

Design and Real-time Implementation of the Adaptive-Neuro-Fuzzy Controller for a Temperature Control System using Model-Based Design

A.R. Sharifi¹, M. Foroughi² and H. Nobahari^{3*}

1, 2, 3. Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology

*Postal Code: 1458889694, Tehran, IRAN

nobahari@sharif.edu

In this paper, an adaptive-neuro-fuzzy controller is implemented online for a temperature control system using model-based design. First, the time domain identification approaches are utilized for the dynamic model identification. Then, the identified model is used in the adaptive-neuro-fuzzy controller. The simulated model of the proposed controller, created in the Simulink environment, is translated into C code using Simulink Coder. The generated C code is compiled into a hardware device and is successfully embedded on a microcontroller. In the next step, the experimental setup of a temperature controller is done to verify the adaptive-neuro-fuzzy controller. Finally, a comparison was made between the proposed controller and a classical proportional-integral-derivative controller to investigate the performance of the proposed approach. The results demonstrate that the proposed approach provides an excellent performance for a temperature control system.

Keywords: Temperature control system, Adaptive-neuro-fuzzy controller, Model-based design

1. PhD Student

2.M. Sc. Student

3.Associate Professor(Corresponding Author)

پیاده‌سازی کنترل‌کننده فازی عصبی تطبیقی در یک سیستم کنترل دما بر اساس روش مدل مبنا

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

۱ و ۲ - دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

*تهران، کد پستی: ۱۴۵۸۸۸۹۶۹۴

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 کنترل‌کننده دما مبتنی بر شناسایی مدل در یک سیستم کنترل دما با استفاده از ابزار تولید خودکار کد است. کنترل‌کننده پیشنهادی این مقاله، کنترل‌کننده فازی-عصبی-تطبیقی است. به منظور طراحی کنترل‌کننده، مدل دینامیکی محفظه آزمایشگاهی با اعمال ورودی‌های مختلف با استفاده از مولد حرارتی و همچنین قرائت دمای محفظه توسط حسگر دما شناسایی می‌شود. کنترل‌کننده با دریافت دمای محفظه، فرمان کنترلی مناسب را تولید و به مولد حرارتی ارسال می‌کند. سپس، بلوک دیگرام‌های 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 کنترل‌کننده دما در تعقیب دمای مطلوب و حذف اغتشاش ورودی بررسی و با عملکرد کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی-انترگرالی مقایسه می‌شود.

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

		علائم و اختصارات	
i	شمارنده قوانین کنترل‌کننده		
K	بهره سیستم	A	دامنه ورودی پله
K_P	بهره تناسبی	a	نسبت تغییرات دما
K_I	بهره انتگرالی	a_i	پارامتر کنترل‌کننده
K_D	بهره مشتقی	b_i	پارامتر کنترل‌کننده
n	تعداد قوانین کنترل‌کننده	C_s	ماتریس کنترل‌پذیری
T_{ref}	دمای مطلوب	c_i	پارامتر کنترل‌کننده
T	دمای واقعی	E	تابع هزینه
t	زمان نمونه‌برداری	e	مقدار خطای سیستم
t_1	زمان متناظر با اولین خروجی	\dot{e}	مشتق خطای سیستم
t_2	زمان متناظر با دومین خروجی	f_i	قانون نام کنترل‌کننده
t_3	زمان متناظر با سومین خروجی	G	تابع تبدیل سیستم
u	متغیر ورودی سیستم		
x	بردار متغیرهای حالت		
y_1	اولین خروجی سیستم		
y_2	دومین خروجی سیستم		
y_3	سومین خروجی سیستم		

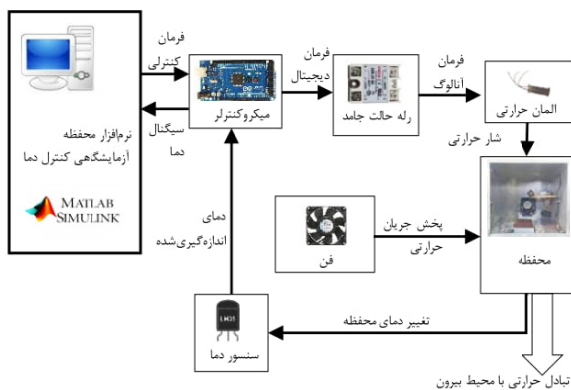
۱. دانشجوی دکتری

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 اشتباهات مدل‌سازی بر عملکرد حلقه کنترل‌کننده را بررسی کرد. همچنین، از مهمترین مزایای این روش می‌توان به تغییر برخط پارامترهای کنترل‌کننده در محیط نرم‌افزار و اعتبارسنجی الگوریتم کنترل‌کننده در حضور محفظه آزمایشگاهی کنترل دما اشاره کرد [۱۰].

