

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

پویا حاجی‌پور و سید محمد تقی 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 به طور معمول با یک تأخیر ثابت تنظیم می‌شود، باعث ناپایداری این سامانه‌ها می‌شود. از طرف دیگر کنترل گرهای منطق فازی به خاطر ماهیت غیرخطی شان می‌توانند گزینه خوبی برای کنترل فرآیندهای غیرخطی باشد. در روش پیشنهادی، محورهای مختلف 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

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 به وجود 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) و Cheng (Ishido et al., 2011).

همکارانش نشان دادند هنگامی که تأخیر زمانی از زمان نمونه‌برداری کوچک‌تر باشد، این تأخیر اثر محسوسی بر روی سامانه کنترلی نمی‌گذارد؛ با این وجود تأخیرهای بیش از زمان نمونه‌برداری می‌تواند عملکرد سامانه را دچار اختلال نماید (Cheng et al., 2007).

کنترل گر تناسبی-انتگرالی سنتی و کنترل گر منطق فازی برای پایداری و کاهش خطای سامانه کنترل از طریق شبکه

سامانه‌های کنترل از طریق شبکه، سامانه‌های توزیع شده در مکان هستند که در آنها ارتباط میان حس‌گرهای، فعال گرهای و کنترل گرهای 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 حس‌گر 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 به عنوان

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

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 سرومومتور جریان متناوب چهارصد واحد ارائه و سپس ایده چرخش جدول قوانین فازی آن با استفاده از شبکه عصبی برای مقابله با تأخیر شبکه مطرح می شود. در بخش چهارم شبیه سازی ها و نتایج عددی ارائه و در پایان نتیجه گیری آورده شده است.

## ۲- سامانه کنترل از طریق شبکه

با توجه به گسترش سامانه های مخابراتی دیجیتال مبتنی بر قرارداد اترنت و افزایش قابلیت اعتماد به این شبکه ها در سال های اخیر، معمول شده است که از این نوع کانال های مخابراتی برای انتقال سیگنال های حس گر و کنترل گر استفاده شود. این روش کاهش چشم گیری در هزینه سیم کشی و نگهداری از سیم های اختصاص یافته دارد (Pan et al., 2011). علاوه بر این امکان اجرای سامانه های کنترلی گستردگی در مکان، انعطاف پذیر و با اجزای متحرک را به وجود آورده است. با این حال، سامانه های کنترل از طریق شبکه، مشکلات خاص خود نظیر تأخیر زمانی متغیر و از دست رفتن بسته را دارد (Ishido et al., 2011; Pan et al., 2011) ساختار یک سامانه کنترل از طریق شبکه تک و دور دی - تک خروجی نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشخص است  $t_1$  و  $t_2$  به ترتیب زمان های تأخیر شبکه در مسیر کنترل گر به فعل گر و در مسیر حس گر به کنترل گر می باشند. به طور کلی تأخیر ایجاد شده در شبکه، براساس بار شبکه، نحوه برنامه ریزی شبکه، تعداد گره های شبکه و پروتکل های مختلف تغییر می کند. مشخصه متغیر تأخیر زمانی این سامانه ها، طراحی و مدل سازی این سامانه ها را پیچیده می کند. مجموع کل تأخیر زمانی رفت و برگشت براساس این که در کجا ایجاد شود، به سه دسته تقسیم می شود: گره سرور، کانال شبکه و گره کاربر (Lai et al., 2008).

