



طراحی و شبیه سازی کنترل کننده مدل پیش بین مبتنی بر سیستم فازی نوع 2 برای کنترل سیستم غیر خطی بویلر - توربین

مرصاد عزیزی¹، بهروز رضایی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- دانشیار، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

* صندوق پستی 484 brezaie@nit.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک روش کنترل مدل پیش بین فازی جدید به منظور کنترل سیستم بویلر- توربین به عنوان یک سیستم غیر خطی نامعین ارائه می گردد. در روش پیشنهادی جهت غلبه بر عواملی که به علت عدم دقت مدل سیستم می تواند منجر به بروز خطای ماندگار یا بایاس در روش کنترل پیش بین گردند از سیستم فازی استفاده شده است. در این راستا با توجه به مدل تکای خطی سیستم و در نظر گرفتن محدودیت های موجود در حالت های سیستم و سیگنال کنترلی، یک کنترل کننده پیش بین با هدف بهینه سازی تابع هزینه مقید طراحی می شود. در طرح کنترلی ارائه شده از یک ناظر فازی نوع 2 برای تعیین سیگنال ورودی مرجع با توجه به شرایط سیستم استفاده می شود. در این مطالعه نشان داده می شود که به کارگیری سیستم های فازی نوع 2 در روش کنترل پیش بین به جای سیستم های فازی نوع 1 منجر به نتایج رضایت بخشی می گردد. روش پیشنهادی به مدل غیر خطی سیستم بویلر- توربین اعمال شود و نتایج حاصل از شبیه سازی، مؤثر بودن این روش در مقایسه با روش های کنترل پیش بین فازی موجود را به ویژه در شرایطی نشان می دهد که وجود نامعینی در مدل وجود دارد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 21 بهمن 1396
پذیرش: 12 فروردین 1397
ارائه در سایت: 07 اردیبهشت 1397
کلید واژگان:
کنترل مدل پیش بین
کنترل فازی
سیستم فازی نوع اول
سیستم فازی نوع دوم
سیستم بویلر - توربین

Designing and simulating model predictive controller based on type-2 fuzzy system for a nonlinear boiler-turbine system

Mersad Azizi, Behrooz Rezaie*

Department of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

* P.O. Box 484 Babol, Iran, brezaie@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 February 2018
Accepted 01 April 2018
Available Online 27 April 2018

Keywords:
Model predictive control
Fuzzy control
Type-1 fuzzy system
Type-2 fuzzy system
Boiler-turbine system

ABSTRACT

In this paper, a novel model predictive control method is presented for controlling a boiler-turbine system as an uncertain nonlinear system. In the proposed method, type-2 fuzzy system is used to cope with steady state error or bias appeared in the predictive control method due to the effects of model mismatch. For this purpose, using a piece-wise linear model of the system and considering the constraints in the system and the control signal, a predictive controller is designed to solve a constrained optimization problem. In the presented control scheme, a type-2 fuzzy supervisor is used to adjust the reference input signal according to the system conditions. It has been shown that utilizing type-2 fuzzy system in the predictive control method, instead of type-1 fuzzy system, leads to satisfactory results. The proposed method is applied to the nonlinear model of the boiler-turbine system and the simulation results show the effectiveness of this method compared with the existing fuzzy predictive control methods, especially for the conditions in which the model uncertainty is present.

1- مقدمه

کنترل پیش بین متشکل از دامنه وسیعی از روش های کنترلی است که به منظور دست یابی به سیگنال کنترل با به حداقل رساندن تابع هدف مقید مستقیم از مدل فرآیند استفاده می کند. کاربرد این روش های طراحی منجر به دستیابی به کنترل کننده های خطی می شود که از لحاظ عملی ساختاری مشابه دارند. تفاوت اصلی میان الگوریتم های مختلف کنترل مدل پیش بین در مدل مورد استفاده برای ارائه فرآیند توابع هزینه ای است که باید به حداقل برسند، روش های بهینه سازی و در نظر گرفتن عوامل جانبی نظیر نویز و اغتشاش است. جوامع آکادمیک و صنعتی اقبال خوبی در برابر روش های

کنترل پیش بین که براساس حداقل کردن یک تابع هزینه برحسب حالت های آینده سیستم با توجه به مدل سیستم تحت کنترل و تحت قیود مشخص عمل می کند، این روش در دهه های اخیر هم از نظر صنعتی و هم از دیدگاه نظری بسیار توسعه یافته است و دلیل این موفقیت ناشی از سادگی، بهینگی، قابلیت کنترل پیش از بروز خطا، در نظر گرفتن قیود و... است که باعث می شود بتوان کنترل کننده پیش بین را در زمره عمومی ترین روش ها برای حل مسأله کنترل در حوزه زمان قلمداد کرد.

- در کل نوآوری‌های مقاله شامل موارد زیر است:
 - استفاده از کنترل پیش‌بین مستقیم مبتنی بر سیستم فازی نوع 2
 - به کار گیری روش پیشنهادی مبتنی بر فازی نوع 2 برای کنترل مدل بویلر-توربین برای نخستین بار
 - استخراج مدل تکه‌ای خطی مناسب با توجه به بازه عملکرد متغیرهای سیستم
 - تعیین مناسب ورودی مرجع توسط سیستم فازی نوع 2
- ساختار مقاله به این صورت است که در بخش بعدی مدل مورد مطالعه معرفی و سیستم‌های فازی نوع 2 تشریح و با یک مثال در بخش 3 توضیح داده می‌شود. ساختار کنترل‌کننده پیشنهادی در بخش 4 شرح داده می‌شود؛ نتایج شبیه‌سازی انجام شده در بخش 5 ارائه می‌گردد و در بخش آخر نتیجه‌گیری نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی روش پیشنهادی صورت می‌گیرد.

2- مدل سیستم بویلر-توربین

در مطالعه سیستم‌های مختلف دسترسی به یک مدل مناسب از سیستم حائز اهمیت است. سیستم بویلر-توربین یک سیستم تبدیل انرژی است که از انرژی شیمیایی برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌کند. مدل سیستم بویلر-توربین اولین بار در سال 1972 و با استفاده از معادلات غیرخطی بر پایه سیستم بویلر-توربین P16/G16 در نیروگاه آ-ب سندونسکا گرفت¹ واقع در مالمو در کشور سوئد ارائه شد [26]. شماتیک این سیستم در شکل 1 نمایش داده شده است. مدل غیرخطی سیستم بویلر-توربین در مقالات بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته و به منظور توصیف بهتر رفتار سیستم اصلاح شده است [28,27]. برخی محققین جهت طراحی کنترل‌کننده از مدل غیرخطی سیستم بویلر-توربین [30,29] و برخی دیگر از یک مدل خطی شده براساس مدل غیرخطی آن استفاده کرده‌اند [31-34].

سیستم بویلر-توربین را می‌توان به عنوان سیستم چند-ورودی چند-خروجی² غیرخطی مدل کرد. این سیستم به شدت کوپل شده و تحت تأثیر محدودیت‌های مختلفی در ورودی و خروجی است. در مقالاتی که از مدل خطی شده سیستم بویلر-توربین استفاده شده بسط سری تیلور کوتاه شده برای خطی‌سازی معادلات غیرخطی حول نقاط کار استفاده شده است [34-31] که یک توصیف مناسب از رفتار سیستم حول نقاط کار ارائه می‌دهد، هر چند برای استفاده از این روش باید به مقادیر نامی حالت‌ها و ورودی‌ها در نقاط کار دسترسی داشته باشیم که به آسانی و همواره در دسترس نیستند.

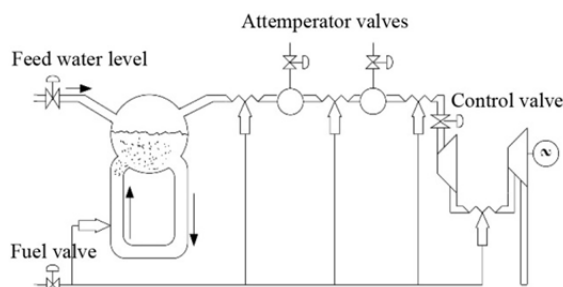


Fig. 1 Schematic of boiler-turbine unit [26]

شکل 1 شماتیک واحد بویلر-توربین [26]

کنترل پیش‌بین نشان داده‌اند. در حال حاضر کنترل پیش‌بین کاربردهای فراوان و موفقی در صنایع مرتبط با فرآیندهای شیمیایی مانند سلول‌های سوخت متانول [1]، راکتورهای مخزنی همزن‌دار [2]، برج‌های تقطیر [3]، سیستم‌های چندمخزنه [4-6]، دیگ‌های بخار [7] و سیستم تعلیق هوا [8] دارد، همچنین در زمینه‌هایی چون هدایتگرهای روبات‌ها [9-11]، هلی‌کوپتر کوادروتور [12]، نیروگاه خورشیدی [13]، صنعت سیمان [14]، سیستم آبیاری [15]، وسایل نقلیه الکتریکی [16,17] و خطوط مترو [18] مطرح شده است.

با وجود مزایای فراوان روش‌های کنترل پیش‌بین، با توجه به حجم پردازش‌های موجود در این روش‌ها، این نوع از کنترل‌کننده‌ها عمدتاً برای سیستم‌های با دینامیک کند و پایدار با مدل معلوم و بدون وجود عوامل مزاحم مانند اغتشاش کاربرد دارند. از این رو توسعه این روش‌ها با ابزارهای مختلف برای کاهش وابستگی به مدل سیستم، افزایش پایداری، توانمندسازی آن‌ها در برابر اغتشاش و ارائه روش‌های بهینه‌سازی کارآمد و سریع به ویژه برای مدل‌های غیرخطی از مسائل چالش‌برانگیز در این زمینه هستند. یکی از این ابزارها که در کنترل پیش‌بین مورد توجه محققین قرار دارد، کنترل فازی است که قابلیت تقابل با عوامل نامعینی و اغتشاش را دارد.

