کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین برای بهبود عملکرد سامانه‌های کنترل از طریق شبکه

بنیامین حق نیاز جهرمی*، سید محمد تقی المدرسی و پویا حاجبی
[۱و۲و۳]دانشکدهٔ مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین یک راه‌حل مناسب در برابر چالش تأخیر تصادفی بسته‌های داده در سامانه‌های کنترل از طریق شبکه است. مدل‌سازی دقیق و برخط دستگاه به ویژه در حالتی که دستگاه غیرخطی است و یا دارای پارامترهای مجهول و تغییرپذیر است، می‌تواند عملکرد کنترلی سامانهٔ کنترل از طریق شبکه را به مقدار قابل‌توجهی بهبود بخشد. در این پژوهش، کنترل‌گری با نام"کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین" ارائه شده که در آن با استفاده از شبکه‌های عصبی پرسپترون به مدل‌سازی برخط دستگاه پرداخته و از یک شبکهٔ عصبی دیگر به‌عنوان مرکز پردازش سیگنال کنترل‌گر استفاده شده است. با استفاده از کنترل‌گر پیشنهادی، تغییرات پارامترهای دستگاه در اثر کارکرد در طول زمان، به‌صورت برخط مدل‌سازی می‌شود و سیگنال کنترلی مناسب تولید می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد در سامانهٔ کنترل از طریق شبکه، در حالتی که تأخیر تصادفی شبکه و تغییرات تابع تبدیل دستگاه افزایش می‌یابد، استفاده از کنترل‌گر عصبی- اسمیت پیش‌بین نسبت به کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده، عملکرد بهتری دارد. به‌عنوان مثال وقتی که تأخیر تصادفی شبکه در بازهٔ [۲۱-۱۹] میلی‌ثانیه باشد، تفاوت مقدار ITAE سامانهٔ پیشنهادی با اسمیت پیش‌بین ساده برابر با ۰/۰۰۰۴ است، اما به‌ازای تأخیر شبکه در بازهٔ [۹۳۰-۹۱۰] میلی‌ثانیه این تفاوت درحدود ۰/۰۲۷ است.

واژگان کلیدی: تأخیر تصادفی شبکه، سامانهٔ کنترل از طریق شبکه، شبکه‌های عصبی، کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده، کنترل‌گر عصبی- اسمیت پیش‌بین، مدل‌سازی 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
*نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات

• تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۲۳ •تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۱ •تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۳/۰۱ •نوع مطالعه: پژوهشی

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-08-23]

[DOI: 10.52547/jsdp.18.1.86]

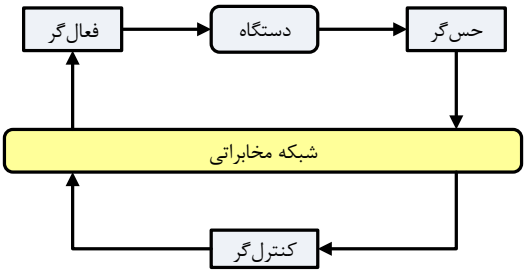
ITAE of controllers is 0.0004. This value increases to 0.027, while the range of stochastic time delay is between 910 and 930 ms.

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

۱- مقدّمه

به طور کلی سامانهٔ کنترل از طریق شبکه، یک سامانهٔ کنترلی شامل حس‌گر، فعال‌گر، کنترل‌گر و دستگاه است که در آن ارتباط بین گره‌های سامانه از طریق شبکه‌های مخابراتی مانند اینترنت، صورت می‌گیرد [7,13]. شمای کلی یک سامانهٔ کنترل از طریق شبکه در شکل (۱) نشان داده شده است. به‌علت وجود شبکهٔ مخابراتی برای ارتباط بین گره‌های سامانهٔ 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 دست‌رفتن بسته‌های داده در شبکه است [8]. این چالش‌ها باعث کاهش عملکرد کنترلی سامانه شده و می‌تواند باعث ناپایداری سامانهٔ کنترلی شود[6].

یکی از روش‌های کم‌کردن اثر تأخیر در سامانه‌های کنترلی استفاده از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین است. دانستن مدل دستگاه در ساختار کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین، نقشی حیاتی دارد. در پژوهش‌های انجام‌شده تا کنون در سامانهٔ کنترل از طریق شبکه، در رابطه با کنترل‌گر 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 سامانهٔ کنترل از طریق شبکه را به مقدار قابل‌توجهی بهبود بخشد. در این مقاله با استفاده از شبکه‌های عصبی پرسپترون به مدل‌سازی دستگاه و بهبود عملکرد کنترلی سامانهٔ کنترل از طریق شبکه پرداخته شده است. همچنین در ساختار کنترل‌گر پیشنهادی از یک شبکهٔ عصبی پرسپترون دیگر به‌عنوان مرکز پردازش کنترل‌گر استفاده شده است که این موضوع نیز باعث بهبود عملکرد سامانهٔ کنترل از طریق شبکه می‌شود. در ادامه، در بخش ۲ مفهوم سامانه‌های کنترل از طریق شبکه و چالش‌های آن توضیح داده خواهد شد. کنترل‌گر پیشنهادی با نام "کنترل‌گر عصبی‌اسمیت 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.



