Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(1) (2021) 75-78
DOI: 10.22060/mej.2019.16092.6269

Real Time Solution for Inverse Heat Conduction Problem in One-Dimensional Plate Utilizing Fuzzy- Proportional–Integral–Derivative Controller

A.H. Rabiee, S.D.Farahani*

Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

ABSTRACT: This paper dealing with a novel algorithm based on features of fuzzy- proportional–integral–derivative controllers to estimate heat flux on the inverse heat conduction problems. The main structure of Fuzzy- proportional–integral–derivative is a proportional–integral–derivative controller in which the proportional, integrator and the derivative gains are obtained online by fuzzy system. The input of the algorithm is the measured temperatures within the model. In each time-step, the smart controller calculates the proper heat flux in order to adjust the measured temperature with the desired input temperature. The model studied a flat plate with an insulated surface and an active level that affects the variable heat flux at the time. The variation of heat flux with time can be considered to be constant, step, and triangular. The measured temperatures are obtained at the active and inactive surface with numerical simulation. The effect of noise level at the measurement temperatures on the accuracy of the proposed method is investigated. The estimations and error analysis indicate that this algorithm is very successful in estimating the different forms of heat flux with different amounts of noise and the different thermocouple positions in the wall. The accuracy of the proposed sequence method is higher than that of the Tikhonov method.

Review History:

Received: 2019-04-09
Revised: 2019-07-09
Accepted: 2019-09-02
Available Online: 2019-09-14

Keywords:

Heat flux
Sequential method
Inverse problem
Filter
Fuzzy- proportional–integral–derivative controller

1. INTRODUCTION

Inverse Heat Conduction Problems (IHCP) have recently found wide applications in industry. In general, methods of solving inverse heat conduction problems can be divided into two main groups: sequential methods and whole domain methods. Each of the groups has its own advantages. Sequential methods can be used for real time estimation and require less memory and computational time [1-3].

Since most of the techniques proposed by researchers are whole domain methods that require all measurement data to be estimated over a specified period of time, this paper proposes an online method based on Fuzzy- Proportional–Integral–Derivative (PID) controller features for heat flux estimation. Here, the algorithm input is the time history of the temperatures measured inside or on the object. These temperature signals contain information about the heat flux applied to the object that can be obtained using the proposed algorithm. At each time step, the intelligent controller calculates the proper heat flux to match the measured temperature with the desired inlet temperature. The accuracy of the proposed method is evaluated by various numerical experiments. In the present study, the effect of control parameters, filter cutoff frequency, data noise and sensor position in heat flux estimation have been investigated.

*Corresponding author's email: sdfarahani@arakut.ac.ir

2. METHODOLOGY

Consider heat conduction in a 1D flat plate in which one surface is exposed to heat flux and another surface is insulated. Heat flux is unknown and may be changed with time. In this paper, we propose a method for estimating heat flux using the time history of measured temperatures using feedback control systems theory. Intelligent control systems are generally classified into neural networks, fuzzy-neural networks, and fuzzy logic systems [4]. Fuzzy controllers have been widely used in nonlinear problems because of their independence to plant precision mathematical models as well as their robustness to uncertainties. Fuzzy control based on fuzzy rules establishes the relation between input and output variables.

The PID controller is widely used in industrial control systems because of its simplicity and efficiency. The basis of this system is proportional control. Adding integrator gain eliminates the steady state error while increasing overshoot. Derivative gain also speeds up systems with slower response times and reduces overshoot [5]. Consequently, the classical control law of the PID controller is written as

$$q(t) = K_{\mathrm{P}} e(t) + K_{\mathrm{D}} \frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} + K_{\mathrm{I}} \int_0^t e(\tau)\,\mathrm{d}\tau, \tag{1}$$

In the Fuzzy-PID control strategy, the proportional,

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

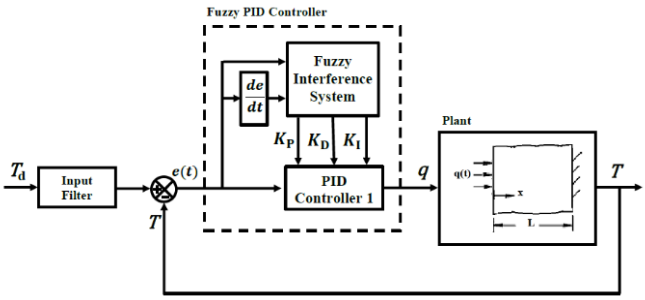


Fig. 1. Schematic of the block diagram of the proposed method

integral, and derivative gains are adjusted online by a fuzzy inference system based on error inputs and error derivatives. The proportional, derivative and the integral gains (K_P , K_D , K_I) are estimated by the aid of the fuzzy logic system which is simply mounted on the classical PID controller [6]. The block diagram of the proposed method is shown in Fig. 1.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Several numerical experiments have been designed to evaluate the accuracy of the proposed method. The effect of noise level, thermocouple position, filter cutoff frequency, control parameters, variations of heat flux with time on the accuracy of estimation have been investigated. In the proposed method, the control parameters and filter cutoff frequency are the key parameters affecting the estimation accuracy. In this way, test simulations have been performed to evaluate the optimum selection of these parameters to obtain a more accurate estimation while the sensor is on the active surface. The purpose here is to apply the Fuzzy-PID controller so that it can correctly calculate the input heat flux based on the time history of the measured temperature signal. In this study, three Fuzzy-PID controllers with different control parameters are considered. All of the considered controllers have succeeded in estimating the desired heat flux with good accuracy at the end of the simulation time.

A low-pass filter with transfer function in the form of $1/(1+s/2\pi f_c)$ was used to estimate the optimum heat flux for the case where the measured temperatures were impregnated with noise. Here the effect of filter cutoff frequency on the simulation results is investigated (see Fig. 2) and the cut-off frequency $f_c = 0.16$ was able to make a good compromise between the system response speed and the heat flux fluctuations and had the lowest *erms* error.

When the thermocouple is placed on the active surface, the estimation is more accurate due to the effects of delay and damping in the conduction heat transfer problem. The proposed method is applied to estimate the time-variable heat flux. The shape of heat flux is considered constant, step and rectangular. The results show that this method can be estimated the shape of heat flux with good accuracy. A comparison is made between the proposed method and the Tikhonov method. In this case, the thermocouple is on the insulation surface and the heat flux is constant. Both methods have been able to estimate the heat flux. The fluctuations in the heat flux estimation using the Tikhonov method are seen

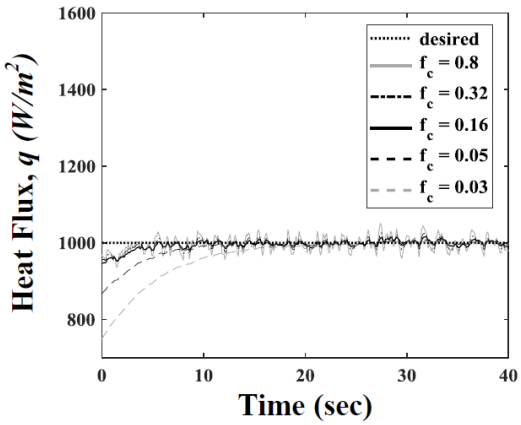


Fig. 2. The effect of filter cutoff frequency on the heat flux estimation

to be higher than the proposed method. Also, the proposed method of this paper can estimate the heat flux with high accuracy only by having the time history of temperature measured up to the present time.

4. CONCLUSIONS

In this paper, a sequential approach is proposed based on the feedback control systems theory in which a Fuzzy-PID controller is utilized so as to estimate the heat flux distribution. The efficacy of the proposed method was investigated for a classic inverse directional heat transfer problem, a flat plate with the insulation and active surfaces. The proposed method does not depend on the mathematical model of the system, so its parameters are set once and then applied to a wide range of input heat flux distribution functions. First, the effect of control parameters and filter cutoff frequency are examined and based on the smaller *erms*, the optimum values for the mentioned parameters are selected and utilized throughout the entire numerical tests. The effect of noise level on measured temperatures, thermocouple position and general firm of heat flux on the heat flux estimation accuracy was investigated and error analysis was performed. The results show that the proposed method has been quite successful in all experiments. When the heat flux shape is applied stepwise or triangular, there is a slight delay in the results due to the transient state response of the control system, which is an inseparable part of the present method. Error analysis shows good accuracy of the proposed method in heat flux estimation and can be introduced as a reverse sequence method in heat flux estimation. The proposed method has the potential to be used concurrently with the experiment, which reduces the need for memory and computational time.

REFERENCES

[1] J.V. Beck, Surface heat flux determination using an integral method, Nuclear Engineering and Design, 7(2) (1968) 170-178.

[2] F. Kowsary, S. Farahani, The smoothing of temperature data using the mollification method in heat flux estimating, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 58(3) (2010) 227-246.

[3] S. Farahani, M. Sefidgar, F. Kowsary, Estimation of kinetic parameters of

composite materials during the cure process by using wavelet transform and mollification method, International Communications in Heat and Mass Transfer, 38(9) (2011) 1305-1311.

[4] A.H. Rabiee, Regenerative semi-active vortex-induced vibration control of elastic circular cylinder considering the effects of capacitance value and control parameters, Journal of Mechanical Science and Technology, 32(12) (2018) 5583-5595.

[5] C. Killian, Modern Control Technology: Components and Systems, Thompson Delmar, 2005.

