

بهبود عملکرد سامانه‌های کنترل از طریق شبکه با استفاده از چرخش در قوانین کنترل گر منطق فازی

پویا حاجبی و سید محمدتقی المدرسی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

در این مقاله یک کنترل گر منطق فازی، که با تأخیرهای زمانی تطبیق می‌یابد، ارائه شده است تا عملکرد سامانه‌های کنترل از طریق شبکه را بهبود دهد. مهم‌ترین چالش در این سامانه‌ها، تأخیر زمانی تصادفی متغیر در شبکه‌های مخابرات داده است. کنترل گرهای سنتی مانند تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر که به‌طور معمول با یک تأخیر ثابت تنظیم می‌شود، باعث ناپایداری این سامانه‌ها می‌شود. از طرف دیگر کنترل گرهای منطق فازی به خاطر ماهیت غیرخطی‌شان می‌تواند گزینه خوبی برای کنترل فرآیندهای غیرخطی باشد. در روش پیشنهادی، محورهای مختصات جدول قوانین کنترل گر فازی براساس یک رابطه غیرخطی از تأخیر تخمینی شبکه می‌چرخد. مقدار این چرخش توسط یک سامانه غیرخطی دیگر یعنی شبکه عصبی محاسبه می‌گردد. در این پژوهش با اعمال تأخیرهای متغیر ناشی از شبکه، شبیه‌سازی‌های مختلف انجام و روش پیشنهادی با پیشگوگر اسمیت و کنترل گر منطق فازی مقایسه می‌شود. با وجود ناپایداری این دو کنترل گر در تأخیرهای بیش از ششصد میلی‌ثانیه، کنترل گر پیشنهادی می‌تواند پایداری سامانه را حفظ کند.

واژگان کلیدی: چرخش جدول قوانین فازی، سامانه کنترل از طریق شبکه، شبکه عصبی، شبکه‌های مخابرات داده، کنترل گر تطبیقی منطق فازی.

۱- مقدمه

سامانه‌های کنترل از طریق شبکه، سامانه‌های توزیع‌شده در مکان هستند که در آنها ارتباط میان حس گرها، فعال گرها و کنترل گرها از طریق شبکه مخابراتی دیجیتال انجام می‌شود (Gupta Cho, 2010; Hespanha et al., 2007). این شبکه تسهیم‌شده که اجزای 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 حس گر متحرک، جراحی از راه دور، ارتباط لامسه‌ای از طریق اینترنت، سامانه‌های خودکار بزرگراه‌ها، پرنده هدایت‌پذیر از دور (پهپاد) و خودروهای بدون سرنشین کاربردهای فراوانی پیدا کرده‌اند. Murray و همکارانش در (Murray et al., 2003) کنترل از طریق شبکه را به‌عنوان

یکی از جهت‌های کلیدی در آینده مشخص کرده‌اند. با این حال استفاده از شبکه در مقایسه با استفاده از چندین ارتباط اختصاص یافته مستقل، چالش‌های جدیدی را به‌وجود می‌آورد. تأخیرهای تصادفی و ازدست‌رفتن بسته در شبکه، دو مشکل بزرگ در سامانه‌های کنترل از طریق شبکه است (Zhang et al., 2013). ازدست‌رفتن بسته، تأخیر تصادفی و چندی‌سازی با تعداد سطوح کم می‌تواند سامانه کنترل از طریق شبکه را ناپایدار کند (Ishido et al., 2011). Cheng و همکارانش نشان دادند هنگامی که تأخیر زمانی از زمان نمونه‌برداری کوچک‌تر باشد، این تأخیر اثر محسوسی بر روی سامانه کنترل نمی‌گذارد؛ با این وجود تأخیرهای بیش از زمان نمونه‌برداری می‌تواند عملکرد سامانه را دچار اختلال نماید (Cheng et al., 2007). بسیاری از کنترل گرهای منطق فازی برای پایداری و کاهش خطا در سامانه کنترل از طریق شبکه

میلی ثانیه خراب می‌شود؛ اما در روش پیشنهادی این پژوهش، یک بهبود قابل ملاحظه در زمانی که تأخیر زمانی بیش از دویست میلی ثانیه است مشاهده می‌شود. حتی در تأخیر زمانی ششصد میلی ثانیه، اختلالی در پاسخ پله سامانه دیده نمی‌شود.

این مقاله علاوه بر این بخش، شامل چهار بخش دیگر به شرح ذیل است: بخش دوم به معرفی دقیق سامانه کنترل از طریق شبکه و تأخیر زمانی اختصاص داده شده است. در بخش سوم، ابتدا طراحی کنترل گر منطق فازی برای کنترل وضعیت یک سروموتور جریان متناوب چهارصد وات ارائه 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 و در پایان نتیجه‌گیری آورده شده است.

۲- سامانه کنترل از طریق شبکه

با توجه به گسترش سامانه‌های مخابراتی دیجیتال مبتنی بر قرارداد اترنت و افزایش قابلیت اعتماد به این شبکه‌ها در سال‌های اخیر، معمول شده است که از این نوع کانال‌های مخابراتی برای انتقال سیگنال‌های حس‌گر و کنترل‌گر استفاده شود. این روش کاهش چشم‌گیری در هزینه سیم‌کشی و نگهداری از سیم‌های اختصاص یافته دارد (Pan et al., 2011). علاوه بر این امکان اجرای سامانه‌های کنترلی گسترده در مکان، انعطاف‌پذیر و با اجزای متحرک را به وجود آورده است. با این حال، سامانه‌های کنترل از طریق شبکه، مشکلات خاص خود نظیر تأخیر زمانی متغیر و ازدست‌رفتن بسته را دارد (Ishido et al., 2011; Pan et al., 2011) که موجب تضعیف عملکرد آنها می‌شود. در شکل (۲-۱) ساختار یک سامانه کنترل از طریق شبکه تک‌ورودی-تک‌خروجی 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 می‌باشند. به‌طور کلی تأخیر ایجادشده در شبکه، براساس 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 براساس این که در کجا ایجاد شود، به سه دسته تقسیم می‌شود: گره سرور، کانال شبکه و گره کاربر (Lai et al., 2008). به‌علاوه