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

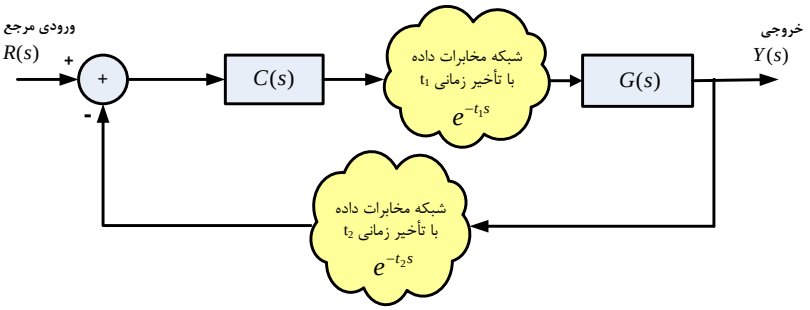
۲- سامانه‌های کنترل از طریق شبکه

به طور کلی همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده‌شده، سامانه‌های کنترل از طریق شبکه یک نمونه از "سامانه‌های کنترلی توزیع‌شده" است که در آن حس‌گر، فعال‌گر و کنترل‌گر توسط شبکه‌های مخابراتی دیجیتال باند- محدود به هم متصل می‌شوند [10]. گره‌های سامانهٔ کنترل از طریق شبکه می‌تواند از لحاظ جغرافیایی در مکان‌هایی مختلف و دور از هم قرار داشته باشد. روند کلی در سامانهٔ کنترل از طریق شبکه بدین صورت است که ابتدا خروجی دستگاه توسط حس‌گر اندازه‌گیری شده و از طریق شبکهٔ مخابراتی به کنترل‌گر ارسال می‌شود؛ سپس سیگنال کنترلی به‌دست‌آمده از کنترل‌گر، از طریق شبکهٔ مخابراتی به فعال‌گر می‌رسد و از طریق یک مبدل، داده‌های دیجیتال به آنالوگ تبدیل و به دستگاه اعمال می‌شود. پس از آن دوباره خروجی آنالوگ دستگاه توسط حس‌گر اندازه‌گیری شده و به سیگنال دیجیتال تبدیل شده و از طریق شبکهٔ مخابراتی دیجیتال برای پردازش به کنترل‌گر ارسال می‌شود. سیگنال‌های دریافتی توسط کنترل‌گر 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 به‌دلیل گستردگی شبکه‌های مخابراتی نظیر اینترنت در سراسر جهان، مزایایی از قبیل کاهش هزینهٔ نصب و نگهداری، کنترل همزمان چند دستگاه از یک مکان و سهولت در گسترش‌پذیری 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،

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-08-23]
[DOI: 10.52547/jsdp.18.1.86]

سامانهٔ کنترل خودکار بزرگراه، کنترل وسایل نقلیه بدون سرنشین و انجام عمل جراحی از راه دور را می‌توان نام برد [9]. وجود شبکهٔ مخابراتی و پدیده‌های تصادفی آن، باعث چالش‌هایی مانند تأخیر تصادفی، گم‌شدن بسته‌های داده و امنیت داده‌ها می‌شود. از لحظهٔ نمونه‌برداری سیگنال خروجی دستگاه توسط حس‌گر تا لحظهٔ اعمال سیگنال کنترلی توسط فعال‌گر، تأخیرهای گوناگونی رخ می‌دهد. این تأخیرها شامل تأخیر شبکهٔ مخابراتی و تأخیر پردازش است. تأخیر شبکه شامل تأخیر دست‌یابی به شبکه (مدت زمانی که طول می‌کشد تا اجازهٔ دست‌یابی به شبکه حاصل شود) و تأخیر انتشار سیگنال در شبکه (مدت زمانی که طول می‌کشد تا سیگنال از کانال مخابراتی عبور کند) است. تأخیر شبکه به ویژگی‌های تصادفی شبکه مانند پروتکل شبکه، ترافیک شبکه، تعداد گره‌های شبکه و سیاست مسیریابی شبکه در مسیریاب‌ها بستگی دارد [11]. تأخیر شبکهٔ مخابراتی، از نوع تأخیرهای تصادفی است. تأخیر پردازش نیز به‌علت عملیات پردازشی در کنترل‌گر به وجود می‌آید. تأخیر پردازش را می‌توان از نوع تأخیرهای ثابت در نظر گرفت. تأخیر تصادفی در عملکرد سامانهٔ کنترلی تأثیر بسزایی دارد و می‌تواند باعث کاهش عملکرد کنترلی سامانه و حتی ناپایداری سامانهٔ کنترل از طریق شبکه شود. در این مقاله به‌طور خاص چالش تأخیر تصادفی بسته‌های داده در نظر گرفته شده است. اینترنت اشیا به‌تازگی مورد اهمیت پژوهش‌گران قرار گرفته و استفاده از سامانه‌های کنترل از طریق شبکه به ابزار و وسیله‌ای برای حل مسائل این حوزه در جهت کنترل دستگاه‌ها در کنار کاهش مصرف انرژی قرار گرفته است. به همین دلیل در [12] روشی برای جبران تأخیر زمانی در سامانه‌های کنترل از طریق شبکه بر اساس مشاهده‌گر تداخل مخابراتی اصلاح شده (MCDOB) ارائه شده است.