در سالیان گذشته تحقیقاتی در زمینه اعتبارسنجی عملکرد کنترل‌کننده با استفاده از ابزارهای زمان حقیقی برای یک سیستم کنترل دما انجام شده است. به‌عنوان نمونه، در مرجع [۱۱]، فرمان لازم در یک محفظه گرم‌کن هوا به‌منظور دست‌یابی به مقدار مطلوب دما توسط کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) تولید شده است. عملکرد کنترل‌کننده PID به‌دلیل نامعینی‌های مدل، غیرخطی‌بودن تغییرات دما، اغتشاشات محیط مانند گرم‌زایی اجزای داخلی و نیز باز و بسته کردن درب محفظه از دقت کافی برخوردار نیست. بنابراین، به‌منظور رفع این مشکلات در مرجع [۱۲] از کنترل‌کننده فازی و در مرجع [۱۳] از یک کنترل‌کننده PID خود تنظیم استفاده شده است. همچنین، کنترل‌کننده فازی به‌منظور

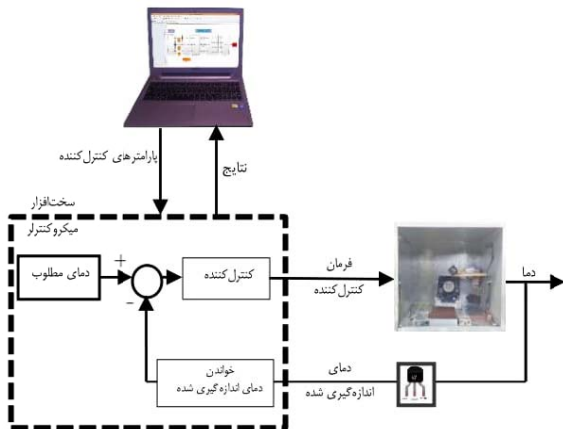
τ	ثابت زمانی
τ_d	تأخیر خالص
η	ضریب یادگیری کنترل‌کننده
ANFIS	کنترل‌کننده فازی-عصبی-تطبیقی
OBC	حافظه رایانه پروازی
PID	کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی
PWM	مدولاسیون عرضی پالس
Run on target hardware	ابزار زمان حقیقی

مقدمه

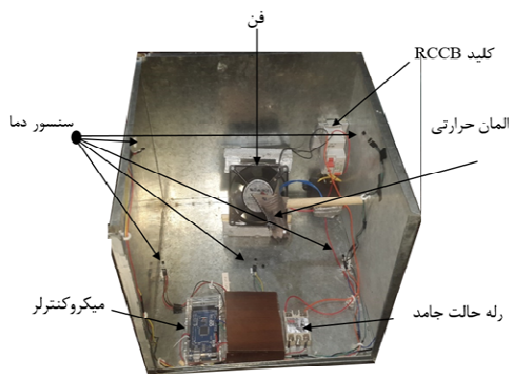
از مهمترین وظایف یک سیستم فضایی به‌منظور عملکرد مناسب آن می‌توان به حفظ دمای قطعات در محدوده مجاز [۱] و جلوگیری از تغییرات سریع دما اشاره کرد. گردش یک ماهواره در مدار همواره تحت تأثیر بارهای حرارتی داخلی و خارجی است که این امر باعث تغییر دمای زیرسیستم‌های ماهواره می‌شود [۲]. از این‌رو، وجود یک سیستم کنترل دما در ماهواره ضروری است. لذا، در مراجع [۳-۵] به طراحی کنترل‌کننده‌های غیرفعال (پسیو) به‌منظور حفظ دمای قطعات ماهواره پرداخته شده است. سپس، عملکرد این کنترل‌کننده‌ها 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 کنترل‌کننده‌های فعال را به‌منظور 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 به‌منظور افزایش دمای محفظه، از یک رله جامد به‌منظور اعمال فرامین کنترلی ارسالی از میکروکنترلر به المان حرارتی، از یک فن به‌منظور پخش یکنواخت حرارت و از حسگر به‌منظور اندازه‌گیری دما استفاده می‌شود. ارتباط اجزای تشکیل‌دهنده محفظه آزمایشگاهی کنترل دما در شکل (۲) نشان داده شده است. همچنین، در این سیستم از ابزار تولید خودکار کد [۸] به‌منظور پیاده‌سازی مستقیم بلوک دیاگرام‌های ایجاد شده 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 این‌صورت، کنترل‌کننده طراحی‌شده در محیط شبیه‌سازی با استفاده از ابزار زمان حقیقی [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 کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده فازی- عصبی- تطبیقی به صورت مفصل توضیح داده می‌شود.