به کار گرفته شده‌اند. پیشگوگر اسمیت^۱، یکی از کنترل‌گرهایی است که برای فرآیندهایی با تأخیر زمانی ثابت، مناسب است (Cheng et al., 2007; Lai Hsu, 2010). *Hsu* و *Lai* پیشگوگر اسمیت تطبیقی را به‌عنوان کنترل‌گری برای سامانه‌های کنترل از طریق شبکه به کار برده‌اند (Lai Hsu, 2010 a)، در روش آنها مشکلاتی نظیر وابستگی دقت مدل به دقت تخمین تابع انتقال دستگاه^۲، وجود دارد و همچنین تغییرات کوچکی در تابع انتقال دستگاه باعث ایجاد تغییر در سامانه کنترلی می‌شود. در همین اواخر *Pan* و همکارانش در (Pan et al., 2011) و *Zhao* و همکارانش در (Zhao et al., 2011)، نشان داده‌اند که کنترل‌گرهای منطق فازی، عملکرد بهتری در مقابله با ازدست‌رفتن بسته و تأخیر زمانی متغیر دارند و همین‌طور با فرآیندهای غیرخطی سازگارترند. *Du* و همکارش، پیشگوگر اسمیتی را که با کنترل‌گر انتگرالی-تناسبی تطبیقی فازی آمیخته شده را برای سامانه کنترل از طریق شبکه، معرفی کردند (Du Du, 2009 a). با این حال آنها تأخیر برخط شبکه را اندازه‌گیری نکردند. آنها سامانه منطق فازی را برای تنظیم ضرایب کنترل‌گر انتگرالی-تناسبی-مشتق‌گیر به کار بردند. این پژوهش ابتدا یک کنترل‌گر منطق فازی برای کنترل وضعیت یک سروموتور جریان متناوب چهارصدوات از طریق اترنت ارائه می‌دهد، در قدم بعدی یک کنترل‌گر برخط تطبیقی فازی برای مقابله با اثرات ناشی از تأخیر شبکه ارائه می‌شود. در این پژوهش یک راهکار برای مقابله با تأخیر با استفاده از چرخش جدول قوانین فازی در طول فرآیند کنترل، ارائه می‌شود. ابتدا تأخیر زمانی رفت و برگشت شبکه (RTT^3) به‌طور برخط اندازه‌گیری، 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، آموزش دیده است. نتایج نشان می‌دهد کنترل‌گری که جدول قوانین آن توسط یک شبکه عصبی می‌چرخد، در مقایسه با سایر روش‌ها عملکرد مناسب‌تری دارد. در واقع در یک شبکه مخابراتی تأخیرهای ناشی از شبکه می‌تواند از دویست میلی ثانیه فراتر رود؛ درحالی‌که نتایج در (Du Du, 2009 a, Du Du, 2009 b) نشان می‌دهد عملکرد سامانه کنترلی برای تأخیرهای بیش از دویست

¹ Smith Predictor

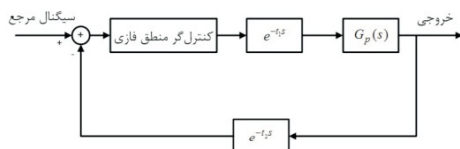
² Plant

³ Round Trip Time

فرآیندهای غیرخطی است و همچنین عملکرد بهتری در مقابل تأخیر زمانی دارد (Pan et al., 2011; Zhao et al., 2011). در این بخش ابتدا، کنترل گر منطق فازی طراحی، سپس این کنترل گر طراحی شده در پیشگوگر اسمیت استفاده می‌شود. در پایان کنترل گر تطبیقی فازی پیشنهادی با جدول قوانین فازی چرخان ارائه می‌شود.

۳-۱- طراحی کنترل گر منطق فازی

شکل (۳-۱) بلوک دیاگرام یک کنترل گر منطق فازی را نشان می‌دهد. در این سامانه، ابتدا خروجی دستگاه اندازه‌گیری و سپس برای به دست آوردن سیگنال خطا با سیگنال مرجع مقایسه می‌شود. سیگنال خطا و مشتق آن، دو ورودی برای کنترل گر منطق فازی هستند. در این پژوهش دستگاه تحت کنترل یک سروموتور جریان متناوب چهارصدوات است که وضعیت آن توسط یک رمزگذار با بهره 10^4 اندازه‌گیری می‌شود. تابع انتقال دستگاه (حالت حلقه باز سامانه) از رابطه (۱) به دست می‌آید. روابط (۲) و (۳) فرم فضای حالت پیوسته تابع انتقال تعریف شده در (۱) است. در این روابط $Gp(s)$ تابع انتقال دستگاه، \dot{x} مشتق بردار حالت و y خروجی می‌باشد. در شکل (۳-۲) هفت تابع عضویت مثلثی برای ورودی (خطا و مشتق خطا) و خروجی معرفی شده است. در شکل (۳-۲) متغیرهای زبانی فازی ("NM"، "NB"، "NS"، "ZE"، "PS"، "PM"، "PB") به ترتیب منفی بزرگ، منفی متوسط، منفی کوچک، صفر، مثبت کوچک، مثبت متوسط، مثبت بزرگ هستند. در کنترل وضعیت، خروجی ورودی را تعقیب می‌کند، بنابراین فرض بر این است که توابع عضویت ورودی و خروجی یکسان باشند.



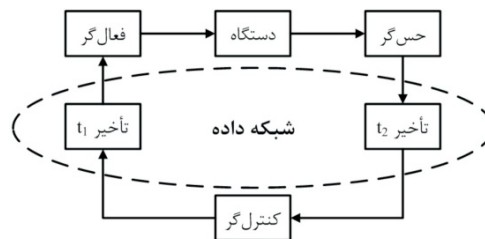
شکل (۳-۱): کنترل گر منطق فازی.

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

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -190 & -78.125 & 0 \\ 128 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 2048 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2)$$

$$y = [0 \quad 22.13 \quad 1228.7]x \quad (3)$$

اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت برای به دست آوردن تخمین دقیق تأخیر به طور متناوب مورد نیاز است (Lai et al., 2008; Lai Hsu, 2010 b; Vatanski et al., 2009). به عنوان مجموع تأخیر مسیر رفت و برگشت شبکه در یک سامانه کنترل از طریق شبکه تک ورودی-تک خروجی تعریف می‌شود. به طور کلی هرچه مسیر طولانی‌تر شود، تأخیر زمانی ناشی از شبکه به علت افزایش تعداد گره‌ها، افزایش می‌یابد و در نهایت منجر به افزایش RTT می‌شود. t_m مشخصه‌ای کلیدی در پیشگوگر اسمیت است که برای جبران تأخیر ثابت مسیر در نظر گرفته می‌شود. در طراحی ساختار پیشگوگر اسمیت کلاسیک مقدار t_m به طور معمول ثابت در نظر گرفته می‌شود و این مقدار برابر متوسط تقریبی تأخیر زمانی بین آن دو گره شبکه است. مقدار RTT می‌تواند به کنترل گر منطق فازی برای جبران تأخیر متغیر اعمال شود. به طور معمول و مرسوم جدول قوانین فازی در کنترل گر منطق فازی در حین فرآیند کنترل ثابت است که در این پژوهش با استفاده از مقدار RTT زاویه‌ای برای چرخش قوانین فازی به دست می‌آید که با اعمال آن بر کنترل گر منطق فازی و چرخش محورهای مختصات جدول قوانین فازی می‌توان با اثر تأخیر مقابله کرد.