[6] Z.-Y. Zhao, M. Tomizuka, S. Isaka, Fuzzy gain scheduling of PID controllers, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 23(5) (1993) 1392-1398.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A.H. Rabiee, S.D. Farahani, Real Time Solution for Inverse Heat Conduction Problem in One-Dimensional Plate Utilizing Fuzzy- Proportional–Integral–Derivative Controller, Amirkabir J. Mech Eng., 53(1) (2021) 75-78.

DOI: 10.22060/mej.2019.16092.6269

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۱، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۰۳ تا ۳۱۶
DOI: 10.22060/mej.2019.16092.6269

حل آنلاین مسئله انتقال حرارت معکوس در یک صفحه یک بعدی با بهره‌گیری از کنترل‌کننده فازی- تناسبی انتگرال‌گیر مشتق‌گیر

امیر حسین ربیعی، سمیه داودآبادی فراهانی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

خلاصه: در این نوشتار به ارائه الگوریتمی جدید بر اساس ویژگی‌های کنترل‌کننده‌های فازی- تناسبی انتگرال‌گیر مشتق‌گیر به منظور برآورد شار حرارتی در مسائل انتقال حرارت معکوس پرداخته شده‌است. ساختار اصلی سیستم فازی- تناسبی انتگرال‌گیر مشتق‌گیر، کنترل‌کننده تناسبی انتگرال‌گیر مشتق‌گیر بوده که در آن بهره‌های تناسبی، انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر توسط سیستم فازی به صورت آنلاین به دست آورده می‌شوند. ورودی الگوریتم دماهای اندازه‌گیری شده است که در هر لحظه کنترل‌کننده هوشمند، شار حرارتی مناسب به منظور تطبیق دمای اندازه‌گیری شده با دمای ورودی مطلوب را محاسبه می‌کند. مزیت الگوریتم پیشنهادی، دنباله‌هایی بودن آن در تخمین شار حرارتی است. مدل مورد مطالعه یک صفحه تخت با یک سطح عایق و سطح فعالی که بر آن شار حرارتی اعمال می‌شود، می‌باشد. تغییرات شار حرارتی می‌تواند با زمان به صورت ثابت، پله‌ای و مثلثی در نظر گرفته شود. دماهای اندازه‌گیری شده در سطح فعال و غیرفعال با شبیه‌سازی عددی به دست آورده شده است. اثر نویز موجود در دماهای اندازه‌گیری بر دقت روش پیشنهادی بررسی شده است. نتایج حاصله از تخمین‌ها و آنالیز خطا نشانگر آن است که این الگوریتم در برآورد شکل‌های مختلف شارحرارتی با مقادیر مختلف نویز موجود دردماهای اندازه‌گیری شده و موقعیت‌های مختلف ترموکوپل در دیواره با دقت خیلی خوبی کاملاً موفق بوده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۲۰-۰۱-۱۳۹۸
بازنگری: ۱۸-۰۴-۱۳۹۸
پذیرش: ۱۱-۰۶-۱۳۹۸
ارائه آنلاین: ۲۳-۰۶-۱۳۹۸

کلمات کلیدی:
شکل‌های مختلف شار حرارتی
روش آنلاین معکوس
نویز
فیلتر
کنترل‌کننده فازی- تناسبی انتگرال‌گیر مشتق‌گیر

۱-مقدمه

توزیع دمای درون هر جسم را می‌توان با معلوم بودن مقادیر شار حرارتی و یا دمای مرزهای آن جسم و حل معادلات مشتق جزئی مربوط به آن به دست آورد که به این روش در انتقال حرارت، مسئله هدایت حرارتی مستقیم گفته می‌شود. اما در بسیاری از مسائل واقعی و صنعتی با توجه به مشکلات مختلف از جمله شرایط دمایی فوق‌العاده بد مرزها مانند موتورهای احتراق داخلی و سفینه‌های فضایی، شرایط سخت فیزیکی مانند محیط‌های اسیدی و خورنده، ایجاد اغتشاش در جریان سیال مانند جت‌های برخوردی و غیره نمی‌توان دما را در سطح جسم اندازه‌گیری کرد. بنابراین نیاز است تا دماها را درون جسم یا در تماس با سطح عایق اندازه‌گیری نمود و سپس شار حرارتی یا دما در مرزها محاسبه گردد، که به این روش، مسئله هدایت حرارتی معکوس گفته می‌شود [۱]. البته مسائل هدایت حرارتی معکوس را می‌توان برای محاسبه خواص ترموفیزیکی جسم، هندسه آن و یا پارامترهای نامعلوم دیگر به کار برد. یکی دیگر از تفاوت‌های مهم روش هدایت حرارتی مستقیم با هدایت حرارتی معکوس در بد وضع بودن مسائل معکوس است. اثبات می‌شود که مسائل هدایت حرارتی معکوس به خطاهای اندازه‌گیری به شدت حساس بوده و کوچکترین تغییری در مقادیر ثبت‌شده باعث اختلافات زیادی در نتایج محاسبه شده می‌گردد. راه حل‌های مختلفی برای این مشکل ارائه شده که یکی از آن‌ها توسط تیخونوف و آرسنین [۲] به نام روش مرتب‌سازی می‌باشد که توانسته است حساسیت مسائل بدوضع به خطاهای اندازه‌گیری را کاهش دهد. روش‌های حل هدایت حرارتی معکوس به طور معمول به

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sdfarahani@arakut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

دو بخش روش‌های تمام دامنه و روش‌های دنباله‌ای تقسیم می‌شوند. در روش تمام دامنه به طور کلی اطلاعات تاریخچه حرارتی برای حل مسئله نیاز است و جواب آن از دقت قابل قبولی برخوردار است. روش حل دنباله‌ای که اولین بار توسط بک [۳] در سال ۱۹۶۱ پیشنهاد شد این قابلیت را دارد که به صورت همزمان با انجام آزمایش مورد استفاده قرار گیرد. این امر سبب می‌شود که نیاز کمتری به حافظه و زمان محاسباتی وجود داشته باشد. ولی در عین حال این روش از دقت کمتری نسبت به روش تمام دامنه برخوردار بوده و به خطاهای اندازه‌گیری حساس‌تر می‌باشد. در حال حاضر نیز مقالات متعددی با استفاده از روش‌های هدایت حرارتی معکوس در دو بعد به رشته تحریر در آمده است. کوثری و فراهانی [۴] برای افزایش دقت و پایداری روش‌های استاندارد معکوس، از نوعی فیلتر برای نویز زدایی دماهای شبیه‌سازی شده استفاده کردند. در تحقیقی دیگر فراهانی و همکاران [۵] به مقایسه دو روش نویز زدایی در تخمین پارامترهای وابسته در مواد مرکب با استفاده از روش معکوس پرداختند. ودباری و بک [۶]، از یک روش فیلتر دنباله‌ایی براساس روش تیخونو در ارزیابی شار حرارتی استفاده کردند. ودباری و همکاران [۷]، روشی برای محاسبه عملکرد حرارتی در مرز از راه دور با استفاده از تاریخچه زمانی دمای اندازه‌گیری شده توسط سنسور دوم به عنوان شرط مرزی ارائه دادند. نجفی و همکاران [۸]، روش دیجیتال فیلتر تیخونو را برای حل مسئله معکوس چند لایه بررسی کردند. روش‌های تمام دامنه‌ایی بر اساس روش شبکه بولتزمن [۹] و روش‌های بهینه سازی [۱۰] توسط محققان توسعه داده شده است. در کاربردهای روش انتقال حرارت معکوس در مواردی که نیاز هست همزمان با اندازه‌گیری دما، شار حرارتی برآورد شود، روش‌های انتقال حرارت معکوس که بلادرنگ هستند و نیاز به حافظه و زمان محاسباتی کمتری دارند، مورد توجه هستند.

از آن جا که بیشتر روش‌های پیشنهادی توسط محققان روش‌های تمام دامنه است که به تمام داده‌های اندازه‌گیری در مدت زمان مشخص برای برآورد نیاز دارند، دراین مقاله روشی آنلاین پیشنهاد شده است که براساس ویژگی‌های کنترل‌کننده فازی- تناسبی انتگرال‌گیر مشتق‌گیر (پی‌آی‌دی)[1] برای برآورد شار حرارتی توسعه داده شده است. ورودی الگوریتم، تاریخچه زمانی دماهای اندازه‌گیری شده در داخل یا بر روی جسم است. این دماها حاوی اطلاعاتی از شار حرارتی اعمالی بر جسم هستند که با استفاده از الگوریتم پیشنهادی می‌توان به این اطلاعات دست یافت. در هر لحظه کنترل‌کننده هوشمند، شار حرارتی مناسب به منظور تطبیق دمای اندازه‌گیری شده با دمای ورودی مطلوب را محاسبه می‌کند. در این تحقیق، از کنترل‌کننده فازی-پی‌آی‌دی بهره گرفته شده است. ساختار اصلی فازی-پی‌آی‌دی، کنترل‌کننده پی‌آی‌دی بوده که در آن بهره‌های تناسبی، انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر توسط سیستم فازی به صورت آنلاین به دست آورده می‌شوند [۱۱]. مدل مورد مطالعه یک صفحه تخت با یک سطح عایق و سطح فعالی که بر آن شار حرارتی متغییر با زمان اعمال می‌شود، در نظر گرفته شده‌است. تغییرات شار حرارتی با زمان به صورت ثابت، پله‌ای و مثلثی می‌تواند باشد. برای حل مستقیم مسئله و حل مسئله معکوس از نرم افزار متلب/سیمولینک استفاده شده است. داده‌های اندازه‌گیری مورد نیاز برای روش معکوس با استفاده از شبیه‌سازی عددی تولید شده‌اند. با طراحی آزمایش‌های مختلف دقت روش پیشنهادی ارزیابی شده است. در مطالعه حاضر، اثر پارامترهای کنترلی، فرکانس قطع فیلتر، مقدار نویز موجود در داده‌ها و موقعیت سنسور در برآورد شار حرارتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲-توصیف مسئله و مدلسازی ریاضی

