

کنترل گر عصبی اسمیت پیش بین برای بهبود

عملکرد سامانه های کنترل از طریق شبکه

بنیامین حق نیاز جهرمی*، سید محمد تقی المدرسی و پویا حاجبی

اواژ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران



چکیده

کنترل گر اسمیت پیش بین یک راه حل مناسب در برابر چالش تأخیر تصادفی بسته های داده در سامانه های کنترل از طریق شبکه است. مدل سازی دقیق و برخط دستگاه به ویژه در حالتی که دستگاه غیرخطی است و یا دارای پارامترهای مجهول و تغییرپذیر است، می تواند عملکرد کنترلی سامانه کنترل از طریق شبکه را به مقدار قابل توجهی بهبود بخشد. در این پژوهش، کنترل گری با نام "کنترل گر عصبی اسمیت پیش بین" ارائه شده که در آن با استفاده از شبکه های عصبی پرسپترون به مدل سازی برخط دستگاه پرداخته و از یک شبکه عصبی دیگر به عنوان مرکز پردازش سیگنال کنترل گر استفاده شده است. با استفاده از کنترل گر پیشنهادی، تغییرات پارامترهای دستگاه در اثر کارکرد در طول زمان، به صورت برخط مدل سازی می شود و سیگنال کنترلی مناسب تولید می شود. نتایج شبیه سازی نشان می دهد در سامانه کنترل از طریق شبکه، در حالتی که تأخیر تصادفی شبکه و تغییرات تابع تبدیل دستگاه افزایش می یابد، استفاده از کنترل گر عصبی - اسمیت پیش بین نسبت به کنترل گر اسمیت پیش بین ساده، عملکرد بهتری دارد. به عنوان مثال وقتی که تأخیر تصادفی شبکه در بازه [۲۱-۱۹] میلی ثانیه باشد، تفاوت مقدار ITAE سامانه پیشنهادی با اسمیت پیش بین ساده برابر با ۰/۰۰۰۴ است، اما به ازای تأخیر شبکه در بازه [۹۳۰-۹۱۰] میلی ثانیه این تفاوت در حدود ۰/۰۲۷ است.

واژگان کلیدی: تأخیر تصادفی شبکه، سامانه کنترل از طریق شبکه، شبکه های عصبی، کنترل گر اسمیت پیش بین ساده، کنترل گر عصبی - اسمیت پیش بین، مدل سازی برخط.

Neural-Smith Predictor Method for Improvement of Networked Control Systems

Benyamin Haghniaz Jahromi*, S.M.T. AlModarresi & Pooya Hajebi

Department of Electrical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

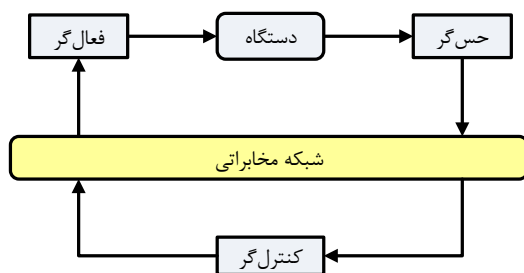
Abstract

Networked control systems (NCSs) are distributed control systems in which the nodes, including controllers, sensors, actuators, and plants are connected by a digital communication network such as the Internet. One of the most critical challenges in networked control systems is the stochastic time delay of arriving data packets in the communication network among the nodes. Using the Smith predictor as the controller is a common solution to overcome network time delay. Online and accurate modeling of the plant improves the performance of the networked control system, especially when the plant is nonlinear and has unknown parameters and time-variant behavior. In this paper, a novel controller, Neural-Smith predictor, is proposed, which firstly models plant using a perceptron neural network and secondly, another neural network is used as the core of signal processing of the controller. The parameters variation of the plant during time is considered online by the controller, and then the desired control signal is generated. The Integral of Time multiplied by the Absolut value of Error (ITAE) is a proper performance index for position control, so this index has been used to compare the results. Results of simulations show that NCS using the Neural-Smith predictor has better performance in comparison to the common Smith predictor and the novel compensation method using a modified communication disturbance observer (MCDOB) when the values of network time delay and variation of plant's transfer function are excessive. For example, while the range of stochastic time delay is between 19 and 21 ms, the difference between the

* Corresponding author

ITAE of controllers is 0.0004. This value increases to 0.027, while the range of stochastic time delay is between 910 and 930 ms.

Keywords: Networked Control Systems, Neural Networks, Neural-Smith predictor, Online System Modeling, Smith predictor, Stochastic Time Delay.



(شکل ۱-): ساختار کلی سامانه کنترل از طریق شبکه.
(Figure -1): General Structure of Networked Control System.

۲- سامانه‌های کنترل از طریق شبکه

به طور کلی همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده، سامانه‌های کنترل از طریق شبکه یک نمونه از "سامانه‌های کنترلی توزیع شده" است که در آن حس گر، فعال گر و کنترل گر توسط شبکه‌های مخابراتی دیجیتال باند-محدود به هم متصل می‌شوند [10]. گره‌های سامانه کنترل از طریق شبکه می‌تواند از لحاظ جغرافیایی در مکان‌هایی مختلف و دور از هم قرار داشته باشد. روند کلی در سامانه کنترل از طریق شبکه بدین صورت است که ابتدا خروجی دستگاه توسط حس گر اندازه‌گیری شده و از طریق شبکه مخابراتی به کنترل گر ارسال می‌شود؛ سپس سیگنال کنترلی به دست آمده از کنترل گر، از طریق شبکه مخابراتی به فعال گر می‌رسد و از طریق یک مبدل، داده‌های دیجیتال به آنالوگ تبدیل و به دستگاه اعمال می‌شود. پس از آن دوباره خروجی آنالوگ دستگاه توسط حس گر اندازه‌گیری شده و به سیگنال دیجیتال تبدیل شده و از طریق شبکه مخابراتی دیجیتال برای پردازش به کنترل گر ارسال می‌شود. سیگنال‌های دریافتی توسط کنترل گر با سیگنال مرجع مقایسه می‌شود و سیگنال خطا را می‌سازد و بر اساس آن مقدار مناسب سیگنال کنترلی را تولید می‌کند. سامانه‌های کنترل از طریق شبکه به دلیل گستردگی شبکه‌های مخابراتی نظیر اینترنت در سراسر جهان، مزایایی از قبیل کاهش هزینه نصب و نگهداری، کنترل همزمان چند دستگاه از یک مکان و سهولت در گسترش پذیری سامانه را به همراه دارد [3].