شکل ۳- شماتیک پیاده‌سازی کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده فازی- عصبی- تطبیقی (ANFIS) می‌توان انتخاب پارامترهای کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده ANFIS پرداخته می‌شود. در نهایت، کنترل‌کننده طراحی شده بر روی میکروکنترلر پیاده‌سازی می‌شود. کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده با تعقیب دماهای مطلوب بررسی و با نتایج حاصل از عملکرد کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده ANFIS، ابتدا کنترل‌پذیری محفظه آزمایشگاهی بررسی و سپس ساختار کنترل‌کننده ANFIS بیان می‌شود. پس از آن، عملکرد کنترل‌کننده ANFIS طراحی شده در تعقیب مقادیر مطلوب در محیط شبیه‌سازی ارزیابی می‌شود. همچنین، در بخش انتهایی عملکرد کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده و نیز بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌های مختلف ایجاد شده است. همچنین، کنترل این سیستم به دلیل وجود نامعینی‌های مدل، غیرخطی بودن تغییرات دما، اغتشاشات محیط مانند گرمایی اجزای داخلی و نیز باز و بسته کردن درب محفظه یک مسئله مهم محسوب می‌شود. از این‌رو، در این مقاله عملکرد کنترل‌کننده ANFIS در سیستم کنترل دما بررسی می‌شود. شکل (۳)، شماتیک پیاده‌سازی کنترل‌کننده فازی- عصبی- تطبیقی را بر روی میکروکنترلر با استفاده از ابزار تولید

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 بلوک دیاگرام‌های شبیه‌سازی شده به زبان‌هایی مانند C و C++ [۱۵]، قابلیت پیاده‌سازی مستقیم مدل ایجاد شده در محیط شبیه‌سازی را بر سخت‌افزار کنترل‌کننده دارد. در این مقاله، از این ابزار به منظور پیاده‌سازی الگوریتم کنترل‌کننده 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 این منظور، 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 کنترل‌کننده ANFIS برای محفظه آزمایشگاهی استفاده کرد.

به منظور شناسایی محفظه 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 شیب 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:

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

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.

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:

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

در رابطه (۲)، A مقدار ورودی پله است. اثبات این رابطه در پیوست الف ارائه شده است. همچنین، پارامتر a از رابطه (۳) حاصل می‌شود:

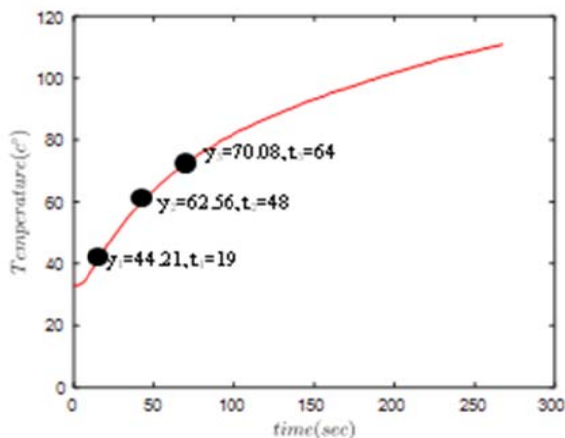
$$a = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_2} \quad (3)$$

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.



