴	۰	۰/۶۹۵۲	-
		کنترل‌گر منطق فازی	۰/۵۲۴۵	۰	۰/۲۱۰۸	-
	۷۰ درصد	کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی	۰/۷۷۹۵	۰	۰/۴۳۹۳	-
		پیشگوگر اسمیت	۰/۹۶۶۷	-	۰/۵۶۱۸	-
		کنترل‌گر منطق فازی	۰/۳۶۳۰	-	۰/۱۲۷۵	-
۲۰۰ میلی‌ثانیه	۲۰ درصد	کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی	۰/۸۰۱۷	۰/۷۷	۰/۶۱۳۴	۱/۵۰
		پیشگوگر اسمیت	۰/۵۷۴۵	۰	۰/۳۱۱۳	-
		کنترل‌گر منطق فازی	۰/۲۴۳۳	۲۳/۷۱	۰/۳۶۵۰	۰/۶۴
	۵۰ درصد	کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی	۰/۸۰۰۹	۱/۳۱	۰/۶۵۵۲	۱/۵۴
		پیشگوگر اسمیت	۰/۵۲۴۱	۰	۰/۳۱۳۲	-
		کنترل‌گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۳۱/۴۹	۰/۴۹۳۰	۰/۶۸
	۷۰ درصد	کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی	۰/۷۹۹۳	۲/۶۵	۰/۷۵۱۲	۱/۵۲
		پیشگوگر اسمیت	۰/۴۹۳۹	۰/۳۱	۰/۳۲۵۲	۱/۲۱
		کنترل‌گر منطق فازی	۰/۲۴۳۹	۳۸/۵۱	۰/۸۴۶۰	۰/۶۹
۴۰۰ میلی‌ثانیه	۲۰ درصد	کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی	۱/۱۴۹۲	۱/۴۰	۱/۵۲۴۶	۲/۳۴
		پیشگوگر اسمیت	۰/۳۴۷۶	۲۹/۳۲	۱/۱۱۹۸	۱/۰۰
		کنترل‌گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۸۹/۴۹	۶/۶۶۴۲	۰/۹۲
	۵۰ درصد	کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی	۱/۱۳۵۷	۱/۶۸	۱/۵۱۷۳	۲/۲۸
		پیشگوگر اسمیت	۰/۳۳۲۰	۳۳/۶۱	۱/۲۵۰۶	۱/۰۰
		کنترل‌گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۹۲/۹۵	۷/۲۴۲۳	۰/۹۰
	۷۰ درصد	کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی	۱/۱۱۸۵	۳/۷۰	۱/۶۳۹۴	۲/۲۰
		پیشگوگر اسمیت	۰/۳۲۸۲	۴۲/۸۳	۱/۸۲۰۸	۰/۹۹
		کنترل‌گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۱۰۸/۱۸	۸/۶۸۲۶	۰/۸۷
۶۰۰ میلی‌ثانیه	۲۰ درصد	کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی	۱/۴۹۰۲	۰	۲/۷۴۵۴	-
		پیشگوگر اسمیت	۰/۳۴۶۲	۷۳/۵۹	۵/۱۶۹۰	۱/۳۲
		کنترل‌گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۱۵۶/۵۰	۱۴/۲۴۶۴	۱/۲۳
	۵۰ درصد	کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی	۱/۴۸۱۷	۰	۲/۷۸۱۳	-
		پیشگوگر اسمیت	۰/۳۴۱۸	۷۳/۴۵	۵/۴۲۳۹	۱/۳۹
		کنترل‌گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۱۵۷/۳۷	۱۵/۳۰۸۲	۱/۱۹
	۷۰ درصد	کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی	۱/۴۴۸۶	۰	۲/۸۰۲۰	-
		پیشگوگر اسمیت	۰/۳۳۸۳	۷۹/۳۱	۵/۹۷۷۳	۱/۲۸
		کنترل‌گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۱۶۸/۴۱	۱۶/۰۰۸۴	۱/۲۳



شکل ۱۸. مقایسه انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطای سه کنترل گر با نرخ از دست رفتن بسته ۵۰ درصد.