(شکل-۲): ساختار کلی سامانهٔ 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- کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین

ساختار سامانهٔ کنترل از طریق شبکه در شکل (۲) نشان داده شده است. t_1 تأخیر شبکه در مسیر کنترل‌گر تا دستگاه و t_2 تأخیر شبکه در مسیر دستگاه تا کنترل‌گر است. در شکل (۲) برای سادگی از نمایش حس‌گر و فعال‌گر صرف نظر شده است. C(s) تابع تبدیل کنترل‌گر، 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 رابطهٔ (۱) نشان داده شده است.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)e^{-t_1 s}}{1+C(s)G(s)e^{-(t_1+t_2)s}} \qquad (۱)$$

حال اگر ساختار کنترل‌گر C(s) به‌صورت کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین مطابق شکل (۳) تغییر کند، تابع تبدیل حلقه بسته به‌صورت رابطهٔ (۲) تغییر می‌یابد. 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 می‌شود.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)e^{-t_1 s}}{1+Z(s)\,(1-e^{-t_m s})C(s)+C(s)G(s)e^{-(t_1+t_2)s}} = \frac{C(s)G(s)e^{-t_1 s}}{1+Z(s)C(s)-e^{-t_m s}C(s)Z(s)+C(s)G(s)e^{-(t_1+t_2)s}} \qquad (۲)$$

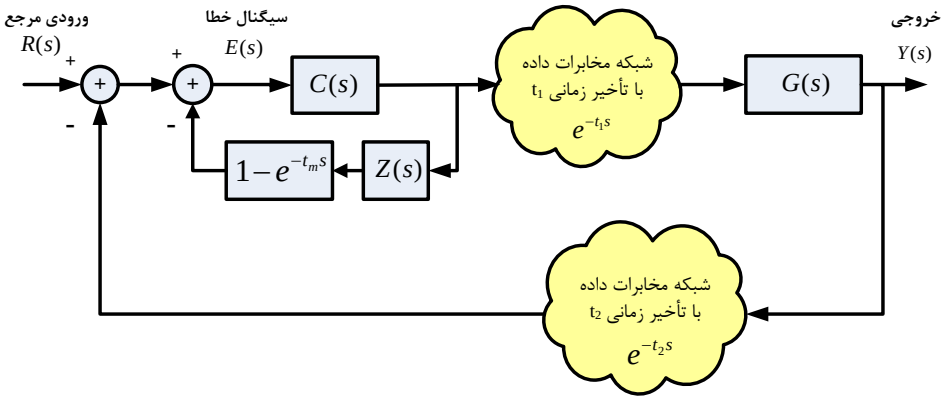
اگر تخمین دقیقی از تابع تبدیل دستگاه در دست باشد (Z(s)=G(s)) و مقدار پارامتر اسمیت نیز برابر با مجموع تأخیر مسیر رفت و برگشت سیگنال باشد ($t_m = t_1+t_2$)، تابع تبدیل حلقه بسته سامانه به‌صورت رابطهٔ (۳) ساده می‌شود.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)e^{-t_1 s}}{1+G(s)C(s)} \qquad (۳)$$

همان‌طور که در رابطهٔ (۳) مشاهده می‌شود، اثر تأخیر مسیر برگشت سیگنال بر عملکرد سامانهٔ کنترل از طریق شبکه به‌طورکامل حذف شده است؛ بنابراین برای بهبود عملکرد سامانهٔ کنترل از طریق شبکه با استفاده از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده، باید تخمینی به‌نسبه دقیق و برخط از تابع تبدیل دستگاه به دست آید. همچنین چون در سامانهٔ کنترل از طریق شبکه تأخیر شبکه متغیر است، بنابراین باید مقدار t_m نیز به صورت برخط تخمین زده شده و مطابق با

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-08-23]
[DOI: 10.52547/jsdp.18.1.86]

تأخیر شبکه تغییر کند. علاوه‌براین برای بهبود بیشتر سامانهٔ کنترل از طریق شبکه با استفاده از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین، باید تابع تبدیل C(s) نیز به طور مناسب طراحی شود. برای رسیدن به این اهداف، ساختار کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین مطابق شکل (۴) پیشنهاد می‌شود. در [1], [2] ساختار اسمیت پیش‌بین با شبکه‌های عصبیRBF, FRBF ترکیب شده و در آن سعی شده است که در حضور گم‌شدن بسته‌های اطلاعاتی، پایداری سامانه حفظ شود؛ اما در این مقاله به‌علت استفاده از ساختار اسمیت پیش‌بین نیازمند به تخمین تأخیر هستیم تا در در واقعیت قابل استفاده باشد.



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

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

مزیت‌های استفاده از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین در سامانهٔ کنترل از طریق شبکه را می‌توان بدین‌گونه بیان کرد:

۱- به‌علت استفاده از شبکهٔ عصبی NN_P در شناسایی مدل دستگاه، نیازی به دانستن مدل دقیق ریاضی دستگاه نیست.

۲- به‌علت استفاده از شبکهٔ عصبی NN_C در قسمت کنترل‌گر، کنترل فرآیندهای غیرخطی امکان‌پذیر می‌باشد.

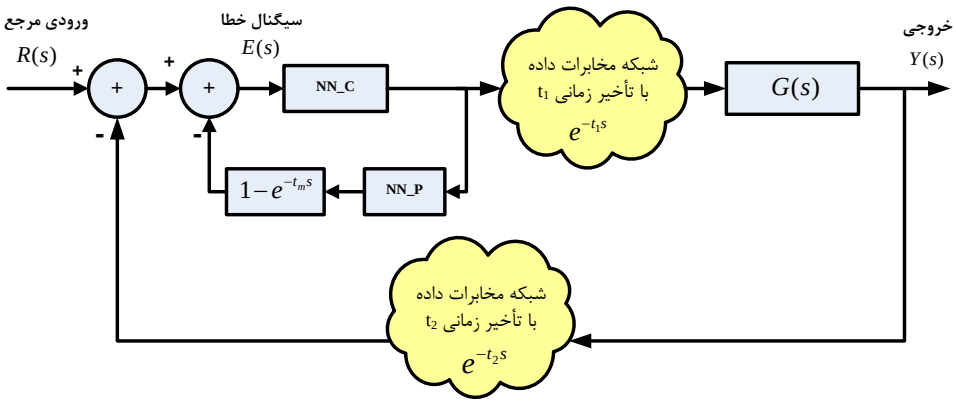
۳- از آنجا که استفاده از دستگاه در طول زمان باعث تغییر پارامترهای تابع تبدیل آن می‌شود، شبکه‌های عصبی ابزار خوبی برای تطبیق مدل دستگاه در کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین است.

