

پیاده‌سازی کنترل کننده فازی عصبی تطبیقی در یک سیستم کنترل دما براساس روش مدل مبنا

علیرضا شریفی^۱، مهدی فروغی^۲ و هادی نوبهاری^{۳*}

۱، ۲ و ۳- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

*تهران، کد پستی: ۱۴۵۸۸۹۶۹۴

nobahari@sharif.edu

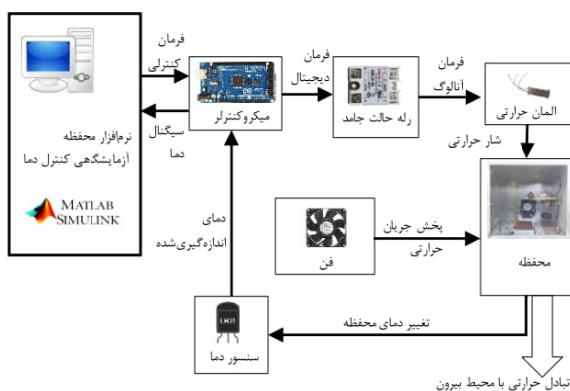
زیرسیستم کنترل دمای یک ماهواره وظیفه حفظ دمای سایر زیرسیستم‌ها را در محدوده مجاز بر عهده دارد. هدف از این مقاله، طراحی و پیاده‌سازی کنترل کننده دما مبتنی بر شناسایی مدل در یک سیستم کنترل دما با استفاده از ابزار تولید خودکار کد است. کنترل کننده پیشنهادی این مقاله، کنترل کننده فازی-عصبی-تطبیقی است. به منظور طراحی کنترل کننده، مدل دینامیکی محفظه آزمایشگاهی با اعمال ورودی‌های مختلف با استفاده از مولد حرارتی و همچنین قرائت دمای محفظه توسط حسگر دما شناسایی می‌شود. کنترل کننده با دریافت دمای محفظه، فرمان کنترلی مناسب را تولید و به مولد حرارتی ارسال می‌کند. سپس، بلوک دیاگرام‌های طراحی شده در محیط سیمولینک به کد C ترجمه شده و بر سخت‌افزار میکروکنترلر که قابلیت پشتیبانی توسط محیط سیمولینک را دارد، پیاده‌سازی می‌شود. در نهایت، با نصب این سخت‌افزار در محفظه آزمایشگاهی، عملکرد کنترل کننده دما در تعقیب دمای مطلوب و حذف اختشاش ورودی بررسی و با عملکرد کنترل کننده تناسبی-مشتقی-انتگرالی مقایسه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سیستم کنترل دما، کنترل کننده فازی عصبی تطبیقی، ابزار تولید خودکار کد، روش مدل مبنا

علامه و اختصارات	
i	شمارنده قوانین کنترل کننده
K	بهره سیستم
K_P	بهره تناسبی
K_I	بهره انتگرالی
K_D	بهره مشتقی
n	تعداد قوانین کنترل کننده
T_{ref}	دما مطلوب
T	دما واقعی
t	زمان نمونه‌برداری
t_1	زمان منتظر با اولین خروجی
t_2	زمان منتظر با دومین خروجی
t_3	زمان منتظر با سومین خروجی
u	متغیر ورودی سیستم
x	بردار متغیرهای حالت
y_1	اولین خروجی سیستم
y_2	دومین خروجی سیستم
y_3	سومین خروجی سیستم
. ۱. دانشجوی دکتری	
. ۲. دانشجوی کارشناسی ارشد	
. ۳. دانشیار (نویسنده مخاطب)	



شکل ۱- محفظه آزمایشگاهی کنترل دما



شکل ۲- نحوه ارتباط اجزای تشکیل دهنده سیستم کنترل دما

در روش تولید خودکار کد می‌توان تأثیر نامعینی‌های موجود در محفظه آزمایشگاهی کنترل دما، ساده‌سازی‌ها و اشتباہات مدل‌سازی بر عملکرد حلقة کنترل کننده را بررسی کرد. همچنین، از مهمترین مزایای این روش می‌توان به تغییر پرخواست پارامترهای کنترل کننده در محیط نرم‌افزار و اعتبارسنجی الگوریتم کنترل کننده در حضور محفظه آزمایشگاهی کنترل دما اشاره کرد [۱۰].

در سالیان گذشته تحقیقاتی در زمینه اعتبارسنجی عملکرد کنترل کننده با استفاده از ابزارهای زمان حقيقی برای یک سیستم کنترل دما انجام شده است. به عنوان نمونه، در مرجع [۱۱]، فرمان لازم در یک محفظه گرم کن هوا به منظور دست‌یابی به مقدار مطلوب دما توسط کنترل کننده تناوبی- انتگرالی- مشتقی (PID) تولید شده است. عملکرد کنترل کننده PID به دلیل نامعینی‌های مدل، غیرخطی بودن تغییرات دما، اغتشاشات محیط مانند گرمایی اجزای داخلی و نیز باز و بسته کردن درب محفظه از دقت کافی برخوردار نیست. بنابراین، به منظور رفع این مشکلات در مرجع [۱۲] از کنترل کننده فازی و در مرجع [۱۳] از یک کنترل کننده PID خود تنظیم استفاده شده است. همچنین، کنترل کننده فازی به منظور

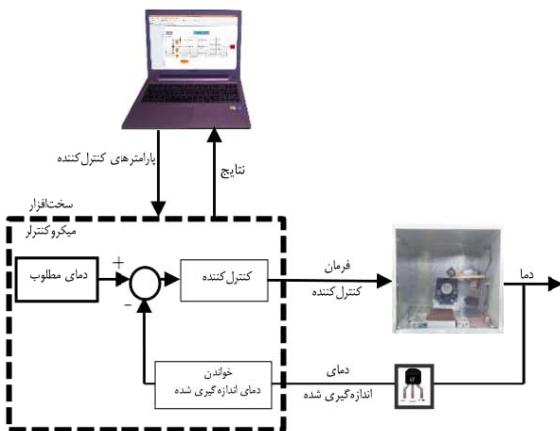
τ	ثابت زمانی
τ_d	تأخير خالص
η	ضریب یادگیری کنترل کننده
ANFIS	کنترل کننده فازی- عصبی- تطبیقی
OBC	حافظه رایانه پروازی
PID	کنترل کننده تناوبی- انتگرالی- مشتقی
PWM	مدولاسیون عرضی پالس
Run on target hardware	ابزار زمان حقيقی