کنترل‌کننده فازی شامل یک نگاشت (غیرخطی) است که با قواعد اگر آن‌گاه توصیف می‌شود. استفاده از منطق فازی برای کنترل سیستم‌های مختلف باعث ایجاد و گسترش راه‌کارهایی جدید در جهت بهینه‌تر کردن فرآیندهای کنترلی شده است. سیستم‌های فازی اولیه موسوم به سیستم‌های فازی نوع 1 به علت داشتن توابع عضویت با درجات تعلق دقیق، توانایی محدودی در کاهش اثر عدم قطعیت در قوانین فازی دارند، نوعی از سیستم‌های فازی به نام سیستم‌های فازی نوع 2 در سال‌های اخیر در مسائل کنترلی کاربرد دارند [19,20] که خود توابع عضویت فازی یا دارای عدم قطعیت است. این نوع سیستم‌ها در برخورد با عدم قطعیت‌ها توانایی بیشتری در کاهش اثر عدم قطعیت و مدل‌کردن آن‌ها دارند [19,20].

روش‌های کنترل پیش‌بین فازی که تاکنون ارائه شده، عمدتاً مبتنی بر سیستم‌های فازی نوع 1 هستند. در این روش‌ها سیستم‌های فازی به منظور مدل کردن سیستم‌های تحت کنترل، افزایش مقاومت یا تطبیق‌پذیری کنترل پیش‌بین و افزایش قابلیت‌های این روش در مقابله با عوامل نامطلوب داخلی و بیرونی سیستم مانند نامعینی و اغتشاش استفاده شده‌اند [21-24]. اما کارهای اندکی در خصوص استفاده از سیستم‌های فازی نوع 2 در کنترل پیش‌بین ارائه شده است. برای مثال کنترل پیش‌بین غیرمستقیم فازی نوع 2 برای پاندول معکوس غیرخطی و ربات تک لینک در [25] انجام شده است و به مقایسه با کنترل فازی نوع 1 در شرایط وجود نویز و اغتشاش می‌پردازد و نشان داده شده که کنترل‌کننده فازی 2 دارای عملکرد به نسبت بهتری است.

مقاله حاضر یک روش کنترل سیستم غیرخطی بویلر-توربین را با استفاده از کنترل پیش‌بین مبتنی بر سیستم فازی نوع اول و دوم ارائه می‌دهد. در روش پیشنهادی کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع اول به فازی نوع دوم ارتقا داده می‌شود و نتایج این دو کنترل‌کننده به همراه کنترل‌کننده مدل پیش‌بین در شرایط کار عادی و نیز در حضور اغتشاش مورد بررسی قرار می‌گیرد. مزیت روش پیشنهادی به کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع اول و مدل پیش‌بین این است که علاوه بر این که در شرایط کار عادی نتیجه مطلوبی می‌دهد و سیستم را به خوبی کنترل می‌کند، در حضور اغتشاش نیز می‌تواند نتیجه قابل قبولی را ارائه دهد.

¹ Sydsvenska Kraft AB Plant

² MIMO

$$z = a_i x + b_i y + c_i \quad i = 1, \dots, 16 \quad (12)$$

و برای توصیف جمله غیرخطی f_4 خطوطی با روابط خطی به صورت رابطه (13) به کار می‌روند.

$$y = \hat{a}_i x + \hat{b}_i \quad i = 1, \dots, 4 \quad (13)$$

در آن‌ها $\hat{a}_i, \hat{b}_i, a_i, b_i$ ضرایب ثابتی هستند. برای نمونه براساس رابطه (12) معادله صفحه‌ای که جمله غیرخطی f_3 را در بازه $\rho_f = \{300, 400\}$ و $P = \{107.5, 126.25\}$ تقریب می‌زند به صورت رابطه (14) خواهد بود.

$$f_3 = -0.0006189\rho_f + 0.0012P + 0.1 \quad (14)$$

در روابط (15-18) جملات غیرخطی f_1, f_2, f_3 و f_4 به صورت پارامتری مشخص شده‌اند.

$$f_1 = a_{i1}^1 u_2 + b_{i1}^1 P + c_{i1}^1 \quad i_1 = 1, \dots, 16 \quad (15)$$

$$f_2 = a_{i2}^2 u_2 + b_{i2}^2 P + c_{i2}^2 \quad i_2 = 1, \dots, 16 \quad (16)$$

$$f_3 = a_{i3}^3 \rho_f + b_{i3}^3 P + c_{i3}^3 \quad i_3 = 1, \dots, 16 \quad (17)$$

$$f_4 = a_{i4}^4 P + c_{i4}^4 \quad i_4 = 1, \dots, 4 \quad (18)$$

حال برای به دست آوردن فرم خطی سیستم با جای‌گذاری جملات غیرخطی f_1, f_2, f_3 و f_4 در روابط (3-1) و (7-5) به روابط (19-24) می‌رسیم.

$$\frac{dE}{dt} = 0.073f_1 - 0.016f_4 - 0.1E \quad (19)$$

$$\frac{dP}{dt} = 0.9u_1 - 0.0018f_1 - 0.15u_3 \quad (20)$$

$$\frac{d\rho_f}{dt} = 1.659u_3 - 0.013f_2 + 0.0022P \quad (21)$$

$$q_e = 0.854f_2 - 0.147P + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \quad (22)$$

$$\alpha_s = f_3 \quad (23)$$

$$L = 0.0065\rho_f + 5f_3 + 0.0047f_2 - 0.0008P + 0.2533u_1 - 0.014u_3 - 3.4105 \quad (24)$$

ناحیه کار پارامترهای جملات غیرخطی f_1, f_2, f_3 و f_4 یعنی ρ_f, P و u_2 طبق فرض در نظر گرفته شده به چهار بخش مساوی تقسیم شده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که ناحیه کار سیستم به 64 بخش تقسیم می‌شود. اکنون برای هر کدام از بخش‌ها یک ماتریس حالت داریم. با در نظر گرفتن مقادیر نامی سیستم یعنی x_1^s و x_2^s با تقریب مناسب و با جای‌گذاری روابط (18-15) در روابط (24-19) ماتریس‌های حالت را به صورت رابطه (25) داریم.

$$A_j = \begin{bmatrix} -0.1 & 0.073b_{i1}^1 - 0.016a_{i4}^4 & 0 \\ 0 & -0.0018b_{i1}^1 & 0 \\ 0 & -0.013b_{i2}^2 + 0.0022 & 0 \\ 0 & 0.073a_{i1}^1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_j = \begin{bmatrix} 0 & 0.073a_{i1}^1 & 0 \\ 0.9 & -0.0018a_{i1}^1 & -0.15 \\ 0 & -0.013a_{i2}^2 & -1.659 \end{bmatrix}$$

$$C_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 5b_{i3}^3 + 0.0047b_{i2}^2 - 0.0008 & 0.0065 + 5a_{i3}^3 \end{bmatrix}$$

$$D_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.2533 & 0.0047a_{i2}^2 & 0.014 \end{bmatrix}$$

$$j = 1, \dots, 64 \quad (25)$$

حال که سیستم بویلر-توربین خطی‌سازی شده است، با داشتن ماتریس‌های حالت (25) کنترل پیش‌بین را به صورت رابطه (26) داریم.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_i x(k) + B_i u(k) \\ y(k) &= C_i x(k) + D_i u(k) \end{aligned} \quad (26)$$

در این بخش، معادلات دینامیکی زمان-پیوسته مربوط به سیستم بویلر-توربین به ترتیب در روابط (3-1) مشخص شده است.

$$\frac{dE}{dt} = ((0.73u_2 - 0.16)P^{9/8} - E)/10 \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = 0.9u_1 - 0.0018u_2P^{9/8} - 0.15u_3 \quad (2)$$

$$\frac{d\rho_f}{dt} = (141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)P)/85 \quad (3)$$

در آن E توان خروجی¹، P فشار بخار درام² و ρ_f چگالی بخار آب³ است. ورودی‌های سیستم، u_1 وضعیت شیر جریان سوخت، u_2 وضعیت شیر کنترل بخار و u_3 وضعیت شیر جریان آب تغذیه است که دارای مقادیری در بازه 0 تا 1 هستند. خروجی سیستم E, P و L که ارتفاع سطح آب در درام⁴ است. دو خروجی اول که حالت‌های سیستم و به سهولت در دسترس هستند، در حالی که ارتفاع سطح سیال به وسیله روابط (6-4) به دست می‌آید.

$$q_e = (0.854u_2 - 0.147)P + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \quad (4)$$

$$\alpha_s = \frac{(1 - 0.001538\rho_f)(0.8P - 25.6)}{\rho_f(1.0394 - 0.0012304P)} \quad (5)$$

$$L = 0.05(0.13073\rho_f + 100\alpha_s + q_e/9 - 67.975) \quad (6)$$

در آن q_e سرعت تبخیر و α_s کیفیت بخار است. جهت اطلاع از جزئیات بیشتر از نحوه استخراج مدل و جزئیات ضرایب و متغیرهای مدل غیرخطی خواننده به مراجع [31-34] ارجاع داده می‌شود.