به کار گرفته شده اند. پیشگوگر اسمیت<sup>۱</sup>، یکی از کنترل گرهایی است که برای فرآیندهایی با تأخیر زمانی ثابت، مناسب است (Cheng et al., 2007; Lai Hsu, 2010). Hsu و Lai پیشگوگر اسمیت تطبیقی را به عنوان کنترل گر برای سامانه های کنترل از طریق شبکه به کار برده اند (Lai Hsu, 2010 a)، در روش آنها مشکلاتی نظیر وابستگی دقت مدل به دقت تخمین تابع انتقال دستگاه<sup>۲</sup>، وجود دارد و همچنین تعییرات کوچکی در تابع انتقال دستگاه باعث ایجاد تعییر در سامانه کنترلی می شود. در همین اواخر Pan و همکارانش در (Pan et al., 2011) و Zhao (Zhao et al., 2011)، نشان داده اند که کنترل گرهای منطق فازی، عملکرد بهتری در مقابله با از دست رفتن بسته و تأخیر زمانی متغیر دارند و همین طور با فرآیندهای غیرخطی سازگار ترند. Du و همکارش، پیشگوگر اسمیتی را که با کنترل گر 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 اندازه گیری نکردند. آنها سامانه منطق فازی را برای تنظیم ضرایب کنترل گر انتگرالی- تناسبی- مشتق گیر به کار برند. این پژوهش ابتدا یک کنترل گر منطق فازی برای کنترل وضعیت یک سرومومتور جریان متناوب چهارصدوات از طریق اترنت ارائه می دهد، در قدم بعدی یک کنترل گر برخط تطبیقی فازی برای مقابله با اثرات ناشی از تأخیر شبکه ارائه می شود. در این پژوهش یک راهکار برای مقابله با تأخیر با استفاده از چرخش جدول قوانین فازی در طول فرآیند کنترل، ارائه می شود. ابتدا تأخیر زمانی رفت و برگشت شبکه<sup>۳</sup> (RTT) به طور برخط اندازه گیری، سپس این مقدار توسعه یک شبکه عصبی آموزش داده شده به یک زاویه، نگاشت می شود. این شبکه عصبی توسعه مقادیر مختلف تأخیر برای کنترل گر تطبیقی منطق فازی، آموزش دیده است. نتایج نشان می دهد کنترل گری که جدول قوانین آن توسعه یک شبکه عصبی می چرخد، در مقایسه با سایر روش ها عملکرد مناسب تری دارد. در واقع در یک شبکه مخابراتی تأخیر های ناشی از شبکه می تواند از دویست میلی ثانیه فراتر رود؛ در حالی که نتایج در (Du Du, 2009 a, Du Du, 2009 b) نشان می دهد عملکرد سامانه کنترلی برای تأخیر های بیش از دویست

<sup>1</sup> Smith Predictor

<sup>2</sup> Plant

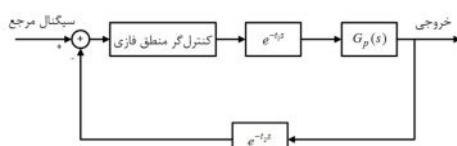
<sup>3</sup> Round Trip Time



فرآیندهای غیرخطی است و همچنین عملکرد بهتری در مقابله 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.

### ۱-۳- طراحی کنترل گر منطق فازی

شکل (۱-۳) بلوک دیاگرام یک کنترل گر منطق فازی را نشان می‌دهد. در این سامانه، ابتدا خروجی دستگاه اندازه‌گیری و سپس برای به دست آوردن سیگنال خطای سیگنال مرجع مقایسه می‌شود. سیگنال خطای و مشتق آن، دو ورودی برای کنترل گر منطق فازی هستند. در این پژوهش دستگاه تحت کنترل یک سرومومتور جریان متناوب چهارصدوات است که وضعیت آن توسط یک رمزگذار با بهره  $10^4$  اندازه‌گیری می‌شود.تابع انتقال دستگاه (حالت حلقة 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 (s) تابع انتقال دستگاه،  $\dot{x}$  مشتق بردار حالت و  $u$  خروجی می‌باشد. در شکل (۲-۳) هفت تابع عضویت مثلثی برای ورودی (خطای و مشتق خطای) و خروجی معروفی شده است. در شکل (۲-۳) متغیرهای زبانی فازی ("NM", "NB", "NS", "ZE", "PM", "PS", "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.



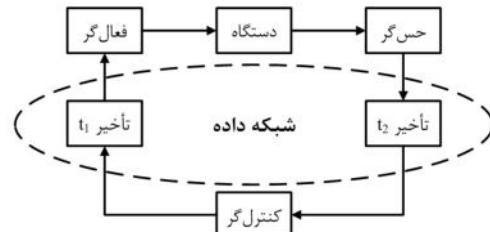
شکل (۱-۳): کنترل گر منطق فازی.

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

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

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

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). RTT 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 هر چه مسیر طولانی تر شود، تأخیر زمانی ناشی از شبکه به علت افزایش تعداد گره‌ها، افزایش 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 کنترل گر منطق فازی و چرخش محورهای مختصات جدول قوانین فازی می‌توان با اثر تأخیر مقابله کرد.



شکل (۱-۲): سامانه تک ورودی- تک خروجی کنترل از طریق شبکه.