در ادامه، جزئیات طراحی کنترل‌گر پیشنهادی بررسی می‌شود. این کنترل‌گر به‌منظور کنترل وضعیت یک سروموتور ۴۰۰AC وات با تابع تبدیل G(s) به کار رفته است. تابع تبدیل G(s) در رابطهٔ (۴) نشان داده شده است. معادلات حالت زمان‌پیوسته دستگاه نیز در رابطهٔ (۵) نشان داده شده است.

$$G(s)=\frac{10^4(0.058s+3.221)}{s(0.0001s^2+0.019s+1)} \qquad (۴)$$

$$\dot{x}=\begin{bmatrix}-190 & -78.125 & 0\\ 128 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\end{bmatrix}x+\begin{bmatrix}2048\\ 0\\ 0\end{bmatrix}u \qquad (۵)$$

$$y=\begin{bmatrix}0 & 22.13 & 1228.7\end{bmatrix}x$$

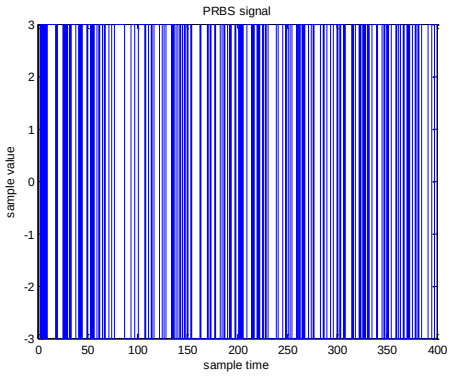


(شکل-۴): ساختار پیشنهادی سامانهٔ کنترل از طریق شبکه با استفاده از کنترل‌گر عصبی- اسمیت پیش‌بین
(Figure-4): The Proposed Structure of Networked Control System using Neural-Smith Predictor

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-08-23]
[DOI: 10.52547/jsdp.18.1.86]

۱-۳- مدل‌سازی تابع تبدیل و تغییرات دستگاه

اگر ساختار تابع تبدیل معلوم نباشد، باید به‌نحو مناسبی این ساختار به‌دست آید. نخستین روش استفاده از ساختار رگرسیون خطی است. اگر مدل به‌دست‌آمده دقت مورد نیاز را نداشته باشد، از ساختارهای غیرخطی و قدرتمند معروفی مانند شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود [5]. در مرحلهٔ مدل‌سازی نیاز به تعدادی دادهٔ ورودی-خروجی است و برای این‌که حالت‌های مختلف دستگاه به‌خوبی تحریک شوند، از سیگنالی استفاده می‌شود که دارای طیف فرکانسی گسترده‌ای است. درواقع باید از سیگنالی استفاده شود که عملکرد دستگاه را در حالت گذرا و دائم نشان دهد. نوفه سفید یکی از سیگنال‌هایی است که چنین ویژگی‌ای 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 شبه‌تصادفی عبارت است از: قابلیت پیاده‌سازی و عملی‌تر آن نسبت به نوفه سفید؛ قابلیت ذخیره‌سازی در رایانه؛ سادگی محاسبات.



(شکل-۵): سیگنال PRBS به‌منظور 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 شبیه‌سازی‌ها برای رسیدن به دقت کافی در شناسایی مدل دستگاه، از چهارهزار نمونه سیگنال PRBS استفاده شده است. در حالت نظری از نوفه سفید با دامنه‌ای در محدودهٔ (۳و۳-) استفاده می‌شود، به همین دلیل دامنهٔ سیگنال PRBS نیز در محدودهٔ (۳و۳-) انتخاب شده است.

برای اعمال سیگنال PRBS به دستگاه، ابتدا دستگاه با فرکانس صد هرتز گسسته‌سازی شده و معادلات حالت دستگاه به‌صورت رابطهٔ (۶) درمی‌آید.

$$x[k+1]=\begin{bmatrix}0.0066 & -0.2973 & 0\\ 0.4870 & 0.7295 & 0\\ 0.0035 & 0.0089 & 1\end{bmatrix}x[k]+\begin{bmatrix}7.7924\\ 7.0909\\ 0.0277\end{bmatrix}u[k] \qquad (۶)$$

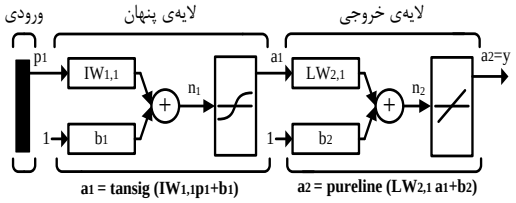
$$y[k]=\begin{bmatrix}0 & 22.13 & 1228.7\end{bmatrix}x[k]$$

حال با اعمال سیگنال PRBS به دستگاه، خروجی دستگاه به‌دست می‌آید؛ سپس شبکهٔ عصبی پرسپترون دو لایهٔ NN_P با ساختار ۱-۱۶۵-۶ طراحی می‌شود. ورودی و خروجی شبکهٔ عصبی NN_P در رابطه‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.

$$\text{input_NN_P}=[u(t-1)\ u(t-2)\ u(t-3)\ y(t-1)\ y(t-2)\ y(t-3)]^T \qquad (۷)$$