مقدمه

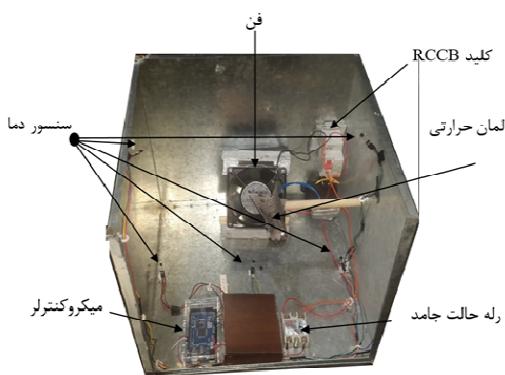
از مهمترین وظایف یک سیستم فضایی به منظور عملکرد مناسب آن می‌توان به حفظ دمای قطعات در محدوده مجاز [۱] و جلوگیری از تغییرات سریع دما اشاره کرد. گرددش یک ماهواره در مدار همواره تحت تأثیر بارهای حرارتی داخلی و خارجی است که این امر باعث تغییر دمای زیرسیستم‌های ماهواره می‌شود [۲]. از این‌رو، وجود یک سیستم کنترل دما در ماهواره ضروری است. لذا، در مراجع [۵-۳] به طراحی کنترل کننده‌های غیرفعال (پسیو) به منظور حفظ دمای قطعات ماهواره پرداخته شده است. سپس، عملکرد این کنترل کننده‌ها با ساخت نمونه آزمایشگاهی و انجام تست محیطی در مراجع [۶-۷] بررسی شده است. همچنین، می‌توان با استفاده از یک محفظه آزمایشگاهی کنترل دما عملکرد کنترل کننده‌های فعال را به منظور حفظ دمای قطعات ماهواره در محدوده مجاز بررسی کرد.

محفظه آزمایشگاهی کنترل دما وسیله‌ای است که امکان دست‌یابی به مقدار مطلوب دما را با استفاده از مولد حرارتی فراهم می‌کند. نمایی از محفظه دما آزمایشگاهی در شکل (۱) نشان داده شده است. در محفظه آزمایشگاهی کنترل دما از یک المان حرارتی به منظور افزایش دمای محفظه، از یک رله حالت جامد به منظور اعمال فرامین کنترلی ارسالی از میکروکنترلر به المان حرارتی، از یک فن به منظور پخش یکنواخت حرارت و از حسگر به منظور اندازه‌گیری دما استفاده می‌شود. ارتباط اجزای تشکیل دهنده محفظه آزمایشگاهی کنترل دما در شکل (۲) نشان داده شده است. همچنین، در این سیستم از ابزار تولید خودکار کد [۸] به منظور پیاده‌سازی مستقیم بلوک دیاگرام‌های دریافت خروجی در محیط شبیه‌سازی شامل بلوک دیاگرام‌های دریافت خروجی حسگر دما، محاسبه فرمان کنترلی و ارسال فرمان به المان حرارتی بر روی میکروکنترلر استفاده می‌شود. در این صورت، کنترل کننده طراحی شده در محیط شبیه‌سازی با استفاده از ابزار زمان حقيقی [۹] به زبان C ترجمه شده و به محفظه آزمایشگاهی کنترل دما اعمال می‌شود.

خودکار کد در محفظه آزمایشگاهی کنترل دما نشان می‌دهد. دمای محفظه توسط حسگر دما با طراحی بلوک دیاگرام لازم در محیط شبیه‌سازی قرائت می‌شود. سپس، به طراحی کنترل کننده دما که ورودی آن اختلاف بین خروجی حسگر دما و دمای مطلوب است، پرداخته می‌شود. در گام بعد، بلوک دیاگرام‌های طراحی شده در محیط شبیه‌سازی با استفاده از ابزار زمان حقیقی تولید خودکار کد روی سخت‌افزار آردینو ATmega2560 که قابلیت پشتیبانی توسط محیط شبیه‌سازی را دارد، پیاده‌سازی می‌شود. فرامین کنترلی ANFIS که به صورت مدولاسیون عرضی پالس (PWM) است، توسط این سخت افزار تولید و به رله حالت جامد اعمال می‌شود. رله حالت جامد فرامین کنترلی را به المان حرارتی ارسال می‌کند. با دریافت این فرامین، محفظه آزمایشگاهی در دمای مطلوب قرار می‌گیرد. همچنین، در محفظه آزمایشگاهی از یک فن به منظور پخش یکنواخت حرارت استفاده می‌شود. اجزای سیستم کنترل دما در شکل (۴) نشان داده شده است. در بخش‌های بعد، مراحل اصلی الگوریتم شامل روند شناسایی سیستم و طراحی کنترل کننده فازی - عصبی - تطبیقی به صورت مفصل توضیح داده می‌شود.



شکل ۳- شماتیک پیاده‌سازی کنترل کننده بر روی میکروکنترلر با استفاده از ابزار تولید خودکار کد



شکل ۴- اجزای سیستم کنترل دما

عملکرد مناسب به انتخاب دقیق توابع عضویت، ضرایب مقیاس‌بندی، الگوریتم استنتاج، فازی‌ساز و فازی‌زدا وابسته است. از این‌رو، با استفاده از کنترل کننده فازی - عصبی - تطبیقی (ANFIS) می‌توان انتخاب پارامترهای کنترل کننده فازی را به صورت هوشمندانه انجام داد.