شکل (۳-۲): سامانه تک‌ورودی-تک‌خروجی کنترل از طریق شبکه.

۳- کنترل گر منطق فازی با استفاده از جدول قوانین چرخان

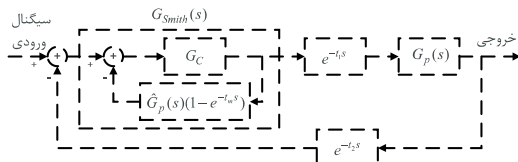
همان‌گونه که در بخش دو اشاره شد، کنترل گر منطق فازی می‌تواند راه حلی برای مقابله با مسأله تأخیر زمانی در سامانه‌های کنترل از طریق شبکه باشد؛ با این حال تاکنون بیشتر از کنترل گرهای تناسبی-انتگرالی و یا تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر برای کنترل این سامانه‌ها استفاده می‌شود که عملکرد محدودتری به خصوص در فرآیندهای غیرخطی دارند. کنترل گر منطق فازی گزینه بهتری در



خطای پاسخ خروجی افزایش می‌یابد. خطای تخمین یکی از مشکلات مهم در ساختار پیشگوگر اسمیت است. در این پژوهش فرض شده است، تابع انتقال دستگاه و تخمین تابع انتقال دستگاه یکسان باشد. همچنین قوانین کنترل‌گر منطق فازی بر طبق قوانین جدول (۱-۳) انتخاب می‌شود.

(جدول ۳-۱): جدول قوانین فازی برای خطا، مشتق خطا و خروجی (بدون استفاده از روش چرخش).

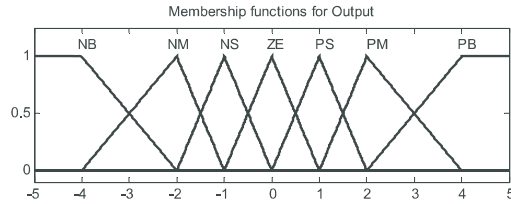
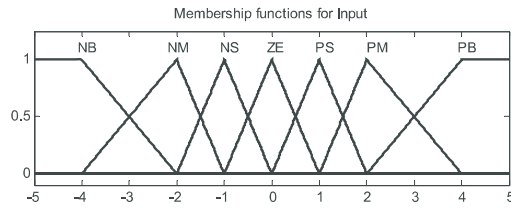
dc \ e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB



(شکل ۳-۳): ساختار پیشگوگر اسمیت (Lai Hsu, 2010 a).

۳-۳- طراحی کنترل‌گر فازی برخط تطبیقی با جدول قوانین چرخان

برای پیاده‌سازی این روش، ابتدا RTT تخمین زده می‌شود (Lai et al., 2008). این کار با استفاده از برجسب‌گذاری زمانی با کنترل‌گر در زمان ارسال هر بسته (به‌عنوان سیگنال کنترلی) و مقایسه آن با زمان دریافت بسته (به‌عنوان سیگنال پس‌خور دریافتی) انجام می‌شود. سپس از این مقدار جبران اثر تأخیر در کنترل‌گر منطق فازی استفاده می‌شود. کنترل‌گر منطق فازی طراحی شده در این بخش با یک ساختار شبکه عصبی ترکیب شده است. مقدار زمان رفت و برگشت اندازه‌گیری شده بسته (RTT)، به‌عنوان تخمینی از تأخیر، در کنترل‌گر منطق فازی پیشنهادی اعمال می‌شود و میزان زاویه چرخش از طریق همین مقدار RTT و به کمک شبکه عصبی استخراج می‌شود. همان‌گونه که در قبیل اشاره شد در این پژوهش از کنترل‌گر منطق فازی برای تنظیم ضرایب کنترل‌گر تناسبی-انترگالی یا تناسبی-انترگالی-مشتق‌گیر استفاده نشده، بلکه به‌طور مستقیم از خود کنترل‌گر منطق فازی جهت کنترل فرآیند استفاده شده

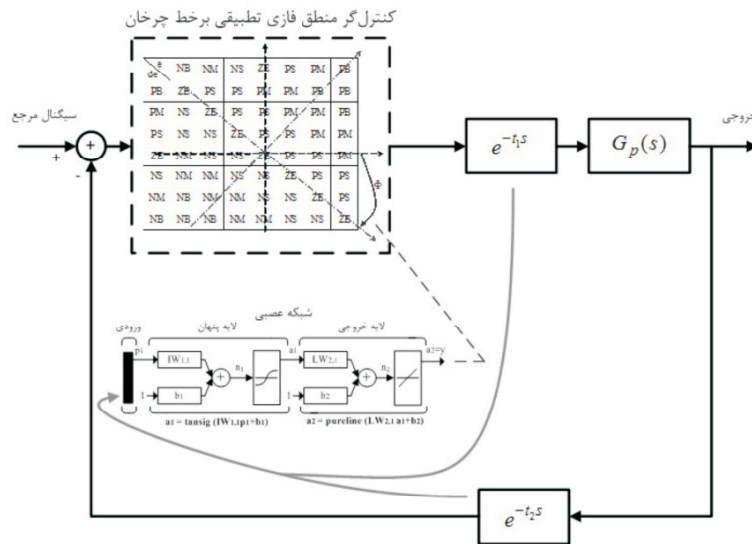


(شکل ۳-۲): توابع عضویت ورودی و خروجی.

در اینجا برخی از پارامترهای سامانه فازی که در این پژوهش به کار رفته معرفی می‌شود: (۱) استنتاج فازی به‌کار رفته در طراحی از نوع ممدانی است (Ross, 2010) (۲) عمل‌گر "و" منطقی براساس کمینه است و روش استدلال منطقی بر اساس کمینه و جمع‌آوری براساس بیشینه است. (۳) خروجی سامانه فازی توسط روش مرکز ثقل به‌دست می‌آید. (۴) قوانین فازی توسط جدول (۱-۳) به‌دست می‌آید که شامل ۴۹ قانون است. (۵) به علت بهره‌ی بالای رمزگذار در دستگاه، ضریب مقیاس خروجی فازی 10^{-4} است.