در این پژوهش، یک صفحه تخت یک بعدی (شکل ۱) با یک سطح غیرفعال (عایق) و سطح فعالی که در معرض شار حرارتی قرار دارد، در نظر گرفته شده است. معادله حاکم بر توزیع دما طبق رابطه (۱) داده شده است.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}$$
$$\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=0}=0 \quad ,-k\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=l}=q\ (t) \qquad (۱)$$
$$T(x,y,0)=0$$

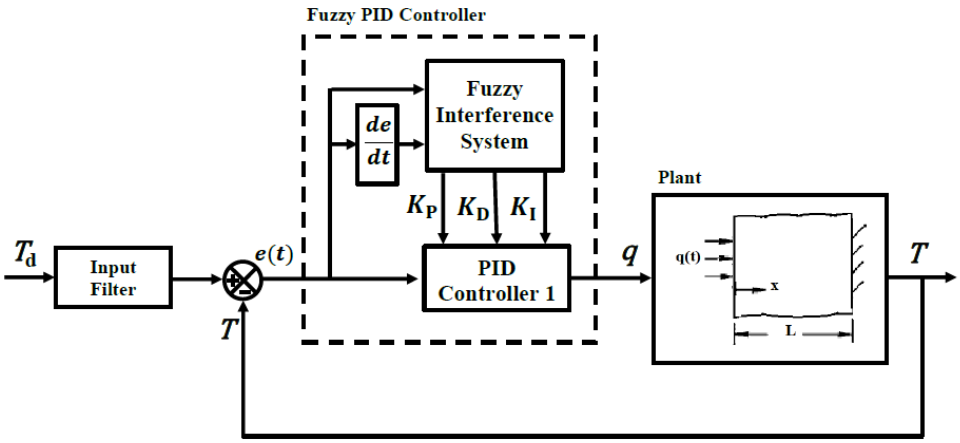
حل دقیق این مسئله و توزیع دما در داخل دامنه حل [۱۲] به صورت زیر است:

$$\frac{T(x,t)}{\frac{qL}{k}}=\frac{\alpha t}{L^2}+\frac{1}{3}-\frac{x}{L}+\frac{1}{2}(\frac{x}{L})^2-\frac{2}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}e^{-\frac{n^2\pi^2\alpha t}{L}}\cos(\frac{n\pi x}{L}) \qquad (۲)$$

برای به دست آوردن ضرایب حساسیت[2] از رابطه (۲) نسبت به

1 Fuzzy-PID

2 Sensivity coefficients



شکل۱. شماتیک مسئله حاضر به همراه دیاگرام جعبه‌ای کنترل‌کننده فازی-پی‌آی‌دی

Fig. 1. Schematic of the present problem along with the Fuzzy-PID controller block diagram.

شار حرارتی مجهول مشتق گرفته شده است.

$$\frac{X(x,t)}{\frac{L}{k}} = \frac{\alpha t}{L^2} + \frac{1}{3} - \frac{x}{L} + \frac{1}{2}\left(\frac{x}{L}\right)^2 - \frac{2}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}e^{-\frac{n^2\pi^2\alpha t}{L}}\cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (۳)$$

با استفاده از انتگرال دوهامل [۱] (رابطه (۳))،

$$T(x,t) = \int_0^t q(\lambda)\frac{\partial X(x,t-\lambda)}{\partial \lambda}d\lambda \quad (۴)$$

می‌توان دماها را به ازاء هر توزیع شار حرارتی به دست آورد.

۳-روش پیشنهادی

در این مقاله، روش پیشنهادی برای برآورد توزیع شار حرارتی با استفاده از تاریخچه زمانی دماهای اندازه‌گیری شده با استفاده از نظریه سیستم‌های کنترل بازخورد[1] می‌باشد. سیستم‌های کنترل خودکار به دانشی گفته می‌شود که هدف اصلی آن تنظیم خودکار یک یا چند متغیر الکتریکی، مکانیکی، سیالاتی، حرارتی، شیمیایی، اقتصادی و ... است. سیستم کنترل بازخورد، سیستمی است که از راه مقایسه خروجی و ورودی مطلوب و با استفاده از اختلاف آن‌ها، رابطه از پیش تعیین شده میان خروجی و ورودی را حفظ می‌کند [۱۳]. سیستم‌های کنترل بازخورد، دارای اجزاء مختلفی نظیر کنترل‌کننده، مقایسه کننده، عملگر، حسگر و فرآیند هستند. در این سیستم‌ها، در هر لحظه، خروجی توسط حسگر اندازه‌گیری شده و به مقایسه‌گر ارسال می‌شود. مقایسه‌گر، سیگنال خطا را که اختلاف بین سیگنال اندازه‌گیری و ورودی مطلوب (مبنا) است، محاسبه می‌کند. سپس کنترل‌کننده توسط یک استراتژی کنترلی، سیگنال کنترلی را بگونه‌ای محاسبه می‌کند که خطا به سمت صفر میل کند. در ادامه، سیگنال کنترلی به عملگر فرستاده شده و تغییرات لازم در سیستم تحت کنترل (فرآیند) اعمال می‌شود [۱۴]. سیستم‌های کنترل پیشینه‌ای بسیار قدیمی دارند اگر چه در دهه‌های گذشته نظریه‌های مختلف کنترلی نظیر کنترل مدرن، بهینه، مقاوم، تطبیقی، و هوشمند توسعه یافته‌اند [۱۵ و ۱۶]. سیستم‌های کنترل هوشمند به طور کلی به شبکه‌های عصبی، شبکه‌های فازی- عصبی و منطق فازی تقسیم بندی می‌شوند [۱۱ و ۱۷]. از کنترل‌کننده‌های فازی به دلیل عدم نیاز آن‌ها به مدل ریاضی دقیق و همینطور مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت‌ها به طور گسترده‌ای در مسائل غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کنترل فازی بر اساس قوانین فازی رابطه‌ای میان متغیرهای ورودی و خروجی دلخواه برقرار می‌کند.

۳-۱-طراحی کنترل‌کننده پی‌آی‌دی

در این بخش، یک کنترل‌کننده پی‌آی‌دی کلاسیک به منظور محاسبه شار حرارتی طراحی می‌شود. کنترل‌کننده پی‌آی‌دی، به دلیل سادگی و کارآمدی به طور فراوانی در سیستم‌های کنترل صنعتی استفاده می‌شود. اساس این سیستم، کنترل تناسبی است. اضافه کردن بهره انتگرال‌گیر موجب حذف خطای حالت ماندگار شده در حالیکه فراجهش را افزایش می‌دهد. همچنین بهره مشتق‌گیر

1 Feedback control system

باعث سرعت بخشیدن به سیستم‌هایی با پاسخ زمانی آهسته شده و فراجهش سیستم را کاهش می‌دهد [۱۴]. پاسخ سیستم کنترل پی‌آی‌دی که حاصل جمع سه کنترل‌کننده ذکر شده می‌باشد به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$q(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} + K_I \int_0^t e(\tau)\,\mathrm{d}\tau, \qquad (۵)$$

که در آن $q(t)$ ورودی کنترلی (شار حرارتی)، K_P بهره تناسبی، K_D بهره مشتق‌گیر و K_I بهره انتگرال‌گیر می‌باشند. همچنین سیگنال خطا به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$e(t) = T_d(t) - T(t), \qquad (۶)$$

که در آن، که $T_d(t)$ دمای مبنا و $T(t)$ دمای اندازه‌گیری شده در هر لحظه هستند. حال هدف تعیین کنترل‌کننده‌ای می‌باشد که بتواند خطای ردیابی را صفر نماید.

۳-۲-طراحی کنترل‌کننده فازی-پی‌آی‌دی

کنترل‌کننده پی‌آی‌دی داری ضرایب بهره ثابتی می‌باشد که توسط روش‌های مختلفی مانند سعی و خطا، زیگلرنیکولز، روش‌های پاسخ فرکانسی و غیره، بر اساس یک اغتشاش دائمی قبل از پیاده سازی عملی به دست آورده می‌شود. حال اگر در عمل دینامیک سیستم تغییر پیدا کند، کنترل‌کننده طراحی شده با پارامترهای تنظیم شده از قبل، ممکن است نتواند به‌درستی وظایف کنترلی را انجام دهد. از این‌رو بخصوص در این مسئله که رابطه‌ی ورودی و خروجی غیر خطی و دارای تأخیر زمانی می‌باشد، بهتر است از یک کنترل‌کننده هوشمند استفاده شود که بتواند در حین فرآیند کنترلی، ساختار داخلی خود را تنظیم نماید. یکی از بهترین گزینه‌های ممکن، استفاده از قابلیت تقریب عمومی سیستم‌های فازی است. در استراتژی کنترلی فازی-پی‌آی‌دی بهره‌های تناسبی، انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر توسط یک سیستم استنتاج فازی بر اساس ورودی‌های خطا و مشتق خطا به صورت آنلاین در حین کنترل تنظیم می‌شوند. در ادامه به معرفی این کنترل‌کننده پرداخته می‌شود [۱۸].