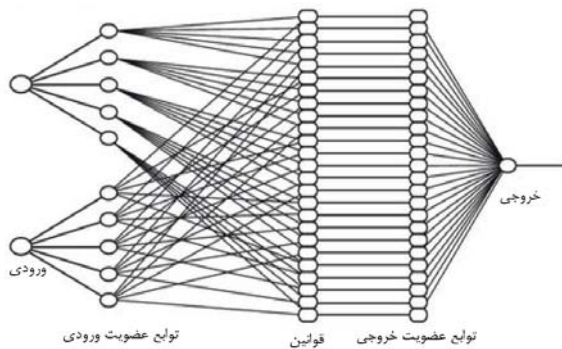
شکل ۵- تاریخچه زمانی دمای سیستم کنترل دما به ازای اعمال ورودی پله با دامنه ۲۵۶ عرض پالس

تأخیر 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:

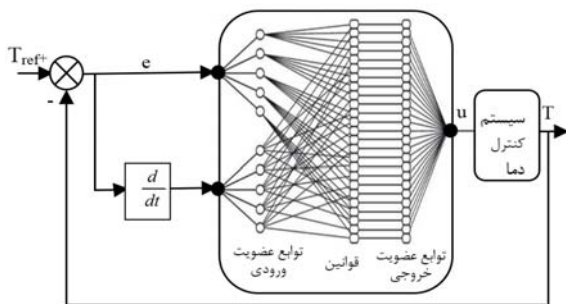
$$G(s) = \frac{0.274}{77.51s + 1} e^{-1.66s} \quad (5)$$

ساختار، به‌منظور 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 به‌منظور تنظیم پارامترهای غیرخطی (پارامترهای توابع عضویت فازی) استفاده می‌شود. در لایه سوم، به‌منظور 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 کنترل‌کننده ANFIS در شکل (۷) نمایش داده شده است.

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



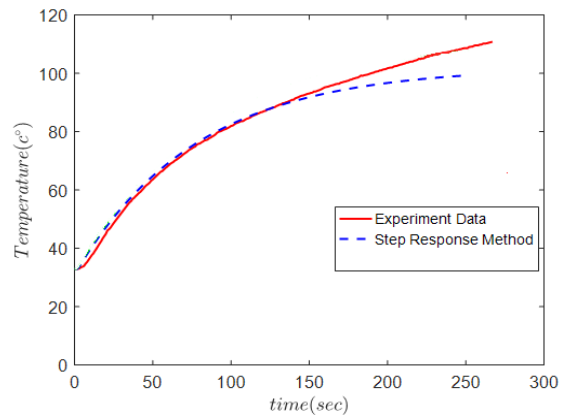
شکل ۷- لایه‌های کنترل‌کننده ANFIS



شکل ۸- بلوک دیاگرام کنترل‌کننده ANFIS

با توجه به اینکه نوع روش فازی در کنترل‌کننده ANFIS سوگینو^۴ است، در نتیجه خروجی کنترل‌کننده (مدولاسیون عرضی پالس) به‌صورت 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 کنترل‌کننده ANFIS

این بخش به طراحی کنترل‌کننده ANFIS براساس مدل دینامیکی شناسایی شده محفظه دما می‌پردازد. این کنترل‌کننده از عملکرد قابل قبولی نسبت به غیرخطی بودن تغییرات دما و اغتشاشات ورودی همچون گرمایی اجزای داخلی و نیز باز و بسته کردن درب محفظه برخوردار است. به‌منظور طراحی کنترل‌کننده ANFIS، ابتدا کنترل‌پذیری سیستم کنترل دما بررسی می‌شود. سپس، کنترل‌کننده ANFIS با استفاده از مدل شناسایی شده طراحی می‌شود.

بررسی کنترل‌پذیری

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

$$C_s = 1.155 \quad (۶)$$

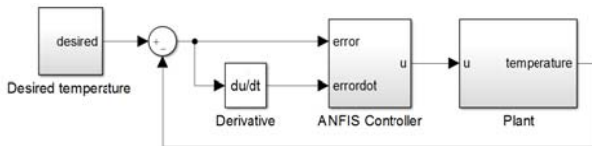
از آنجاکه، درمیان ماتریس فوق مخالف صفر است، بنابراین سیستم کنترل دما کنترل‌پذیر است.