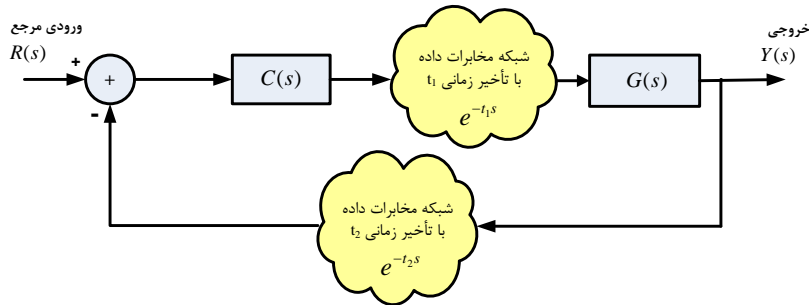
سامانه‌های کنترل از طریق شبکه، کاربردهای فراوانی در حوزه‌های پزشکی، صنعتی و علوم فضایی پیدا کرده است. از جمله کاربردهای این‌گونه سامانه‌های کنترلی،

۱- مقدمه

به طور کلی سامانه کنترل از طریق شبکه، یک سامانه کنترلی شامل حس گر، فعال گر، کنترل گر و دستگاه است که در آن ارتباط بین گره‌های سامانه از طریق شبکه‌های مخابراتی مانند اینترنت، صورت می‌گیرد [7,13]. شمای کلی یک سامانه کنترل از طریق شبکه در شکل (۱) نشان داده شده است. به علت وجود شبکه مخابراتی برای ارتباط بین گره‌های سامانه کنترل از طریق شبکه، تحلیل و طراحی این سامانه‌ها دارای مشکلات و پیچیدگی‌های خاصی است. دو چالش مهم در این سامانه‌ها، تأخیر زمانی تصادفی و از دست رفتن بسته‌های داده در شبکه است [8]. این چالش‌ها باعث کاهش عملکرد کنترلی سامانه شده و می‌تواند باعث ناپایداری سامانه کنترلی شود [6].

یکی از روش‌های کم کردن اثر تأخیر در سامانه‌های کنترلی استفاده از کنترل گر اسمیت پیش‌بین است. دانستن مدل دستگاه در ساختار کنترل گر اسمیت پیش‌بین، نقشی حیاتی دارد. در پژوهش‌های انجام شده تا کنون در سامانه کنترل از طریق شبکه، در رابطه با کنترل گر اسمیت پیش‌بین، به شناسایی مدل دستگاه و تأثیر آن بر عملکرد سامانه توجه نشده است. مدل‌سازی دقیق دستگاه به‌ویژه در حالتی که دستگاه غیرخطی است و یا دارای پارامترهای مجهول است، می‌تواند عملکرد کنترلی سامانه کنترل از طریق شبکه را به مقدار قابل توجهی بهبود بخشد. در این مقاله با استفاده از شبکه‌های عصبی پرسپترون به مدل‌سازی دستگاه و بهبود عملکرد کنترلی سامانه کنترل از طریق شبکه پرداخته شده است. همچنین در ساختار کنترل گر پیشنهادی از یک شبکه عصبی پرسپترون دیگر به‌عنوان مرکز پردازش کنترل گر استفاده شده است که این موضوع نیز باعث بهبود عملکرد سامانه کنترل از طریق شبکه می‌شود. در ادامه، در بخش ۲ مفهوم سامانه‌های کنترل از طریق شبکه و چالش‌های آن توضیح داده خواهد شد. کنترل گر پیشنهادی با نام "کنترل گر عصبی اسمیت پیش‌بین" در بخش ۳ توضیح داده می‌شود. در بخش ۴ روش کنترلی پیشنهادی به‌منظور کنترل وضعیت یک سروموتور AC شبیه‌سازی شده و نتایج آن نمایش داده می‌شود. بخش ۵، شامل نتیجه‌گیری خواهد بود.

سامانه کنترل خودکار بزرگراه، کنترل وسایل نقلیه بدون سرنشین و انجام عمل جراحی از راه دور را می توان نام برد [9]. وجود شبکه مخابراتی و پدیده های تصادفی آن، باعث چالش هایی مانند تأخیر تصادفی، گم شدن بسته های داده و امنیت داده ها می شود. از لحظه نمونه برداری سیگنال خروجی دستگاه توسط حس گر تا لحظه اعمال سیگنال کنترلی توسط فعال گر، تأخیرهای گوناگونی رخ می دهد. این تأخیرها شامل تأخیر شبکه مخابراتی و تأخیر پردازش است. تأخیر شبکه شامل تأخیر دست یابی به شبکه (مدت زمانی که طول می کشد تا اجازه دست یابی به شبکه حاصل شود) و تأخیر انتشار سیگنال در شبکه (مدت زمانی که طول می کشد تا سیگنال از کانال مخابراتی عبور کند) است. تأخیر شبکه به ویژگی های تصادفی شبکه مانند پروتکل شبکه، ترافیک شبکه، تعداد گره های شبکه و سیاست مسیریابی شبکه در مسیریاب ها بستگی دارد [11]. تأخیر



(شکل-۲): ساختار کلی سامانه کنترل از طریق شبکه با در نظر گرفتن چالش تأخیر تصادفی شبکه.
(Figure-2): Networked Control Systems Taking the Stochastic Delay Challenge into Account

۳- کنترل گر عصبی اسمیت پیش بین

ساختار سامانه کنترل از طریق شبکه در شکل (۲) نشان داده شده است. t_1 تأخیر شبکه در مسیر کنترل گر تا دستگاه و t_2 تأخیر شبکه در مسیر دستگاه تا کنترل گر است. در شکل (۲) برای سادگی از نمایش حس گر و فعال گر صرف نظر شده است. $C(s)$ تابع تبدیل کنترل گر، $G(s)$ تابع تبدیل دستگاه، $R(s)$ تبدیل لاپلاس سیگنال مرجع و $Y(s)$ تبدیل لاپلاس سیگنال خروجی دستگاه است. تابع تبدیل حلقه بسته شکل (۲) در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)e^{-t_1s}}{1+C(s)G(s)e^{-(t_1+t_2)s}} \quad (1)$$

حال اگر ساختار کنترل گر $C(s)$ به صورت کنترل گر اسمیت پیش بین مطابق شکل (۳) تغییر کند، تابع تبدیل حلقه بسته به صورت رابطه (۲) تغییر می یابد. در شکل (۳)، $Z(s)$ تخمینی از تابع تبدیل دستگاه، t_m پارامتر اسمیت و $E(s)$ سیگنال خطا است. از سیگنال خطا برای تولید سیگنال کنترلی مناسب توسط تابع تبدیل $C(s)$ استفاده می شود.