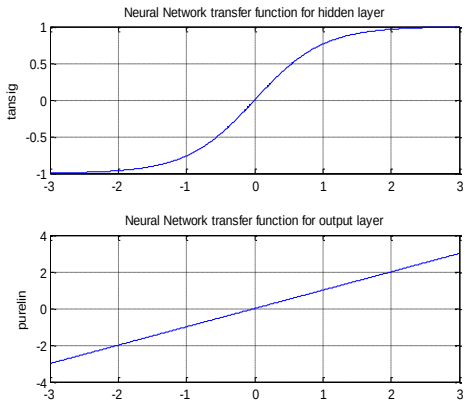
$$\text{target_NN_P}=[y(t)] \qquad (۸)$$

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



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

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

$$\tan sig(x)=\frac{2}{1+e^{-2x}}-1 \qquad (۹)$$

$$purelin(x)=x \qquad (۱۰)$$

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-08-23]
[DOI: 10.52547/jsdp.18.1.86]

اهمیت استفاده از شبکهٔ عصبی و مدل‌سازی دستگاه زمانی مشخص می‌شود که تابع تبدیل دستگاه بر اثر کارکرد در طول زمان تغییر کند. برای بررسی این موضوع تابع تبدیل سروموتور به‌صورت رابطهٔ (۱۱) مدل‌سازی می‌شود.

$$G(s) = \frac{10^4(0.058s+3.221)}{(s+\alpha)(0.0001s^2+0.019s+1)} \qquad (۱۱)$$

در واقع برای نشان‌دادن تغییر تابع تبدیل دستگاه در طول زمان، مخرج رابطهٔ (۱۱) به جای s به‌صورت s+α نوشته شده است، بدین معنا که در طول زمان بر اثر کارکردن دستگاه، قطب‌های تابع تبدیل موتور تغییر مکان می‌دهند؛ همچنین در این مقاله برای این‌که عملکرد سامانه با شاخصی عددی ارزیابی شود، از معیار "انتگرال حاصل‌ضرب زمان در قدرمطلق خطا" مطابق رابطهٔ (۱۲) استفاده شده است.

$$\mathrm{ITAE}=\int_0^{\infty} t\,|e(t)|\,dt \qquad (۱۲)$$

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

۲-۳- مرکز پردازش کنترل‌گر عصبی‌اسمیت

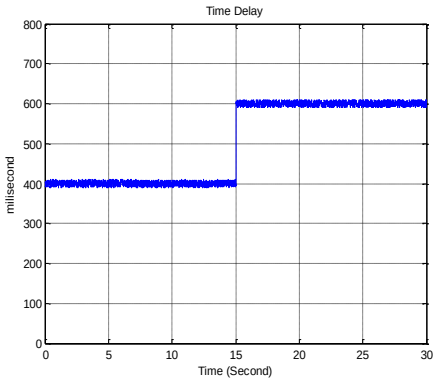
شبکهٔ عصبی NN_C بخش مرکزی کنترل‌گر عصبی‌اسمیت را تشکیل می‌دهد. این شبکهٔ عصبی مانند یک کنترل‌گر تناسبی‌انتگرالی عمل می‌کند. در سامانهٔ کنترل از طریق شبکه در حالتی که تأخیر شبکه در هر دو مسیر رفت و برگشت سیگنال برابر صفر باشد، برای کنترل سروموتور با معادلهٔ (۴) از یک کنترل‌گر تناسبی‌انتگرالی با ضریب انتگرالی Ki=۰/۰۰۰۰۰۰۰۱ و ضریب تناسبی Kp=۰/۰۰۰۱ استفاده می‌شود [4]. شبکهٔ عصبی پرسپترون NN_C با ساختار ۱-۵-۲ عملکرد کنترل‌گر تناسبی‌انتگرالی مورد نظر را دارد. ورودی شبکهٔ 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 کنترل‌گر است. توابع انتقال شبکهٔ عصبی NN_C مانند شبکهٔ عصبی NN_P است. در هر دو شبکهٔ عصبی از قانون پس‌انتشار خطای Levenberg-Marquardt برای آموزش شبکه استفاده شده است.

۳-۳- تخمین برخط تأخیر شبکه مخابراتی

مجموع تأخیر مسیر رفت و برگشت سیگنال در شبکهٔ مخابراتی، (t_1+t_2)، باید به‌صورت برخط تخمین زده شود و سپس پارامتر اسمیت (t_m) در ساختار کنترل‌گر پیشنهادی برابر با این مقدار در نظر گرفته شود تا به‌صورت 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 بازهٔ نمونه‌برداری، زمان ارسال داده به‌وسیلهٔ گرهٔ حس‌گر و زمان دریافت داده به‌وسیلهٔ گرهٔ فعال‌گر در لایهٔ کاربرد محاسبه و بر این اساس مقدار کل تأخیر شبکه به‌صورت برخط در هر بار ارسال داده محاسبه می‌شود. الگوریتم پیشنهادی تخمین تأخیر در شکل‌های (۸) و (۹) مقالهٔ [4] آورده شده است. در این مقاله فرض شده است که خطای تخمین تأخیر وجود ندارد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور بررسی عملکرد سامانهٔ کنترل از طریق شبکه در حالت استفاده از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین، وضعیتی در نظر گرفته شده است که تأخیر شبکه مطابق شکل (۸) بین ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌ثانیه تغییر کند. در شکل (۸) فرض شده از لحظهٔ صفر تا ۱۵ ثانیه، تأخیر شبکه به‌صورت یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۳۹۰ و ۴۱۰ میلی‌ثانیه است و از لحظهٔ پانزده تا ثانیهٔ سی، تأخیر شبکه به‌صورت یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۵۹۰ و ۶۱۰ میلی‌ثانیه است. همچنین در تمام مدت این سی ثانیه، مقدار α=0 است.