مسئله مورد بررسی در این مقاله، طراحی و پیاده‌سازی ANFIS مبتنی بر شناسایی مدل برای یک محفظه آزمایشگاهی کنترل دما است. به این منظور، ابتدا دمای محفظه توسط حسگر دما با طراحی بلوک دیاگرام‌های لازم در محیط شبیه‌سازی قرائت می‌شود. سپس، دینامیک سیستم با اعمال ورودی پله شناسایی می‌شود. در گام بعد، به طراحی و شبیه‌سازی کنترل کننده ANFIS پرداخته می‌شود. در نهایت، کنترل کننده طراحی شده بر روی میکروکنترلر پیاده‌سازی می‌شود. کنترل کننده با دریافت دمای محفظه از حسگر، دمای فرمان مناسب را تولید و به المان حرارتی ارسال می‌کند. با اعمال فرمان، دمای محفظه آزمایشگاهی به دمای مطلوب میل می‌کند. در نهایت، عملکرد این کنترل کننده با تعقیب دمای مطلوب میل می‌کند. در نهایت، عملکرد کنترل کننده از PID مقایسه می‌شود.

در ادامه، ابتدا به بیان مسئله و معرفی ابزار تولید خودکار کد پرداخته می‌شود. سپس، مدل محفظه آزمایشگاهی کنترل دما با اعمال ورودی پله شناسایی می‌شود. در قدم بعد، به منظور طراحی کنترل کننده ANFIS، ابتدا کنترل پذیری محفظه آزمایشگاهی بررسی و سپس ساختار کنترل کننده ANFIS بیان می‌شود. پس از آن، عملکرد کنترل کننده ANFIS طراحی شده در تعقیب مقادیر مطلوب در محیط شبیه‌سازی ارزیابی می‌شود. همچنین، در بخش انتهایی عملکرد کنترل کننده پس از پیاده‌سازی در محفظه آزمایشگاهی کنترل دما با استفاده از ابزار تولید خودکار کد بررسی می‌شود.

بیان مسئله

محفظه آزمایشگاهی کنترل دما به منظور فراهم کردن امکان طراحی و پیاده‌سازی سریع کنترل کننده و نیز بررسی عملکرد کنترل کننده‌های مختلف ایجاد شده است. همچنین، کنترل این سیستم به دلیل وجود نامعینی‌های مدل، غیرخطی بودن تغییرات دما، اغتشاشات محیط مانند گرمایشی اجزای داخلی و نیز باز و بسته کردن درب محفظه یک مسئله مهم محسوب می‌شود. از این‌رو، در این مقاله عملکرد کنترل کننده ANFIS در سیستم کنترل دما بررسی می‌شود. شکل (۳)، شماتیک پیاده‌سازی کنترل کننده فازی - عصبی - تطبیقی را بر روی میکروکنترلر با استفاده از ابزار تولید

بهره سیستم (K): بهره سیستم مرتبه اول از نسبت مقدار نهایی سیستم به مقدار ورودی پله حاصل می‌شود. از آنجاکه، سیستم کنترل دما مطابق با شکل (۵) به حالت ماندگار نرسیده است، بنابراین بهره سیستم از حل معادله زیر حاصل می‌شود:

$$aln(KA-y_3)-(a+1)ln(KA-y_2)+ln(KA-y_1)=0 \quad (2)$$

در رابطه (۲)، A مقدار ورودی پله است. همچنین، پارامتر a از رابطه (۳) حاصل می‌شود:

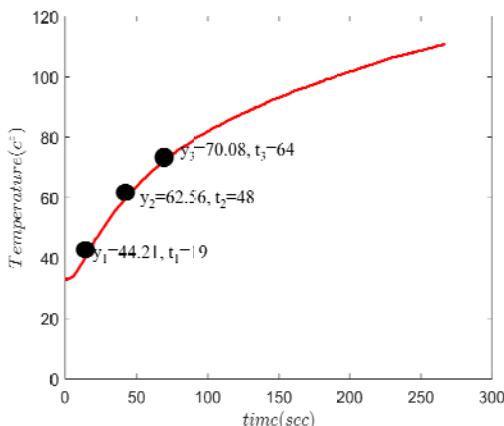
$$a = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_2} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، نقاط (t_1, y_1) , (t_2, y_2) و (t_3, y_3) بیانگر سه نقطه از پاسخ سیستم هستند که در شکل (۵) نشان داده شده است. با جایگذاری این نقاط در معادله (۲)، مقدار بهره سیستم برابر 0.274 حاصل می‌شود.

ثابت زمانی سیستم (τ): ثابت زمانی سیستم از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{KA - y_1}{KA - y_2}} \quad (4)$$

با جایگذاری نقاط (t_1, y_1) و (t_2, y_2) در رابطه (۴)، ثابت زمانی سیستم کنترل دما برابر $77/51$ به دست می‌آید.



شکل ۵- تاریخچه زمانی دمای سیستم کنترل دما به ازای اعمال ورودی با دامنه ۲۵۶ عرض پالس

تأخير خالص سیستم (τ_d): تأخیر خالص بیانگر زمان تأخیر در شروع پاسخ سیستم است. بنابراین، تأخیر خالص سیستم کنترل دما با توجه به شکل (۵) برابر $1/66$ ثانیه است. در این صورت، تابع تبدیل سیستم کنترل دما به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$G(s) = \frac{0.274}{77.51s + 1} e^{-\frac{1.66s}{66}} \quad (5)$$

ابزار تولید خودکار کد

تولید خودکار کد به معنای ترجمه یک زبان برنامه‌نویسی به زبان دیگر است [۱۴]. به عنوان نمونه، با تولید خودکار کد می‌توان یک برنامه سطح بالا که در محیط نرم‌افزار نوشته شده است، را به زبان ماشین ترجمه و سپس بر روی یک میکروکنترلر پیاده‌سازی کرد. محیط شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب، یکی از مهم‌ترین ابزارهای تولید خودکار کد را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. این محیط با تبدیل C++ [۱۵]، قابلیت پیاده‌سازی مستقیم مدل ایجاد شده در محیط شبیه‌سازی را بر سخت‌افزار کنترل کننده دارد. در این مقاله، از این ابزار به منظور پیاده‌سازی الگوریتم کنترل کننده ANFIS که در محیط شبیه‌سازی طراحی شده است، بر روی سخت‌افزار استفاده می‌شود.