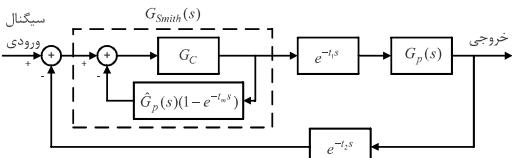
### ۳- کنترل گر منطق فازی با استفاده از جدول قوانین چرخان

همان‌گونه که در بخش دو اشاره شد، کنترل گر منطق فازی می‌تواند راه حلی برای مقابله با مسئله تأخیر زمانی در سامانه‌های کنترل از طریق شبکه باشد؛ با این حال تاکنون بیشتر از کنترل گرهای تناوبی- انتگرالی و یا تناوبی- انتگرالی- مشتق‌گیر برای کنترل این سامانه‌ها استفاده می‌شود که عملکرد محدودتری به خصوص در فرآیندهای غیرخطی دارند. کنترل گر منطق فازی گرینه 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 کنترل گر منطق فازی بر طبق قوانین جدول (۱-۳) انتخاب می‌شود.

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

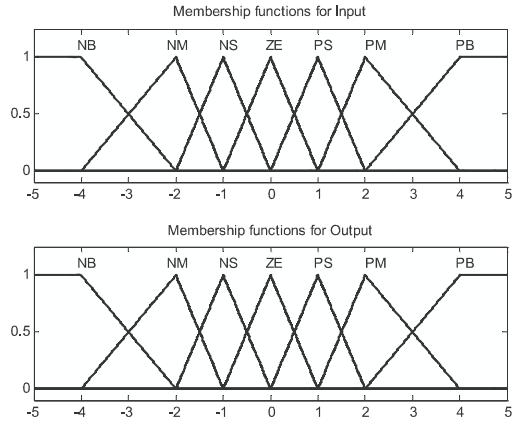
$\frac{dc}{dt}$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB



(شکل ۲-۳): ساختار پیشگوگر اسمیت (Lai Hsu, 2010 a).

### ۳-۳- طراحی کنترل گر 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 برچسب‌گذاری زمانی با کنترل گر در زمان ارسال هر بسته (به عنوان سیگنال کنترلی) و مقایسه آن با زمان دریافت بسته (به عنوان سیگنال پس خور دریافتی) انجام می‌شود. سپس از این مقدار برای جبران اثر تأخیر در کنترل گر منطق فازی استفاده می‌شود. کنترل گر منطق فازی طراحی شده در این بخش با یک ساختار شبکه عصبی ترکیب شده است. مقدار زمان رفت و برگشت اندازه‌گیری شده بسته (RTT)، به عنوان تخمینی از تأخیر، در کنترل گر منطق فازی پیشنهادی اعمال می‌شود و میزان زاویه چرخش از طریق همین مقدار RTT و به کمک شبکه عصبی استخراج می‌شود. همان‌گونه که در قبل اشاره شد در این پژوهش از کنترل گر منطق فازی برای تنظیم ضرایب کنترل گر تناسبی-انتگرالی یا تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر استفاده نشده، بلکه به طور مستقیم از خود کنترل گر منطق فازی جهت کنترل فرآیند استفاده شده



(شکل ۲-۳): توابع عضویت ورودی و خروجی.

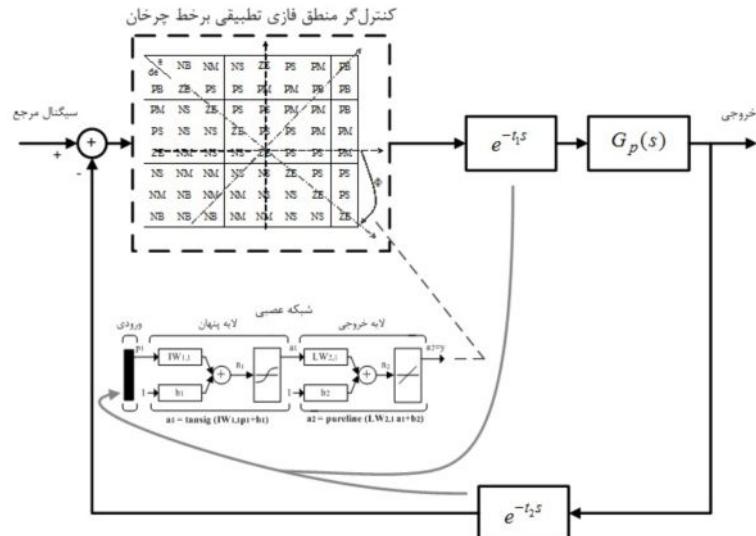
در اینجا برخی از پارامترهای سامانه فازی که در این پژوهش به کار رفته معرفی می‌شود: ۱) استنتاج فازی به کار رفته در طراحی از نوع ممدانی است (Ross, 2010) ۲) عمل گر "و" منطقی براساس کمینه است و روش استدلال منطقی بر اساس کمینه و جمع‌آوری براساس بیشینه است. ۳) خروجی سامانه فازی توسط مرکز نقل به دست می‌آید.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