۳-۲- پیشگوگر اسمیت با کنترل‌گر منطق فازی

پیشگوگر اسمیت یکی از کنترل‌گرهایی است که برای فرآیندهایی با تأخیر زمانی مناسب است (Cheng et al., 2007; Lai Hsu, 2010 a). در اینجا یک پیشگوگر اسمیت طراحی می‌شود تا نتایج آن با نتایج کنترل‌گر منطق فازی مقایسه شود. در این پیشگوگر اسمیت که در شکل (۳-۳) ترسیم شده است، بلوک G_C کنترل‌گر منطق فازی را که در بخش ۳-۱ طراحی آن توضیح داده شده نشان می‌دهد. G_P تابع انتقال دستگاه است. \hat{G}_P تخمین تابع انتقال دستگاه است. t_m تخمین مجموع کل تأخیر زمانی کنترل‌گر به دستگاه و دستگاه به کنترل‌گر می‌باشد. اگر t_m تخمین مناسبی از تأخیر کلی شبکه باشد، عملکرد سامانه بهبود می‌یابد. در این پژوهش، مقدار t_m برابر دویست میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. در عمل \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، ناپایداری سامانه و میزان



(شکل ۳-۴): ساختار کنترل گر منطق فازی تطبیقی برخط با استفاده از شبکه عصبی.

$$A = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

در طول فرآیند کنترلی (بدون وجود تأخیر)، با گذشت زمان خطا و مشتق آن یک مسیر دایره‌ای شکل به دور محورهای مختصات صفحه فاز را طی می‌کند. از طرفی برای نوشتن جدول قوانین فازی از صفحه فاز کنترل گر استفاده می‌شود و با توجه به نقاط تنظیمی (مانند نقطه شروع پاسخ سامانه، رسیدن به مقدار مطلوب برای اولین بار، رسیدن به اولین فراجهش) قوانین جدول کنترل گر منطق فازی تکمیل می‌شود. به عنوان مثال در ۴۹ قانون جدول (۳-۲)، قانونی وجود دارد که اگر خطا "NB" و مشتق آن "ZE" باشد، خروجی کنترل گر منطق فازی باید "NM" باشد. این قانون مربوط به اولین فراجهش و براساس این نقطه تنظیم شده است.

(جدول ۳-۲): 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

است. کنترل گر غیرخطی منطق فازی این توانایی را دارد که فرآیندهای غیرخطی و پیچیده را کنترل کند و در برابر تغییرات جزئی دستگه در حین فرآیند کنترل، عملکرد بهتری نسبت به سایر کنترل گرها داشته باشد. در حین فرآیند کنترلی که در آن تأخیر وجود ندارد، سیگنال خطا و مشتق خطا به طور متناوب و به صورت غیرخطی تغییر می‌کند. در این پژوهش یک روش کنترلی ارائه می‌شود که یک کنترل گر منطق فازی را با یک شبکه عصبی ترکیب می‌کند. شکل (۳-۴)، ساختار کنترل گر پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این شکل مقدار RTT با شبکه عصبی به یک زاویه نگاشت می‌شود. میزان زاویه چرخش جدول قوانین فازی در کنترل گر منطق فازی به نوبت براساس مقدار RTT تغییر می‌کند.

قوانین فازی استفاده شده در این قسمت براساس جدول (۳-۲) است، ولی سایر پارامترها (توابع عضویت، عملگرهای منطق فازی و روش منطق فازی) با پارامترهای قسمت ۳-۱ یکسان است. رابطه (۴) رابطه نگاشت بین خطا و مشتق خطا را در مختصات جدید نشان می‌دهد. رابطه (۵) ماتریس دوران چرخش محورهای مختصات به اندازه ϕ رادیان را، نشان می‌دهد. ساختار جدول قوانین در حال چرخش در شکل (۳-۵) نشان داده شده است.

$$\begin{bmatrix} e_{new} \\ \dot{e}_{new} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ساختار شبکه عصبی به کاررفته در این پژوهش، به صورت یک شبکه عصبی feedforward تک ورودی-تک خروجی است که دو لایه دارد. خروجی شبکه عصبی، مقدار چرخش لازم برای محورهای مختصات جدول قوانین کنترل گر منطق فازی است تا کنترل گر اثر تأخیر شبکه را جبران نماید. به جای چرخاندن محورهای مختصات روی قوانین، خطا و مشتق خطا توسط رابطه (۴) و (۵) به مقادیر جدیدش در محور مختصات قدیمی نگاشت می شود. این مقادیر جدید به عنوان خطا و مشتق خطا به ورودی سامانه منطق فازی اعمال می شود.

قبل از راه اندازی سامانه، شبکه عصبی با مجموعه ای از داده ها (براساس تأخیرهای مختلف) آموزش می بیند؛ به این صورت که میزان چرخش برای چندین تأخیر مختلف به دست می آید؛ سپس این مقادیر به یک شبکه عصبی داده می شود تا آموزش ببیند. به عنوان مثال تأخیرهای ۲۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ میلی ثانیه در نظر گرفته و هر کدام از این تأخیرها به طور مجزا به سامانه اعمال می شود. برای یافتن داده های آموزشی با آزمایش چند زاویه مختلف، مقدار مطلوب چرخش برای آن تأخیر با توجه به شاخص عملکرد انتگرال خطای وزن-بر- زمان مطلق (ITAE¹) به دست می آید. با داشتن این داده ها، شبکه عصبی آموزش داده می شود. پس از آموزش، میزان چرخش مطلوب متناسب با سایر تأخیرهای داخل این محدوده، با شبکه عصبی محاسبه می شود. شکل (۳-۶)، رابطه خروجی (زاویه چرخش محورهای مختصات جدول قوانین کنترل گر منطق فازی) بر حسب ورودی (تأخیر کلی شبکه) شبکه عصبی را نشان می دهد.

به لحاظ پیچیدگی محاسباتی، در مرحله آموزش شبکه عصبی، مدتی زمان نیاز است تا داده ها استخراج و شبکه آموزش ببیند؛ ولی این مرحله قبل از راه اندازی و به کارگیری کنترل گر است و زمان بر بودن آن تأثیری بر عملکرد سامانه در هنگام اجرا ندارد. هنگامی که شبکه عصبی آموزش دید، با توجه به آن که شبکه عصبی تنها یک ورودی و یک خروجی دارد و شامل دو لایه است، زاویه با اعمال دو مرحله ضرب ماتریسی و دو جمع ساده به دست می آید که حاصل یک عدد تک بعدی است. با استفاده از

در این نقطه خطا منفی و مقدارش بزرگ و مشتق آن نیز صفر است و سیگنال کنترل متناظر با این نقطه باید به گونه ای باشد که پاسخ خروجی سامانه کاهش یابد تا به مقدار مطلوب (سیگنال مرجع) برسد. حال فرض شود در سامانه تأخیر در مسیر رفت (کنترل گر به فعال گر) و برگشت (حس گر به کنترل گر) وجود داشته باشد. زمانی که پاسخ سامانه به اولین فراجش می رسد، با تأخیری به اندازه تأخیر مسیر برگشت، کنترل گر توسط سیگنال پسخور متوجه اولین فراجش می شود، در حالی که این واقعه مربوط به گذشته است. حتی با فرستادن سیگنال کنترل مرتبط با اولین فراجش به دستگاه در آن لحظه، سیگنال مربوطه همراه با تأخیری به اندازه تأخیر مسیر رفت به فعال گر می رسد. بنابراین اگر قانون مربوط به فراجش اول در آن لحظه اعمال شود، سامانه ناپایدار می شود. از آن جا که براساس دیاگرام فاز کنترل گر، خطا و مشتق خطا در طول فرآیند، نسبت به هم دارای روند چرخشی است و با توجه به همین چرخش آن روی صفحه فاز، قوانین جدول کنترل گر منطق فازی نوشته می شود. می توان با چرخش صحیح محورهای مختصات، جای درستی که باید اعمال شوند تصحیح شود و در عمل با این چرخش محور مختصات صفحه فاز، قانونی دیگر در مورد آنها اعمال می شود. در این پژوهش به جای آن که محورها بچرخند، مختصات جدید خطا و مشتق آن در محور مختصات قدیم به دست می آید. با این کار چون خطا و مشتق خطا مقادیر دیگری دارند، به طور طبیعی قانونی دیگر برای خروجی کنترل گر متناسب با مقادیر جدید آنها اعمال می شود. با اعمال این قانون به جای قانون قبلی، اثر تأخیر زمانی جبران می شود.