شناسایی سیستم کنترل دما

این بخش به شناسایی سیستم کنترل دما براساس حوزه زمان می‌پردازد. به این‌منظور، مدل دینامیکی سیستم براساس اطلاعات به دست آمده از خروجی حسگر به ازای اعمال ورودی پله ثابت حاصل می‌شود. در این صورت، با یافتن مدل دینامیکی سیستم می‌توان پاسخ سیستم کنترل دما را به ورودی‌های مختلف پیش‌بینی و محاسبه کرد. همچنین، می‌توان از مدل دینامیکی در طراحی کنترل کننده ANFIS برای محفظه آزمایشگاهی استفاده کرد.

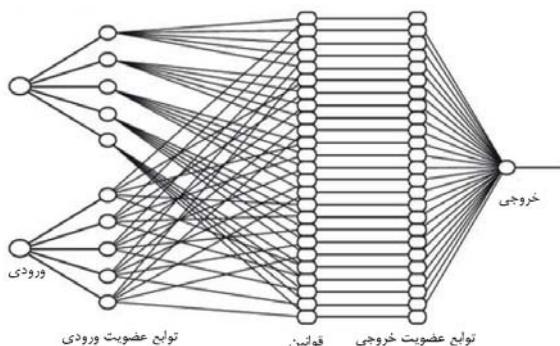
به منظور شناسایی محفوظه دما، ورودی پله با دامنه ۲۵۶ مدولاسیون عرضی پالس به سیستم کنترل دما اعمال می‌شود. سپس، دما با استفاده از حسگر اندازه‌گیری می‌شود. تاریخچه زمانی خروجی دما در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پاسخ سیستم کنترل دما به ازای ورودی پله دارای ویژگی‌هایی همچون نوسانی نبودن پاسخ سیستم و صفر نبودن شبیب نمودار در لحظه شروع پس از میزان تأخیر اولیه است. بنابراین، سیستم کنترل دما را می‌توان با یک سیستم مرتبه اول تقریب زد [۱۵]. تابع تبدیل یک سیستم مرتبه اول به صورت رابطه (۱) نشان داده می‌شود:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\frac{\tau_d s}{66}} \quad (1)$$

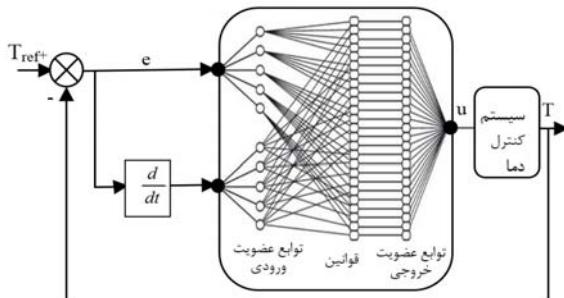
در رابطه (۱)، پارامترهای K، τ و τ_d به ترتیب بیانگر بهره سیستم، ثابت زمانی و مقدار تأخیر خالص است. در ادامه نحوه محاسبه هر یک از این پارامترها برای سیستم کنترل دما توضیح داده خواهد شد.

ساختار، به منظور آموزش مدل استنتاج فازی-عصبی-تطبیقی از الگوریتم یادگیری ترکیبی استفاده می‌شود. این الگوریتم دارای چهار لایه است [۱۷]. در لایه اول، تمام ورودی‌ها به بازه $[1, -1]$ نگاشت داده می‌شوند. در لایه دوم، فرایند فازی‌سازی از روش گرادیان نزولی به منظور تنظیم پارامترهای غیرخطی (پارامترهای توابع عضویت فازی) استفاده می‌شود. در لایه سوم، به منظور بهروزرسانی پارامترهای خطی (پارامترهای قسمت استنتاج قوانین فازی) از روش تخمین حداقل مربعات بازگشتی استفاده می‌شود. در نهایت، عمل فازی‌زدایی در لایه چهارم انجام می‌شود. لایه‌های کنترل کننده ANFIS در شکل (۷) نمایش داده شده است.

به منظور آموزش شبکه عصبی نیاز به داده‌های آموزشی است. بنابراین، ابتدا کنترل کننده PID بر روی سیستم کنترل دما پیاده‌سازی می‌شود. سپس مقادیر خطا (e)، نرخ خطأ (\dot{e}) و مدولاسیون عرضی پالس (u) اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت، این مقادیر جهت آموزش کنترل کننده ANFIS استفاده می‌شوند. بلوک دیاگرام کنترل کننده ANFIS در شکل (۸) نشان داده شده است.



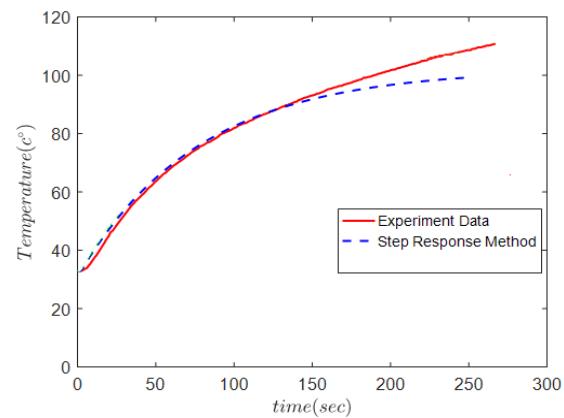
شکل ۷- لایه‌های کنترل کننده ANFIS



شکل ۸- بلوک دیاگرام کنترل کننده ANFIS

با توجه به اینکه نوع روش فازی در کنترل کننده ANFIS سوگینو^۴ است، در نتیجه خروجی کنترل کننده (مدولاسیون عرض پالس) به صورت زیر حاصل می‌شود:

در نهایت، عملکرد مدل شناسایی شده اعتبارسنجی می‌شود. شکل (۶) به مقایسه نتایج حاصل از پاسخ سیستم شناسایی شده (رابطه ۵) با پاسخ سیستم کنترل دما پس از اعمال ورودی پله می‌پردازد. نتایج حاکی از عملکرد مناسب مدل شناسایی شده سیستم کنترل دما است.