در فرآیند طراحی کنترل‌کننده فازی-پی‌آی‌دی فرض می‌شود که بهره‌های کنترلی تناسبی K_P، و مشتق‌گیر K_D، به ترتیب در محدوده‌های $[K_P^{min}, K_P^{max}]$ و $[K_D^{min}, K_D^{max}]$ قرار گرفته‌اند. همچنین به منظور ساده‌سازی محاسبات، پارامترهای K_P و K_D بین صفر و یک به صورت نرمال‌شده به دست آورده می‌شوند:

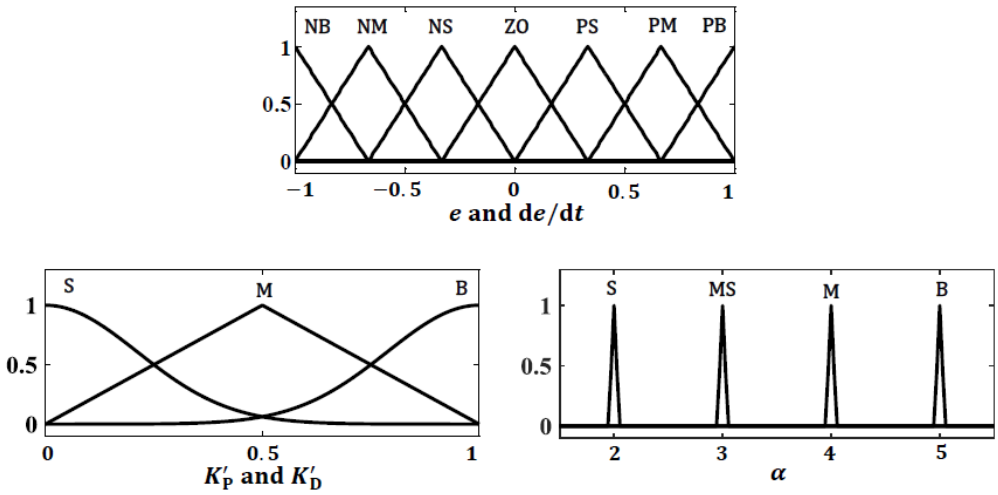
$$K_P' = (K_P - K_P^{min}) / (K_P^{max} - K_P^{min}) \qquad (۷)$$

$$K_D' = (K_D - K_D^{min}) / (K_D^{max} - K_D^{min}) \qquad (۸)$$

در کنترل‌کننده فازی-پی‌آی‌دی حاضر، بهره کنترلی انتگرال‌گیر پس از محاسبه بهره‌های تناسبی و مشتق‌گیر و بر اساس یک ضریب α که توسط سیستم فازی تقریب زده می‌شود، به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$K_I = K_P^2 / (\alpha K_D) \qquad (۹)$$

در ادامه توسط سیستم فازی، پارامترهای K_P'، K_D' و α بر اساس سیگنال خطا $e(t)$ و $\dot{e}(t)$ به دست آورده می‌شوند. به منظور طراحی یک سیستم فازی، قدم اول، فازی سازی متغیرهای ورودی/خروجی به منظور ایجاد استنتاج فازی است. برای این منظور از یک سیستم فازیِ دو ورودی $(e,\dot{e})$، سه خروجی (K_P', K_D', α) استفاده می‌شود. محدوده متغیرهای ورودی به صورت $e \in [-۱، ۱]$ و $\dot{e} \in [-۱، ۱]$ و متغیرهای خروجی به صورت $K_P' \in [۰،۱]$، $K_D' \in [۰،۱]$ و در نهایت $\alpha \in [۲،۵]$ در نظر گرفته می‌شوند. سپس، محدوده متغیرهای ورودی به هفت متغیر زبانی $(e,\dot{e}) = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ و متغیرهای خروجی به ترتیب به دو و چهار متغیر زبانی $(K_P', K_D') = \{S, B\}$ و $\alpha = \{۲، ۳، ۴، ۵\}$ تقسیم بندی می‌شوند: که در آن NB منفی بزرگ، NM منفی متوسط، NS منفی کوچک، ZO صفر، PS مثبت کوچک، PM مثبت متوسط، PB مثبت بزرگ، S کوچک، B بزرگ، ۲ اعداد تقریباً برابر با دو، ۳ اعداد تقریباً برابر با سه، ۴ اعداد تقریباً برابر با چهار، و در نهایت ۵ اعداد تقریباً برابر با پنج می‌باشند. لازم به ذکر است برای طراحی سیستم استنتاج فازی از جعبه ابزار فازی نرم افزار متلب استفاده شده که توابع عضویت تمامی متغیرهای زبانی گفته شده در



شکل۲. توابع عضویت ورودی و خروجی کنترل‌کننده فازی-پی‌آی‌دی

Fig. 2. Input and output membership functions of Fuzzy-PID controller.

جدول ۱. قواعد اگر آنگاه فازی برای $K'_P / K'_D / \alpha$ [18]

Table 1. Fuzzy if-then rules for $K'_P / K'_D / \alpha$ [18]

de / dt						e
PM	PS	ZO	NS	NM	NB	
B/S/۲	B/S/۲	B/S/۲	B/S/۲	B/S/۲	B/S/۲	NB
B/B/۳	B/S/۲	B/S/۲	B/S/۲	B/B/۳	S/B/۳	NM
S/B/۳	B/B/۳	B/S/۲	B/B/۳	S/B/۳	S/B/۴	NS
S/B/۴	S/B/۳	B/B/۳	S/B/۳	S/B/۴	S/B/۵	ZO
S/B/۳	B/B/۳	B/S/۲	B/B/۳	S/B/۳	S/B/۴	PS
B/B/۳	B/S/۲	B/S/۲	B/S/۲	B/B/۳	S/B/۳	PM
B/S/۲	B/S/۲	B/S/۲	B/S/۲	B/S/۲	B/S/۲	PB

شکل ۲ نمایش داده شده‌اند.

در ادامه قواعد اگر-آنگاه فازی بین ورودی‌ها $(e,\dot{e})$ و خروجی‌ها (K'_P,K'_D,α)، در جدول ۱، لیست شده‌اند. قانون کنترلی سیستم استنتاج فازی که شامل مجموعه کاملی از این قواعد اگر-آنگاه فازی می‌باشد، به صورت (به عنوان مثال برای اولین المان جدول ۱) اگر e ، NB و $\dot{e}$، NB باشند، آنگاه K'_P می‌شود B، K'_D می‌شود S و α می‌شود ۲، تعریف می‌شود. در نهایت، با استفاده از استنتاج ممدانی و روش غیرفازی ساز مرکز گرانش[1]، بهره‌های نرمال شده K'_P، و K'_D و ضریب α به دست می‌آیند. سپس با استفاده از خروجی‌های سیستم فازی، بهره‌های تناسبی K_P، و مشتق‌گیر K_D به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$K_P = K'_P(K_P^{max} - K_P^{min}) + K_P^{min} \quad (۱۰)$$

$$K_D = K'_D(K_D^{max} - K_D^{min}) + K_D^{min} \quad (۱۱)$$

و در نهایت بهره انتگرال‌گیر K_I مطابق رابطه (۹) تعیین می‌شود. دیاگرام جعبه‌ای روش پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده‌است.

۴-بحث پیرامون نتایج

در مسئله مورد مطالعه به دنبال تخمین تاریخچه زمانی شارحرارتی مجهول هستیم و بدین منظور تعداد سنسورها حداقل باید برابر با تعداد مولفه‌های شار حرارتی باشند. برای ارزیابی توانایی

1 Center of gravity

جدول ۲. خواص حرارتی [1]
Table 2. Thermal properties [1]

خواص حرارتی	نماد	واحد	مقدار
گرمای ویژه	C_P	J / kgK	۴۶۵
رسانندگی گرمایی	k	W / mK	۵۴
چگالی	ρ	kg / m^3	۷۸۳۳

روش پیشنهادی سنسور در دو موقعیت مختلف قرار داده شده است: روی سطح فعال و روی سطح غیرفعال. در مسائل معکوس با دور شدن موقعیت سنسور به سطح فعال، با در نظر گرفتن اثر تأخیر زمانی و مکانی در انتقال حرارت رسانش، با کوچک شدن ضریب حساسیت دقت تخمین کمتر می‌گردد. برای تولید داده‌های اندازه‌گیری شده به دماهای واقعی به دست آمده از حل مستقیم مدل در محل سنسورها، نویز با توزیع گاوسی به آن اضافه می‌شود. برای حل مستقیم از گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه و برای حل معکوس از گام زمانی ۰/۱ ثانیه استفاده شده است. روش پیشنهادی با استفاده از چندین آزمایش عددی در برآورد شار حرارتی در یک مسئله انتقال حرارت معکوس یک بعدی ارزیابی شده است. برای ارزیابی و توانایی روش پیشنهادی از ریشه دوم میانگین مربع خطا[1] [۱] برای مقایسه مقادیر تخمین زده شده با مقادیر واقعی از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$erms = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{q}_i - qexact_i)^2}{n}} \qquad (۱۲)$$