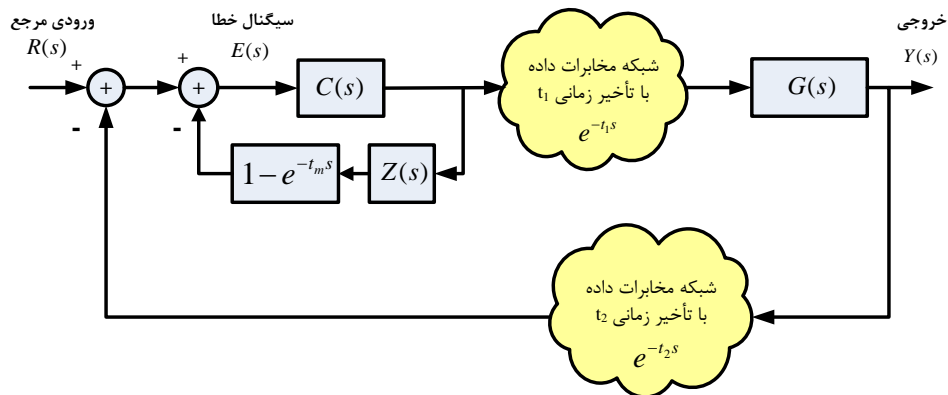
اگر تخمین دقیقی از تابع تبدیل دستگاه در دست باشد $Z(s)=G(s)$ و مقدار پارامتر اسمیت نیز برابر با مجموع تأخیر مسیر رفت و برگشت سیگنال باشد $(t_m = t_1+t_2)$ ، تابع تبدیل حلقه بسته سامانه به صورت رابطه (۳) ساده می شود.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)e^{-t_1s}}{1+G(s)C(s)} \quad (3)$$

همان طور که در رابطه (۳) مشاهده می شود، اثر تأخیر مسیر برگشت سیگنال بر عملکرد سامانه کنترل از طریق شبکه به طور کامل حذف شده است؛ بنابراین برای بهبود عملکرد سامانه کنترل از طریق شبکه با استفاده از کنترل گر اسمیت پیش بین ساده، باید تخمینی به نسبت دقیق و برخط از تابع تبدیل دستگاه به دست آید. همچنین چون در سامانه کنترل از طریق شبکه تأخیر شبکه متغیر است، بنابراین باید مقدار t_m نیز به صورت برخط تخمین زده شده و مطابق با

عصبی RBF, FRBF ترکیب شده و در آن سعی شده است که در حضور گم شدن بسته‌های اطلاعاتی، پایداری سامانه حفظ شود؛ اما در این مقاله به علت استفاده از ساختار اسمیت پیش‌بین نیازمند به تخمین تأخیر هستیم تا در واقعیت قابل استفاده باشد.

تأخیر شبکه تغییر کند. علاوه بر این برای بهبود بیشتر سامانه کنترل از طریق شبکه با استفاده از کنترل گر اسمیت پیش‌بین، باید تابع تبدیل $C(s)$ نیز به طور مناسب طراحی شود. برای رسیدن به این اهداف، ساختار کنترل گر عصبی اسمیت پیش‌بین مطابق شکل (۴) پیشنهاد می‌شود. در [1]، [2] ساختار اسمیت پیش‌بین با شبکه‌های



(شکل-۳): ساختار سامانه کنترل از طریق شبکه با در نظر گرفتن کنترل گر اسمیت پیش‌بین.
(Figure-3): Networked Control Systems using Smith Predictor Controller

شبکه‌های عصبی ابزار خوبی برای تطبیق مدل دستگاه در کنترل گر اسمیت پیش‌بین است. در ادامه، جزئیات طراحی کنترل گر پیشنهادی بررسی می‌شود. این کنترل گر به منظور کنترل وضعیت یک سروموتور AC ۴۰۰ وات با تابع تبدیل $G(s)$ به کار رفته است. تابع تبدیل $G(s)$ در رابطه (۴) نشان داده شده است. معادلات حالت زمان پیوسته دستگاه نیز در رابطه (۵) نشان داده شده است.

در شکل (۴)، در ساختار کنترل گر پیشنهادی، NN_C یک شبکه عصبی پرسپترون است که عملکردی مانند یک کنترل گر تناسبی- انتگرالی دارد. NN_P نیز یک شبکه عصبی پرسپترون دیگر است که دستگاه تحت کنترل را مدل سازی می‌کند.

مزیت‌های استفاده از کنترل گر عصبی اسمیت پیش‌بین در سامانه کنترل از طریق شبکه را می‌توان بدین گونه بیان کرد:
۱- به علت استفاده از شبکه عصبی NN_P در شناسایی مدل دستگاه، نیازی به دانستن مدل دقیق ریاضی دستگاه نیست.

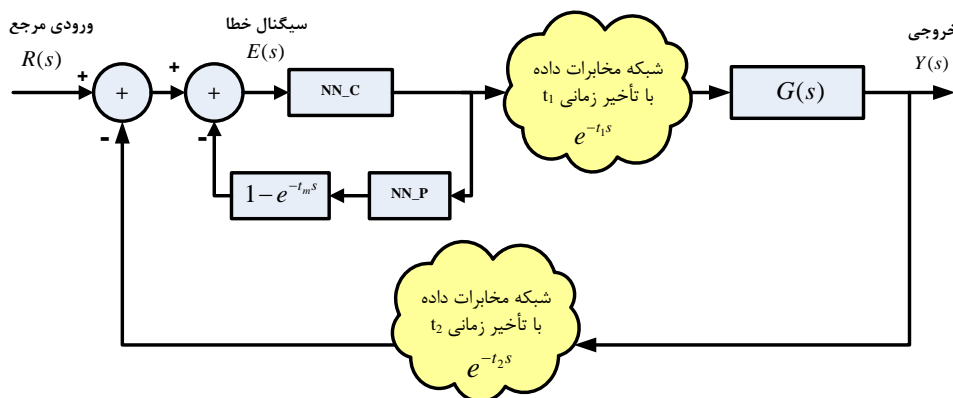
۲- به علت استفاده از شبکه عصبی NN_C در قسمت کنترل گر، کنترل فرآیندهای غیرخطی امکان پذیر می‌باشد.

۳- از آنجا که استفاده از دستگاه در طول زمان باعث تغییر پارامترهای تابع تبدیل آن می‌شود،

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

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -190 & -78.125 & 0 \\ 128 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 2048 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (5)$$

$$y = [0 \quad 22.13 \quad 1228.7] x$$



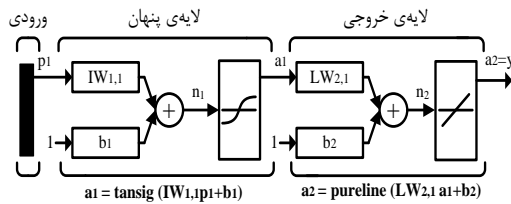
(شکل-۴): ساختار پیشنهادی سامانه کنترل از طریق شبکه با استفاده از کنترل گر عصبی- اسمیت پیش‌بین
(Figure-4): The Proposed Structure of Networked Control System using Neural-Smith Predictor

حال با اعمال سیگنال PRBS به دستگاه، خروجی دستگاه به دست می آید؛ سپس شبکه عصبی پرسپترون دو لایه NN_P با ساختار ۱-۱۶۵-۶ طراحی می شود. ورودی و خروجی شبکه عصبی NN_P در رابطه های (۷) و (۸) نشان داده شده است.

$$\text{input_NN_P} = [u(t-1) \ u(t-2) \ u(t-3) \ y(t-1) \ y(t-2) \ y(t-3)]^T \quad (7)$$