### ۲-۳- پیشگوگر اسمیت با کنترل گر منطق فازی

پیشگوگر اسمیت یکی از کنترل گرهایی است که برای فرآیندهایی با تأخیر زمانی مناسب است (Cheng et al., 2007; Lai Hsu, 2010 a). در اینجا یک پیشگوگر اسمیت طراحی می‌شود. در این پیشگوگر اسمیت که در شکل (۳-۳) مقایسه شود. در این پیشگوگر اسمیت که در شکل (۱-۳) طراحی آن با نتایج آن با نتایج کنترل گر منطق فازی مقایسه شود. در این پیشگوگر اسمیت که در شکل (۳-۳) ترسیم شده است، بلوک  $G_C$  کنترل گر منطق فازی را که در بخش ۱-۳ 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 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 پژوهش، مقدار  $t_m$  برابر دویست میلی ثانیه درنظر 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

فصل نهم





(شکل ۴-۳): 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 خط 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 خط “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 خط، مشتق خط 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 دستگاه در حین فرآیند کنترل، عملکرد بهتری نسبت به سایر کنترل‌گرهای داشته باشد. در حین فرآیند کنترلی که در آن تأخیر وجود ندارد، سیگنال خط و مشتق خط 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 (۴-۳)، 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 (۲-۳) است، ولی سایر پارامترها (توابع عضویت، عملکردهای منطق فازی و روش منطق فازی) با پارامترهای قسمت ۱-۳ یکسان است. رابطه (۴) رابطه نگاشت بین خط و مشتق خط را در مختصات جدید نشان می‌دهد. رابطه (۵) ماتریس دوران چرخش محورهای مختصات به اندازه  $\phi$  را دیان را، نشان می‌دهد. ساختار جدول قوانین در حال چرخش در شکل (۴-۳) نشان داده شده است.

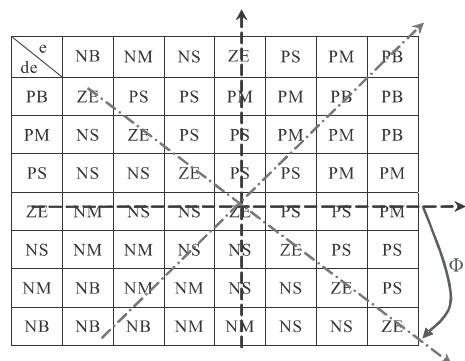
$$\begin{bmatrix} e_{new} \\ \dot{e}_{new} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ساختار شبکه عصبی به کاررفته در این پژوهش، به صورت یک شبکه عصبی feedforward تکخروجی 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، خط و مشتق خط توسط رابطه<sup>(۴)</sup> و<sup>(۵)</sup> به مقادیر جدیدش در محور مختصات قدیمی نگاشت می‌شود. این مقادیر جدید به عنوان خط و مشتق خط به ورودی سامانه منطق فازی اعمال می‌شود.

قبل از راهاندازی سامانه، شبکه عصبی با مجموعه‌ای از داده‌ها (براساس 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. به عنوان مثال تأخیرهای ۰۰۰، 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 می‌شود. برای باقتن داده‌های آموزشی با آزمایش چند زاویه مختلف، مقدار مطلوب چرخش برای آن تأخیر با توجه به شاخص عملکرد انتگرال خطای وزن-بر-زمان مطلق (ITAE<sup>(۱)</sup>) به دست می‌آید. با داشتن این داده‌ها، شبکه عصبی آموزش داده می‌شود. پس از آموزش، میزان چرخش مطلوب متناسب با سایر تأخیرهای داخل این محدوده، با شبکه عصبی محاسبه می‌شود. شکل (۶-۳)، رابطه خروجی (زاویه چرخش محورهای مختصات جدول قوانین کنترل گر منطق فازی) بر حسب ورودی (تأخير کلی شبکه) شبکه عصبی را نشان می‌دهد.