خطای بایاس[2] در حقیقت میزان خطای روش معکوس در برآورد شار حرارتی را برای حالتی که دماهای اندازه‌گیری شده فاقد نویز باشند را نشان می‌دهد که مانند رابطه (۱۲) محاسبه می‌گردد. در حقیقت خطای ریشه دوم میانگین مربع خطا مجموع خطای بایاس و خطای ناشی از نویز موجود در داده‌ها، خطای واریانس، است. خطای واریانس تخمین [۱] را می‌توان از رابطه (۱۳) محاسبه نمود:

$$V = erms^2 - Bias^2 \qquad (۱۳)$$

توجه شود که برای مقایسه آسانتر خطاها از مجذور خطای واریانس استفاده شده است. واحدخطای ریشه دوم میانگین مربع خطا وخطای بایاس و مجذور واریانس (W/m^2) می‌باشد. البته در مطالعه حاضر، محاسبات انجام شده به صورت نسبت این خطاها به مقدار ماکزیمم شار حرارتی و به صورت بی بعد در نظر گرفته شده است. چند سری آزمایش عددی به منظور ارزیابی روش پیشنهادی طراحی شده است. جنس صفحه از فولاد ضد زنگ آستنیتی گرید ۳۰۴[3] با خواص حرارتی ثابت (جدول ۲) به طول ۰/۱ m در نظر گرفته شده است. ابتدا شار حرارتی در سطح فعال با استفاده از تاریخچه زمانی دمای اندازه‌گیری شده در سطح فعال برآورد شده است. دماهای آزمایشی شبیه‌سازی شده با در نظر گرفتن شار حرارتی تولیدی و به عنوان ورودی روش معکوس استفاده شده است. در بررسی اثر پارامترهای کنترلی، فرکانس قطع فیلتر، موقعیت سنسور و شکل شار حرارتی اعمالی، از دماهای اندازه‌گیری آغشته به نویز استفاده شده است.

۱-۴- اثر پارامترهای کنترلی

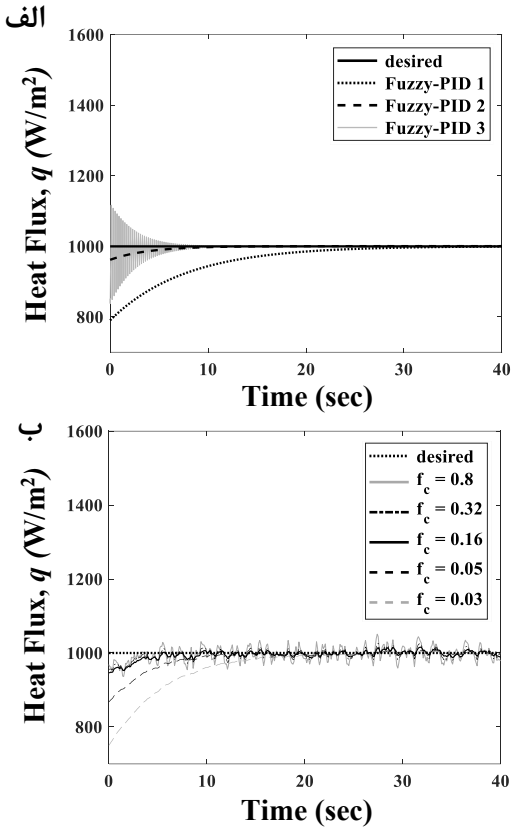
در روش پیشنهادی پارامترهای کنترلی و فرکانس قطع فیلتر، پارامترهای اثرگذار بر دقت تخمین هستند. به منظور بررسی انتخاب دقیق این پارامترها برای دست یابی به تخمینی دقیق‌تر در حالتی که سنسور در سطح فعال قرار دارد شبیه‌سازی‌هایی انجام شده و پارامتر بهینه براساس کمترین ریشه دوم میانگین مربع خطا انتخاب شده است. در اینجا هدف اعمال کنترل‌کننده فازی-پی‌آی‌دی به گونه‌ای می‌باشد که بر اساس تاریخچه زمانی دمای اندازه‌گیری شده، بتواند شار حرارتی ورودی را به درستی محاسبه کند (یعنی خطای حالت ماندگار سیستم را به صفر برساند). بهره‌های کنترل‌کننده پی‌آی‌دی بر اساس سیگنال خطا و مشتق زمانی آن به صورت آنلاین توسط سیستم فازی تعیین می‌شوند و نیازی به استفاده از روش‌های معمول برای تنظیم بهره‌های کنترلی نیست. به هر حال محدوده بهره‌های

1 Root mean square error
2 Bias
3 AISI304

جدول ۳. محدوده بهره‌های کنترلی برای سه کنترل کننده مختلف فازی-پی‌آی‌دی

Table 3. The ranges of control gains for three different Fuzzy-PID controllers

	K_D^{max}	K_P^{max}
فازی- پی‌آی‌دی ۱	۱۰۰	۱۰۰۰۰
فازی- پی‌آی‌دی ۲	۳۰۰	۳۰۰۰۰
فازی- پی‌آی‌دی ۳	۵۰۰	۵۰۰۰۰



شکل۳. شار حرارتی تخمینی الف)اثر پارامترهای کنترلی و ب)اثر فرکانس قطع فیلتر

Fig. 3. Estimated heat flux. a) Effect of Control parameters, b) Effect of Filter cutoff frequency

تناسبی و مشتق‌گیر در این کنترل‌کننده می‌توانند بر حداکثر تلاش کنترلی[1] تأثیر گذار باشند. بنابراین در این تحقیق، سه کنترل کننده فازی-پی‌آی‌دی با محدوده پارامترهای کنترلی مختلف که در جدول ۳ لیست شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است در تمامی این کنترل‌کننده‌ها، کران پایین $K_P^{min} = K_D^{max} = ۰$ در نظر گرفته‌شده است.

شکل ۳-الف و ۳-ب نتایج برآورد شار حرارتی با اعمال کنترل‌کننده‌های مختلف را به ترتیب برای حالت داده‌های بدون نویز و برای حالتی که دماهای اندازه‌گیری شده به نویز آغشته شده‌اند، نشان می‌دهند. همانطور که در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود، تمام کنترل‌کننده‌های در نظر گرفته شده موفق شده‌اند در انتهای زمان شبیه‌سازی با دقت مناسبی شار حرارتی مطلوب را تخمین زنند. نتایج آنالیز خطا برای سه کنترل‌کننده فازی-پی‌آی‌دی ذکر شده در جدول ۴ نشان داده شده است. در اینجا سرعت پاسخ برای فازی-پی‌آی‌دی ۱ که بهره‌های کنترلی نسبتاً پایین‌تری دارد، کمتر است. در ادامه فازی-پی‌آی‌دی ۲ توانسته‌است به سرعت، شار حرارتی مطلوب را با دقت بسیار بالایی تخمین زند. در نهایت فازی-پی‌آی‌دی ۳ که بهره‌های کنترلی نسبتاً بزرگتری دارد، دچار نوسانات شدید در ابتدای فرآیند تخمین شده‌است. در نتیجه در اینجا، سیستم کنترل فازی-

1 Control effort

جدول ۴. آنالیز خطای تخمین شار حرارتی روش پیشنهادی توسط سه کنترل‌کننده فازی-پی‌آی‌دی

Table 4. Error analysis of heat flux estimation of the proposed method by three Fuzzy-PID controllers

	فازی- پی‌آی‌دی ۱	فازی- پی‌آی‌دی ۲	فازی- پی‌آی‌دی ۳
ریشه دوم میانگین مربع خطا	۰/۰۲۸	۰/۰۰۸	۰/۰۶۵

جدول ۵. آنالیز خطای تخمین شار حرارتی روش پیشنهادی با فرکانس‌های قطع فیلتر مختلف

Table 5. Heat flux estimation error analysis of the proposed method with different filter cutoff frequencies

فرکانس قطع	۰/۰۳۰	۰/۰۵۰	۰/۱۶۰	۰/۳۲۰	۰/۸۰۰	۱/۶۰۰
ریشه دوم میانگین مربع خطا	۰/۰۶۷	۰/۰۳۱	۰/۰۱۳	۰/۰۱۴	۰/۰۲۰	۰/۰۲۷

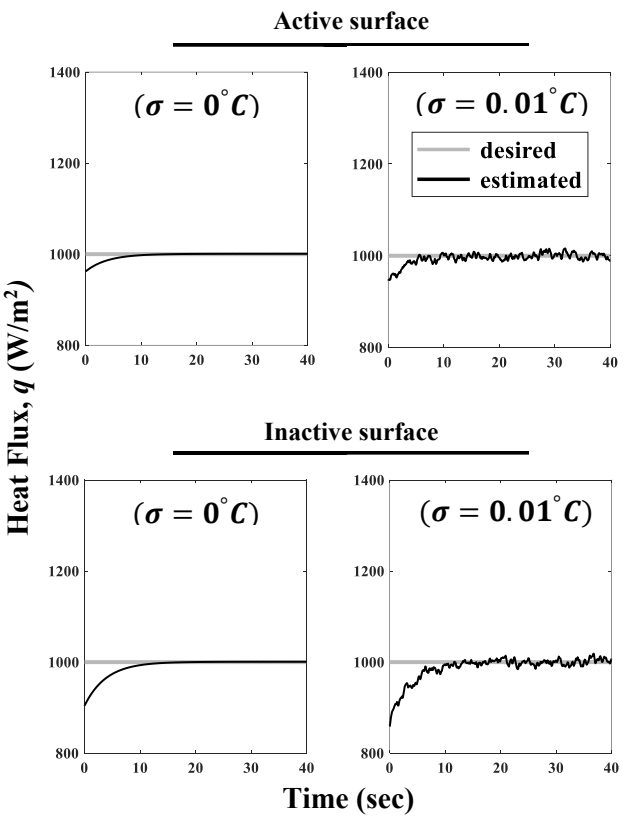
پی‌آی‌دی ۲ که بهترین زمان پاسخ را بدون ایجاد نوسان در ورودی کنترلی به دست آورده‌است و دارای کمترین مقدارخطای ریشه دوم میانگین مربع خطا است، برای استفاده در تمام شبیه‌سازی‌های پیش‌رو انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است تأخیر زمانی مشاهده شده در روش پیشنهادی، همان پاسخ حالت گذرای سیستم‌های کنترلی بوده که جزء جدایی ناپذیر این روش می‌باشد. ولی روش پیشنهادی بر خلاف روش‌های کلاسیک تمام دامنه نظیر روش گرادیان مزدوج وروش تیخونو به صورت آنلاین شارحرارتی را بدون استفاده همزمان از تمام داده‌های اندازه‌گیری شده تقریب می‌زند.