$$q_e = (0.854u_2 - 0.147)P + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \quad (4)$$

$$\alpha_s = \frac{(1 - 0.001538\rho_f)(0.8P - 25.6)}{\rho_f(1.0394 - 0.0012304P)} \quad (5)$$

$$L = 0.05(0.13073\rho_f + 100\alpha_s + q_e/9 - 67.975) \quad (6)$$

برای کنترل سیستم ابتدا باید سیستم را خطی‌سازی کنیم؛ بنابراین باید ابتدا جملات غیرخطی موجود در روابط (6-1) را حذف کرد که این جملات در روابط (10-7) ارائه شده‌اند.

$$f_1 = u_2 P^{9/8} \quad (7)$$

$$f_2 = u_2 P \quad (8)$$

$$f_3 = \frac{(1 - 0.001538\rho_f)(0.8P - 25.6)}{\rho_f(1.0394 - 0.0012304P)} \quad (9)$$

$$f_4 = P^{9/8} \quad (10)$$

به منظور خطی‌سازی جملات غیرخطی روابط (10-7) از روش خطی‌سازی تکه‌ای استفاده می‌شود. در این روش توابع غیرخطی f_1, f_2, f_3 و f_4 توسط بسط سری تیلور در بازه‌های مختلف عملکرد خطی‌سازی می‌گردند. توابع f_1, f_2 و f_3 دومتغیره و تابع f_4 یک متغیره است. در حالت دومتغیره بسط سری تیلور در رابطه (11) آورده شده است.

$$f_i(x_1, x_2) \approx f_i(x_1^s, x_2^s) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Big|_{(x_1^s, x_2^s)} (x_1 - x_1^s) + \frac{\partial f_i}{\partial x_2} \Big|_{(x_1^s, x_2^s)} (x_2 - x_2^s) + \dots \quad (11)$$

$$f_2 = u_2 P \quad (8)$$

$$f_3 = \frac{(1 - 0.001538\rho_f)(0.8P - 25.6)}{\rho_f(1.0394 - 0.0012304P)} \quad (9)$$

$$f_4 = P^{9/8} \quad (10)$$

در این رابطه x_1 و x_2 متغیرهای f_i و x_1^s و x_2^s مقادیر نامی این متغیرهاست [31]. اکنون فرض می‌کنیم متغیرهای P, ρ_f و u_2 به ترتیب دارای مقادیری در بازه‌های $\{0, 1\}$ ، $\{70, 145\}$ ، $\{200, 600\}$ است که این بازه‌ها نمایش‌دهنده ناحیه کار سیستم هستند. هر یک از این بازه‌ها به چهار قسمت مساوی تقسیم می‌شود، در نتیجه جملات غیرخطی f_1, f_2, f_3 دارای 16 بخش و جمله f_4 چون تنها به متغیر P وابسته است و چهار بخش دارد که در هر یک از این بخش‌ها جمله غیرخطی با توجه به رابطه (11) از یک معادله خطی تقریب زده می‌شوند. برای جملات غیرخطی f_1, f_2 و f_3 از صفحاتی با معادلات خطی به صورت رابطه (12) استفاده می‌گردد.

¹ Electric Power (MW)

² Drum Steam Pressure (kg/cm²)

³ Steam-Water Density (kg/cm³)

⁴ Drum Water Level (meters)

برای روشن شدن موضوع، برای نمونه متغیر مورد علاقه x را میزان گرمی هوای داخل هواپیما در نظر بگیرید که در بازه $[0,10]$ تغییر می‌کند. مقدار صفر نشان‌دهنده هیچ مقدار گرمای هوا و میزان 10 نشان‌دهنده حداکثر میزان گرمای هواست. از جمله عباراتی که ممکن است میزان درک از گرمای هوا را مشخص کند (مثلاً در سالن انتظار فرودگاه‌ها) «نسبتاً گرم» است. فرض کنید با بررسی 100 مرد و زن، از آن‌ها خواسته می‌شود که دو نقطه انتهایی برای محدوده «نسبتاً گرم» در مقیاس صفر تا 10 انتخاب کنند. به یقین نتایج به دست آمده از همه آن‌ها یکسان نیست؛ زیرا کلمات برای افراد مختلف معانی متفاوت دارد. در یک رویکرد (فازی نوع 1) با میانگین از این 100 جفت نقاط انتهایی و سپس استفاده از مقادیر متوسط، یک فاصله‌ای مرتبط با «نسبتاً گرم» ساخته می‌شود. سپس یک تابع عضویت مثلثی (یا هر شکل دیگر) می‌تواند ساخته شود. این تابع عضویت مثلثی نوع 1 همان‌طور که در شکل 2 خط نقطه‌چین نشان داده شده است، به طور کامل عدم قطعیت وابسته به دو نقطه انتهایی را در نظر نگرفته است. در رویکرد دوم (فازی نوع 2) از میانگین مقادیر نقاط انتهایی و پراکندگی حول آن برای به دست آوردن یک فاصله عدم قطعیت در هر یک از نقاط انتهایی استفاده می‌شود؛ بنابراین مکان‌های دو نقطه انتهایی روی محور افقی x نامشخص هستند و توابع عضویت مثلثی را می‌توان در مکان‌هایی در نظر گرفت که دو نقطه انتهایی آن‌ها می‌توانند در هر نقطه‌ای بر محور افقی x نامشخص قرار بگیرند. به این ترتیب یک سری توابع عضویت مثلثی پیوسته خواهیم داشت. فرض کنید که دقیقاً N تابع مثلثی وجود داشته باشد. در هر مقدار از محور افقی درجه عضویت وجود خواهد داشت $MF_1(x), MF_2(x), \dots, MF_N(x)$. یک عدد وزنی بین صفر تا یک به صورت $w_{x1}, w_{x2}, \dots, w_{xN}$ به هر یک از این درجه‌های عضویت تعلق می‌دهیم. این اعداد وزنی را می‌توان یک امکان وقوع، وابسته به هر یک از این درجات عضویت در x در نظر گرفت. در نتیجه در هر x مجموعه این درجات یک تابع را تشکیل می‌دهند به نام تابع عضویت ثانویه (رابطه (30))

$$\{(MF_i(x), w_{xi}), i = 1, 2, \dots, N\} \quad (30)$$

به این ترتیب زمانی که تعیین درجه عضویت یک عنصر در یک مجموعه به عنوان 1 یا 0 امکان‌پذیر نباشد، مجموعه فازی را برای فازی‌سازی آن اعمال می‌کنیم. به طریق مشابه زمانی که تعیین درجه عضویت یک عنصر در یک مجموعه فازی به عنوان یک عدد در بازه $[0,1]$ امکان‌پذیر نباشد، می‌توانیم آن را دوباره فازی‌سازی نماییم (یعنی تابع عضویت فازی). اگر همه عدم قطعیت‌ها از بین بروند یک مجموعه فازی نوع 2 به یک مجموعه فازی نوع 1 کاهش می‌یابد. برای نمونه در شکل 3 اگر عدم قطعیت‌های اطراف دو نقطه انتهایی از بین بروند تنها نمودار تابع عضویت مثلثی نقطه‌چین باقی می‌ماند. در شکل 3 تابع عضویت اولیه نوع 2 گوسی با واریانس مشخص σ و قطعیت کامل، اما میانگین غیرقطعی m نشان داده شده است که در بازه $[m_1, m_2]$ تغییر می‌کند.

در شکل 4 ساختار کلی یک سیستم فازی نوع 2 نشان داده شده است. یک سیستم فازی نوع 2 از چهار قسمت فازی‌سازی، قوانین، موتور استنتاج و پروسه خروجی تشکیل شده است. در حقیقت یک سیستم فازی نگاشت بین یک ورودی غیرفازی و یک خروجی غیرفازی است. در یک سیستم فازی نوع 2 پروسه خروجی شامل دو مرحله است. مرحله اول نگاشت یک مجموعه فازی نوع دوم به یک مجموعه فازی نوع اول که به این مرحله کاهش فازی یا کاهش مرتبه می‌گویند. سپس مرحله فازی‌زدایی مجموعه کاهش مرتبه یافته

اکنون با به دست آمدن مدل تکه‌ای خطی می‌توان برای هر تکه یا ناحیه کاری یک کنترل پیش‌بین خطی طراحی نمود. به عبارت دیگر به ازای مجموعه مقادیر ماتریس‌های A_i, B_i, C_i و D (برای $i=1, \dots, 64$)، 64 سیستم حاصل می‌شود و بنابراین 64 قانون کنترل پیش‌بین با حداقل نمودن یک تابع هزینه طبق رابطه (27) و با در نظر گرفتن قیود ورودی‌های کنترلی به صورت رابطه (28) به دست می‌آید.

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \Delta U \quad (27)$$

$$u_{\min} \leq u_i \leq u_{\max}, \quad u_{\min} = 0, \quad u_{\max} = 1 \quad i=1,2,3 \quad (28)$$

در رابطه (27) بردار متشکل از مقادیر مطلوب، Y ماتریسی متشکل از بردارهای سطری خروجی y^T از زمان $k+1$ تا $k+N_p$ است که در آن N_p افق پیش‌بین و R ماتریس وزنی است که در این مقاله ماتریس واحد در نظر گرفته شده است. همچنین ΔU ماتریسی متشکل از بردارهای سطری تغییرات ورودی Δu^T از زمان k تا $k+N_c-1$ که در آن N_c افق پیش‌بین ورودی است. تغییرات ورودی $\Delta u(k)$ به صورت رابطه (29) در نظر گرفته می‌شود.