شکل ۱۷. مقایسه انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطای سه کنترل گر با نرخ از دست رفتن بسته ۲۰ درصد.

جدول ۶. مقایسه نتایج با تأخیرهای مختلف و احتمال از دست رفتن بسته با ماتریس انتقال حالت مارکف غیر یکنواخت و بر اساس ماتریس‌های انتقال حالت مارکف $T_{70\%Neq}$ و $T_{50\%Neq}$

مقدار تقریبی تأخیر	از دست رفتن بسته	روش کنترل	زمان خیز (ثانیه)	درصد فراجهدش	انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطا	زمان قله (ثانیه)
۲۰ میلی ثانیه	۲۰ درصد	کنترل گر منطق فازی تطبیقی	۰/۸۲۰۰	۰	۰/۵۰۹۶	-
		پیشگوگر اسمیت	۱/۱۰۳۹	۰	۰/۷۴۶۶	-
		کنترل گر منطق فازی	۰/۵۷۵۸	۰	۰/۲۴۱۲	-
	۵۰ درصد	کنترل گر منطق فازی تطبیقی	۰/۷۲۴۱	۰	۰/۵۲۱۲	-
		پیشگوگر اسمیت	۱/۰۴۶۷	۰	۰/۷۶۷۳	-
		کنترل گر منطق فازی	۰/۵۳۳۶	۰	۰/۲۴۵۶	-
۲۰۰ میلی ثانیه	۷۰ درصد	کنترل گر منطق فازی تطبیقی	۰/۶۴۹۸	۲/۰۸	۰/۶۴۴۶	۱/۲۴
		پیشگوگر اسمیت	۱/۰۷۷۷	۰/۰۴	۰/۹۹۹۱	۲/۹۰
		کنترل گر منطق فازی	۰/۲۸۷۴	۱۲/۹۱	۰/۴۸۷۰	۰/۷۳
	۲۰ درصد	کنترل گر منطق فازی تطبیقی	۰/۸۰۸۰	۰/۶۸	۰/۶۳۴۶	۱/۵۵
		پیشگوگر اسمیت	۰/۵۷۸۹	۰	۰/۳۳۰۷	-
		کنترل گر منطق فازی	۰/۲۴۳۶	۲۵/۱۶	۰/۳۹۵۷	۰/۶۳
۴۰۰ میلی ثانیه	۵۰ درصد	کنترل گر منطق فازی تطبیقی	۰/۷۰۳۶	۱/۱۴	۰/۷۹۵۶	۱/۵۳
		پیشگوگر اسمیت	۰/۳۸۵۶	۳۰/۹۲	۰/۹۲۶۷	۰/۹۲
		کنترل گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۹۹/۵۱	۳/۱۴۶۳	۰/۹۲
	۷۰ درصد	کنترل گر منطق فازی تطبیقی	۰/۷۰۵۳	۳۱/۸۵	۲/۰۱۸۹	۱/۷۰
		پیشگوگر اسمیت	۰/۳۷۰۴	۴۳/۴۸	۲/۱۳۸۱۶	۱/۳۲
		کنترل گر منطق فازی	۰/۲۳۷۷	۹۶/۸۴	۴/۶۴۹۰	۰/۹۶
۶۰۰ میلی ثانیه	۲۰ درصد	کنترل گر منطق فازی تطبیقی	۱/۱۴۹۶	۱/۳۰	۱/۵۴۶۶	۲/۴۱
		پیشگوگر اسمیت	۰/۳۵۲۲	۳۲/۲۷	۱/۲۳۰۷	۱/۰۱
		کنترل گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۹۳/۹۷	۶/۹۳۱۸	۰/۹۱
	۵۰ درصد	کنترل گر منطق فازی تطبیقی	۱/۱۷۸۶	۲/۱۲	۱/۶۶۸۵	۲/۲۳
		پیشگوگر اسمیت	۰/۳۵۰۷	۵۴/۶۱	۲/۰۱۶۳	۰/۹۶
		کنترل گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۱۶۳/۱۳	۹/۷۸۵۳	۲/۹۰
۷۰ درصد	کنترل گر منطق فازی تطبیقی	۱/۰۳۶۸	۸/۶۷	۱/۸۰۹۹	۱/۸۸	
	پیشگوگر اسمیت	۰/۳۰۷۸	۱۰۸/۴۷	۵/۵۶۱۲	۱/۱۰	
	کنترل گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۱۹۵/۶۸	۱۲/۰۲۵۵	۱/۱۰	
۲۰ درصد	۲۰ درصد	کنترل گر منطق فازی تطبیقی	۱/۴۹۴۶	۰	۲/۷۵۶۱	-
		پیشگوگر اسمیت	۰/۳۴۵۲	۷۴/۳۴	۵/۲۷۸۵	۱/۳۲
		کنترل گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۱۵۸/۲۴	۱۴/۵۸۱۲	۱/۲۲
	۵۰ درصد	کنترل گر منطق فازی تطبیقی	۱/۴۹۷۴	۰	۲/۹۸۹۵	-
		پیشگوگر اسمیت	۰/۳۰۳۱	۱۰۱/۲۱	۸/۰۰۰۹	۱/۴۰
		کنترل گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۱۸۳/۱۷	۱۷/۱۵۵۸	۱/۴۰
۷۰ درصد	کنترل گر منطق فازی تطبیقی	۱/۴۷۶۶	۰	۳/۰۴۱۹	-	
	پیشگوگر اسمیت	۰/۳۳۷۴	۹۷/۶۵	۸/۵۴۵۲	۱/۲۹	
	کنترل گر منطق فازی	۰/۲۳۷۲	۲۰۲/۷۴	۲۰/۷۹۱۲	۱/۲۹	