۴-۲- اثر فرکانس قطع فیلتر

برای تخمین شار حرارتی مطلوب برای حالتی که دماهای اندازه‌گیری شده به نویز آغشته شده‌اند، از یک فیلتر پایین گذر با تابع تبدیل به فرم $۱/(۱+s/۲\pi f_c)$ استفاده شده‌است. در صورت عدم استفاده از فیلتر، به دلیل وجود نوسانات با فرکانس بالا در ورودی سیستم کنترل حلقه بسته، ورودی کنترلی (شار حرارتی) دچار نوسانات شدید با دامنه و فرکانس بالا خواهد شد. در اینجا اثر فرکانس قطع فیلتر بر نتایج شبیه‌سازی بررسی شده‌است (شکل ۳-ب و جدول ۵). هر چه فرکانس قطع فیلتر کاهش پیدا کند، محدوده فرکانسی بیشتری در دمای ورودی تضعیف شده در نتیجه دامنه نوسانات شار حرارتی ورودی کاهش پیدا می‌کند که این در ازای کاهش زمان پاسخ سیستم می‌باشد. در اینجا مشاهده می‌شود که فیلتر قطع $f_c = ۰/۱۶$ توانسته‌است مصالحه مناسبی بین سرعت پاسخ سیستم و نوسانات شار حرارتی برقرار نماید و دارای کمترین خطای ریشه دوم میانگین مربع خطا است. بنابر این از این به بعد در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای ورودی‌های دارای نویز از فیلتر قطع $f_c = ۰/۱۶$ استفاده شده است.

۴-۳- اثر موقعیت ترموکوپل و شکل شار حرارتی

با استفاده از پارامترهای بهینه انتخاب شده، شار حرارتی تخمینی در حالتی که تاریخچه دمای ورودی بدون نویز $(\sigma = ۰^\circ C)$ و آغشته به نویز $(\sigma = ۰/۰۱^\circ C)$ در سطح فعال و غیرفعال هستند، در شکل ۴ نشان داده شده است. در بعضی از کاربردهای روش انتقال حرارت معکوس امکان قرار گیری سنسور در سطح فعال نیست. در این آزمایش موقعیت سنسور تغییر کرده و در سطح غیرفعال قرار داده شده و با استفاده از تاریخچه زمانی دمای اندازه‌گیری شده در سطح غیرفعال برآورد شده است. به دلیل اثرات تأخیر و میرایی در انتقال حرارت رسانشی، تغییرات دمایی به ازاء شار حرارتی ثابت با دور شدن از سطح فعال کمتر شده که باعث ایجاد خطا در تخمین می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد هنگامی که سنسورها در سطح فعال قرار دارند تخمین دقیق‌تر خواهد بود (جدول ۶). آزمایشات دیگری با درنظر گرفتن شارحرارتی متغییر با زمان (به صورت پله‌ای و مثلثی) با قرار دادن سنسور در سطح غیرفعال، داده‌های اندازه‌گیری با نویز $(\sigma = ۰/۰۱^\circ C)$ طراحی شده‌اند. شکل ۵ شار حرارتی تخمینی را در حالتی که تغییرات شار حرارتی به صورت پله‌ای است را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی توانسته‌است شار حرارتی ورودی را حتی در حالتی که مقدار شار به صورت ناگهانی (به شکل پله‌ای) تغییر می‌کند با یک تأخیر زمانی به خوبی تخمین بزند. همانطور که گفته شد، این تأخیر زمانی همان پاسخ حالت گذرای سیستم کنترل بوده که جزء جدایی ناپذیر روش به کار گرفته شده در تخمین شار حرارتی می‌باشد. ولی به هر حال، هدف تخمین



شکل۴. شار حرارتی تخمینی با استفاده از روش پیشنهادی با داده‌های نویزی و بدون نویز اندازه‌گیری شده درسطح فعال و درسطح غیرفعال

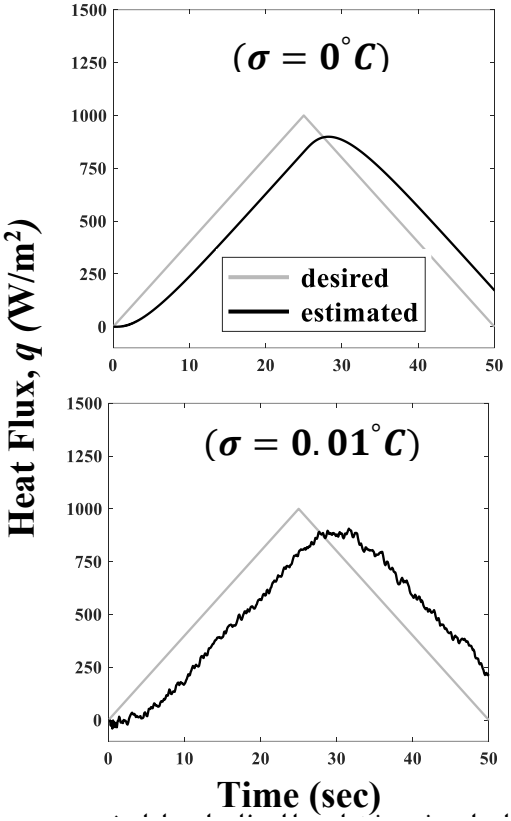
Fig. 4. Estimated heat flux using the proposed method, with non-noise and noisy data measured on active and inactive surfaces

جدول ۶. آنالیز خطای تخمین شار حرارتی با تغییر موقعیت ترموکوپل و شکل شار حرارتی

Table 6. Error analysis of heat flux estimation by changing thermocouple position and heat flux shape

شکل شار حرارتی	موقعیت ترموکوپل	بایاس	ریشه دوم میانگین مربع خطا	واریانس
ثابت	سطح فعال	۰/۰۰۸	۰/۰۱۳	۰/۰۱۰
ثابت	سطح غیرفعال	۰/۰۲۱	۰/۰۲۹	۰/۰۲۰
پله ۱	سطح غیرفعال	۰/۱۱۶	۰/۱۵۸	۰/۱۰۷
پله ۲	سطح غیرفعال	۰/۱۵۶	۰/۱۸۵	۰/۱۰۰
مثلثی	سطح غیرفعال	۰/۱۴۴	۰/۱۸۲	۰/۱۱۱

شار حرارتی در بخش پاسخ حالت ماندگار سیستم است که در شکل ۵ (شار حراتی ورودی پله‌ای) مشاهده می‌شود که سیستم کنترل به خوبی توانسته است به مقادیر مناسب میل کند. در اینجا پارامترهای کنترلی همان پارامترهای تنظیم شده در بخش‌های قبلی هستند و مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی برخلاف روش‌های معمول مانند روش دنباله‌ایی بک برای یک بار تنظیم شده و در ادامه قادر خواهد بود، محدوده وسیعی از شارهای حرارتی ورودی را تقریب بزند. در آزمایشی دیگر تغییرات زمانی شار حرارتی با زمان به صورت مثلثی در نظر گرفته شده است. شکل ۶ شار حرارتی تخمینی را در این حالت نشان می‌دهد. جدول ۶ آنالیز خطای مربوط به اثر موقعیت سنسور و شکل شار حرارتی در تخمین شار حرارتی با استفاده از روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. همانطور که در اینجا مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی توانسته‌است شکل شار حرارتی ورودی را به خوبی تخمین زند ولی با یک فاصله‌ی زمانی که این به دلیل وجود