(شکل ۳-۵): چرخش محورهای مختصات جدول قوانین فازی.

¹ Integral of the Time-weighted Absolute Error

$$\begin{cases} x[k+1] = A_d x[k] + B_d u[k] \\ y[k] = C_d x[k] + D_d u[k] \end{cases} \quad (6)$$

$$A_d = e^{AT} \quad (7)$$

$$B_d = \left(\int_0^T e^{A\tau} d\tau \right) B \quad (8)$$

$$C_d = C \quad (9)$$

$$D_d = D \quad (10)$$

$$x[k+1] = \begin{bmatrix} 0.0066 & -0.2973 & 0 \\ 0.4870 & 0.7295 & 0 \\ 0.0035 & 0.0089 & 1 \end{bmatrix} x[k] \quad (11)$$

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

$$y[k] = [0 \quad 22.13 \quad 1228.7] x[k] \quad (12)$$

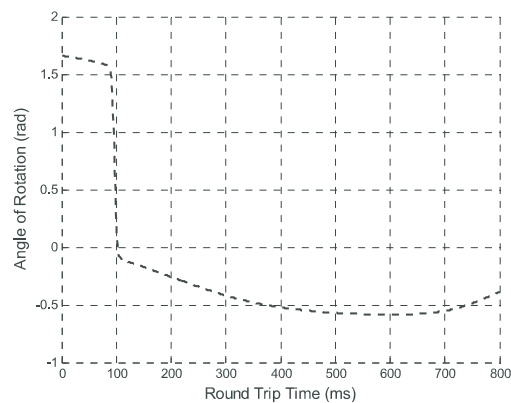
در شبیه‌سازی‌ها یک تأخیر زمانی تصادفی به سامانه اعمال می‌شود تا اثر شبکه در سامانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. مجموع تأخیر مسیر رفت (t_1) و مسیر برگشت (t_2)، تأخیر زمانی کلی شبکه (RTT) را تشکیل می‌دهد. در این پژوهش متوسط مجموع تأخیر زمانی شبکه به صورت پله‌ای تغییر می‌کند. متوسط پله‌ها ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌ثانیه است. توزیع تغییرات تأخیر در هر پله به صورت یک تابع یکنواخت در بازه ۱۰- تا ۱۰+ میلی‌ثانیه است. پس از آموزش شبکه عصبی، مقادیر وزن‌ها و بایاس‌ها استخراج می‌شود که در جدول (۴-۱) 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 (۱۳) و (۱۴) شکل ریاضی این دو تابع را نشان می‌دهد.

$$\text{tansig}(n) = \frac{2}{1 + e^{-2n}} - 1 \quad (13)$$

$$\text{purelin}(n) = n \quad (14)$$

زمان نمونه‌برداری ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است و همچنین مدل‌سازی سامانه کنترل از طریق شبکه براساس مدلی است که در (Chow Tipsuwan, 2001) معرفی شده است. در این پژوهش 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 فازی معمولی. نتایج در شکل‌های (۴-۱) و (۴-۲) رسم شده است.

ماتریس دوران، مقادیر خطا و مشتق خطا به مقادیر جدیدشان نگاشت می‌شود که این کار نیز تنها با ضرب ماتریس دو در دو در یک (خطا و مشتق خطا) در ماتریس دو در دو (دوران) انجام می‌شود. به این ترتیب در مقایسه با تأخیرهای زیاد ناشی از شبکه، پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی مقدار ناچیزی است و در عمل باری به سامانه تحمیل نمی‌شود.



(شکل ۳-۶): خروجی (زاویه چرخش محورهای مختصات جدول قوانین کنترل گر منطق فازی) بر حسب ورودی (تأخیر کلی شبکه) شبکه عصبی.

۴- شبیه‌سازی و نتایج عددی

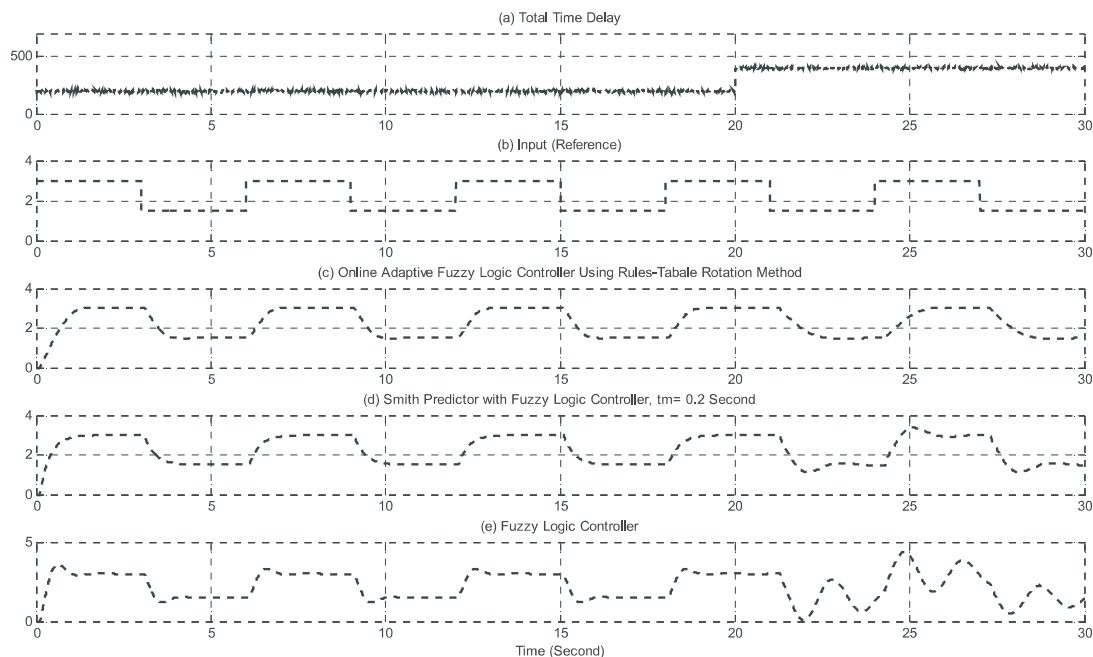
سامانه کنترل از طریق شبکه حلقه بسته شامل بخش‌های کنترل‌گر، دستگاه و شبکه مخابرات داده است. به‌منظور شبیه‌سازی و به‌دست آوردن پاسخ سامانه، هر بخش باید به‌طور مجزا مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. از فضای حالت برای شبیه‌سازی و رسم پاسخ سامانه به ورودی، استفاده شده است. در مرحله اول، تابع انتقال دستگاه به فضای حالت انتقال می‌یابد؛ چون اطلاعات کنترلی از طریق خطوط داده دیجیتال انتقال می‌یابند، لازم است از معادلات فضای حالت گسسته برای شبیه‌سازی فرآیند استفاده شود. رابطه (۶)، شکل فضای حالت گسسته فرآیند را نشان می‌دهد، که ماتریس‌های A, B, C, D و ماتریس‌های فضای پیوسته هستند و ماتریس‌های A_d, B_d, C_d, D_d ماتریس‌های نظیر معادل آن در فضای گسسته می‌باشند و از روابط (۷) تا (۱۰) استخراج می‌شوند. T ، زمان نمونه‌برداری (برابر ۰/۰۱ ثانیه) است. با قراردادن روابط (۲) و (۳) در روابط (۶) تا (۱۰)، معادلات فضای حالت گسسته دستگاه استخراج می‌شود که در روابط (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است.