به لحاظ پیچیدگی محاسباتی، در مرحله آموزش شبکه عصبی، مدتی زمان نیاز است تا داده‌ها استخراج و شبکه آموزش ببیند؛ ولی این مرحله قبل از راهاندازی و به کلگیری 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 می‌آید که حاصل یک عدد تک بعدی است. با استفاده از

در این نقطه خط منفی و مقدارش بزرگ و مشتق آن نیز صفر است و سیگنال کنترل متضایر با این نقطه باید به گونه‌ای 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 فرجهش می‌رسد، با تأخیری به اندازه تأخیر مسیر برگشت، کنترل گر توسط سیگنال پسخور متوجه اولین فرجهش می‌شود، در حالی که این واقعه مربوط به گذشته است. حتی با فرستادن سیگنال کنترل مرتبط با اولین فرجهش به دستگاه در آن لحظه، سیگنال مربوطه همراه با تأخیری به اندازه تأخیر مسیر رفت به فعال گر می‌رسد. بنابراین اگر قانون مربوط به فرجهش اول در آن لحظه اعمال شود، سامانه ناپایدار می‌شود. از آن جا که براساس دیاگرام فاز کنترل گر، خط و مشتق خط 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 می‌شود. می‌توان 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 می‌شود. در این پژوهش به جای آن که محورها بچرخند، مختصات جدید خط و مشتق آن در محور مختصات قدیم بدست می‌آید. با این کار چون خط و مشتق خط مقادیر دیگری دارند، به طور طبیعی قانونی دیگر برای خروجی کنترل گر متناسب با مقادیر جدید آنها اعمال می‌شود. با اعمال این قانون به جای قانون قبلی، اثر تأخیر زمانی جبران می‌شود.



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

<sup>۱</sup> Integral of the Time-weighted Absolute Error



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

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

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

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

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

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

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

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

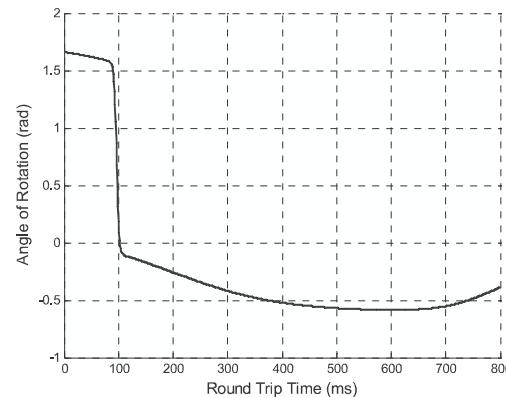
در شبیه‌سازی‌ها یک تأخیر زمانی تصادفی به سامانه اعمال می‌شود تا اثر شبکه در سامانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. مجموع تأخیر مسیر رفت ( $t_1$ ) و مسیر برگشت ( $t_2$ )، تأخیر زمانی کلی شبکه (RTT) را تشکیل می‌دهد. در این پژوهش متوسط مجموع تأخیر زمانی شبکه به صورت پله‌ای تغییر می‌کند. متوسط پله‌ها ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی ثانیه است. توزیع تغییرات تأخیر در هر پله به صورت یکتابع یکنواخت در بازه ۱۰-۱۰۰ میلی ثانیه است. پس از آموزش شبکه عصبی، مقادیر وزن‌ها و بایاس‌ها استخراج می‌شود که در جدول (۱۴) 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.

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

$$purelin(n) = n \quad (14)$$

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 کنترل گر انجام شده است؛ ۱) کنترل گر منطق فازی تطبیقی برخط، ۲) پیشگوگر اسمیت با کنترل گر منطق فازی، ۳) کنترل گر فازی معمولی. نتایج در شکل‌های (۱-۴) و (۲-۴) رسم شده است.