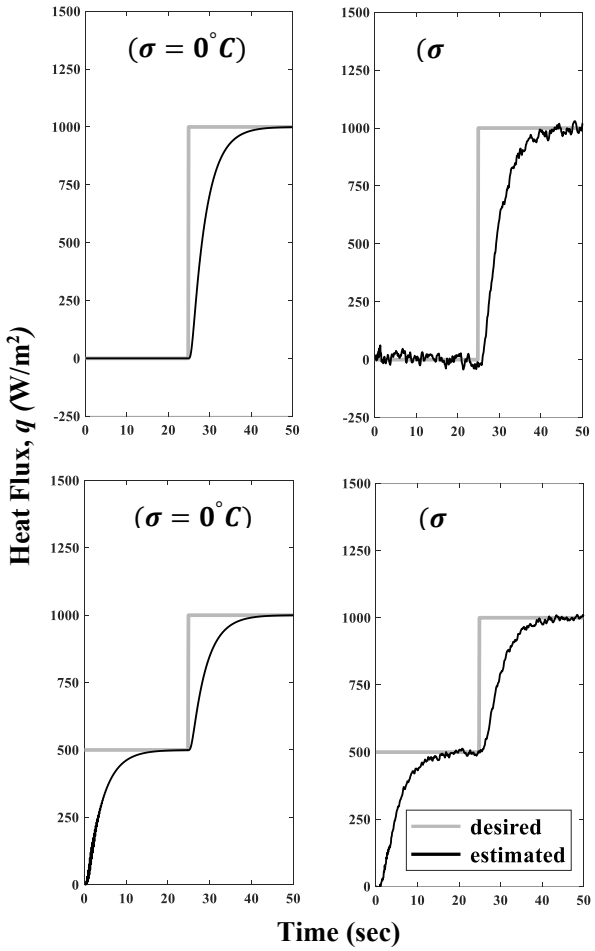
شکل ۶. شار حرارتی مثلثی تخمینی با استفاده از روش پیشنهادی با استفاده از دماهای نویزی و بدون نویز اندازه‌گیری شده در سطح غیرفعال

Fig. 6. Estimated triangular form heat flux using the proposed method using non-noise and noisy temperature signals measured at the inactive surface

تأخیر زمانی بین شار حرارتی ورودی به مسئله و محل نصب سنسور می‌باشد.

۴-۴-اثر مقدار نویز موجود در دماهای اندازه‌گیری شده

بررسی اثر نویز موجود در داده‌ها در دقت روش پیشنهادی با در نظر گرفتن نویز (σ) با مقادیر $۰/۰۵^{\circ}C$، $۰/۰۱^{\circ}C$، $۰^{\circ}C$، و $۰/۱^{\circ}$ در برآورد شار حرارتی برای حالتی که توزیع شار حرارتی اعمالی با زمان ثابت است، بررسی شده‌است. شار حرارتی برآورد شده با استفاده از روش پیشنهادی در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب برای حالتی که سنسور در سطح فعال و غیرفعال قرار دارد نشان داده شده‌اند. آنالیز خطا در هر آزمایش انجام شده و مقادیر خطاها درجدول ۷ آورده شده است. هنگامی که نویز موجود در ورودی روش معکوس زیاد می‌شود، نوسانات در تخمین بیشتر می‌گردد و خطای واریانس نیز افزایش



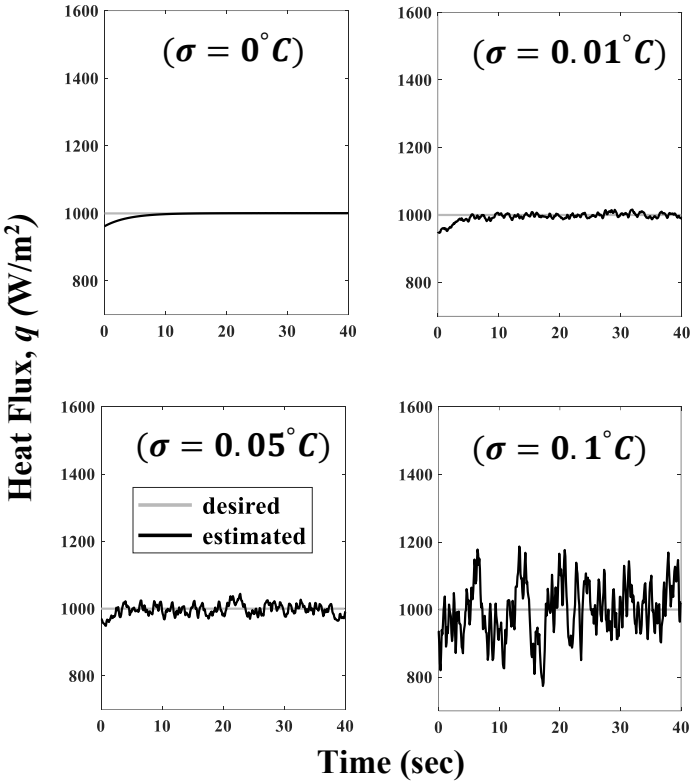
شکل ۵. شار حرارتی پله ایی تخمینی با استفاده از روش پیشنهادی با استفاده از دماهای نویزی و بدون نویز اندازه‌گیری شده در سطح غیرفعال

Fig. 5. Estimated step form heat flux using the proposed method using non-noise and noisy temperature signals measured at the inactive surface

می‌یابد. تخمین‌ها در چند آزمایش در نظر گرفته شده با شار حرارتی اعمالی در این مسئله در هر آزمایش تطابق خوبی دارد که نشان دهنده دقت روش دنباله‌ای پیشنهادی می‌باشد.

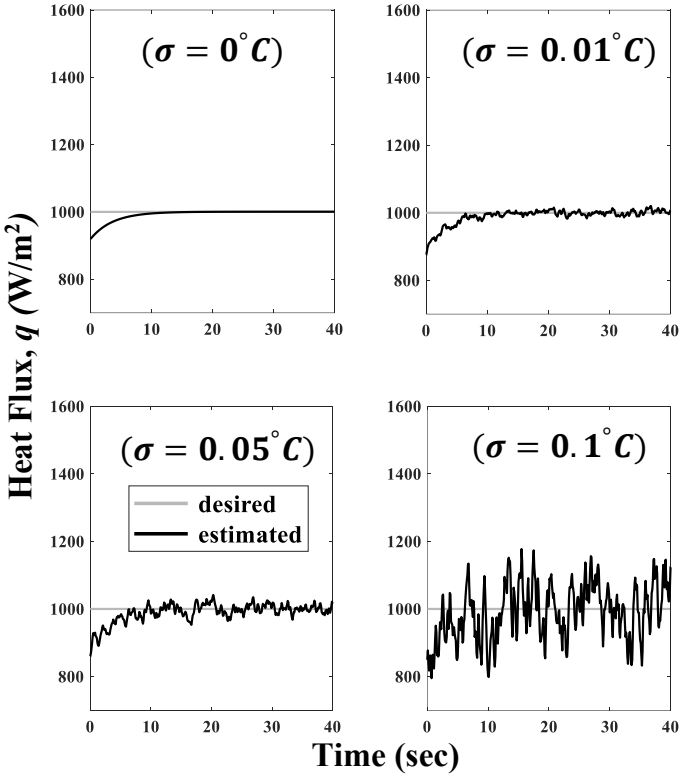
۴-۵- مقایسه روش پیشنهادی با روش تیخونو

در این مقاله روش پیشنهادی با روش تنظیم تیخونو مرتبه صفر، یکی از روش‌های کلاسیک انتقال حرارت معکوس، مقایسه شده است. روش تنظیم تیخونو مرتبه صفر در حقیقت یک روش تمام دامنه است که برای برآورد شار حرارتی از تمام داده‌های اندازه‌گیری استفاده می‌کند .روش تنظیم، روشی است که درآن با اضافه کردن فاکتوری به تابع مربعات خطا باعث کاهش نوسانات در تابع مجهول نظیر شار



شکل ۷. بررسی اثر مقدار نویز موجود در دماهای اندازه‌گیری شده در سطح فعال بر تخمین شار حرارتی

Fig. 7. Investigating the effect of noise level at temperature signals measured at active surface on heat flux estimation



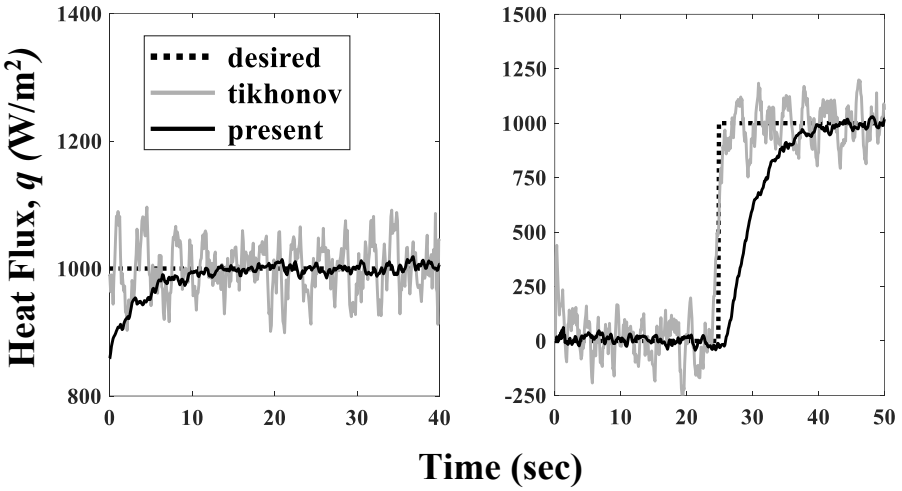
شکل ۸. بررسی اثر مقدار نویز موجود در دماهای اندازه‌گیری شده در سطح غیرفعال بر تخمین شار حرارتی

Fig. 8. Investigating the effect of noise level at temperature signals measured at inactive surface on heat flux estimation