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (29)$$

مطابق روش کنترل پیش‌بین در مرجع [35] با نوشتن بردار Y برحسب بردار ΔU به کمک مقادیر ماتریس‌های مدل در رابطه (26) برای هر یک از 64 ناحیه کاری مختلف، تابع هزینه برحسب ΔU نوشته می‌شود. پس از حل مسأله بهینه‌سازی مقید، ΔU به دست می‌آید که با در نظر گرفتن اولین سطر آن یعنی $\Delta u(k)$ بردار ورودی کنترل $u(k)$ حاصل می‌گردد؛ بنابراین می‌توان 64 ورودی کنترل برای هر 64 ناحیه کاری محاسبه نمود. خواننده برای اطلاع بیشتر در مورد جزئیات روش کنترل پیش‌بین به [35] ارجاع داده می‌شود.

3- سیستم‌های فازی نوع 2

تابع عضویت فازی نوع دوم یک سیستم فازی در بازه $[0,1]$ است، در حالی که تابع عضویت فازی معمولی مقداری عددی در بازه $[0,1]$ است. نمای کلی تابع عضویت یک مجموعه فازی نوع 2 در شکل 2 نشان داده شده است. در واقع تابع عضویت یک مجموعه فازی نوع 2 سه بُعدی است [36]. رسم شکل سه بُعدی تابع عضویت نوع 2 ساده نیست، ولی رسم دامنه دو بُعدی می‌تواند برای سادگی مفید واقع شود. در شکل 2 اثر عدم قطعیت به وسیله یک تابع عضویت بالایی¹ و پایینی² محدود شده است.

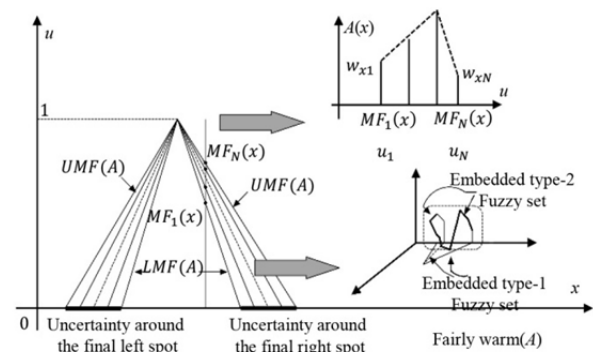


Fig. 2 Fuzzy type-2 membership function [37]

شکل 2 تابع عضویت مجموعه فازی نوع 2 [37]

¹ UMF: Upper Membership Function

² LMF: Lower Membership Function

می‌شود؛ بنابراین انتخاب مدل به صورت خودکار توسط سیستم فازی انجام می‌شود. علاوه بر این از یک سیستم فازی نیز برای تعیین یکی از سیگنال‌های مرجع مربوط به خروجی E (توان خروجی بویلر) استفاده می‌شود که بر اساس رابطه (31) مشخص می‌شود.

$$r(k+1) = r(k) + F(k) \quad (31)$$

که در آن r سیگنال مرجع مربوط به گام- زمانی k -ام ($r(0)$) برابر با سیگنال مرجع ثابت برای کنترل‌کننده پیش‌بین) و F نماینده یک تابع فازی است. تابع فازی F وابسته به متغیرهایی است که باید براساس شرایط و نیازهای سیستم مناسب انتخاب شوند.

در واقع تابع F خروجی سیستم فازی و جهت ایجاد تغییر در ورودی مرجع مربوط به خروجی سیستم E برای رسیدن به پاسخ مناسب است که از روی آن سیگنال مرجع در گام بعد تعیین می‌گردد. مقدار F در قواعد فازی از روی میزان خطای دنبال‌یابی و نیز آهنگ تغییرات توان خروجی به عنوان متغیرهای ورودی سیستم فازی تعیین می‌شود.

کنترل‌کننده پیش‌بین فازی براساس تابع فازی F در رابطه (31) برای سیستم بویلر- توربین با استفاده از سیستم واسط فازی ممدانی و براساس متغیرهای تعریف شده در رابطه (32) تعیین می‌گردد.

$$e(k) = r(0) - E(k) \quad (32)$$

$$dE(k) = E(k) - E(k-1)$$

در آن $e(k)$ و $dE(k)$ به ترتیب نمایش‌دهنده خطای دنبال‌یابی و آهنگ تغییرات توان خروجی سیستم هستند که به ترتیب با هدف حداقل کردن خطای دنبال‌یابی و کاهش نوسانات سیگنال خروجی حول سیگنال مرجع پیشنهاد شده‌اند.

توابع عضویت برای سیگنال‌های ورودی، خروجی و پایگاه داده فازی

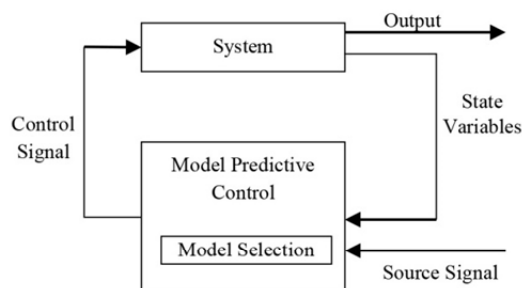


Fig. 5 Structure of predictive controller

شکل 5 ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین

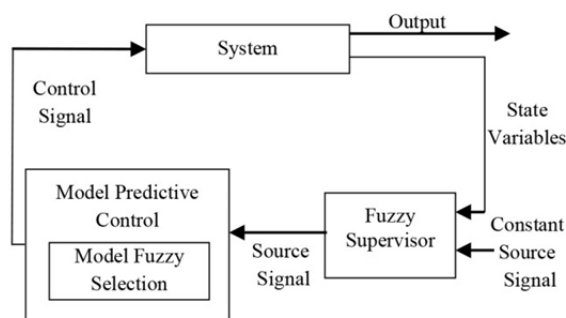


Fig. 6 Structure of fuzzy predictive controller

شکل 6 ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین فازی

است. روش‌های کاهش مرتبه در سیستم‌های فازی نوع 2 در واقع همان روش‌های توسعه‌یافته فازی‌زدایی در سیستم‌های فازی نوع 1 است. کاهش مرتبه شامل روش‌های مرکز ثقل، مرکز مجموعه و ارتفاع است [39,38,36].

4- ساختار کنترل‌کننده

برای غلبه بر مشکلات ناشی از اغتشاش و همچنین مواجه نشدن با مشکلاتی از قبیل افزایش پیچیدگی مدل و هزینه‌های محاسباتی، کنترل‌کننده پیش‌بین فازی استفاده می‌گردد. در این روش برخلاف ساختار متداول کنترل پیش‌بین از یک ناظر فازی برای تنظیم سیگنال خروجی کنترل‌کننده مدل پیش‌بین با توجه به شرایط سیستم استفاده می‌شود که می‌توان ناظر فازی از نوع 1 یا 2 و مرتبه‌های بالاتر باشد که در این مقاله از ناظر فازی نوع 1 و 2 استفاده می‌شود. ساختار روش پیشنهادی در شکل‌های 5 و 6 نمایش داده شده است.

همان‌طور که از شکل 5 دیده می‌شود یک کنترل‌کننده پیش‌بین استاندارد با استفاده از رابطه (27) و قیود (28) بهینه‌سازی تعیین می‌شود و بسته به این‌که متغیرهای حالت و کنترل در گام پیشین در کدام بازه قرار دارند، کنترل پیش‌بین از یکی از 64 مدل مربوط به بازه مربوطه استفاده می‌کند، همچنین در شکل 6 می‌توان دید در روش پیشنهادی بخش کنترل‌کننده پیش‌بین مانند حالت پیشین است. با این تفاوت که انتخاب مدل توسط یک سیستم فازی سوگنوی¹ نوع 1 انجام می‌شود که در قواعد فازی براساس بازه مربوطه در قسمت اگر، مدل مربوطه در قسمت آن‌گاه داده

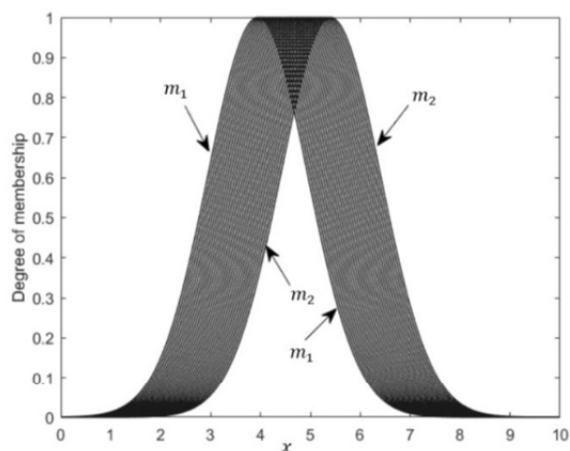


Fig. 3 Gaussian membership function with mean uncertainty [37]

شکل 3 تابع عضویت گوسی با عدم قطعیت در میانگین [37]

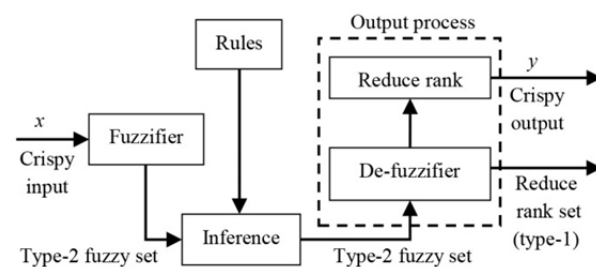


Fig. 4 Structure of type-2 fuzzy system [38]

شکل 4 ساختار یک سیستم فازی نوع 2 [38]