شکل ۶- مقایسه پاسخ سیستم شناسایی شده با پاسخ سیستم کنترل دما به‌ازای اعمال ورودی پله

طراحی کنترل کننده ANFIS

این بخش به طراحی کنترل کننده ANFIS براساس مدل دینامیکی شناسایی شده محفظه دما می‌پردازد. این کنترل کننده از عملکرد قابل قبولی نسبت به غیرخطی‌بودن تغییرات دما و اغتشاشات ورودی همچون گرمایشی اجزای داخلی و نیز باز و بسته کردن درب محفظه برخوردار است. به منظور طراحی کنترل کننده ANFIS، ابتدا کنترل پذیری سیستم کنترل دما بررسی می‌شود. سپس، کنترل کننده ANFIS با استفاده از مدل شناسایی شده طراحی می‌شود.

بررسی کنترل پذیری

اگر بتوان با تغییر ورودی یک سیستم دینامیکی بر متغیرهای حالت تأثیر گذاشت؛ در این صورت، سیستم دینامیکی کنترل پذیر است. بنابراین، شرط لازم و کافی به منظور کنترل پذیری یک سیستم را می‌توان با کامل بودن رتبه ماتریس کنترل پذیری بررسی کرد [۱۶]. بنابراین، با توجه به مدل شناسایی شده سیستم کنترل دما، ماتریس کنترل پذیری به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$C_s = 1.155 \quad (6)$$

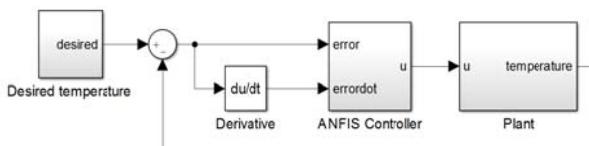
از آنجاکه، دترمینان ماتریس فوق مخالف صفر است، بنابراین سیستم کنترل دما کنترل پذیر است.

ساختار کنترل کننده ANFIS

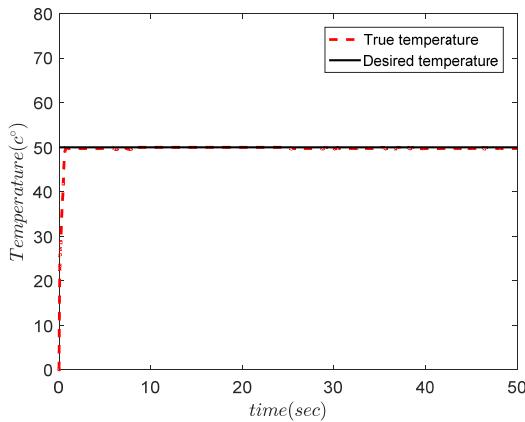
کنترل کننده ANFIS در حقیقت یک سیستم استنتاج فازی است که در چارچوب شبکه‌های عصبی-تطبیقی ارائه شده است. در این

شبیه‌سازی کنترل کننده ANFIS

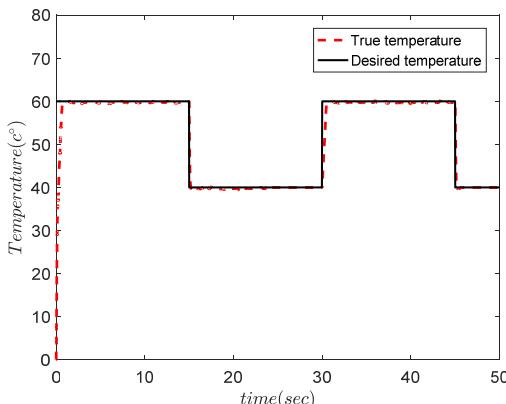
این بخش به ارائه نتایج شبیه‌سازی کنترل کننده ANFIS بهمنظور ردیابی مقادیر مطلوب در محیط شبیه‌سازی نرم‌افزار متلب می‌پردازد. بلوك دیاگرام سیستم کنترل کننده دما در محیط شبیه‌سازی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. عملکرد کنترل کننده ANFIS در تعقیب دمای مطلوب با دامنه ۵۰ درجه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همچنین عملکرد این کنترل کننده بهمنظور تعقیب دماهای مطلوب به صورت موج مربعی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. نتایج حاکی از عملکرد مناسب کنترل کننده ANFIS در محیط شبیه‌ساز بهمنظور ردیابی مقادیر مطلوب است.



شکل ۱۰- بلوك دیاگرام سیستم کنترل دما در محیط شبیه‌سازی



شکل ۱۱- عملکرد کنترل کننده شبیه‌سازی شده ANFIS در تعقیب دمای مطلوب با دامنه ۵۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۲- عملکرد کنترل کننده شبیه‌سازی شده ANFIS در تعقیب دمای مطلوب به صورت موج مربعی

$$u = \frac{\sum_{i=1}^{n=25} f_i(a_i e + b_i \dot{e} + c_i)}{\sum_{i=1}^{n=25} f_i} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، i و n به ترتیب بیانگر شمارنده و تعداد قوانین هستند. رویه قوانین در شکل (۹) نمایش داده شده است. همچنین، f_i بیانگر ANFIS درودی نام است. a_i ، b_i و c_i پارامترهای کنترل کننده ANFIS محاسبه می‌شوند. این پارامترها توسط قانون یادگیری شبکه‌های عصبی به‌گونه‌ای به‌روزرسانی می‌شوند که تابع هزینه زیر کمینه شود:

$$E = \frac{1}{2} \sum (T_{ref}(t) - T(t))^2 \quad (8)$$

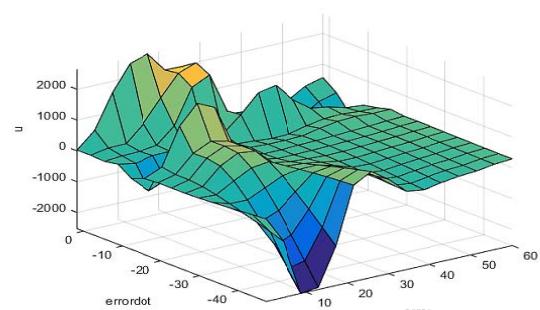
در رابطه (۸)، T و T_{ref} به ترتیب بیانگر دمای سیستم و دمای مطلوب است. در این صورت، کنترل کننده می‌تواند به سرعت نسبت به تغییرات واکنش نشان دهد و در نتیجه منجر به کمترین مقدار خطای حالت ماندگار شود. در نتیجه، قانون به‌روزرسانی کنترل کننده (۸) به صورت زیر حاصل می‌شوند [۱۸]:

$$a_i(t+1) = a_i(t) + \eta e^2(t) \frac{\sum_{i=1}^{n=25} f_i^4}{\sum_{i=1}^{n=25} f_i} \quad (9)$$

$$b_i(t+1) = b_i(t) + \eta e(t) \dot{e}(t) \frac{\sum_{i=1}^{n=25} f_i^4}{\sum_{i=1}^{n=25} f_i} \quad (10)$$

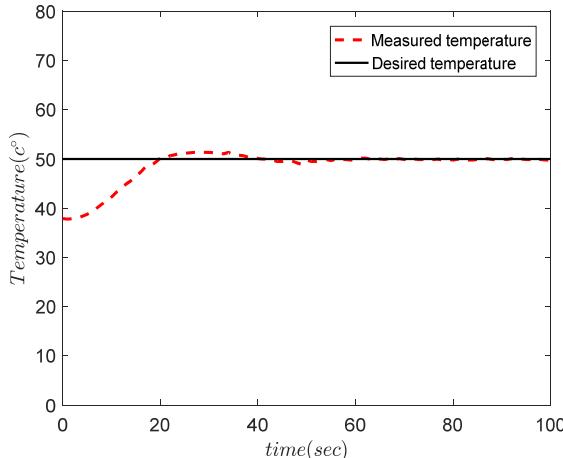
$$c_i(t+1) = c_i(t) + \eta e(t) \frac{\sum_{i=1}^{n=25} u_i^4}{\sum_{i=1}^{n=25} u_i^4} \quad (11)$$

در رابطه (۹) تا (۱۱)، η ضریب یادگیری کنترل کننده ANFIS است. این پارامتر باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که سرعت یادگیری افزایش یابد. همچنین، f_i^4 بیانگر میزان تحریک قانون نام در لایه چهارم است.

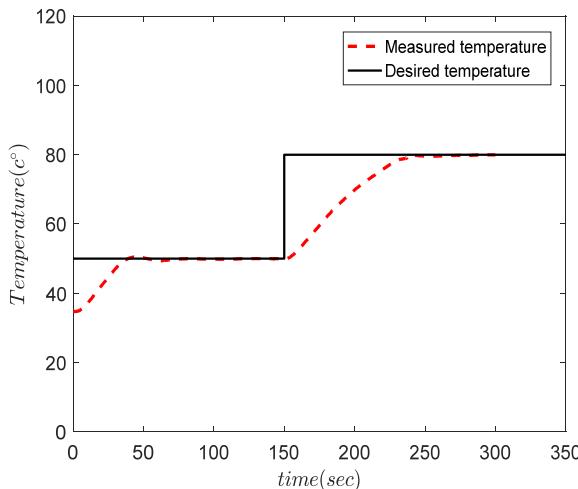


شکل ۹- رویه قوانین کنترل کننده ANFIS

سانتی‌گراد در شکل (۱۴) نشان داده شده است. بنابراین، کنترل کننده ANFIS قابلیت ردیابی دمای مطلوب مختلف را دارد.



شکل ۱۳- عملکرد کنترل کننده پیاده‌سازی شده ANFIS در تعقیب دمای مطلوب با دامنه ۵۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۱۴- عملکرد کنترل کننده پیاده‌سازی شده ANFIS در تعقیب دمای مطلوب با دامنه‌های ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد

بررسی امکان حذف اغتشاش

این بخش به بررسی امکان حذف اغتشاش ورودی توسط کنترل کننده ANFIS می‌پردازد. بدین منظور، اغتشاش ورودی ثابت با دامنه ۲۰ عرض پالس در فاصله زمانی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ ثانیه به سیستم کنترل دما اعمال می‌شود. نتایج عملکرد کنترل کننده ANFIS در حضور اغتشاش ورودی در شکل (۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کنترل کننده ANFIS قابلیت حذف اغتشاش ورودی را دارد.

نتایج پیاده‌سازی کنترل کننده ANFIS

این بخش به بررسی نتایج حاصل از پیاده‌سازی کنترل کننده ANFIS در سیستم کنترل دما می‌پردازد. بدین منظور، ابتدا عملکرد کنترل کننده ANFIS در ردیابی مقادیر مطلوب بررسی می‌شود. سپس، عملکرد این کنترل کننده به منظور حذف اغتشاش ورودی ارزیابی می‌شود. در نهایت، عملکرد کنترل کننده‌های ANFIS با یکدیگر مقایسه می‌شود. مقادیر بهره‌های کنترل کننده PID در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- بهره‌های کنترل کننده PID

بهره	مقدار	واحد
(K _P) تناسی	۲۰۵	ولتاژ به درجه
(K _I) انتگرالی	۲/۳۳	ولتاژ در ثانیه بر درجه
(K _D) مشتقی	۲۸۸	ولتاژ در مجذور ثانیه بر درجه