ساختار کنترل‌کننده ANFIS

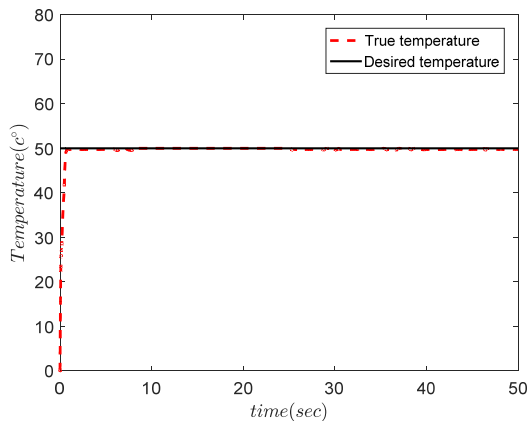
کنترل‌کننده ANFIS در حقیقت یک سیستم استنتاج فازی است که در چارچوب شبکه‌های عصبی- تطبیقی ارائه شده است. در این

شبیه‌سازی کنترل‌کننده ANFIS

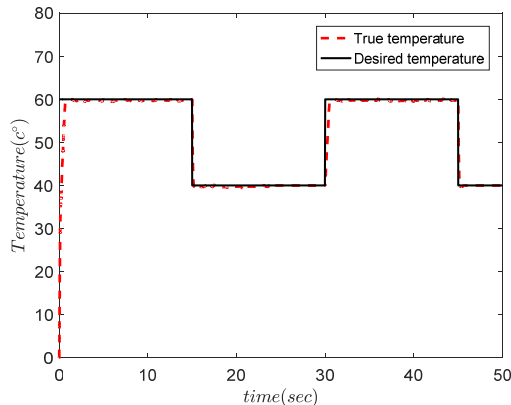
این بخش به ارائه نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده ANFIS به منظور ردیابی مقادیر مطلوب در محیط شبیه‌سازی نرم‌افزار متلب می‌پردازد. بلوک دیاگرام سیستم کنترل‌کننده دما در محیط شبیه‌سازی در شکل (۱۰) نشان داده شده است. عملکرد کنترل‌کننده ANFIS در تعقیب دمای مطلوب با دامنه ۵۰ درجه در شکل (۱۱) نشان داده شده است.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



شکل ۱۰- بلوک دیاگرام سیستم کنترل دما در محیط شبیه‌سازی



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



شکل ۱۲- عملکرد کنترل‌کننده 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 ورودی نام است. a_i ، b_i و c_i پارامترهای کنترل‌کننده ANFIS محسوب می‌شوند. این پارامترها توسط قانون یادگیری شبکه‌های عصبی به‌گونه‌ای به‌روزرسانی می‌شوند که تابع هزینه زیر کمینه شود:

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

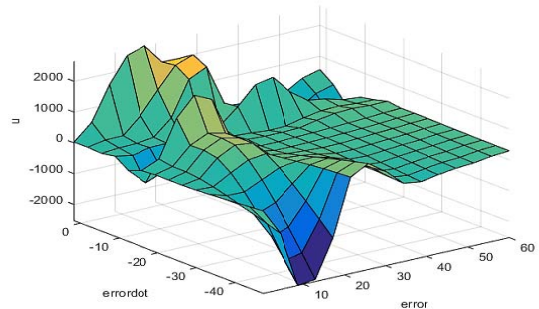
در رابطه (۸)، T_{ref} و T به ترتیب بیانگر دمای سیستم و دمای مطلوب است. در این صورت، کنترل‌کننده می‌تواند به سرعت نسبت به تغییرات واکنش نشان دهد و در نتیجه منجر به کمترین مقدار خطای حالت ماندگار شود. در نتیجه، قانون به‌روزرسانی کنترل‌کننده به‌صورت زیر حاصل می‌شوند [۱۸]:

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

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

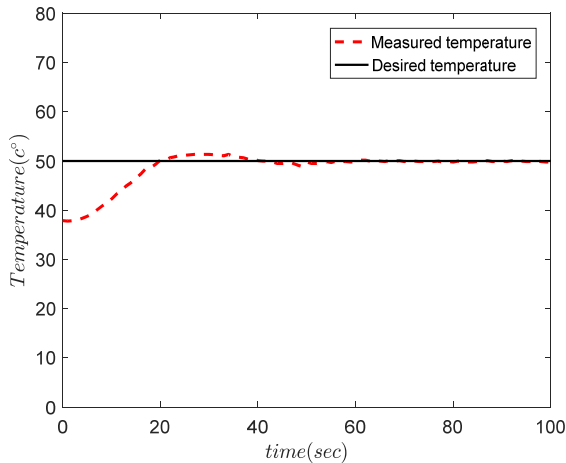
$$c_i(t+1) = c_i(t) + \eta e(t) \frac{u_i^4}{\sum_{i=1}^{n=25} u_i^4} \quad (11)$$

در رابطه (۹) تا (۱۱)، η ضریب یادگیری کنترل‌کننده 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.