¹ Sugeno

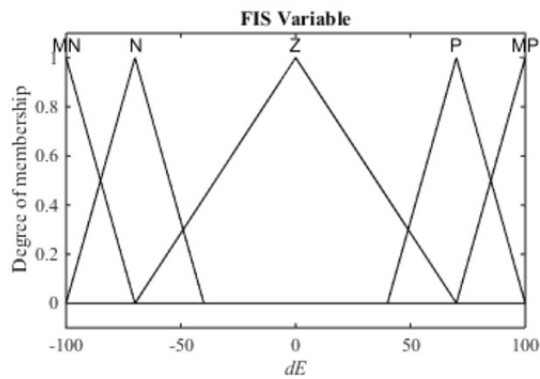


Fig. 9 Membership function "dE(k)"

شکل 9 تابع عضویت "dE(k)"

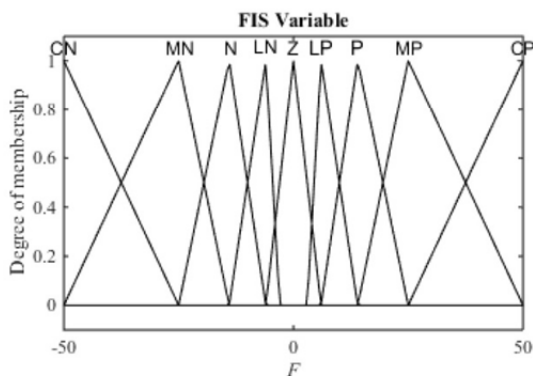


Fig. 10 Membership function "F"

شکل 10 تابع عضویت "F"

جدول 1 پایگاه داده فازی برای کنترل‌کننده پیش‌بین فازی نوع 1

Table 1 Fuzzy database for type-1 fuzzy model prediction controller

داده فازی "e"							داده فازی "dE"
MP	P	LP	Z	LN	N	MN	
Z	LN	LN	N	MN	CN	CN	MN
LP	Z	Z	LN	N	MN	MN	N
P	P	LP	Z	LN	N	N	Z
MP	P	LP	LP	Z	LN	LN	P
CP	MP	P	P	LP	Z	Z	MP

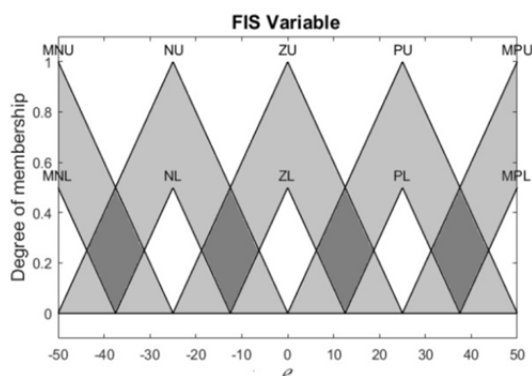


Fig. 11 Membership function "e(k)"

شکل 11 تابع عضویت "e(k)"

U و L به ترتیب به معنی سطح بالایی¹ و سطح پایینی¹ است.¹ Upper

براساس تجربه و تحلیل رفتار سیستم در حضور اغتشاش و نامعینی تعریف شده‌اند. ساختار تابع فازی F در شکل 7 ارائه شده است. فازی‌ساز و فازی‌زدا به ترتیب از نوع مثلثی و میانگین مراکز هستند و موتور استنتاج فازی از نوع حاصل ضرب است. توابع عضویت ورودی و خروجی در شکل‌های 8-10 و پایگاه داده فازی در جدول 1 ارائه شده است.

پارامترهای CP, MP, P, LP, Z, LN, N, MN, CN در شکل‌های 8-10 و جدول 1 به ترتیب نشان‌دهنده کاملاً منفی، خیلی منفی، منفی، کمی منفی، صفر، کمی مثبت، مثبت، خیلی مثبت، کاملاً مثبت است.

کنترل‌کننده پیش‌بین فازی نوع 2 براساس تابع فازی F، برای سیستم بویلر-توربین با استفاده از سیستم واسط فازی و براساس متغیرهای تعریف شده مشابه به با فازی نوع اول در رابطه (31) تعیین می‌گردد.

توابع عضویت برای سیگنال‌های ورودی، خروجی و پایگاه داده فازی براساس تجربه و تحلیل رفتار سیستم در حضور اغتشاش و نامعینی تعریف شده‌اند. ساختار تابع فازی F در شکل 7 ارائه شده است و فازی‌ساز و فازی‌زدا نوع 2 به ترتیب از نوع مثلثی و میانگین مراکز هستند، با این تفاوت که توابع عضویت فازی نوع 2 از دو سطح بالایی و پایینی تشکیل شده همان‌طور که در بخش 3 توضیح داده شده است. توابع عضویت ورودی و خروجی در شکل‌های 11 و 12 و پایگاه داده فازی در جدول 2 ارائه شده است.

همچنین تابع عضویت F(k) از نوع ثابت در بازه‌های طراحی شده در روابط (33) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} -50 \leq MN \leq -30, & \quad -30 \leq N \leq -15 \\ -15 \leq Z \leq 15, & \quad 15 \leq P \leq 30 \\ 15 \leq MP \leq 30 \end{aligned} \quad (33)$$

در شکل‌های 11 و 12 و جدول 2 MN, P, Z, N, MP به ترتیب نشان‌دهنده خیلی منفی، منفی، صفر، مثبت، خیلی مثبت و همچنین پسوند

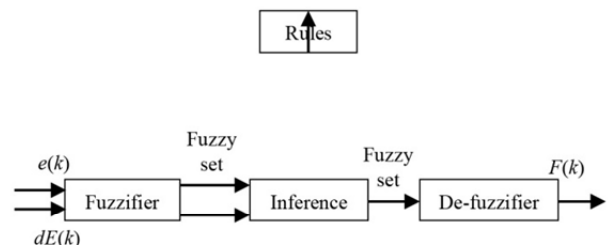


Fig. 7 Structure of "F" fuzzy function for fuzzy predictive control

شکل 7 ساختار تابع فازی "F" برای کنترل پیش‌بین فازی

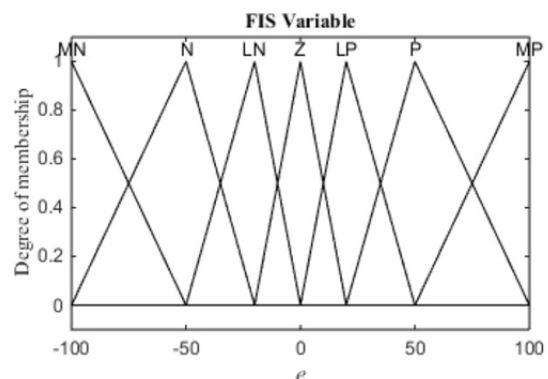


Fig. 8 Membership function "e(k)"

شکل 8 تابع عضویت "e(k)"

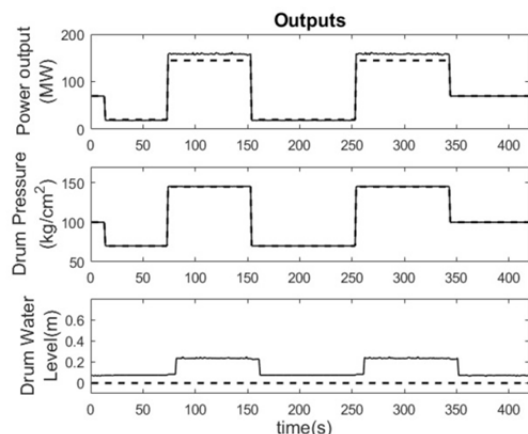


Fig. 13 Results of model predictive controller in normal working conditions (solid line: output; dashed line: set point)

شکل 13 نتایج حاصل از کنترل مدل پیش‌بین در شرایط کار عادی (خط ممتد: خروجی، خط چین: مقدار مطلوب)

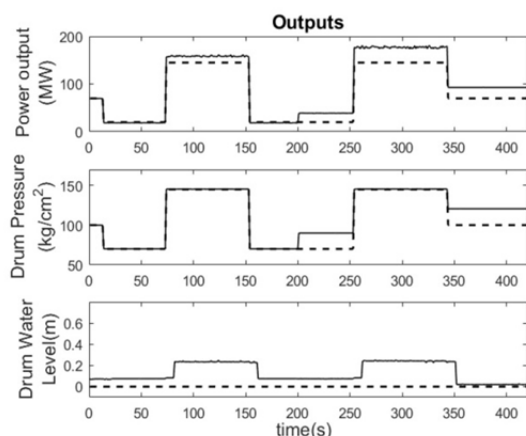


Fig. 14 Results of model predictive controller with disturbance in $t=200$ s (solid line: output; dashed line: set point)

شکل 14 نتایج حاصل از کنترل مدل پیش‌بین با اعمال اغتشاش در ثانیه 200 (خط ممتد: خروجی، خط چین: مقدار مطلوب)

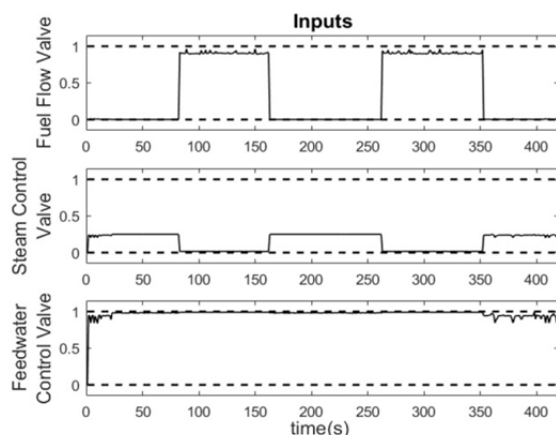


Fig. 15 Results of model predictive controller in normal working conditions (solid line: input; dashed line: set point)