ماتریس دوران، مقادیر خطأ و مشتق خطأ به مقادیر جدیدشان نگاشت می‌شود که این کار نیز تنها با ضرب ماتریس دو در یک (خطأ و مشتق خطأ) 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

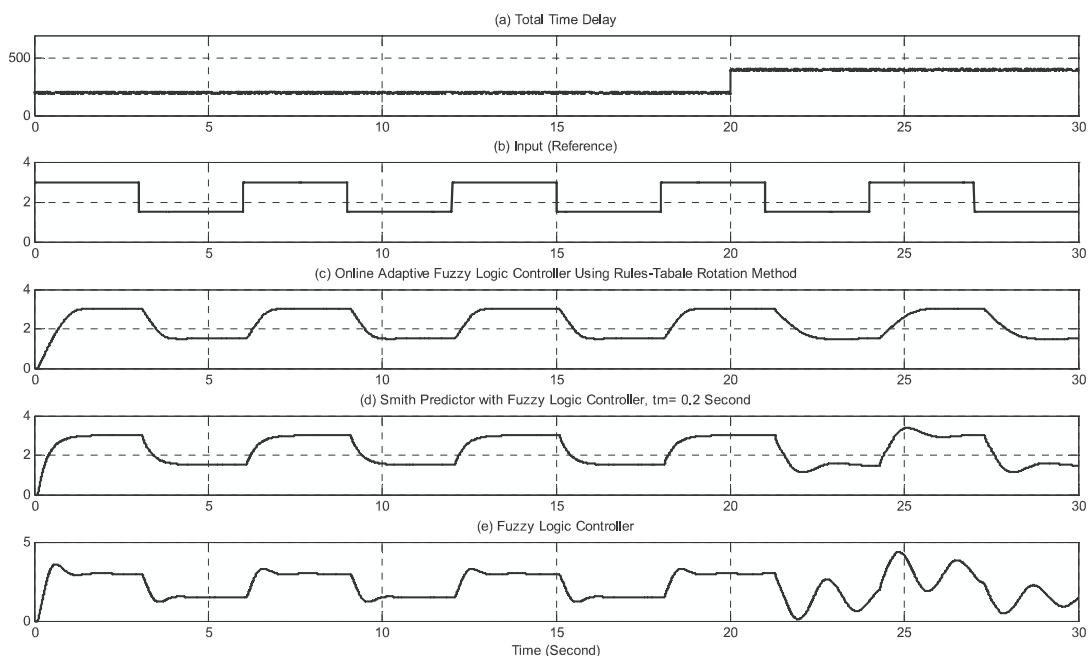
سامانه کنترل از طریق شبکه حلقة بسته شامل بخش‌های کنترل گر، دستگاه و شبکه مخابرات داده است. به‌منظور شبیه‌سازی و به‌دست آوردن پاسخ سامانه، هر بخش باید به‌طور مجزا مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. از فضای حالت برای شبیه‌سازی و رسم پاسخ سامانه به ورودی، استفاده شده است. در مرحله اول، تابع انتقال دستگاه به 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، C\_d، B\_d و D\_d ماتریس‌های نظری 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 دویست میلی‌ثانیه خراب می‌شود.

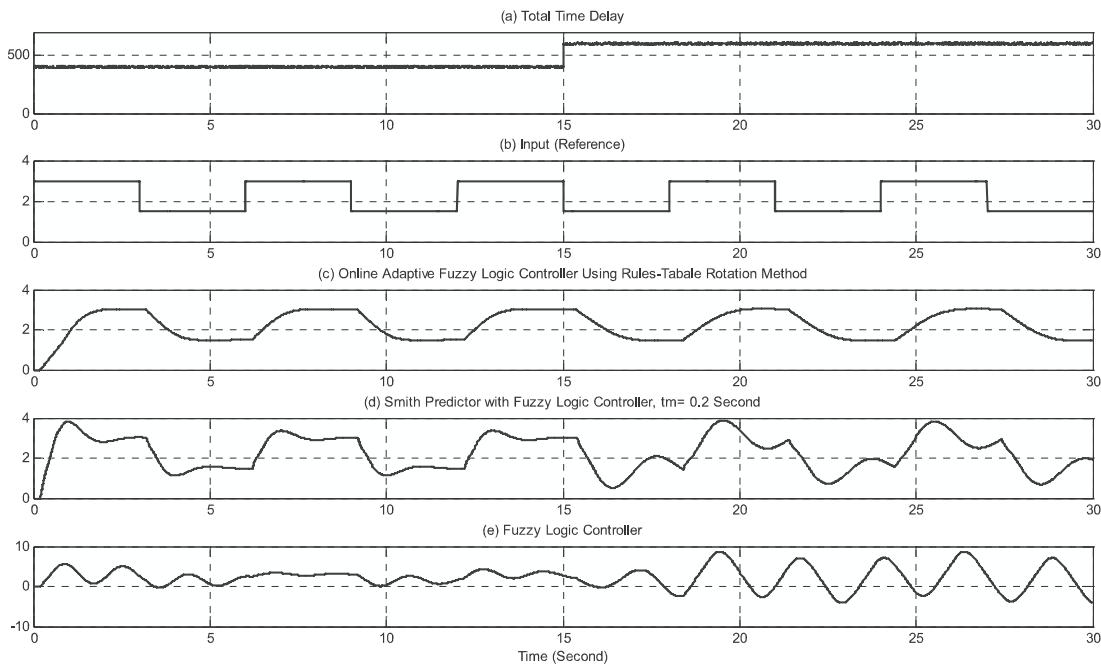
(جدول ۴-۱): مقادیر وزن‌ها و بایاس‌های شبکه عصبی.