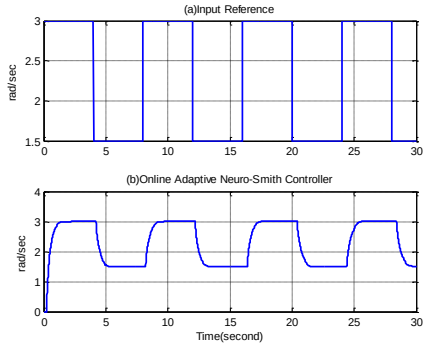
(شکل-۸): شمای مجموع تأخیر تصادفی شبکه (۴۰۰-۶۰۰ میلی‌ثانیه)

(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) نشان‌دهندهٔ مقدار چرخش شافت سروموتور بر حسب رادیان بر ثانیه است و شکل (۹- ب) نیز سیگنال خروجی سامانه را نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-08-23]
[DOI: 10.52547/jsdp.18.1.86]

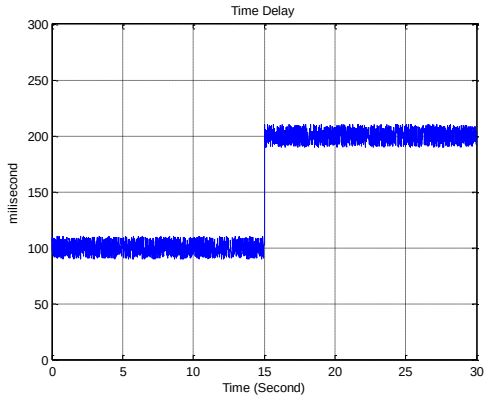
می‌شود، دستگاه با وجود تأخیر زیاد و تصادفی شبکه توانسته است به‌خوبی سیگنال مرجع را دنبال کند.



(شکل-۹): نتیجهٔ شبیه‌سازی سامانهٔ کنترل از طریق شبکه با استفاده از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین به‌ازای تأخیر۴۰۰-۶۰۰ میلی ثانیه و α=0. الف) سیگنال مرجع. ب) سیگنال خروجی دستگاه به‌ازای استفاده از کنترل گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین.

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

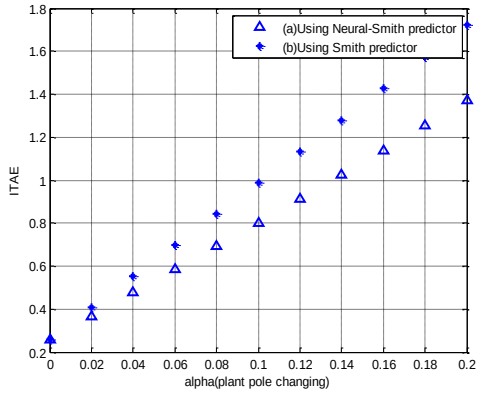
حال وضعیتی را در نظر بگیرید که تأخیر شبکه به‌صورت شکل (۱۰) بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌ثانیه تغییر می‌کند.



(شکل-۱۰): شمای مجموع تأخیر تصادفی شبکه (۱۰۰-۲۰۰ 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 رابطهٔ (۱۱) از مقدار صفر به مقدار ۰/۲ تغییر کند، عملکرد سامانهٔ کنترل از طریق شبکه به‌ازای استفاده از کنترل گر 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 α=0.1 باشد، به‌ازای استفاده از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین، مقدار ITAE برابر ۰/۸ است و در حالتی که از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده استفاده شود، مقدار ITAE برابر یک است. بنابراین شناسایی دستگاه با استفاده از شبکهٔ 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 ۰/۲ باشد، تفاوت معیار ITAE بین دو حالت برابر ۰/۳۵ است و در حالتی که α برابر ۰/۰۲ باشد تفاوت معیار ITAE بین دو حالت، برابر با ۰/۰۷۷ است؛ بنابراین هرچقدر تغییرات تابع تبدیل بیشتر باشد، تأثیر بهبود عملکرد سامانه به‌ازای استفاده از کنترل‌گر پیشنهادی بیشتر نمایان می‌شود.



(شکل -۱۱): مقایسهٔ 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 Tansfer 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 ۰/۰۲ 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. به عنوان مثال وقتی تأخیر شبکه دارای توزیع یکنواخت در بازهٔ [۷۳۰-۷۱۰] میلی‌ثانیه باشد، معیار ITAE به‌ازای استفاده از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین برابر با ۰/۷۵۷۳ است و در حالت استفاده از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین، معیار ITAE برابر با ۱/۰۰۷۶ است. تأثیر استفاده

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-08-23]
[DOI: 10.52547/jsdp.18.1.86]

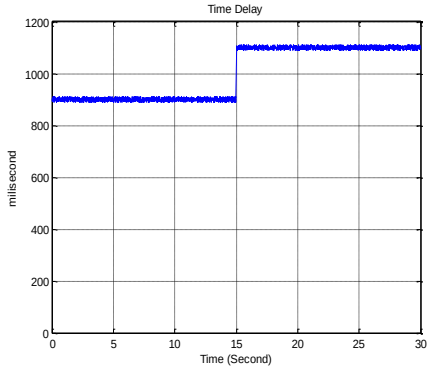
از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین برای بهبود عملکرد سامانهٔ کنترل از طریق شبکه در تأخیرهای بالای شبکهٔ مخابراتی، بیشتر مشهود است. به‌عنوان نمونه مطابق جدول (۱) وقتی که تأخیر شبکه در بازهٔ [۲۱-۱۹] میلی‌ثانیه باشد، تفاوت مقدار ITAE سامانه به‌ازای استفاده از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده و کنترل گر عصبی‌اسمیت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