شکل 15 نتایج حاصل از کنترل مدل پیش‌بین در شرایط کار عادی (خط ممتد: ورودی، خط چین: مقدار مطلوب)

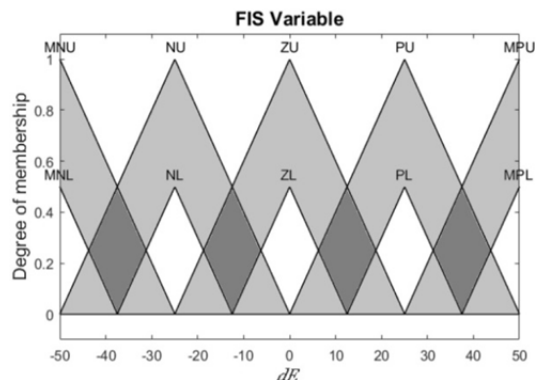


Fig. 12 Membership function " $dE(k)$ "

شکل 12 تابع عضویت " $dE(k)$ "

جدول 2 پایگاه داده فازی برای کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 2

Table 2 Fuzzy database for type-2 fuzzy model prediction controller

داده فازی " e "		داده فازی " dE "		
MPU	PU	ZU	NU	MNU
Z	N	N	MN	MNU
Z	Z	Z	N	NU
P	Z	Z	N	ZU
P	P	Z	Z	PU
MP	MP	P	Z	MPU

5- شبیه‌سازی و نتایج

برای آزمون کنترل فازی نوع 2 ارائه شده، آن را برای کنترل سیستم بویلر-توربین به کار برده‌ایم. برای بررسی عملکرد کنترل‌کننده فازی نوع 2، نتایج با کنترل‌کننده پیش‌بین و کنترل‌کننده فازی نوع 1 مقایسه می‌شود. رفتار سیستم برای کنترل‌کننده‌ها در حضور اغتشاش و نامعینی بررسی می‌گردد.

در سیستم بویلر-توربین هدف کنترلی تنظیم متغیرهای حالت در مقادیر مطلوب به همراه حداقل کردن تغییرات ارتفاع سطح سیال در درام با در نظر گرفتن محدودیت موجود بر سیگنال‌های ورودی است. با در نظر گرفتن محدودیت‌های ورودی طبق رابطه (28) با هدف کنترل متغیرهای حالت در مقادیر مطلوب و حداقل کردن تغییرات ارتفاع سطح آب درام، کنترل‌کننده پیش‌بین و پیش‌بین فازی نوع 1 و 2 به سیستم بویلر-توربین اعمال می‌گردد. نتایج حاصل از اعمال کنترل‌کننده‌های طراحی شده به سیستم غیرخطی بویلر-توربین در این بخش ارائه شده است. تابع هزینه طبق رابطه (27) با افق پیش‌بین² برابر 10 و افق کنترل³ برابر 20 در نظر گرفته شده است. رابطه (27) برابر ماتریس واحد در نظر گرفته شده است.

5-1- کنترل‌کننده مدل پیش‌بین

نتایج حاصل از اعمال کنترل‌کننده مدل پیش‌بین طراحی شده بر سیستم غیرخطی بویلر-توربین در شکل‌های 13-16 ارائه شده است.

همان‌گونه که از نتایج شکل 13 مشخص است، کنترل‌کننده مدل پیش‌بین تا حدودی می‌تواند سیستم را در شرایط کار عادی کنترل کند، همچنین از نتایج شکل 14 دیده می‌شود که در حالت بروز خطا در سیستم به دلیل تغییرات در پارامترهای سیستم، کنترل مدل پیش‌بین توانایی مقابله با این اغتشاش را به خوبی ندارد. شکل‌های 15 و 16 نیز نشان می‌دهند که ورودی‌ها قیود را رعایت می‌کنند و پاسخ مناسبی می‌دهند.

¹ Lower

² Prediction Horizon

³ Prediction Control

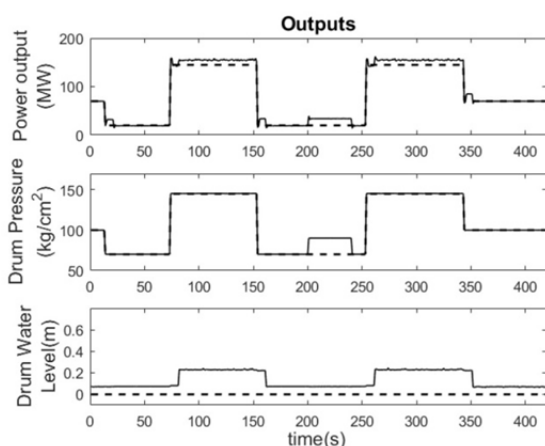


Fig. 18 Results of type-1 fuzzy model predictive controller with disturbance in $t=200$ s (solid line: output; dashed line: set point)
 شکل 18 نتایج حاصل از کنترل مدل پیش‌بین فازی نوع 1 با اعمال اغتشاش در ثانیه 200 (خط ممتد: خروجی، خط چین: مقدار مطلوب)

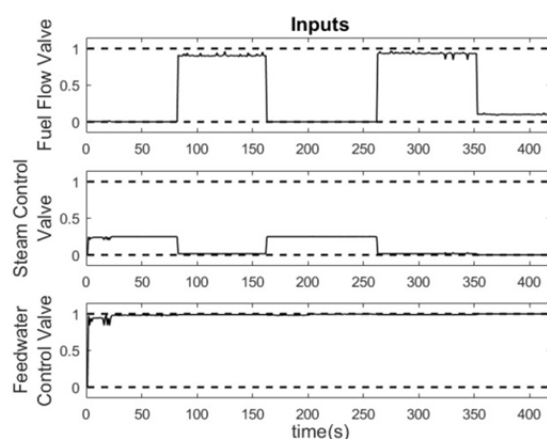


Fig. 16 Results of model predictive controller with disturbance in $t=200$ s (solid line: input; dashed line: set point)

شکل 16 نتایج حاصل از کنترل مدل پیش‌بین با اعمال اغتشاش در ثانیه 200 (خط ممتد: ورودی، خط چین: مقدار مطلوب)

5-2- کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 1

در شکل‌های 17-20 نتایج حاصل از اعمال کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 1 طراحی شده برای سیستم غیرخطی بویلر-توربین ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل 17 قابل ملاحظه است، کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 1 می‌تواند سیستم را در شرایط کار عادی با کمی بالازدگی و پایین‌زدگی (قابل چشم‌پوشی) کنترل کند، همچنین سطح سیال درام به پاسخ مطلوب نسبت به کنترل‌کننده مدل پیش‌بین نزدیک‌تر شده است. از نتایج شکل 18 مشخص است که در حالت بروز خطا در سیستم، کنترل مدل پیش‌بین فازی نوع 1 توانسته است در توان خروجی نتیجه بهتری نسبت به کنترل مدل پیش‌بین دهد. در شکل‌های 19 و 20 نیز دیده می‌شود که ورودی‌ها قیود را رعایت می‌کنند و پاسخ خوبی دارند.

5-3- کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 2

حال کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 2 طراحی شده به سیستم غیرخطی بویلر-توربین اعمال می‌گردد و نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های 21-24 ارائه شده است.

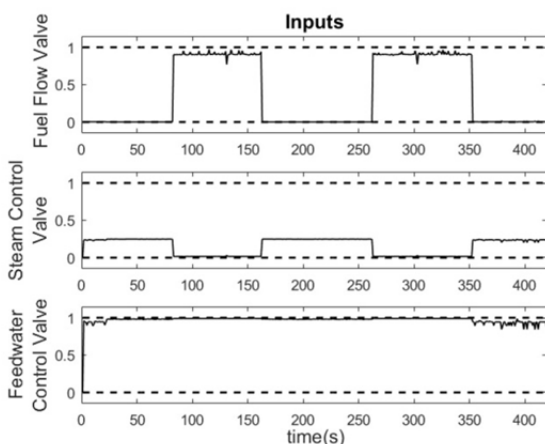


Fig. 19 Results of type-1 fuzzy model predictive controller in normal working conditions (solid line: input; dashed line: set point)
 شکل 19 نتایج حاصل از کنترل مدل پیش‌بین فازی نوع 1 در شرایط کار عادی (خط ممتد: ورودی، خط چین: مقدار مطلوب)

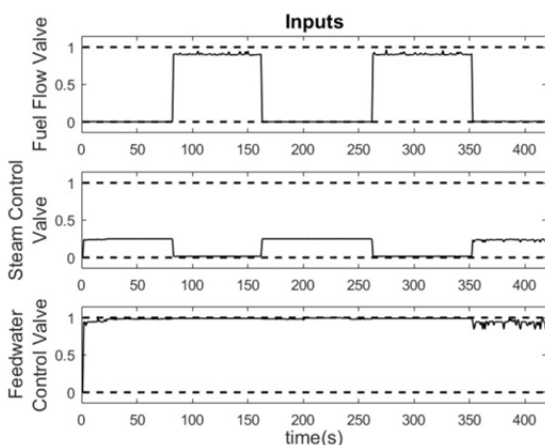


Fig. 20 Results of type-1 fuzzy model predictive controller with disturbance in $t=200$ s (solid line: input; dashed line: set point)
 شکل 20 نتایج حاصل از کنترل مدل پیش‌بین فازی نوع 1 با اعمال اغتشاش در ثانیه 200 (خط ممتد: ورودی، خط چین: مقدار مطلوب)