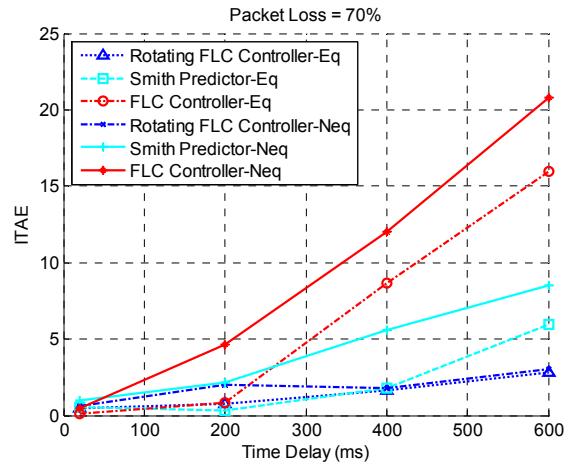
بسته‌ها با نرخ ۷۰٪ و به طور متوالی رخ می‌دهد و تأخیر زمانی شبکه حدود ۶۰۰ میلی ثانیه است، انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطای کنترل گر پیشنهادی، نسبت به پیشگوگر اسمیت به ۰/۳۵ کاهش یافته و نسبت به کنترل گر منطق فازی به ۰/۱۴ کاهش یافته است.

سپاسگزاری

از پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات به خاطر حمایت تشویقی مالی از این پروژه تحقیقاتی، قدردانی می‌شود.