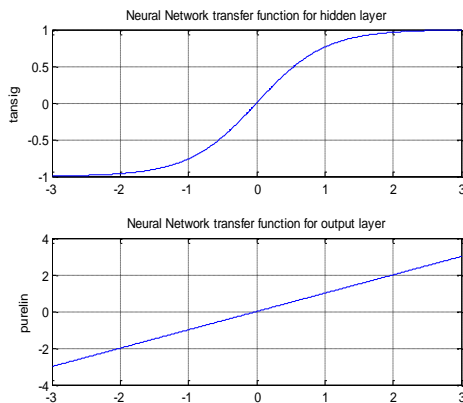
$$\text{target_NN_P} = [y(t)] \quad (8)$$

درواقع علت انتخاب ساختار ماتریس input_NN_P و target_NN_P در رابطه های (۷) و (۸)، این است که شبکه عصبی باید رفتار یک دستگاه با مرتبه سه را مدل کند. تابع انتقال شبکه عصبی NN_P در لایه مخفی تانژانت هایپربولیک و در لایه خروجی تابع خطی است. ساختار شبکه عصبی NN_P در شکل (۶) نشان داده شده است.



(شکل-۶): ساختار شبکه عصبی NN_P.
(Figure-6): The Structure of Neural Network NN_P.

توابع انتقال شبکه عصبی NN_P در شکل (۷) نشان داده شده است. تابع انتقال تانژانت هایپربولیک و خطی در روابط (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.



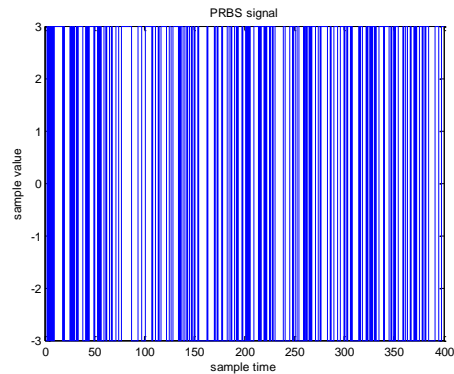
(شکل-۷): توابع انتقال شبکه عصبی NN_P.
(Figure-7): The Transfer Functions of Neural Network NN_P.

$$\tan \operatorname{sig}(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (9)$$

$$\operatorname{purelin}(x) = x \quad (10)$$

۱-۳- مدل سازی تابع تبدیل و تغییرات دستگاه

اگر ساختار تابع تبدیل معلوم نباشد، باید به نحو مناسبی این ساختار به دست آید. نخستین روش استفاده از ساختار رگرسیون خطی است. اگر مدل به دست آمده دقت مورد نیاز را نداشته باشد، از ساختارهای غیرخطی و قدرتمند معروفی مانند شبکه های عصبی استفاده می شود [5]. در مرحله مدل سازی نیاز به تعدادی داده ورودی-خروجی است و برای این که حالت های مختلف دستگاه به خوبی تحریک شوند، از سیگنالی استفاده می شود که دارای طیف فرکانسی گسترده ای است. در واقع باید از سیگنالی استفاده شود که عملکرد دستگاه را در حالت گذرا و دائم نشان دهد. نوفه سفید یکی از سیگنال هایی است که چنین ویژگی ای را دارد؛ اما در این بخش از سیگنال معروف دیگری با نام سیگنال باینری شبه تصادفی مطابق شکل (۵) استفاده شده است. علل استفاده از سیگنال باینری شبه تصادفی عبارت است از: قابلیت پیاده سازی و عملی تر آن نسبت به نوفه سفید؛ قابلیت ذخیره سازی در رایانه؛ سادگی محاسبات.



(شکل-۵): سیگنال PRBS به منظور شناسایی مدل دستگاه.
(Figure-5): The PRBS Signal to Identify the Plant Model

در شکل (۵) تعداد چهارصد نمونه از سیگنال PRBS نمایش داده شده اما در شبیه سازی ها برای رسیدن به دقت کافی در شناسایی مدل دستگاه، از چهارهزار نمونه سیگنال PRBS استفاده شده است. در حالت نظری از نوفه سفید با دامنه ای در محدوده (۳ و -۳) استفاده می شود، به همین دلیل دامنه سیگنال PRBS نیز در محدوده (۳ و -۳) انتخاب شده است.

برای اعمال سیگنال PRBS به دستگاه، ابتدا دستگاه با فرکانس صد هرتز گسسته سازی شده و معادلات حالت دستگاه به صورت رابطه (۶) درمی آید.

$$x[k+1] = \begin{bmatrix} 0.0066 & -0.2973 & 0 \\ 0.4870 & 0.7295 & 0 \\ 0.0035 & 0.0089 & 1 \end{bmatrix} x[k] + \begin{bmatrix} 7.7924 \\ 7.0909 \\ 0.0277 \end{bmatrix} u[k] \quad (6)$$

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

اهمیت استفاده از شبکه عصبی و مدل سازی دستگاه زمانی مشخص می شود که تابع تبدیل دستگاه بر اثر کارکرد در طول زمان تغییر کند. برای بررسی این موضوع تابع تبدیل سروموتور به صورت رابطه (۱۱) مدل سازی می شود.

$$G(s) = \frac{10^4(0.058s+3.221)}{(s+\alpha)(0.0001s^2+0.019s+1)} \quad (11)$$

در واقع برای نشان دادن تغییر تابع تبدیل دستگاه در طول زمان، مخرج رابطه (۱۱) به جای s به صورت $s+\alpha$ نوشته شده است، بدین معنا که در طول زمان بر اثر کارکردن دستگاه، قطب های تابع تبدیل موتور تغییر مکان می دهند؛ همچنین در این مقاله برای این که عملکرد سامانه با شاخصی عددی ارزیابی شود، از معیار "انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطا" مطابق رابطه (۱۲) استفاده شده است.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) سیگنال $e(t)$ اختلاف بین سیگنال خروجی دستگاه و سیگنال مرجع است.

۲-۳- مرکز پردازش کنترل گر عصبی اسمیت

شبکه عصبی NN_C بخش مرکزی کنترل گر عصبی اسمیت را تشکیل می دهد. این شبکه عصبی مانند یک کنترل گر تناسبی انتگرالی عمل می کند. در سامانه کنترل از طریق شبکه در حالتی که تأخیر شبکه در هر دو مسیر رفت و برگشت سیگنال برابر صفر باشد، برای کنترل سروموتور با معادله (۴) از یک کنترل گر تناسبی انتگرالی با ضریب انتگرالی $K_i=0/00000001$ و ضریب تناسبی $K_p=0/0001$ استفاده می شود [4]. شبکه عصبی پرسپترون NN_C با ساختار ۱-۵-۲ عملکرد کنترل گر تناسبی انتگرالی مورد نظر را دارد. ورودی شبکه عصبی NN_C، ماتریس $input_NN_C=[E(k) \ E(k-1)]^T$ و خروجی آن سیگنال کنترلی است. سیگنال $E(s)$ در شکل (۴) نشان داده شده و در واقع سیگنال ورودی بخش مرکزی کنترل گر است. توابع انتقال شبکه عصبی NN_C مانند شبکه عصبی NN_P است. در هر دو شبکه عصبی از قانون پس انتشار خطای Levenberg-Marquardt برای آموزش شبکه استفاده شده است.