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

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سیگنال خروجی کنترل‌گر منطق فازی تطبیقی بر خط، فراجهش 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-تناسی-انتگرالی-مشتق گیر برای سامانه کنترل از طریق شبکه در (Du, 2009 a) بسط داده است. آنها فقط برای تنظیم ضرایب کنترل‌گر تناسی-انتگرالی-مشتق گیر، 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. به طور عملی در یک شبکه مخابراتی، تأخیرها می‌توانند فراتر از دویست میلی‌ثانیه نیز بروند (به عنوان مثال حدود ۴۰۰ یا ۶۰۰ میلی‌ثانیه). نتایج (Du, 2009 a, Du, 2009 a) نشان می‌دهند که کنترل‌گر منطق فازی با کنترل‌گر تناسی-انتگرالی-مشتق گیر می‌تواند تأخیر حدود ۴۰۰ میلی‌ثانیه را کاهش دهد.



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

که در آن  $t$  زمان و  $e$  خطای ناشی از تفاوت بین سیگنال مرجع و خروجی است. شکل (۳-۴)، شاخص انتگرال خطای وزن-بر-زمان مطلق در مدت ۷ ثانیه بر حسب تأخیر شبکه را برای سه کنترل گر مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش تأخیر شبکه در روش پیشنهادی انتگرال خطای وزن-بر-زمان مطلق تعییر زیادی نمی‌کند؛ با این حال این شاخص برای دو کنترل گر بهشت افزایش می‌باید که نشان از برتری کنترل گر پیشنهادی نسبت به دو کنترل گر دیگر است. شاخص دیگر برای ارزیابی سامانه کنترلی و مقایسه نتایج، درصد فراجهش (P.O.) است. درصد فراجهش 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 به طور معمول  $f_v$ ، برابر اندازه ورودی است.

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

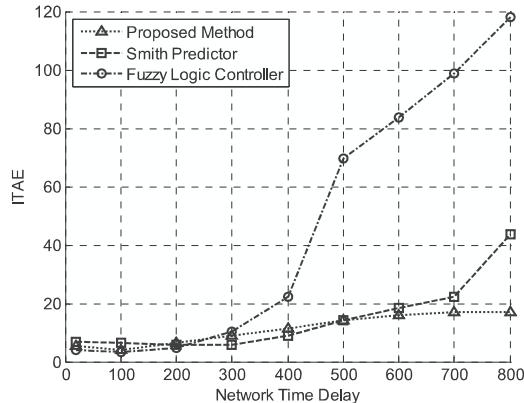
در این بررسی‌ها، بیشینه تأخیر دویست میلی ثانیه فرض شده است که به صورت گستته اعمال شده است. در روش پیشنهادی این پژوهش، تأخیرها بیش از دویست میلی ثانیه فرض شده‌اند، حتی زمانی که تأخیر شصت میلی ثانیه است، در پاسخ دستگاه مشکلی دیده نمی‌شود و با وجود چنین تأخیر زمانی زیادی، نتایج در شکل (۲-۴) نشان می‌دهد 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 کنترل گر مورد استفاده، بالاتر است. کوچکشدن انتگرال خطای وزن-بر-زمان مطلق می‌تواند شاخص عملکرد خوبی در طراحی کنترل گر تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر باشد. بنابراین به‌منظور مقایسه عملکرد کنترل گرهای مختلف ازتابع 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  $0.39$  کاهش یافته است و در این حالت کنترل گر منطق فازی معمولی به طور کامل ناپایدار شده است. همچنین درصد فراجهش نسبت به دو کنترل گر دیگر کمتر است.

## ۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش به ارائه روشی جدید برای بهبود عملکرد سامانه‌های 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 می‌آید. با استفاده از چرخش، اثر نامطلوب تأخیر زمانی متغیر شبکه بر روی عملکرد سامانه جبران می‌شود. روش پیشنهادی برای کنترل وضعیت یک سرورموتور جریان متناوب با توان چهارصد وات که به عنوان دستگاه راه دور در نظر گرفته شده، به کار رفته است. نتایج شبیه‌سازی‌ها و مقایسه سه نوع کنترل گر در کنترل این دستگاه تائید می‌کند 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  $0.76$  کاهش یافته است. برای تأخیر هشت‌صد میلی ثانیه این ساختار به  $0.39$  کاهش می‌یابد؛ که این مقدار در مورد کنترل گر منطق فازی معمولی به  $0.14$  کاهش یافته و کنترل گر در این حالت به طور کامل ناپایدار شده است. در تمامی این حالات مقدار فراجهش



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

زمان قله، زمانی است که طول می‌کشد تا خروجی دستگاه به مقدار قله خود برسد. هرچه مقادیر  $M_{pt}$  و درصد فراجهش کمتر باشد، عملکرد سامانه مطلوب‌تر است. جدول (۲-۴)، مقایسه بین نتایج را نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، در مجموع فراجهش کمتری نسبت به دو روش دیگر دارد؛ چون پیشگوگر اسمیت در این تأخیر دویست میلی ثانیه نتیجه بهتری از خود نشان می‌دهد، با این وجود برای سایر تأخیرها عملکردش کاهش می‌یابد. کنترل گر فازی معمولی برای حالت بدون تأخیر تنظیم شده است و برای سایر تأخیرها، نسبت به دو کنترل گر دیگر عملکرد ضعیفتری دارد. نتایج نشان می‌دهد که کنترل گر منطق فازی تطبیقی بر خط نسبت به دو کنترل گر دیگر، نتیجه مطلوب‌تری دارد. برای تأخیرهای زیاد حدود هشت‌صد

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

مقدار تقریبی تأخیر	روش کنترل	درصد فراجهش	انتگرال خطای وزن-بر-زمان مطلق	زمان قله (ثانیه)
۲۰۰ میلی ثانیه	کنترل گر منطق فازی تطبیقی بر خط	۰	۶/۵۱۱	-
	پیشگوگر اسمیت	۰	۵/۶۹۸۷	-
	کنترل گر منطق فازی	۲۲	۴/۹۰۵۱	۰/۶۳۰۰
۶۰۰ میلی ثانیه	کنترل گر منطق فازی تطبیقی بر خط	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 بر خط	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 بر خط	۴۸	۱۷/۰۸۰۵	۲/۲۱۰۰
	پیشگوگر اسمیت	۱۱۶	۴۳/۵۸۲۵	۱/۸۰۰۰
	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.

کنترل‌گر پیشنهادی نسبت به دو کنترل‌گر دیگر بسیار کوچک‌تر است. پس نتیجه گرفته می‌شود، استفاده از روش پیشنهادی تأثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد سامانه کنترل از طریق شبکه (به خصوص 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 27<sup>th</sup> 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-dropsouts 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.

پویا حاجی 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 دکترای رشته مهندسی برق (مخابرات) در  
دانشگاه یزد هستند. وی در سال ۱۳۹۲، به عنوان دانشجوی  
پژوهش‌گر نمونه دانشگاه یزد در مقطع دکتری انتخاب شدند.



زمینه‌های علاقه‌مندی ایشان پردازش سیگنال‌های گسسته،  
سامانه‌های منطق فازی و شبکه‌های عصبی است.  
نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:  
[Hajebi@stu.yazd.ac.ir](mailto:Hajebi@stu.yazd.ac.ir)

  
سید محمد تقی المدرسی مدارک  
کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را  
بهتریب 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 دانشگاه  
مهندسی برق و کامپیوتر و معاون پژوهش و فناوری دانشگاه  
یزد می‌باشد. 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](mailto:smta@yazd.ac.ir)

فصل نهم

سال ۱۳۹۳ شماره ۲ پیاپی ۲۲