مرجع‌ها

- [1] J. P. Hespanha, P. Naghshtabrizi, and Y. Xu, "A survey of recent results in networked control systems," Proc. IEEE, vol. 95, no. 1, pp. 138-162, January 2007.
- [2] F. L. Lian, J. R. Moyne, and D. M. Tilbury, "Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet and DeviceNet," IEEE Control Syst. Mag., vol. 21, no. 1, pp. 66-83, February 2001.
- [3] P. Ogren, E. Fiorelli, and N. E. Leonard, "Cooperative control of mobile sensor networks: Adaptive gradient climbing in a distributed environment," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 49, no. 8, pp. 1292-1302, August 2004.
- [4] C. Meng, T. Wang, W. Chou, and S. Luan, Y. Zhang, and Z. Tian, "Remote surgery case: Robot-assisted teleneurosurgery," In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'04), April 2004, pp. 819-823.
- [5] J. P. Hespanha, M. L. McLaughlin, G. S. Sukhatme, M. Akbarian, R. Garg, and W. Zhu, "Haptic collaboration over the Internet," In Proc. of the 5th Phantom Users Group Workshop, October 2000, pp. 9-13.
- [6] K. Hikichi, H. Morino, I. Arimoto, K. Sezaki, and Y. Yasuda, "The evaluation of delay jitter for haptics collaboration over the Internet," In Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'02), November 2002, pp. 1492-1496.
- [7] S. Shirmohammadi and N. H. Woo, "Evaluating decorators for haptic collaboration over the Internet," In Proc. of the 3rd IEEE International Workshop Haptic, Audio and Visual Environments and Their Applications, October 2004, pp. 105-109.
- [8] P. Seiler and R. Sengupta, "Analysis of communication losses in vehicle control problems," In Proc. of the American Control Conference, June 2001, vol. 2, pp. 1491-1496.
- [9] P. Seiler and R. Sengupta, "An H_∞ approach to networked control," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 50, no. 3, pp. 356-364, March 2005.
- [10] R. M. Murray, K. J. Astrom, S. P. Boyd, R. W. Brockett, and G. Stein, "Future directions in control in an information-rich world," IEEE Contr. Syst. Mag., vol. 23, no. 2, pp. 20-33, April 2003.



شکل ۱۹. مقایسه انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطای سه کنترل گر با نرخ از دست رفتن بسته ۷۰ درصد.

نتیجه‌گیری

سامانه‌های کنترل از طریق شبکه، کاربردهای فراوانی در بسیاری از زمینه‌ها پیدا کرده‌اند، با این حال مشکلاتی در ساختارشان نظیر تأخیر زمانی متغیر و از دست رفتن بسته وجود دارد که طراحی کنترل گر برای آن‌ها را چالش برانگیز می‌نماید. سعی بر آن است تا کنترل گرهای تناسبی - انتگرالی - مشتق‌گیر و کنترل گرهای منطق فازی، به گونه‌ای طراحی شوند تا مسائل ناپایداری در این سامانه‌ها رفع گردند. کنترل گرهای منطق فازی با توانایی بالای آن‌ها برای مقاومت در برابر تغییرات پویای سامانه، می‌تواند گزینه مناسبی در این سامانه‌ها باشد. کنترل گر منطق فازی با جدول قوانین فازی چرخان راه‌حل مناسبی برای تأخیرهای زمانی متغیر است. بنابراین با توجه به این دو ویژگی که کنترل منطق فازی و همچنین چرخش قوانین به همراه دارد، این مقاله، یک روش جدید برای سامانه‌های کنترل از طریق شبکه ارائه کرده است. این روش پیشنهادی که با چرخش قوانین با کمک یک شبکه عصبی صورت می‌پذیرد، برای کنترل وضعیت یک سروموتور جریان متناوب با توان ۴۰۰ وات که به عنوان دستگاره راه دور در نظر گرفته شده است، به کار می‌رود. نتایج شبیه‌سازی‌ها و مقایسه سه نوع کنترل گر از کنترل این دستگاره تأیید می‌کند که کنترل گر طراحی شده پیشنهادی، مخصوصاً در تأخیرهایی با حدود ۶۰۰ میلی ثانیه و زمانی که از دست رفتن بسته به طور متوالی رخ می‌دهد، عملکرد بهتری دارد. در حالتی که از دست رفتن بسته‌ها با نرخ ۷۰٪ و به طور یکنواخت رخ می‌دهد و تأخیر زمانی شبکه حدود ۶۰۰ میلی ثانیه است، انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطای کنترل گر پیشنهادی نسبت به پیشگوگر اسمیت به ۰/۴۶ کاهش یافته و این مقدار نسبت به کنترل گر منطق فازی به ۰/۱۷ کاهش یافته است. عملکرد کنترل گر پیشنهادی در مقابله با تأخیر و از دست رفتن بسته‌ها زمانی که از دست رفتن بسته‌ها به طور متوالی رخ می‌دهد، بهتر نمایان می‌شود. در حالتی که از دست رفتن