(جدول-۱): مقایسهٔ 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 بازهٔ [۲۱-۱۹]	کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین	۳۲۴۶/۰
	کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده	۳۲۵۰/۰
توزیع یکنواخت در بازهٔ [۱۳۰-۱۱۰]	کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین	۳۶۹۴/۰
	کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده	۴۱۶۸/۰
توزیع یکنواخت در بازهٔ [۳۳۰-۳۱۰]	کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین	۴۷۹۸/۰
	کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده	۶۱۴۷/۰
توزیع یکنواخت در بازهٔ [۵۳۰-۵۱۰]	کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین	۶۰۸۴/۰
	کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده	۸۲۷۱/۰
توزیع یکنواخت در بازهٔ [۷۳۰-۷۱۰]	کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین	۷۵۷۳/۰
	کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده	۰۰۷۶/۱
توزیع یکنواخت در بازهٔ [۹۳۰-۹۱۰]	کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین	۹۸۱۲/۰
	کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده	۳۴۱۵/۱

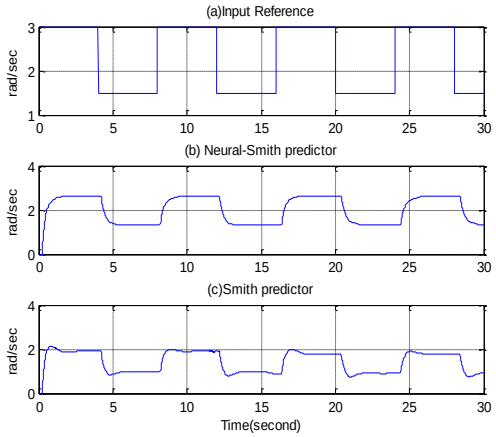
برای درک بهتر از تأثیر مدل‌سازی برخط دستگاه، حالتی در نظر گرفته می‌شود که تأخیر شبکه مطابق شکل (۱۲) در بازهٔ [۱۱۰۰-۹۰۰] میلی‌ثانیه بوده و مقدار تغییرات تابع تبدیل دستگاه برابر با α=۰/۵ باشد.



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



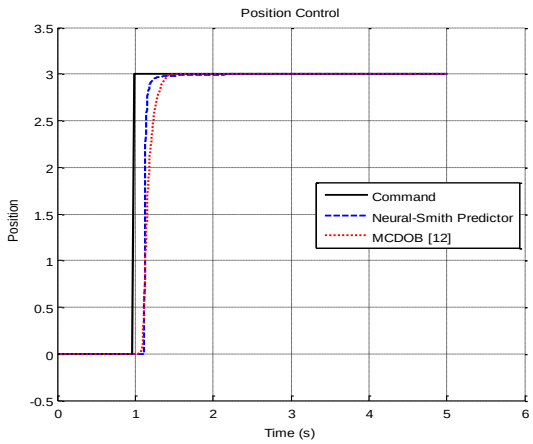
(شکل-۱۳): نتیجهٔ شبیه‌سازی سامانهٔ کنترل از طریق شبکه به‌ازای تأخیر۹۰۰-۱۱۰۰ میلی‌ثانیه و α=۰/۵ : الف) سیگنال مرجع؛ ب) سیگنال خروجی دستگاه به‌ازای استفاده از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش بین؛ ج) سیگنال خروجی دستگاه به‌ازای استفاده از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده.

(Figure-13): Simulation Results of NCS for Stochastic Delay in Interval of [1100 - 900] ms and α=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

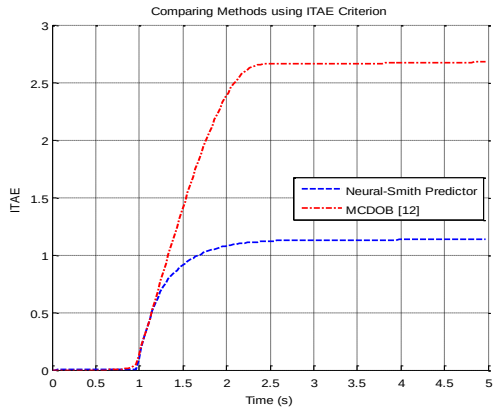
[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-08-23]
[DOI: 10.52547/jsdp.18.1.86]

سیگنال خروجی دستگاه به‌ازای استفاده از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده، نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل (۱۳) مشخص است، در حالتی که از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده استفاده می‌شود، خروجی سامانه دارای فراجهش، نوسانات و خطای حالت دائم است؛ اما در حالتی که از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین استفاده می‌شود، در خروجی سامانه هیچ‌گونه فراجهش، نوسانات و خطای حالت دائمی دیده نمی‌شود و خروجی سامانه با دقت بالایی سیگنال مرجع را دنبال می‌کند. در [12] روشی برای مقابله با تأخیر در شبکه‌های کنترل از طریق شبکه ارائه شده است که تا حدی به مسألهٔ کاهش مصرف انرژی هم پرداخته شده ولی در عین حال تأخیرهای تصادفی در هر دو مسیر رفت و برگشت ثابت در نظر گرفته شده‌اند که درعمل این چنین نیست. بیشینه تأخیرهای تصادفی برای هر مسیر رفت و برگشت در این مقاله پنجاه میلی‌ثانیه (به‌طور مجموع صد میلی‌ثانیه) در نظر گرفته شده و همچنین در [12] با فرض‌داشتن پهنای باند کافی، پدیدهٔ ازدست‌رفتن بسته در نظر گرفته نشده است. در این مقاله با فرض فرکانس بالا تخمین تابع انتقال دستگاه برای استفاده در ساختار کنترل‌گر به‌طورکامل ایده‌آل و برابر با خود تابع انتقال واقعی دستگاه در نظر گرفته شده است. بر این اساس روش مقالهٔ [12] را با روش پیشنهادی ارائه شدهٔ خودمان در این مقاله بررسی کردیم که نتایج مقادیر ITAE در جدول (۲) برای تأخیر مجموع صد میلی‌ثانیه محاسبه شده است. در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نیز به‌ترتیب مقایسهٔ نمودارهای پاسخ به پلهٔ واحد و مقادیر ITAE لحظه‌ای ترسیم شده است. همان‌گونه که از نتایج عددی و نمودارها مشخص است، روش پیشنهادی این مقاله نسبت به روش ارائه‌شده در [12]، توانسته در مقابل تأخیرهای ناشی از شبکه بهتر مقاومت کند و مقدار ITAE کمتری هم دارد.