(Du, 2009 b) نشان می‌دهد که پاسخ سامانه در تأخیرهای بیش از دوپست میلی‌ثانیه خراب می‌شود.

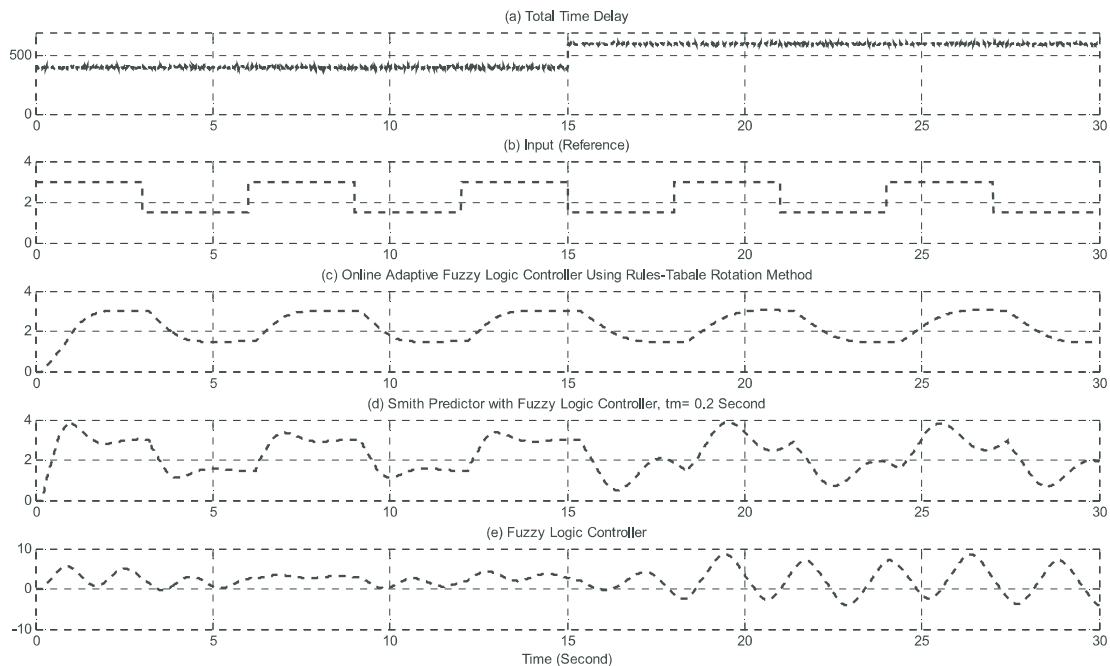
(جدول ۴-۱): مقادیر وزن‌ها و بایاس‌های شبکه عصبی.

$IW_{1,1} = \begin{bmatrix} -0.0122 \\ 0.0051 \\ -0.2367 \end{bmatrix}$	$LW_{2,1} = [-0.1661 \quad -0.3420 \quad 0.8277]$
$b_1 = \begin{bmatrix} 9.4477 \\ -1.0289 \\ 22.8867 \end{bmatrix}$	$b_2 = 0.7361$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سیگنال خروجی کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی بر خط، فراجهبش کمتری دارد؛ بنابراین این کنترل‌گر می‌تواند سازگاری خوبی با سامانه کنترل از طریق شبکه داشته باشد. F. Du و W. Du پیشگوگر اسمیتی را پیشنهاد دادند که با کنترل‌گر فازی-تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر برای سامانه کنترل از طریق شبکه در (Du Du, 2009 a) بسط داده شده است. آنها فقط برای تنظیم ضرایب کنترل‌گر تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر، کنترل‌گر منطق فازی را اعمال کردند، که در این حالت کنترل‌گر به صورت برون خط کار می‌کرد. آنها همچنین یک کنترل با شبکه عصبی RBF به همراه پیشگوگر اسمیت برای سامانه کنترل از طریق شبکه طراحی کردند که برون خط کار می‌کند. به‌طور عملی در یک شبکه مخابراتی، تأخیرها می‌تواند فراتر از دوپست میلی‌ثانیه نیز برود (به‌عنوان مثال حدود ۴۰۰ یا ۶۰۰ میلی‌ثانیه). نتایج (Du Du, 2009 a, Du)



(شکل ۴-۱): نتایج شبیه‌سازی (بیشینه تأخیر حدود ۴۰۰ میلی‌ثانیه است). الف) تأخیر زمانی ب) سیگنال مرجع پ) وضعیت (چرخش شافت موتور) برای کنترل‌گر منطق فازی برخط با استفاده از چرخش قوانین ت) وضعیت (چرخش شافت موتور) برای پیشگوگر اسمیت با کنترل‌گر منطق فازی ث) وضعیت (چرخش شافت موتور) برای کنترل‌گر منطق فازی.



(شکل ۴-۲): نتایج شبیه‌سازی (بیشینه تأخیر حدود ۶۰۰ میلی‌ثانیه است). الف) تأخیر زمانی (ب) سیگنال مرجع (پ) وضعیت (چرخش شافت موتور) برای کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی برخط با استفاده از چرخش قوانین (ت) وضعیت (چرخش شافت موتور) برای پیش‌گوگر اسمیت با کنترل‌گر منطق فازی (ث) وضعیت (چرخش شافت موتور) برای کنترل‌گر منطق فازی.