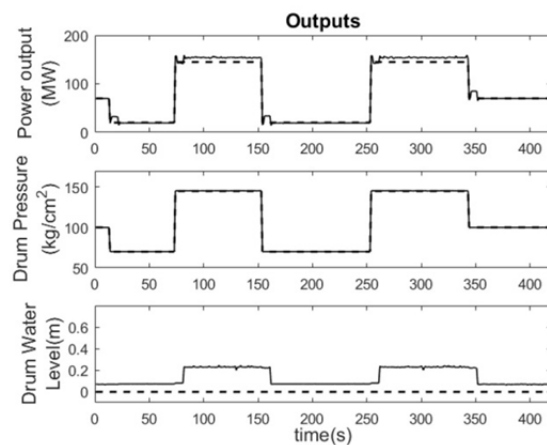


Fig. 17 Results of type-1 fuzzy model predictive controller in normal working conditions (solid line: output; dashed line: set point)
 شکل 17 نتایج حاصل از کنترل مدل پیش‌بین فازی نوع 1 در شرایط کار عادی (خط ممتد: خروجی، خط چین: مقدار مطلوب)

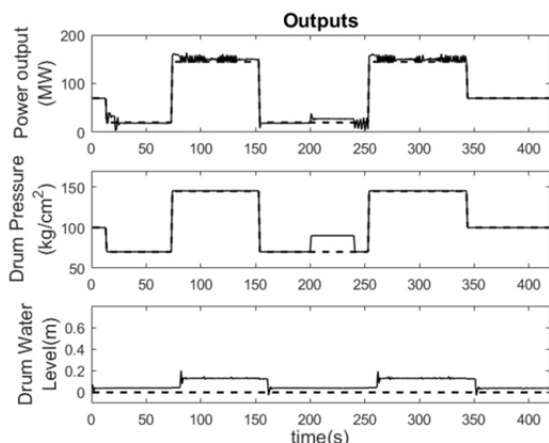


Fig. 22 Results of type-2 fuzzy model predictive controller with disturbance in $t=200$ s (solid line: output; dashed line: set point)

شکل 22 نتایج حاصل از کنترل مدل پیش‌بین فازی نوع 2 با اعمال اغتشاش در ثانیه 200 (خط ممتد: خروجی، خط چین: مقدار مطلوب)

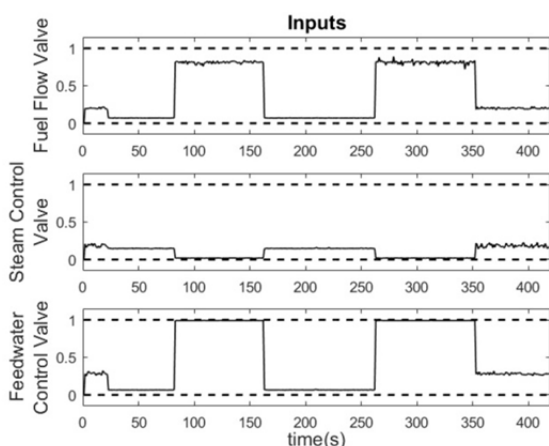


Fig. 23 Results of type-2 fuzzy model predictive controller in normal working conditions (solid line: input; dashed line: set point)

شکل 23 نتایج حاصل از کنترل مدل پیش‌بین فازی نوع 2 در شرایط کار عادی (خط ممتد: ورودی، خط چین: مقدار مطلوب)

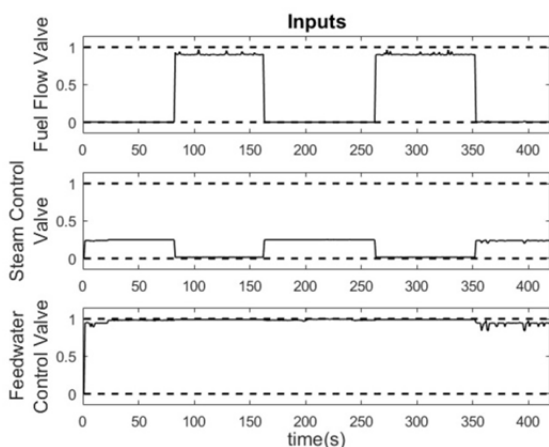


Fig. 24 Results of type-2 fuzzy model predictive controller with disturbance in $t=200$ s (solid line: input; dashed line: set point)

شکل 24 نتایج حاصل از کنترل مدل پیش‌بین فازی نوع 2 با اعمال اغتشاش در ثانیه 200 (خط ممتد: ورودی، خط چین: مقدار مطلوب)

همان‌گونه که از نتایج شکل 21 ملاحظه می‌شود کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 2 می‌تواند سیستم را در شرایط کار عادی با کمی بالازدگی و پایین‌زدگی (قابل چشم‌پوشی، ولی به نسبت بیشتر از کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 1) کنترل کند. همان‌طور که مشخص است سطح سیال درام به پاسخ مطلوب نسبت به کنترل‌کننده‌های مدل پیش‌بین و پیش‌بین فازی نوع 1 نزدیک‌تر شده است، همچنین از نتایج شکل 22 نیز مشخص است در حالت بروز خطا در سیستم کنترل مدل پیش‌بین فازی نوع 1 توانسته است در توان خروجی بهتر از کنترل‌کننده پیش‌بین و پیش‌بین فازی نوع 1 کار کند. در شکل‌های 23 و 24 نیز دیده می‌شود که ورودی‌ها قیود را رعایت می‌کنند و پاسخ رضایت‌بخشی دارند.

برای آزمون کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 2 ارائه شده، نتایج با کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 1 و مدل پیش‌بین مقایسه می‌شود. در این راستا برای بررسی تعقیب ورودی سیستم از دو شاخص عملکرد انتگرال قدر مطلق خطا¹ و انتگرال زمان ضرب در قدر مطلق خطا² استفاده می‌شود که این دو شاخص به صورت روابط (34,35) تعریف می‌شوند. جدول‌های 3 و 4 معیارهای عملکرد کنترل‌کننده‌ها در خروجی سطح آب درام را نشان می‌دهند.

$$IAE = \sum_{k=1}^N |e(k)| \quad (34)$$

$$ITAE = \sum_{k=1}^N |e(k)| \times kT \quad (35)$$

برابر یک است. $N = T_f/T$ زمان نهایی برابر 420 ثانیه و T زمان نمونه برداری

همان‌طور که در جدول‌های 3 و 4 مشاهده می‌کنیم، میزان انتگرال قدر مطلق خطا و انتگرال زمان ضرب در قدر مطلق خطا در کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 2 به صورت قابل ملاحظه‌ای تا حدود بیش از 40% نسبت به کنترل مدل پیش‌بین فازی نوع 1 و مدل پیش‌بین کاهش یافته است.

در مورد سرعت پاسخ‌گویی کنترل‌کننده‌ها نیز در کنترل‌کننده فازی نوع دوم در هر دو حالت حضور و بدون حضور اغتشاش، 8% تا 10% نسبت کنترل‌کننده فازی نوع 1 بهبود حاصل می‌شود. این در حالی است که سرعت پاسخ‌گویی کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 1 خود نیز نسبت به

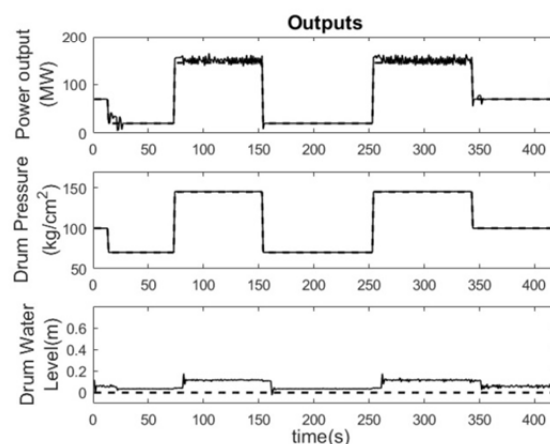


Fig. 21 Results of type-2 fuzzy model predictive controller in normal working conditions (solid line: output; dashed line: set point)

شکل 21 نتایج حاصل از کنترل مدل پیش‌بین فازی نوع 2 در شرایط کار عادی (خط ممتد: خروجی، خط چین: مقدار مطلوب)

¹ IAE: Integral Absolute Error

² ITAE: Integral Time multiplied Absolute Error

without stabilizing constraints or costs, *IFAC-OnLine*, Vol. 48, No. 23, pp. 129-135, 2015.