(شکل-۱۴): مقایسهٔ کنترل وضعیت روش پیشنهادی با MCDOB در تأخیر زمانی ۱۰۰ میلی‌ثانیهٔ شبکه.

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



(شکل-۱۵): مقایسهٔ روش پیشنهادی با MCDOB با استفاده از معیارITAE در تأخیر زمانی ۱۰۰ میلی‌ثانیهٔ شبکه.

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

(جدول-۲): مقایسهٔ معیار ITAE سامانه به‌ازای استفاده از کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین و MCDOB در [12] برای مدت زمان ۵ ثانیه و تأخیر ۱۰۰ میلی‌ثانیه 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.

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

۵- نتیجه‌گیری

در سامانهٔ کنترل از طریق شبکه، ارتباط بین اجزای سامانه با استفاده از شبکه‌های مخابراتی صورت می‌گیرد. برای ازبین‌بردن اثر تأخیر تصادفی شبکه بر عملکرد سامانه، به‌طورمعمول از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین استفاده می‌شود. مدل‌سازی دستگاه یک عامل تأثیرگذار در عملکرد کنترل‌گر اسمیت بیش‌بین است. در این مقاله کنترل‌گری با نام "کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین" ارائه شده که در آن با استفاده از دو شبکهٔ عصبی پرسپترون به مدل‌سازی دستگاه و پردازش سیگنال کنترلی پراخته شده و باعث بهبود عملکرد کنترلی سامانه شده است. در ساختار کنترل‌گر پیشنهادی، تغییرات تابع تبدیل دستگاه به‌صورت برخط در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل‌گر عصبی‌اسمیت پیش‌بین در حالتی که تأخیر

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-08-23]
[DOI: 10.52547/jsdp.18.1.86]

تصادفی شبکه و تغییرات تابع تبدیل دستگاه بیشتر باشد، نقش مؤثرتری در بهبود عملکرد سامانه دارد. به‌عنوان مثال وقتی که تأخیر شبکهٔ مخابراتی دارای توزیع یکنواخت در بازهٔ [۲۱-۱۹] میلی‌ثانیه باشد، تفاوت مقدار ITAE نسبت به حالتی که از کنترل‌گر اسمیت پیش‌بین ساده استفاده شود، برابر با ۰/۰۰۰۴ است؛ اما در حالتی که تأخیر شبکه دارای توزیع یکنواخت در بازهٔ [۹۳۰-۹۱۰] 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 سامانهٔ 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.

[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 رشتهٔ مهندسی برق (الکترونیک) و رشتهٔ 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 رشتهٔ 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 رایانامهٔ ایشان عبارت است از:

b.haghniaz@stu.yazd.ac.ir

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-08-23]

[DOI: 10.52547/jsdp.18.1.86]

سید محمّدتقی المدرسی مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را به‌ترتیب در رشتهٔ مهندسی برق (الکترونیک) و رشتهٔ مهندسی برق (مخابرات) در سال‌های ۱۳۶۵ و ۱۳۶۸ از دانشگاه صنعتی اصفهان دریافت و مدرک دکترای مهندسی برق (الکترونیک- پردازش هوشمند سیگنال) خود را از دانشگاه ساوت‌همپتون کشور انگلستان در سال ۱۳۷۹ دریافت کرده است. دکتر المدرسی از سال ۱۳۶۹ عضو هیأت علمی دانشگاه یزد بوده و هم‌اکنون دانشیار دانشکدهٔ مهندسی برق دانشگاه یزد هستند. زمینه‌های علاقه‌مندی ایشان پردازش هوشمند سیگنال، شبکه‌های عصبی، سامانه‌های کنترل از طریق شبکه و شبکه‌های هوشمند است.

نشانی رایانامهٔ ایشان عبارت است از:

smta@yazd.ac.ir

پویا حاجبی مدرک کارشناسی در رشتهٔ مهندسی برق (الکترونیک) و مدارک کارشناسی ارشد و دکترای خود را در رشتهٔ مهندسی برق (مخابرات) به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۴، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۳ از دانشگاه یزد دریافت کرده است. ایشان در سال ۱۳۹۲، به‌عنوان دانشجوی پژهش‌گر نمونهٔ دانشگاه یزد در مقطع دکتری انتخاب شدند. دکتر حاجبی در زمینهٔ پژوهش و ساخت دستگاه‌های الکترونیکی مرتبط با حوزهٔ پردازش سیگنال فعالیت دارند. زمینه‌های علاقه‌مندی ایشان پردازش سیگنال‌های گسسته، پردازش سیگنال‌های بیولوژیکی، سامانه‌های کنترل از طریق شبکه، سامانه‌های مخابرات بی‌سیم، منطق فازی و شبکه‌های عصبی است.

نشانی رایانامهٔ ایشان عبارت است از:

Hajebi@stu.yazd.ac.ir

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-08-23]

[DOI: 10.52547/jsdp.18.1.86]

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-08-23]
[DOI: 10.52547/jsdp.18.1.86]