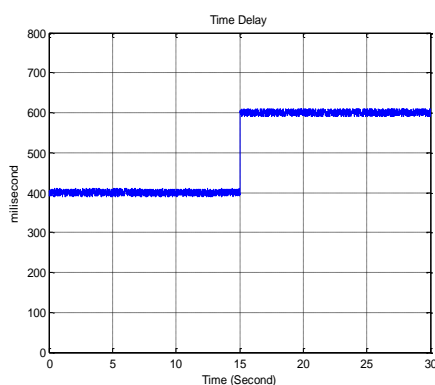
۳-۳- تخمین برخط تأخیر شبکه مخابراتی

مجموع تأخیر مسیر رفت و برگشت سیگنال در شبکه مخابراتی، (t_1+t_2) ، باید به صورت برخط تخمین زده شود و سپس پارامتر اسمیت (t_m) در ساختار کنترل گر پیشنهادی

برابر با این مقدار در نظر گرفته شود تا به صورت برخط و متناسب با شرایط شبکه تغییر کند. برای دستیابی به این هدف، از روش پیشنهادی در [4] استفاده شده است. در این روش در ابتدای هر بازه نمونه برداری، زمان ارسال داده به وسیله گره حسگر و زمان دریافت داده به وسیله گره فعال گر در لایه کاربرد محاسبه و بر این اساس مقدار کل تأخیر شبکه به صورت برخط در هر بار ارسال داده محاسبه می شود. الگوریتم پیشنهادی تخمین تأخیر در شکل های (۸) و (۹) مقاله [4] آورده شده است. در این مقاله فرض شده است که خطای تخمین تأخیر وجود ندارد.

۴- نتایج شبیه سازی

به منظور بررسی عملکرد سامانه کنترل از طریق شبکه در حالت استفاده از کنترل گر عصبی اسمیت پیش بین، وضعیتی در نظر گرفته شده است که تأخیر شبکه مطابق شکل (۸) بین ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی ثانیه تغییر کند. در شکل (۸) فرض شده از لحظه صفر تا ۱۵ ثانیه، تأخیر شبکه به صورت یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۳۹۰ و ۴۱۰ میلی ثانیه است و از لحظه پانزده تا ثانیه سی، تأخیر شبکه به صورت یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۵۹۰ و ۶۱۰ میلی ثانیه است. همچنین در تمام مدت این سی ثانیه، مقدار $\alpha=0$ است.

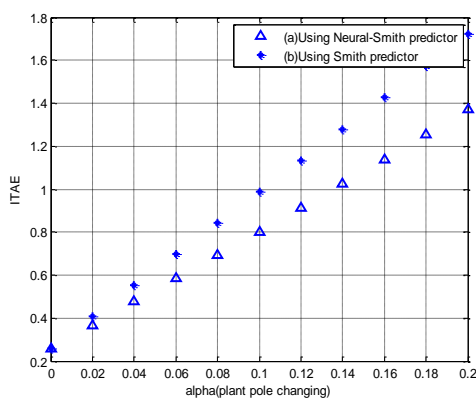


شکل (۸): شمای مجموع تأخیر تصادفی شبکه (۴۰۰-۶۰۰ میلی ثانیه)

(Figure-8) : Random Time Delay of Network in Interval of [400 - 600]ms.

سیگنال مرجع و سیگنال خروجی دستگاه در این حالت در شکل (۹) نشان داده شده است. سیگنال مرجع در شکل (۹-الف) نشان دهنده مقدار چرخش شافت سروموتور بر حسب رادیان بر ثانیه است و شکل (۹-ب) نیز سیگنال خروجی سامانه را نشان می دهد. همان طور که مشاهده

عصبی‌اسمیت پیش‌بین، مقدار ITAE برابر 0.8 است و در حالتی که از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده استفاده شود، مقدار ITAE برابر یک است. بنابراین شناسایی دستگاه با استفاده از شبکه عصبی، عملکرد کنترلی سامانه را بهبود بخشیده است. مطابق شکل (۱۱) هر چه مقدار تغییر تابع تبدیل دستگاه از مقدار اولیه آن بیشتر باشد، تأثیر کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین بر بهبود عملکرد کنترلی سامانه بیشتر می‌شود. به‌عنوان نمونه در شکل (۱۱) در حالتی که α برابر 0.2 باشد، تفاوت معیار ITAE بین دو حالت برابر 0.35 است و در حالتی که α برابر 0.02 باشد تفاوت معیار ITAE بین دو حالت، برابر با 0.77 است؛ بنابراین هرچه قدر تغییرات تابع تبدیل بیشتر باشد، تأثیر بهبود عملکرد سامانه به‌ازای استفاده از کنترل‌گر پیشنهادی بیشتر نمایان می‌شود.

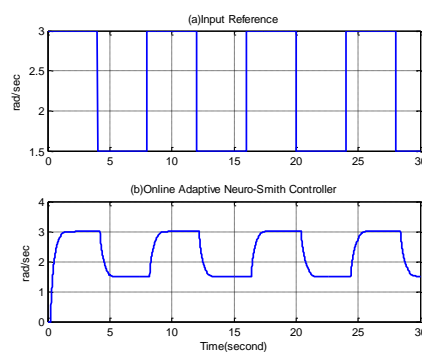


(شکل-۱۱): مقایسه معیار ITAE به‌ازای تغییر تابع تبدیل دستگاه. الف) با استفاده از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین. ب) با استفاده از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده.

(Figure-11): Comparison of ITAE according to Changing Transfer Function of Plant. a) Using Neural-Smith Predictor. b) Using Classic Smith Predictor.

جدول (۱) به‌منظور بررسی بیشتر تأثیر کنترل‌گر عصبی-اسمیت پیش‌بین در تأخیرهای زمانی مختلف شبکه بر عملکرد کنترلی سامانه تهیه شده است. جدول (۱) به‌ازای α برابر با 0.2 شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود در تمامی تأخیرهای مورد بررسی، معیار ITAE سامانه، در حالتی که از ساختار کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین استفاده شود، مقدار کمتری دارد. به‌عنوان مثال وقتی تأخیر شبکه دارای توزیع یکنواخت در بازه $[730-710]$ میلی‌ثانیه باشد، معیار ITAE به‌ازای استفاده از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین برابر با 0.7573 است و در حالت استفاده از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین، معیار ITAE برابر با 1.076 است. تأثیر استفاده

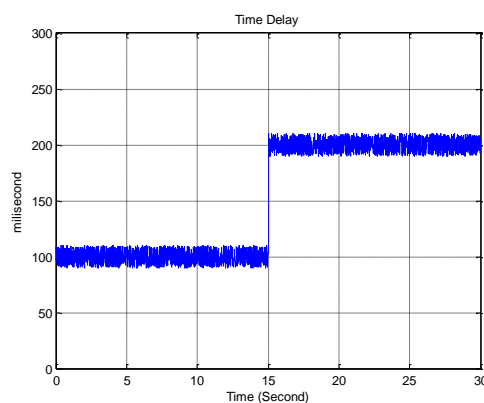
می‌شود، دستگاه با وجود تأخیر زیاد و تصادفی شبکه توانسته است به‌خوبی سیگنال مرجع را دنبال کند.