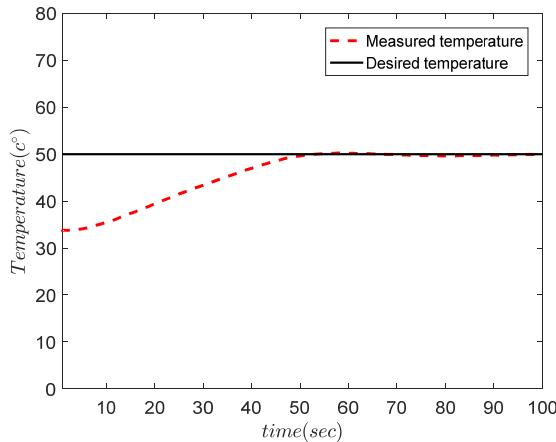
محدوده دمای مجاز تجهیزات ماهواره در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به این جدول، محفظه آزمایشگاهی کنترل دما باید قابلیت عملکرد در دمای میان ۵ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد را داشته باشد. بنابراین در این پژوهش، عملکرد کنترل کننده ANFIS در تعقیب دمای مطلوب با دامنه‌های ۴۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شده است.

جدول ۲- محدوده دمای مجاز تجهیزات ماهواره [۱۹]

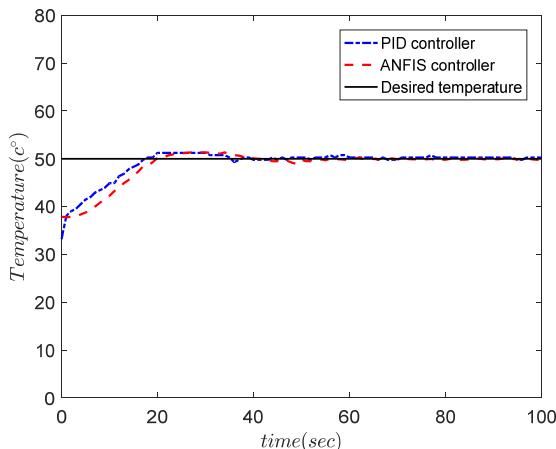
تجهیزات ماهواره	محدوده دمای مجاز (°C)
باتری	-۵ تا ۳۰
واحد تله‌متري	-۵ تا ۵۰
آرایه‌های خورشیدی	-۵۰ تا ۱۲۰
دوربین	-۵ تا ۳۰
فرستنده تصویر	-۱۰ تا ۵۰

بررسی ردیابی دمای مطلوب

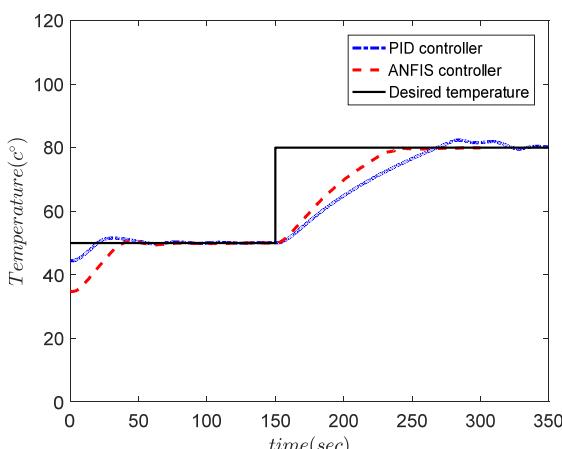
این بخش به بررسی نتایج حاصل از پیاده‌سازی کنترل کننده ANFIS به منظور تعقیب مقادیر مطلوب می‌پردازد. عملکرد این کنترل کننده در تعقیب دمای مطلوب پله با دامنه ۵۰ درجه سانتی‌گراد در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همچنین، عملکرد کنترل کننده در تعقیب دمای مطلوب با دامنه‌های ۵۰ و ۸۰ درجه



شکل ۱۵- عملکرد کنترل کننده ANFIS در حضور اغتشاش ورودی پله



شکل ۱۶- مقایسه عملکرد کنترل کننده‌های ANFIS و PID در تعقیب دمای مطلوب با دامنه ۵۰ درجه سانتی گراد



شکل ۱۷- مقایسه عملکرد کنترل کننده‌های ANFIS و PID در تعقیب دماهای مطلوب با دامنه‌های ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد

مقایسه عملکرد کنترل کننده ANFIS با کنترل کننده PID

در این بخش، عملکرد کنترل کننده ANFIS با عملکرد کنترل کننده PID به منظور تعقیب دماهای مطلوب مقایسه می‌شود. نتایج حاصل از پیاده‌سازی کنترل کننده‌های ANFIS و PID در تعقیب دمای مطلوب پله با دامنه ۵۰ درجه سانتی گراد در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همچنین شکل (۱۷)، عملکرد این کنترل کننده‌ها را در تعقیب دماهای مطلوب با دامنه‌های ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کنترل کننده ANFIS عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده PID به منظور تعقیب دماهای مطلوب دارد. در مقابل مزیت کنترل کننده PID این است که تنظیم پارامترهای آن به دقت مدل دینامیکی سیستم چندان حساس نیست. در حالی که، برای آموزش کنترل کننده ANFIS به مدل دقیق دینامیکی سیستم نیاز است که در این پژوهش مدل دقیق دینامیکی سیستم در بخش شناسایی استخراج شد.