که در آن t زمان و e خطای ناشی از تفاوت بین سیگنال مرجع و خروجی است. شکل (۴-۳)، شاخص انتگرال خطای وزن-بر-زمان مطلق در مدت ۷ ثانیه برحسب تأخیر شبکه را برای سه کنترل‌گر مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش تأخیر شبکه در روش پیشنهادی انتگرال خطای وزن-بر-زمان مطلق تغییر زیادی نمی‌کند؛ با این حال این شاخص برای دو کنترل‌گر به‌شدت افزایش می‌یابد که نشان از برتری کنترل‌گر پیشنهادی نسبت به دو کنترل‌گر دیگر است. شاخص دیگر برای ارزیابی سامانه کنترل و مقایسه نتایج، درصد فراجش (P.O.) است. درصد فراجش بر اساس (۱۶) به دست می‌آید که در آن برای یک پله واحد، M_{pt} مقدار اولین قله در پاسخ زمانی سامانه و f_v مقدار نهایی پاسخ است که به‌طور معمول f_v برابر اندازه ورودی است.

$$P.O. = \frac{M_{pt} - f_v}{f_v} \times 100\% \quad (16)$$

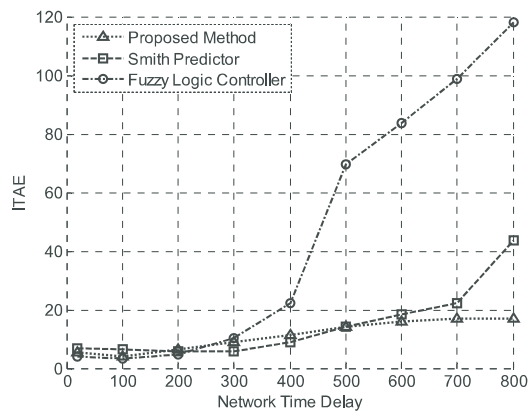
در این بررسی‌ها، بیشینه تأخیر دویست میلی‌ثانیه فرض شده است که به‌صورت گسسته اعمال شده است. در روش پیشنهادی این پژوهش، تأخیرها بیش از دویست میلی‌ثانیه فرض شده‌اند، حتی زمانی که تأخیر ششصد میلی‌ثانیه است، در پاسخ دستگاه مشکلی دیده نمی‌شود و با وجود چنین تأخیر زمانی زیادی، نتایج در شکل (۴-۲) نشان می‌دهد تأثیر چندانی بر روی پاسخ‌ها نداشته است. در اینجا که کنترل از نوع کنترل وضعیت می‌باشد، 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. کوچک‌شدن انتگرال خطای وزن-بر-زمان مطلق می‌تواند شاخص عملکرد خوبی در طراحی کنترل‌گر تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر باشد. بنابراین به‌منظور مقایسه عملکرد کنترل‌گرهای مختلف از تابع هزینه انتگرال خطای وزن-بر-زمان مطلق استفاده شده است. رابطه (۱۵)، شکل ریاضی این تابع هزینه را بیان می‌کند.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (15)$$

میلی ثانیه، انتگرال خطای وزن-بر-زمان مطلق کنترل گر پیشنهادی نسبت به پیشگوگر اسمیت به ۰/۳۹ کاهش یافته است و در این حالت کنترل گر منطق فازی معمولی به طور کامل ناپایدار شده است. همچنین درصد فراجش نسبت به دو کنترل گر دیگر کمتر است.

۵- نتیجه گیری

این پژوهش به ارائه روشی جدید برای بهبود عملکرد سامانه های کنترل از طریق شبکه مبتنی بر چرخش محور مختصات جدول قوانین فازی پرداخته است. مقدار چرخش توسط یک شبکه عصبی بر حسب تأخیر کل شبکه به دست می آید. با استفاده از چرخش، اثر نامطلوب تأخیر زمانی متغیر شبکه بر روی عملکرد سامانه جبران می شود. روش پیشنهادی برای کنترل وضعیت یک سروموتور جریان متناوب با توان چهارصد وات که به عنوان دستگاه راه دور در نظر گرفته شده، به کار رفته است. نتایج شبیه سازی ها و مقایسه سه نوع کنترل گر در کنترل این دستگاه تأیید می کند که کنترل گر طراحی شده پیشنهادی، در تأخیرهای زیاد (به خصوص در تأخیرهایی با بیش از ششصد میلی ثانیه) عملکرد بهتری دارد. در تأخیر حدود هفتصد میلی ثانیه، انتگرال خطای وزن-بر-زمان مطلق کنترل گر پیشنهادی نسبت به پیشگوگر اسمیت به ۰/۷۶ کاهش یافته است. برای تأخیر هشتصد میلی ثانیه این شاخص به ۰/۳۹ کاهش می یابد؛ که این مقدار در مورد کنترل گر منطق فازی معمولی به ۰/۱۴ کاهش یافته و کنترل گر در این حالت به طور کامل ناپایدار شده است. در تمامی این حالات مقدار فراجش



(شکل ۴-۳): مقایسه انتگرال خطای وزن-بر-زمان مطلق برای سه کنترل گر مختلف بر حسب تأخیرهای مختلف شبکه.

زمان قله، زمانی است که طول می کشد تا خروجی دستگاه به مقدار قله خود برسد. هر چه مقادیر M_{PI} و درصد فراجش کمتر باشد، عملکرد سامانه مطلوب تر است. جدول (۴-۲)، مقایسه بین نتایج را نشان می دهد. این جدول نشان می دهد که روش پیشنهادی، در مجموع فراجش کمتری نسبت به دو روش دیگر دارد؛ چون پیشگوگر اسمیت در این پژوهش برای تأخیر دو بیست میلی ثانیه تنظیم شده است، در تأخیر دو بیست میلی ثانیه نتیجه بهتری از خود نشان می دهد، با این وجود برای سایر تأخیرها عملکردش کاهش می یابد. کنترل گر فازی معمولی برای حالت بدون تأخیر تنظیم شده است و برای سایر تأخیرها، نسبت به دو کنترل گر دیگر عملکرد ضعیف تری دارد. نتایج نشان می دهد که کنترل گر منطق فازی تطبیقی بر خط نسبت به دو کنترل گر دیگر، نتیجه مطلوب تری دارد. برای تأخیرهای زیاد حدود هشتصد

(جدول ۴-۲): مقایسه عملکرد کنترل گرهای مختلف با اعمال تأخیرهای متفاوت شبکه.