(شکل-۹): نتیجه شبیه‌سازی سامانه کنترل از طریق شبکه با استفاده از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین به‌ازای تأخیر 400 - 600 میلی‌ثانیه و $\alpha=0$ (الف) سیگنال مرجع. ب) سیگنال خروجی دستگاه به‌ازای استفاده از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین.

(Figure-9): Simulation Results of NCS using Neural-Smith Predictor for Stochastic Delay in Interval of [400-600] ms and $\alpha=0$. a) Reference Signal, b) Output Signal of Plant using Proposed Controller.

حال وضعیتی را در نظر بگیرید که تأخیر شبکه به‌صورت شکل (۱۰) بین 100 تا 200 میلی‌ثانیه تغییر می‌کند.

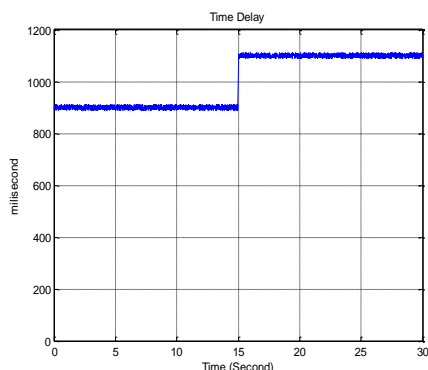


(شکل-۱۰): شمای مجموع تأخیر تصادفی شبکه ($100-200$ میلی‌ثانیه).

(Figure-10): Random Time Delay of Network in Interval of [100 - 200]ms

از آن‌جا که ساختار کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین به تابع تبدیل دستگاه وابسته است، دانستن مدل دستگاه در هر لحظه، در عملکرد کنترل‌گر و سامانه تأثیرگذار است. اگر در اثر کارکرد دستگاه مقدار α در رابطه (۱۱) از مقدار صفر به مقدار 0.2 تغییر کند، عملکرد سامانه کنترل از طریق شبکه به‌ازای استفاده از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین و کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۱) وقتی که از ساختار کنترل‌گر عصبی-اسمیت پیش‌بین استفاده شود، معیار ITAE سامانه دارای مقدار کمتری است. به‌عنوان نمونه در حالتی که $\alpha=0.1$ باشد، به‌ازای استفاده از کنترل‌گر

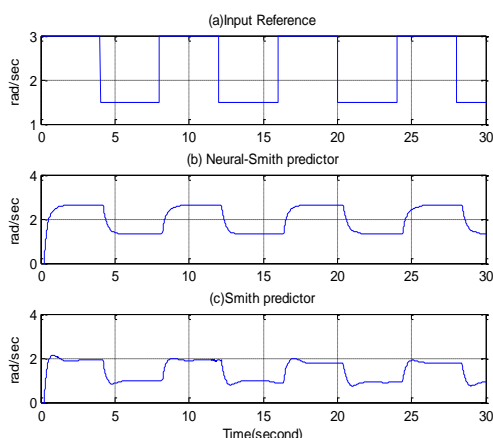
برای درک بهتر از تأثیر مدل‌سازی برخط دستگاه، حالتی در نظر گرفته می‌شود که تأخیر شبکه مطابق شکل (۱۲) در بازه [۹۰۰-۱۱۰۰] میلی‌ثانیه بوده و مقدار تغییرات تابع تبدیل دستگاه برابر با $\alpha=0.5$ باشد.



(شکل-۱۲): شمای مجموع تأخیر تصادفی شبکه (۹۰۰-۱۱۰۰ میلی‌ثانیه)

(Figure-12) : Total amount of Random Time Delay of Network in Interval of [900 - 1100]ms

در این حالت، نتایج شبیه‌سازی برای کنترل وضعیت دستگاه در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



(شکل-۱۳): نتیجه شبیه‌سازی سامانه کنترل از طریق شبکه به‌ازای تأخیر ۹۰۰-۱۱۰۰ میلی‌ثانیه و $\alpha=0.5$: الف) سیگنال مرجع؛ ب) سیگنال خروجی دستگاه به‌ازای استفاده از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین؛ ج) سیگنال خروجی دستگاه به‌ازای استفاده از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده.

(Figure-13): Simulation Results of NCS for Stochastic Delay in Interval of [1100 - 900] ms and $\alpha=0.5$. a) Reference Signal, b) Output Signal of Plant using Proposed Controller, c) Output Signal of Plant Using Classic Smith Predictor.

سیگنال مرجع در شکل (۱۳-الف) نشان داده شده که بیان‌گر سرعت چرخش شافت سروموتور بر حسب رادیان بر ثانیه است. سیگنال خروجی دستگاه باید سیگنال مرجع را دنبال کند. در شکل (۱۳-ب) سیگنال خروجی دستگاه به‌ازای استفاده از کنترل‌گر عصبی-اسمیت پیش‌بین نشان داده شده است. در شکل (۱۳-ج) نیز

از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین برای بهبود عملکرد سامانه کنترل از طریق شبکه در تأخیرهای بالای شبکه مخابراتی، بیشتر مشهود است. به‌عنوان نمونه مطابق جدول (۱) وقتی که تأخیر شبکه در بازه [۲۱-۱۹] میلی‌ثانیه باشد، تفاوت مقدار ITAE سامانه به‌ازای استفاده از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده و کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین برابر با ۰/۰۰۰۴ است؛ اما در حالتی که تأخیر شبکه مخابراتی در بازه [۹۳۰-۹۱۰] میلی‌ثانیه باشد، تفاوت ITAE برابر با ۰/۰۲۷ است؛ بنابراین استفاده از شبکه عصبی برای شناسایی برخط مدل دستگاه، باعث بهبود عملکرد سامانه کنترل از طریق شبکه با استفاده از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین شده است.

(جدول-۱): مقایسه معیار ITAE سامانه به‌ازای استفاده از

کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین و کنترل‌گر اسمیت پیش-بین ساده.