حجم حافظه مورد نیاز برای کنترل کننده‌های ANFIS و PID به ترتیب برابر ۲۱ و ۱۰ کیلو بایت است. از آنجا که، این حجم حافظه، میزان کمی از حجم کل حافظه رایانه پروازی (OBC) را اشغال می‌کند، بنابراین پیاده‌سازی کنترل کننده ANFIS در رایانه پروازی ماهواره امکان‌پذیر است. به عنوان نمونه، کنترل کننده ANFIS قابلیت پیاده‌سازی در پردازنده Intel X86 که یک پردازنده متداول در خانواده میکروماهواره‌ها با حجم حافظه یک مگابایت است [۲۰]، را دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کنترل کننده ANFIS مبتنی بر شناسایی مدل در یک سیستم کنترل دما با استفاده از ابزار تولید خودکار کد طراحی و بر سخت‌افزار میکروکنترلر پیاده‌سازی شد. با نصب این سخت‌افزار در محفظه آزمایشگاهی، ابتدا عملکرد کنترل کننده ANFIS در تعقیب دمای مطلوب و همچنین حذف اغتشاش ورودی بررسی شد. نتایج حاکی از عملکرد مناسب کنترل کننده ANFIS به منظور تعقیب دمای مطلوب در سیستم کنترل دما و حذف اغتشاش ورودی است. در کام بعد، عملکرد کنترل کننده‌های ANFIS و PID با یکدیگر مقایسه شد. کنترل کننده ANFIS عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده PID به منظور تعقیب دمای مطلوب و امکان واکنش سریع‌تر نسبت به تغییرات سیستم را دارد. در نهایت، بودجه محاسباتی کنترل کننده ANFIS در مقایسه با کنترل کننده PID و قابلیت پیاده‌سازی در رایانه پروازی ماهواره بررسی شد.

- [7] Dennison, JR., Hartley, K., Montierth Phillipps, L., Dekany, J., Dyer, JS. and Johnson, RH., "Small Satellite Space Environments Effects Test Facility," 2014.
- [8] Herrington, J., *Code Generation in Action*, Manning Publications Co, 2003.
- [9] Bucher, R., and Balemi, S., "Rapid Controller Prototyping with Matlab/Simulink and Linux," *Control Engineering Practice*, Vol. 14, No. 2, 2006, pp. 185-192.
- [10] Nobahari, H. and Sharifi, AR., *Lab Manual for Control System*, Sharif University Technology, Aerospace Engineering Department, 2016 (in persian).
- [11] Wati, DA. and Hidayat, R., "Genetic Algorithm-based PID Parameters Optimization for Air Heater Temperature Control," *Robotics, Biomimetics, and Intelligent Computational Systems (ROBIONETICS), 2013 IEEE International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 30-34.
- [12] Wati, DA., "Design of Type-2 Fuzzy Logic Controller for Air Heater Temperature Control," *Science and Technology (TICST), 2015 International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 360-365.
- [13] Yu, E. and Hu, Y., "A Novel Modified PID Controller Applied to Temperature Control with Self-Tuning Ability," *In Control and Decision Conference (CCDC), IEEE*, 2016, pp. 7025-7029.
- [14] Marwedel, P. and Goossens, G., editors., "Code Generation for Embedded Processors," *Springer Science and Business Media*, Vol. 317, 2013.
- [15] Ogata, K., *Modern Control Engineering*, Third Edition, perntice Hall, 1997.
- [16] Atkinson, P., *Feedback Control Theory for Engineers*, Springer Science and Business Media, 2012.
- [17] Rashidi, F., Sheraktmasoum, M. and Rahmati, A., "Adaptive Fuzzy Controller Design for DC-DC Exchangers," *18th International Power System Conference*, 2004 (in persian).
- [18] Kim, J. and Kasabov, N., "HyFIS: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems and their Application to Nonlinear Dynamical Systems," *Neural Networks*, Vol. 12, No. 9, 1999, pp. 1301-1319.
- [19] Gilmore, DG., *Spacecraft Thermal Control Handbook, Fundamental Technologies*, Vol. I The Aerospace Press/American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.
- [20] Ahmed, HE., Kamal, E. and Elsayed, A., "Telemetry Microcomputer Application in Satellites OBC," *In Internet, 2009. AH-ICI 2009. First Asian Himalayas International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 1-6.

پیوست الف - اثبات رابطه (۲)

پاسخ زمانی سیستم مرتبه اول بهازای ورودی پله با اندازه A با گرفتن لاپلاس معکوس از رابطه (۱) بهصورت رابطه (۲) حاصل می‌شود:

$$y(t) = KA \left(1 - e^{-\frac{t-\tau_1}{\tau}} \right) \quad (12)$$

پس ثابت زمانی این سیستم را می‌توان با داشتن مختصات دو نقطه (t₁,y₁) و (t₂,y₂) و (t₃,y₃) یا (t₂,y₂) بهصورت رابطه (۱۳) محاسبه کرد:

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{K-y_1}{K-y_2}} = \frac{t_3 - t_2}{\ln \frac{K-y_2}{K-y_3}} \quad (13)$$

اگر $a = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_2}$ فرض شود؛ آنگاه رابطه (۱۴) بهصورت زیر حاصل می‌شود:

$$a \ln(KA - y_3) - (a+1) \ln(KA - y_2) + \ln(KA - y_1) = 0 \quad (14)$$

مراجع

- [1] VanOutryve, C.B., *A Thermal Analysis and Design Tool for Small Spacecraft*, San Jose State University, 2008.
- [2] Bolandi, H., Mirzaghatghi, A., Esmailzadeh, B. and Talaei, M., "Modeling and Thermal Satellite Analysis using a Grid-Electric Method," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 5, No. 1, 2013 (in persian).
- [3] Saghari, A., Vesi, H. and Kosari, A., "Circuit Optimal Design for a Remote Sensing Satellite based on the Power Requirements and Thermal Load Control," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 9, No. 3, 2017 (in persian).
- [4] Baturkin, V., "Micro-satellites Thermal Control—Concepts and Components," *ActaAstronautica*, Vol. 56, No. 1, 2005, pp. 161-170.
- [5] Gilmore, DG. and Donabedian, M. editors., *Spacecraft Thermal Control Handbook: Cryogenics*, Vol. 2. AIAA, 2003.
- [6] Dekany, J., Johnson, RH., Wilson, G., Evans, A., Dennison, JR., "Ultrahigh Vacuum Cryostat System for Extended Low-Temperature Space Environment Testing," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 42, No. 1, 2014, pp. 266-271.