مقدار تقریبی تأخیر	روش کنترل	درصد فراجش	انتگرال خطای وزن-بر-زمان مطلق	زمان قله (ثانیه)
۲۰۰ میلی ثانیه	کنترل گر منطق فازی تطبیقی برخط	۰	۶/۵۱۱۱	-
	پیشگوگر اسمیت	۰	۵/۶۹۸۷	-
	کنترل گر منطق فازی	۲۲	۴/۹۰۵۱	۰/۶۳۰۰
۶۰۰ میلی ثانیه	کنترل گر منطق فازی تطبیقی برخط	۰	۱۶/۰۷۱۸	-
	پیشگوگر اسمیت	۷۲	۱۸/۳۱۶۵	۱/۳۰۰۰
	کنترل گر منطق فازی	۱۵۵	۸۳/۷۱۱۹	۱/۲۱۰۰
۷۰۰ میلی ثانیه	کنترل گر منطق فازی تطبیقی برخط	۱۴	۱۶/۹۹۳۸	۲/۵۹۰۰
	پیشگوگر اسمیت	۹۴	۲۲/۱۷۸۸	۱/۴۵۰۰
	کنترل گر منطق فازی	۱۸۹	۹۸/۹۴۶۴	۱/۳۶۰۰
۸۰۰ میلی ثانیه	کنترل گر منطق فازی تطبیقی برخط	۴۸	۱۷/۰۸۰۵	۲/۲۱۰۰
	پیشگوگر اسمیت	۱۱۶	۴۲/۵۸۲۵	۱/۶۰۰۰
	کنترل گر منطق فازی	۲۲۳	۱۱۸/۱۸۲۱	۱/۵۱۰۰

Lai, C. L.; Hsu, P. L., 2010 b, "Realization of Networked Control Systems on Ethernet with Varied Time Delay," In Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), pp. 66-73.

Lai, C. L.; Hsu, P. L.; Wang, B. C., 2008, "Design of the Adaptive Smith Predictor for Time-varying Network Control System," In Proceedings of the International Conference on Instrumentation, Control, Information Technology and System Integration (SICE'08), pp. 2933-2938.

Murray, R. M.; Astrom, K. J.; Boyd, S. P.; Brockett, R. W.; Stein, G., 2003, "Future directions in control in an information-rich world," IEEE Control Systems Magazine, vol. 23, no. 2, pp. 20-33.

Pan, I.; Das, S.; Gupta, A., 2011, "Tuning of an Optimal Fuzzy PID Controller with Stochastic Algorithms for Networked Control Systems with Random Time Delay," ISA Transactions, vol. 50, no. 1, pp. 28-36.

Ross, T. J., 2010, "Fuzzy Logic with Engineering Applications," 3rd edition, John Wiley & Sons, Ltd., Publications.

Vatanski, N.; Georges, J. P.; Aubrun, C.; Rondeau, E.; Jounela, S. L. J., 2009, "Networked Control with Delay Measurement and Estimation," Control Engineering Practice, vol. 17, no. 2, pp. 231-244.

Zhang, L.; Gao, H.; Kaynak, O., 2013, "Network-induced Constraints in Networked Control Systems—A Survey," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, no. 1, pp. 403-416.

Zhao, D.; Li, C.; Ren, J., 2011, "Fuzzy Speed Control and Stability Analysis of a Networked Induction Motor System with Time Delays and Packet Dropouts," Nonlinear Analysis: Real World Applications, vol. 12, no. 1, pp. 273-287.



پویا حاجبی مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را به ترتیب در رشته مهندسی برق (الکترونیک) و رشته مهندسی برق (مخابرات) در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۸ از دانشگاه یزد اخذ کرده‌اند. ایشان از سال ۱۳۸۸

تاکنون دانشجوی دکتری رشته مهندسی برق (مخابرات) در دانشگاه یزد هستند. وی در سال ۱۳۹۲، به‌عنوان دانشجوی پژوهش‌گر نمونه دانشگاه یزد در مقطع دکتری انتخاب شدند.

کنترل گر پیشنهادی نسبت به دو کنترل گر دیگر بسیار کوچک‌تر است. پس نتیجه گرفته می‌شود، استفاده از روش پیشنهادی تأثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد سامانه کنترل از طریق شبکه (به‌خصوص در تأخیرهای زیاد) دارد.

۶- سپاس‌گزاری

این پژوهش با حمایت مالی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات انجام شده است.

۷- مراجع

Cheng, C. W.; Lai, C. L.; Wang, B. C.; Hsu, P. L., 2007, "The Time-delay Effect of Multiple-networks Systems in NCS," In Proceedings of the International Conference on Instrumentation, Control, Information Technology and System Integration (SICE'07), pp. 929-934.

Chow, M. Y.; Tipsuwan, Y., 2001, "Network-based Control Systems: A Tutorial," In Proceedings of the 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1593-1602.

Du, W.; Du, F., 2009 a, "Novel Smith Predictor and Fuzzy Control for Networked Control Systems," In Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Information Processing (APCIP), pp. 75-78.

Du, F.; Du, W., 2009 b, "RBF Neural Network Control and Novel Smith Predictor for Networked Control Systems," In Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Information Processing (APCIP), pp. 67-70.

Gupta, R. A.; Cho, M.-Y., 2010, "Networked Control System: Overview and Research Trends," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 7, pp. 2527-2535.

Hespanha, J. P.; Naghshtabrizi, P.; Xu, Y., 2007, "A Survey of Recent Results in Networked Control Systems," Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 1, pp. 138-162.

Ishido, Y.; Takaba, K.; Quevedo, D. E., 2011, "Stability Analysis of Networked Control Systems Subject to Packet-dropouts and Finite-level Quantization," Systems & Control Letters, vol. 60, no. 5, pp. 325-332.

Lai, C. L.; Hsu, P. L., 2010 a, "Design the Remote Control System with the Time-delay Estimator and the Adaptive Smith Predictor," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 6, no. 1, pp. 73-80.

زمینه‌های علاقه‌مندی ایشان پردازش سیگنال‌های گسسته، سامانه‌های منطق فازی و شبکه‌های عصبی است. نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

Hajebi@stu.yazd.ac.ir



سید محمدتقی المدرسی مدارک

کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را

به ترتیب در رشته مهندسی برق

(الکترونیک) و رشته مهندسی برق

(مخابرات) در سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۶۸

از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ کرده‌اند

و مدرک دکترای مهندسی برق (الکترونیک- پردازش هوشمند سیگنال) خود را از دانشگاه ساوت‌همپتون کشور انگلستان در سال ۱۳۷۹ دریافت کردند. دکتر المدرسی از سال ۱۳۶۹ عضو هیأت علمی دانشگاه یزد بوده و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر و معاون پژوهش و فناوری دانشگاه یزد می‌باشند. زمینه‌های علاقه‌مندی ایشان پردازش هوشمند، شبکه‌های عصبی، سامانه‌های کنترل از طریق شبکه و شبکه‌های هوشمند است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

smta@yazd.ac.ir