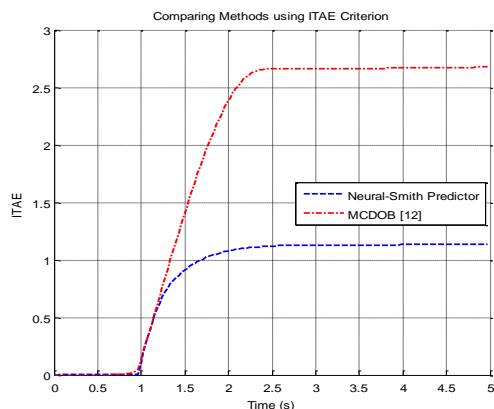
(Table-1): Comparison of ITAE in NCS Applying Neural-Smith Predictor as well as Classic Smith Predictor.

مقدار تأخیر شبکه (میلی‌ثانیه)	نوع کنترل‌گر	معیار ITAE
توزیع یکنواخت در بازه [۱۹-۲۱]	کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین	۳۲۴۶/۰
	کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده	۳۲۵۰/۰
توزیع یکنواخت در بازه [۱۱۰-۱۳۰]	کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین	۳۶۹۴/۰
	کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده	۴۱۶۸/۰
توزیع یکنواخت در بازه [۳۱۰-۳۳۰]	کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین	۴۷۹۸/۰
	کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده	۶۱۴۷/۰
توزیع یکنواخت در بازه [۵۱۰-۵۳۰]	کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین	۶۰۸۴/۰
	کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده	۸۲۷۱/۰
توزیع یکنواخت در بازه [۷۱۰-۷۳۰]	کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین	۷۵۷۳/۰
	کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده	۰۰۷۶/۱
توزیع یکنواخت در بازه [۹۱۰-۹۳۰]	کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین	۹۸۱۲/۰
	کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده	۳۴۱۵/۱

(شکل-۱۴): مقایسه کنترل وضعیت روش پیشنهادی با

MCDOB در تأخیر زمانی ۱۰۰ میلی ثانیه شبکه.

(Figure-14): Comparison of Position Control between the MCDOB [12] and the Proposed Scheme when Network Time Delay is 100 ms.



(شکل-۱۵): مقایسه روش پیشنهادی با MCDOB با استفاده از

معیار ITAE در تأخیر زمانی ۱۰۰ میلی ثانیه شبکه.

(Figure-15): Comparison of ITAE between the MCDOB [12] and the Proposed Scheme when Network Time Delay is 100 ms.

(جدول-۲): مقایسه معیار ITAE سامانه به ازای استفاده از

کنترل گر عصبی اسمیت پیش بین و MCDOB در [12] برای مدت

زمان ۵ ثانیه و تأخیر ۱۰۰ میلی ثانیه ناشی از شبکه.

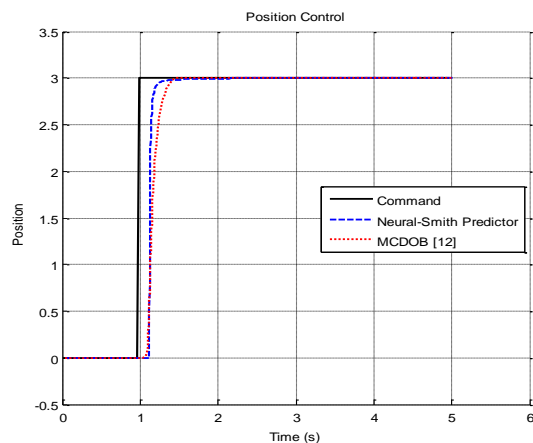
(Table-2): Comparison of ITAE between the MCDOB [12] and the Proposed Scheme when the Network Time Delay and the Duration of Simulation are 100 ms and 5 seconds, respectively.

بدون MCDOB [12]	با MCDOB [12]	روش پیشنهادی ارائه شده	مقایسه روشها
نوسانی	۲/۶۷۶۹	۱/۱۳۶۰	ITAE

۵- نتیجه گیری

در سامانه کنترل از طریق شبکه، ارتباط بین اجزای سامانه با استفاده از شبکه های مخابراتی صورت می گیرد. برای از بین بردن اثر تأخیر تصادفی شبکه بر عملکرد سامانه، به طور معمول از کنترل گر اسمیت پیش بین استفاده می شود. مدل سازی دستگاه یک عامل تأثیرگذار در عملکرد کنترل گر اسمیت پیش بین است. در این مقاله کنترل گری با نام "کنترل گر عصبی اسمیت پیش بین" ارائه شده که در آن با استفاده از دو شبکه عصبی پرسپترون به مدل سازی دستگاه و پردازش سیگنال کنترلی پراخته شده و باعث بهبود عملکرد کنترلی سامانه شده است. در ساختار کنترل گر پیشنهادی، تغییرات تابع تبدیل دستگاه به صورت برخط در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که کنترل گر عصبی اسمیت پیش بین در حالتی که تأخیر

سیگنال خروجی دستگاه به ازای استفاده از کنترل گر اسمیت پیش بین ساده، نشان داده شده است. همان طور که از شکل (۱۳) مشخص است، در حالتی که از کنترل گر اسمیت پیش بین ساده استفاده می شود، خروجی سامانه دارای فراجهش، نوسانات و خطای حالت دائم است؛ اما در حالتی که از کنترل گر عصبی اسمیت پیش بین استفاده می شود، در خروجی سامانه هیچ گونه فراجهش، نوسانات و خطای حالت دائمی دیده نمی شود و خروجی سامانه با دقت بالایی سیگنال مرجع را دنبال می کند. در [12] روشی برای مقابله با تأخیر در شبکه های کنترل از طریق شبکه ارائه شده است که تا حدی به مسأله کاهش مصرف انرژی هم پرداخته شده ولی در عین حال تأخیرهای تصادفی در هر دو مسیر رفت و برگشت ثابت در نظر گرفته شده اند که در عمل این چنین نیست. بیشینه تأخیرهای تصادفی برای هر مسیر رفت و برگشت در این مقاله پنجاه میلی ثانیه (به طور مجموع صد میلی ثانیه) در نظر گرفته شده و همچنین در [12] با فرض داشتن پهنای باند کافی، پدیده ازدست رفتن بسته در نظر گرفته نشده است. در این مقاله فرض فرکانس بالا تخمین تابع انتقال دستگاه برای استفاده در ساختار کنترل گر به طور کامل ایده آل و برابر با خود تابع انتقال واقعی دستگاه در نظر گرفته شده است. بر این اساس روش مقاله [12] را با روش پیشنهادی ارائه شده خودمان در این مقاله بررسی کردیم که نتایج مقادیر ITAE در جدول (۲) برای تأخیر مجموع صد میلی ثانیه محاسبه شده است. در شکل های (۱۴) و (۱۵) نیز به ترتیب مقایسه نمودارهای پاسخ به پله واحد و مقادیر ITAE لحظه ای ترسیم شده است. همان گونه که از نتایج عددی و نمودارها مشخص است، روش پیشنهادی این مقاله نسبت به روش ارائه شده در [12]، توانسته در مقابل تأخیرهای ناشی از شبکه بهتر مقاومت کند و مقدار ITAE کمتری هم دارد.