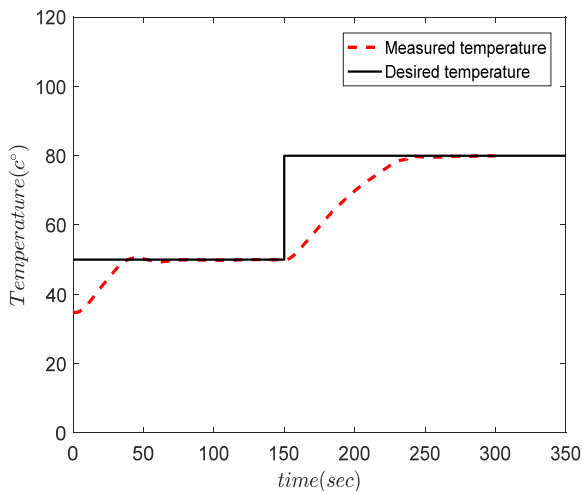


شکل ۹- رویه قوانین کنترل‌کننده ANFIS

سانتی‌گراد در شکل (۱۴) نشان داده شده است. بنابراین، کنترل‌کننده ANFIS قابلیت ردیابی دماهای مطلوب مختلف را دارا است.



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



شکل ۱۴- عملکرد کنترل‌کننده پیاده‌سازی شده ANFIS در تعقیب دماهای مطلوب با دامنه‌های ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد

بررسی امکان حذف اغتشاش

این بخش به بررسی امکان حذف اغتشاش ورودی توسط کنترل‌کننده ANFIS می‌پردازد. بدین منظور، اغتشاش ورودی ثابت با دامنه ۲۰ عرض پالس در فاصله زمانی ۵۰ تا ۱۰۰ ثانیه به سیستم کنترل دما اعمال می‌شود. نتایج عملکرد کنترل‌کننده ANFIS در حضور اغتشاش ورودی در شکل (۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده ANFIS قابلیت حذف اغتشاش ورودی را دارد.

نتایج پیاده‌سازی کنترل‌کننده ANFIS

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

جدول ۱- بهره‌های کنترل‌کننده PID

بهره	مقدار	واحد
تناسبی (K_P)	۲۰۵	ولتاژ به درجه
انتگرالی (K_I)	۲/۳۳	ولتاژ در ثانیه بر درجه
مشتقی (K_D)	۲۸۸	ولتاژ در مجذور ثانیه بر درجه

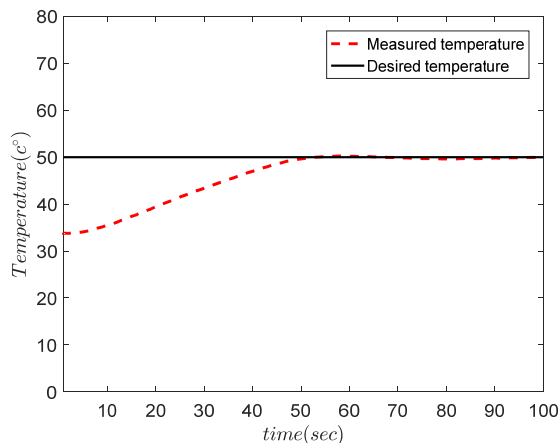
محدوده دمای مجاز تجهیزات ماهواره در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به این جدول، محفظه آزمایشگاهی کنترل دما باید قابلیت عملکرد در دماهای بین ۵ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد را داشته باشد. بنابراین در این پژوهش، عملکرد کنترل‌کننده ANFIS در تعقیب دماهای مطلوب با دامنه‌های ۴۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شده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

جدول ۲- محدوده دمای مجاز تجهیزات ماهواره [۱۹]