- with embedded Markov chain,” *Simulation Modelling Practice Theory*, vol. 17, no. 10, pp. 1635–1641, November 2009.
- [19] F. Du and W. Du, “RBF neural network control and novel Smith predictor for networked control systems,” In *Proc. of the Asia-Pacific Conference on Information Processing (APCIP)*, July 2009, pp. 67-70.
- [20] C. L. Lai, P. L. Hsu, and B. C. Wang, “Design of the adaptive Smith predictor for time-varying network control system,” In *Proc. of the International Conference on Instrumentation, Control, Information Technology and System Integration (SICE’08)*, August 2008, pp. 2933-2938.
- [21] C. L. Lai and P. L. Hsu, “Realization of networked control systems on Ethernet with varied time delay,” In *Proc. of the IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC)*, October 2010, pp. 66-73.
- [22] N. Vatanski, J. P. Georges, C. Aubrun, E. Rondeau, and S. L. J. Jounela, “Networked control with delay measurement and estimation,” *Control Eng. Practice*, vol. 17, no. 2, pp. 231-244, February 2009.
- [23] S. Yuksel and T. Basar, “State estimation and control for linear system over communication networks,” in *Proc. IEEE Conf. Control Applicat.*, vol. 1, June 2003, pp. 409–414.
- [24] T. J. Ross, “Fuzzy logic with engineering applications,” 3rd ed. John Wiley & Sons, Ltd., 2010.
- [25] M. Y. Chow and Y. Tipsuwan, “Network-based control systems: A tutorial,” In *Proc. of the 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2001, 1593-1602.
- [11] M. G. Rivera and A. Barreiro, “Analysis of networked control systems with drops and variable delays,” *Automatica*, vol. 43, no. 12, pp. 2054-2059, December 2007.
- [12] Y. Ishido, K. Takaba, and D. E. Quevedo, “Stability analysis of networked control systems subject to packet-dropouts and finite-level quantization,” *Syst. Control Lett.*, vol. 60, no. 5, pp. 325-332, May 2011.
- [13] C. W. Cheng, C. L. Lai, B. C. Wang, and P. L. Hsu, “The time-delay effect of multiple-networks systems in NCS,” In *Proc. of the International Conference on Instrumentation, Control, Information Technology and System Integration (SICE’07)*, September 2007, pp. 929-934.
- [14] C. L. Lai and P. L. Hsu, “Design the remote control system with the time-delay estimator and the adaptive Smith predictor,” *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 6, no. 1, pp. 73-80, February 2010.
- [15] I. Pan, S. Das, and A. Gupta, “Tuning of an optimal fuzzy PID controller with stochastic algorithms for networked control systems with random time delay,” *ISA Trans.*, vol. 50, no. 1, pp. 28-36, January 2011.
- [16] D. Zhao, C. Li, and J. Ren, “Fuzzy speed control and stability analysis of a networked induction motor system with time delays and packet dropouts,” *Nonlinear Anal.: Real World Appl.*, vol. 12, no. 1, pp. 273-287, February 2011.
- [17] W. Du, F. Du, C. Shen, Y. Zhou, Y. Du, S. Feng, and B. Chen, “New Smith Predictor and Fuzzy Adaptive Controller for Wireless Networked Control Systems,” *Software Eng. Research, Manage & Appl.*, vol. 253, pp. 239–249, 2009.
- [18] P. Wen and Y. Li, “Minimum packet drop sequences based networked control system model