- [8] Z. Xian-Ming, H. Qing-Long, Y. Xinghuo, "Survey on Recent Advances in Networked Control Systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, 2016, pp. 1740-1752.
- [9] H.-C. Yi, H.-W. Kim, J.-Y. Choi, "Design of Networked Control System with Discrete-time State Predictor over WSN," *Journal of Advances in Computer Networks*, vol. 2, no. 2, 2014, pp. 106-109.
- [10] K.-E. You, L.-H. Xie, "Survey of Recent Progress in Networked Control Systems," *Acta Automatica Sinica*, vol. 39, no. 2, 2013, pp. 101-117.
- [11] L. Zhang, H. Gao, O. Kaynak, "Network-induced Constraints in Networked Control Systems—A Survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, 2013, pp. 403-416.
- [12] T. Yamanaka, K. Yamada, R. Hotchi and R. Kubo, "Simultaneous Time-Delay and Data-Loss Compensation for Networked Control Systems With Energy-Efficient Network Interfaces," in *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 110082-110092.

[۱۳] حاجبی پویا، المدرسی سید محمد تقی، "بهبود عملکرد سامانه‌های کنترل از طریق شبکه با استفاده از چرخش در قوانین کنترلگر منطق فازی"، پردازش علائم و داده‌ها، شماره ۱۱ (۲)، صفحات ۳۱-۴۲، ۱۳۹۳.

- [13] P. Hajebi, S.M.T. AlModarresi, "Improvement of Networked Control Systems Performance Using Rotation in Fuzzy Logic Controller Rules." *Journal of Signal and Data Processing (JSDP)*, vol. 11, no. 2, 2015, pp. 31-42.



بنیامین حق‌نیاز جهرمی مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را به‌ترتیب در رشته مهندسی برق (الکترونیک) و رشته مهندسی برق (مخابرات) در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۲ از دانشگاه فنی شهید چمران کرمان و دانشگاه یزد اخذ کرده است. ایشان از سال ۱۳۹۵ تا کنون دانشجوی دکترا در رشته مهندسی برق (مخابرات) دانشگاه شیراز بوده است. زمینه‌های علاقه‌مندی ایشان پردازش آماری سیگنال، تئوری تخمین و آشکارسازی، سامانه‌های مخابرات بی‌سیم و سامانه‌های کنترل از طریق شبکه است. نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

b.haghniaz@stu.yazd.ac.ir

تصادفی شبکه و تغییرات تابع تبدیل دستگاه بیشتر باشد، نقش مؤثرتری در بهبود عملکرد سامانه دارد. به‌عنوان مثال وقتی که تأخیر شبکه مخابراتی دارای توزیع یکنواخت در بازه [۱۹-۲۱] میلی‌ثانیه باشد، تفاوت مقدار ITAE نسبت به حالتی که از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده استفاده شود، برابر با ۰/۰۰۴ است؛ اما در حالتی که تأخیر شبکه دارای توزیع یکنواخت در بازه [۹۱۰-۹۳۰] میلی‌ثانیه باشد، تفاوت ITAE برابر با ۰/۰۲۷ است. همچنین در حالتی که تغییرات قطب تابع تبدیل برابر ۰/۰۲ باشد تفاوت معیار ITAE برابر با ۰/۰۷۷ است؛ ولی در حالتی که تغییرات قطب تابع تبدیل دستگاه برابر ۰/۲ باشد، تفاوت معیار ITAE برابر ۰/۳۵ است که نشان از بهبود بیشتر عملکرد سامانه کنترلی با استفاده از کنترل‌گر عصبی- اسمیت پیش‌بین پیشنهادی است.

6- References

۶- مراجع

- [1] F. Du, W. Du, "Networked control systems with RBF neural network control and new Smith predictor," *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Xi'an, 2009, pp. 2744-2748.
- [2] W. Du, F. Du, "New Smith Predictor and FRBF Neural Network Control for Networked Control Systems," *Eighth IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science*, Shanghai, 2009, pp. 210-215.
- [3] M. Mahmoud, M. Hamdan, "Fundamental Issues in Networked Control Systems," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 5, no. 5, 2018, pp. 902-922.
- [4] C. L. Lai, P. L. Hsu, "Design the Remote Control System with the Time-delay Estimator and the Adaptive Smith Predictor," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 6, no. 1, 2010, pp. 73-80.
- [5] A. C. Meruelo, D. M. Simpson, S. M. Veres, P. L. Newland, "Improved System Identification Using Artificial Neural Networks and Analysis of Individual Differences in Responses of an Identified Neuron," *Neural Networks*, vol. 75, 2016, pp. 56-65,
- [6] Z. Tian, S. Li, Y. Wang, X. Wang, Q. Zhang, "The Time-delay Compensation Method for Networked Control System Based on Improved Fast Implicit GPC," *International Journal of Control and Automation*, vol. 9, no. 1, 2016, pp. 231-240.
- [7] F. Y. Wang, D. Liu, *Networked Control Systems: Theory and Applications*, Springer Publishing, 2008.

سید محمدتقی المدرسی مدارک

کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را به ترتیب در رشته مهندسی برق (الکترونیک) و رشته مهندسی برق (مخابرات) در سال های ۱۳۶۵ و ۱۳۶۸

از دانشگاه صنعتی اصفهان دریافت و مدرک دکترای مهندسی برق (الکترونیک- پردازش هوشمند سیگنال) خود را از دانشگاه ساوت همپتون کشور انگلستان در سال ۱۳۷۹ دریافت کرده است. دکتر المدرسی از سال ۱۳۶۹ عضو هیأت علمی دانشگاه یزد بوده و هم اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه یزد هستند. زمینه های علاقه مندی ایشان پردازش هوشمند سیگنال، شبکه های عصبی، سامانه های کنترل از طریق شبکه و شبکه های هوشمند است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

smta@yazd.ac.ir

پویا حاجبی مدرک کارشناسی در رشته

مهندسی برق (الکترونیک) و مدارک کارشناسی ارشد و دکترای خود را در رشته مهندسی برق (مخابرات) به ترتیب در سال های ۱۳۸۴، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۳ از

دانشگاه یزد دریافت کرده است. ایشان در سال ۱۳۹۲، به عنوان دانشجوی پژوهش گر نمونه دانشگاه یزد در مقطع دکتری انتخاب شدند. دکتر حاجبی در زمینه پژوهش و ساخت دستگاه های الکترونیکی مرتبط با حوزه پردازش سیگنال فعالیت دارند. زمینه های علاقه مندی ایشان پردازش سیگنال های گسسته، پردازش سیگنال های بیولوژیکی، سامانه های کنترل از طریق شبکه، سامانه های مخابرات بی سیم، منطق فازی و شبکه های عصبی است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

Hajebi@stu.yazd.ac.ir