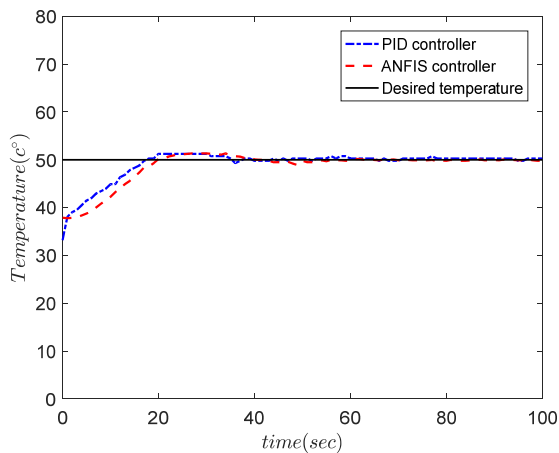
تجهیزات ماهواره	محدوده دمای مجاز ($^{\circ}C$)
باتری	۵- تا ۳۰
واحد تله‌متری	۵- تا ۵۰
آرایه‌های خورشیدی	۵۰- تا ۱۲۰
دوربین	۵ تا ۳۰
فرستنده تصویر	۱۰- تا ۵۰

بررسی ردیابی دماهای مطلوب

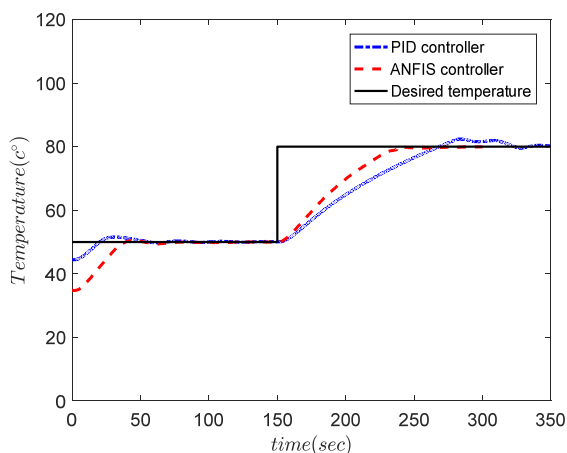
این بخش به بررسی نتایج حاصل از پیاده‌سازی کنترل‌کننده ANFIS به منظور تعقیب مقادیر مطلوب می‌پردازد. عملکرد این کنترل‌کننده در تعقیب دمای مطلوب پله با دامنه ۵۰ درجه سانتی‌گراد در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همچنین، عملکرد کنترل‌کننده در تعقیب دماهای مطلوب با دامنه‌های ۵۰ و ۸۰ درجه



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



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



شکل ۱۷ - مقایسه عملکرد کنترل کننده های ANFIS و PID در تعقیب دماهای مطلوب با دامنه های 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 می شود. نتایج حاصل از پیاده سازی کنترل کننده های 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 کننده ها را در تعقیب دماهای مطلوب با دامنه های ۵۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، کنترل کننده ANFIS عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده PID به منظور تعقیب دماهای مطلوب دارا است. 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 کننده های 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 می کند، بنابراین پیاده سازی کنترل کننده ANFIS در رایانه پروازی ماهواره امکان پذیر است. به عنوان نمونه، کنترل کننده ANFIS قابلیت پیاده سازی در پردازنده Intel X86 که یک پردازنده متداول در خانواده میکروماهواره ها با حجم حافظه یک مگابایت است [۲۰]، را داراست.

نتیجه گیری

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 سخت افزار میکروکنترلر پیاده سازی شد. با نصب این سخت افزار 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 گام بعد، عملکرد کنترل کننده های 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 سریع تر نسبت به تغییرات سیستم را دارد. در نهایت، بودجه محاسباتی کنترل کننده ANFIS در مقایسه با کنترل کننده PID و قابلیت پیاده سازی 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 (۱۲) حاصل می‌شود:

$$y(t) = KA \left(1 - e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \right) \quad (12)$$

پس ثابت زمانی این سیستم را می‌توان با داشتن مختصات دو نقطه (t_1, y_1) و (t_2, y_2) یا (t_2, y_2) و (t_3, y_3) 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., Mirzaghetaghi, A., Esmailzadeh, B. and Talae, 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," *Acta Astronautica*, 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.