- [10] M. Ghorbani, S. K. Hosseini Sani, Nonlinear model predictive control of Stewart platform 6 dof, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 41-50, 2016. (in Persian فارسی)
- [11] M. Zamanian, A. Keymasi Khalaji, Trajectory tracking and stabilization of a tractor-trailer wheeled robot using model predictive control, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 167-175, 2018. (in Persian فارسی)
- [12] S. Jalili, B. Rezaie and Z. Rahmani, A novel hybrid model predictive control design with application to a quadrotor helicopter, *Optimal Control Applications and Methods*, 2018. (doi: 10.1002/oca.2411)
- [13] M. Zabihi, Z. Rahmani, B. Rezaie, Controlling parabolic trough collector using model predictive control, *Energy*, Vol. 18, No. 2, pp. 1-14, 2015. (in Persian فارسی)
- [14] G. Prasath, B. Recke, M. Chidambaram, J. B. Jorgensen, Soft Constrained based MPC for Robust Control of a Cement Grinding Circuit, *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 46, No. 32, pp. 475-480, 2013.
- [15] L.-D.-L. Nguyen, I. Prodan, L. Lefevre, D. Genon-Catalot, Distributed Model Predictive Control of Irrigation System using Cooperative Controllers, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 50, No. 1, pp. 6564-6569, 2017.
- [16] L. Yuan, H. Zhao, H. Chen, B. Ren, Nonlinear MPC-based slip control for electric vehicles with vehicle safety constraints, *Mechatronics*, Vol. 38, pp. 1-15, 2016.
- [17] S. Najjaran, Z. Rahmani, M. HassanZadeh, Energy management in order to reduce fuel consumption for parallel Plug-in Hybrid Electric vehicles based on fuzzy predictive control, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 353-362, 2017. (in Persian فارسی)
- [18] S. Najafi, B. Moaveni, Modeling and real-time traffic regulation in metro loop lines using nonlinear model predictive control, *Control*, Vol. 9, No. 2, pp. 1-12, 2015. (in Persian فارسی)
- [19] M. El-Bardini, A. M. El-Nagar, Interval type-2 fuzzy PID controller for uncertain nonlinear inverted pendulum system, *ISA Transactions*, Vol. 53, No. 3, pp. 732-743, 2014.
- [20] A. Sharifian, M. Jabbari Ghadi, S. Ghavidel, L. Li, J. Zhang, A new method based on type-2 fuzzy neural network for accurate wind power forecasting under uncertain data, *Renewable Energy*, Vol. 120, pp. 220-230, 2018.
- [21] F. Zhang, X. Wu, J. Shen, Extended state observer based fuzzy model predictive control for ultra-supercritical boiler-turbine unit, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 118, pp. 90-100, 2017.
- [22] X. Wu, J. Shen, Y. Li, K. Y. Lee, Hierarchical optimization of boiler-turbine unit using fuzzy stable model predictive control, *Control Engineering Practice*, Vol. 30, pp. 112-123, 2014.
- [23] M. Sarailoo, Z. Rahmani, B. Rezaie, Fuzzy predictive control of boiler-turbine system based on hybrid model system, *Industrial and Engineering Chemical Research*, Vol. 53, No. 6, pp. 2362-2381, 2014.
- [24] P. Sarhadi, B. Rezaie, Z. Rahmani, Adaptive predictive control based on adaptive neuro-fuzzy inference system for a class of nonlinear industrial processes, *the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 61, pp. 132-137, 2016.
- [25] K. Sabahi, S. Ghaemi, J. Liu, M. A. Badamchizade, Indirect predictive type-2 fuzzy neural network controller for a class of nonlinear input-delay systems, *ISA Transactions*, Vol. 71, No. 2, pp. 185-195, 2017.
- [26] K. J. Astrom, K. Eklund, A simplified non-linear model of a drum-boiler-turbine unit, *Control*, Vol. 16, No. 1, pp. 145-169, 1972.
- [27] A. J. Morton, P. H. Price, The controllability of steam output, pressure and water level in drum boilers, *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Great Britain*, pp. 75-84, 1977.
- [28] R. D. Bell, K. J. Astram, *Dynamic models for boiler-turbine alternator units: Data logs and parameter estimation for a 160 MW unit*, Report TFRT-3J92, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987.
- [29] U. C. Moon, K. Y. Lee, A boiler-turbine system control using a fuzzy autoregressive moving average (FARMA) model, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 18, No. 1, pp. 142-148, 2003.
- [30] J. Wu, J. Shen, M. Krug, S.K. Nguang, Y. Li, GA-based nonlinear predictive switching control for a boiler-turbine system, *Control Theory and Applications*, Vol. 10, No. 1, pp. 100-106, 2012.
- [31] R. Dimeo, K. Y. Lee, Boiler-turbine control system design using a genetic algorithm, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 4, pp. 752-759, 1995.
- [32] P. Chen, J. S. Shamma, Gain-scheduled l1-optimal control for boiler-turbine dynamics with actuator saturation, *Process Control*, Vol. 14, No. 3, pp. 263-277, 2004.
- [33] W. Tan, H. J. Marquez, T. Chen, J. Liu, Analysis and control of a nonlinear boiler-turbine unit, *Process Control*, Vol. 15, No. 8, pp. 883-891, 2005.
- [34] J. Wu, M. Kurg, S.K. Nguang, J. Shen, Y.G. Li, H_∞ fuzzy tracking control for boiler-turbine systems, *Proceedings of IEEE International Conference on Control and Automation*, Christchurch, New Zealand, pp. 1980-1985, 2009.
- [35] J. A. Rossiter, Y. Ding, Interpolation methods in model predictive control: an overview, *Control*, Vol. 83, No. 2, pp. 297-312, 2010.
- [36] J. M. Mendel, Type-2 Fuzzy sets and systems: an overview, *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Vol. 2, No. 1, pp. 20-29, 2007.

جدول 3 نتایج عددی سطح سیال درام بدون حضور اغتشاش

Table 3 Numerical results of drum water level without disturbance

کنترل‌کننده	ITAE	IAE
مدل پیش‌بین	1.19119e+04	58.3909
مدل پیش‌بین فازی نوع 1	1.1624e+04	57.0020
مدل پیش‌بین فازی نوع 2	6.5146e+03	31.9208

جدول 4 نتایج عددی سطح سیال درام در حضور اغتشاش

Table 4 Numerical results of drum water level in the presence of disturbance

کنترل‌کننده	ITAE	IAE
مدل پیش‌بین	1.1146e+4	55.3862
مدل پیش‌بین فازی نوع 1	1.1024e+04	54.9709
مدل پیش‌بین فازی نوع 2	6.5078e+03	31.8723

کنترل‌کننده مدل پیش‌بین بهتر است.

6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 2 برای کنترل سیستم بویلر-توربین ارائه شد و عملکرد کنترل‌کننده ارائه شده برای چند معیار عملکرد با کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 1 و مدل پیش‌بین مقایسه گردید. نتایج حاصل در کل برتری کنترل‌کننده مدل پیش‌بین فازی نوع 2 نسبت به روش موسوم در کنترل مدل پیش‌بین و کنترل مدل پیش‌بین فازی نوع 1 را نشان داد. روش پیشنهادی به دلیل استفاده از ناظر فازی و ترکیب آن با کنترل پیش‌بین دارای مزیت‌های قابل توجهی است. نتایج حاصل در هر گام به دلیل استفاده از تابع هزینه در سیستم کنترل بهینه است و علاوه بر آن به دلیل وجود بخش فازی دست طراح برای اعمال داده‌های تجربی به سیستم کنترل باز است و می‌توان با توجه به شرایط مختلف با اعمال تغییرات مورد نیاز در بخش فازی نتایج مطلوب را حاصل کرد. تعمیم این روش به سیستم‌های دیگر و نیز استفاده از طرح‌های ترکیبی مبتنی بر روش‌های هوشمند از جمله مطالعات آتی مدنظر نویسندگان است.

7- مراجع

- [1] W. Yang, G. Feng, T. Zhang, Quasi-min-max fuzzy model predictive control of direct methanol fuel cells, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 248, pp. 39-60, 2013.
- [2] J. Holaza, M. Klauco, J. Drgona, J. Oravec, M. Kvasnica, M. Fikar, MPC-based reference governor control of a continuous stirred-tank reactor, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 108, pp. 289-299, 2018.
- [3] C. Bo, J. Li, L. Yang, H. Yi, J. Tang, X. Qiao, MPC of distillation column with side reactors for methylacetate, *Chemical Engineering*, Vol. 25, No. 12, pp. 1798-1804, 2017.
- [4] V. Kirubakaran, T. K. Radhakrishnan, N. Sivakumaran, Fuzzy aggregation based multiple models explicit multi parametric MPC design for a quadruple tank process, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49, No. 1, pp. 555-560, 2016.
- [5] M. Sarailoo, Z. Rahmani, B. Rezaie, A novel model predictive control scheme based on bees algorithm in a class of nonlinear systems: Application to three tanks system, *Neurocomputing*, Vol. 15, pp. 294-304, 2015.
- [6] M. Sarailoo, B. Rezaie, Z. Rahmani, Fuzzy predictive control of three-tank system based on a novel modeling framework of hybrid systems, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of System, Control Engineering*, Vol. 228, No. 6, pp. 369-384, 2014.
- [7] M. Klauco, M. Kvasnica, Control of a boiler-turbine unit using MPC-based reference governors, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 110, pp. 1437-1447, 2017.
- [8] X. Sun, C. Yuan, Y. Cai, S. Wang, L. Chen, Model predictive control of an air suspension with damping multi-mode switching damper based on hybrid model, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 94, pp. 94-110, 2017.
- [9] K. Worthmann, M. W. Mehrez, M. Zanon, G. K. I. Mann, R. G. Gosine, M. Diehl, Regulation of differential drive robots using continuous time MPC

- Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 6, pp. 643-658, 1999.
- [39] J. M. Mendel, Advances in type-2 fuzzy sets and systems, *Information Sciences*, Vol. 177, No. 1, pp. 84-110, 2007.

- [37] J. M. Mendel, Type-2 Fuzzy sets: some questions and answers, *IEEE Neural Networks Society Newsletter*, Vol. 1, pp. 10-13, 2003.
- [38] N. N. Karnik, J. M. Mendel, L. Qilian, Type2 fuzzy logic systems, *IEEE*