جدول ۷. آنالیز خطای تخمین شار حرارتی با تغییر میزان نویز موجود در دماهای اندازه‌گیری شده

Table 7. Error analysis of heat flux estimation by varying the noise level at measured temperatures

	خطا	$\sigma=$ ۰	$\sigma=$ ۰/۰۱	$\sigma=$ ۰/۰۵	$\sigma=$ ۰/۱
سطح فعال	ریشه دوم میانگین مربع خطا	۰/۰۰۸	۰/۰۱۳	۰/۰۱۷	۰/۰۸۱
	بایاس	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸
	واریانس	۰/۰۰۰	۰/۰۱۰	۰/۰۱۵	۰/۰۸۰
سطح غیرفعال	ریشه دوم میانگین مربع خطا	۰/۰۱۷	۰/۰۲۵	۰/۰۳۰	۰/۰۸۳
	بایاس	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷
	واریانس	۰/۰۰۰	۰/۰۱۸	۰/۰۲۵	۰/۰۸۱



شکل ۹. مقایسه روش پیشنهادی و روش تیخونو در تخمین شار حرارتی ثابت و پله‌ای در سطح غیرفعال

Fig. 9. Comparison of proposed method and Tikhonov method in estimation of constant and step form heat flux at inactive surface

حرارتی می‌شود. این نوسانات در ذات یک مسئله بد وضع وجود دارد. روش‌های تنظیم توسط تعدادی از محققان مورد مطالعه قرارگرفته‌اند [۱]. در روش تنظیم تیخونو مرتبه صفر [۱] می‌توان با استفاده از رابطه زیر شار حرارتی را برآورد نمود:

$$q=[X^T X+\alpha I]^{-1} X^T (Y-T_0) \qquad (۱۴)$$

در رابطه (۱۴)، α پارامتر تنظیم و X ماتریس ضریب حساسیت است. در مسائل معکوس [۱]، تغییرات دما به ازاء تغییر در پارمتر تخمین، ضریب حساسیت نامیده می‌شود. در این پژوهش هدف برآورد شار حرارتی است و می‌توان ضریب حساسیت را با استفاده از مشتق دما نسبت به شارحرارتی (رابطه (۱۵)) محاسبه نمود:

$$X_p(x_{sensor},t)=\frac{\partial T(x_{sensor},t)}{\partial q} \qquad (۱۵)$$

برای دریافت جزئیات بیشتر در باره روش تیخونومرتبه صفر می‌توان به [۱] مراجعه نمود. شکل ۹ مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از روش پیشنهادی و روش تیخونو مرتبه صفر برای حالتی که سنسور در سطح غیرفعال قرار دارد را نشان می‌دهد. آنالیز خطا برای روش تیخونو انجام شده و در جدول ۸ ارائه شده است. هر دو روش به خوبی توانسته‌اند شار حرارتی را برآورد کنند. دیده می‌شود نوسانات موجود در تخمین شار حرارتی با استفاده از روش تیخونو بیشتر از روش پیشنهادی است. همچنین روش پیشنهادی این مقاله می‌تواند تنها با داشتن تاریخچه زمانی دمای اندازه‌گیری شده تا زمان حاضر، شار حرارتی ورودی را با دقت بالایی تخمین بزند. پارامترهای تأثیرگذار

جدول ۸. آنالیز خطای تخمین شار حرارتی بااستفاده از روش تیخونو مرتبه صفر با $\sigma = ۰/۰۱$

Table 8. Error analysis of heat flux estimation using zero-order Tikhono method with $\sigma = 0.01$

شکل شار حرارتی	موقعیت ترموکوپل	پارامتر تنظیم	ریشه دوم میانگین مربع خطا
ثابت	سطح غیرفعال	$۸ \times ۱۰^{-۲/۶}$	۰/۰۷۴۲
پله ۱	سطح غیرفعال	$۸ \times ۱۰^{-۲/۶}$	۰/۱۳۲

در روش پیشنهادی که همان پارامترهای سیستم کنترل هستند، تنها یک بار تنظیم شده و سیستم کنترل می‌تواند برای انواع ورودی‌ها با شکل‌ها و دامنه‌های دیگر نیز کارآمدی خود را حفظ کند در حالی که روش تنظیم تیخونو مرتبه صفر یک روش تمام دامنه است که برای برآورد شار حرارتی به تمام داده‌های اندازه‌گیری شده نیاز دارد و نمی‌تواند به صورت دنباله‌ای مورد استفاده قرار گیرد. در آزمایش‌های واقعی، می‌بایست به صورت آنلاین و با اندازه‌گیری دمای اندازه‌گیری شده فعلی در زمان حاضر، شار حرارتی ورودی را تخمین زد که روش پیشنهادی این قابلیت را دارد که به صورت همزمان با انجام آزمایش برای برآورد شار حرارتی مورد استفاده قرار گیرد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به ارائه روشی دنباله‌ای بر اساس نظریه سیستم‌های کنترل بازخورد که در آن از کنترل‌کننده فازی-پی‌آی‌دی بهره گرفته شده‌است، برای برآورد توزیع شار حرارتی پرداخته شد. روش پیشنهادی برای یک مسئله کلاسیک انتقال حرارت هدایتی معکوس، یک صفحه تخت با یک سطح عایق و سطح فعالی که بر آن شار حرارتی متغییر با زمان اعمال می‌شود، بررسی شد. کنترل‌کننده استفاده شده در روش پیشنهادی به مدل ریاضی سیستم تحت کنترل وابستگی نداشته به همین دلیل پارامترهای آن یک بار تنظیم شده و پس از آن برای محدوده وسیعی از توابع توزیع شار حرارتی ورودی به کار گرفته می‌شود. ابتدا پارامترهای کنترلی و فرکانس قطع فیلتر بررسی و براساس خطای ریشه دوم میانگین مربع خطا کمتر، بهترین مقدار برای پارامترهای ذکر شده انتخاب شد و در تمامی آزمایشات از همین مقادیر استفاده شد. اثر میزان نویز موجود در دماهای اندازه‌گیری شده، موقعیت ترموکوپل و شکل شار حرارتی بر دقت تخمین شار حرارتی با استفاده از روش پیشنهادی بررسی شد و آنالیز خطا نیز انجام گردید. نتایج نشان می‌دهد در تمامی آزمایشات روش ارائه شده کاملاً موفق بوده است. هنگامی که شکل شار حرارتی اعمالی به صورت پله‌ای یا مثلثی است کمی تأخیر زمانی در نتایج دیده می‌شود که علت این رفتار همان پاسخ حالت گذرای سیستم کنترل بوده که جزء جدایی‌ناپذیر روش به کار گرفته شده در تخمین شار حرارتی می‌باشد. آنالیز خطا نشان دهنده دقت خوب روش پیشنهادی در برآورد شار حرارتی است و می‌تواند به عنوان یک روش دنباله‌ای معکوس در برآورد شار حرارتی معرفی گردد. روش پیشنهادی این قابلیت را دارد که به صورت همزمان با انجام آزمایش مورد استفاده قرار گیرد که این امر سبب می‌شود، نیاز کمتری به حافظه و زمان محاسباتی وجود داشته باشد.

مراجع

[1] J.V. Beck, B. Blackwell, C.R.S. Clair Jr, Inverse heat conduction: Ill-posed problems, James Beck, 1985.

[2] A.N. Tikhonov, V.I. Arsenin, Solutions of ill-posed problems, Winston, Washington, DC, 1977.

[3] J.V. Beck, Surface heat flux determination using an integral method, Nuclear Engineering and Design, 7(2) (1968) 170-178.

[4] F. Kowsary, S. Farahani, The smoothing of temperature data using the mollification method in heat flux estimating, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 58(3) (2010) 246-227.

[5] S. Farahani, M. Sefidgar, F. Kowsary, Estimation of kinetic parameters of composite materials during the cure process by using wavelet transform and mollification method, International Communications in Heat and Mass Transfer, 38(9) (2011) 1305-1311.

[6] K.A. Woodbury, J.V. Beck, Estimation metrics and optimal regularization in a Tikhonov digital filter for the inverse heat conduction problem, International Journal of Heat

and Mass Transfer, 62 (2013) 31-39.

[7] K.A. Woodbury, J.V. Beck, H. Najafi, Filter solution of inverse heat conduction problem using measured temperature history as remote boundary condition, International Journal of Heat and Mass Transfer, 72 (2014) 139-147.

[8] H. Najafi, K.A. Woodbury, J.V. Beck, A filter based solution for inverse heat conduction problems in multi-layer mediums, International Journal of Heat and Mass Transfer, 83 (2015) 710-720.

[9] H. Kameli, F. Kowsary, A new inverse method based on Lattice Boltzmann method for 1D heat flux estimation, International Communications in Heat and Mass Transfer, 50 (2014) 1-7.

[10] R. Brittes, F.H. França, A hybrid inverse method for the thermal design of radiative heating systems, International Journal of Heat and Mass Transfer, 57(1) (2013) 48-57.

[11] A.H. Rabiee, Regenerative semi-active vortex-induced vibration control of elastic circular cylinder considering the effects of capacitance value and control parameters, Journal of Mechanical Science and Technology, 32(12) (2018) 5583-5595.

[12] F. Incropera, D. DeWitt, Introduction to heat transfer, (1985).

[13] G.F. Franklin, J.D. Powell, A. Emami-Naeini, J.D. Powell, Feedback control of dynamic systems, Addison-Wesley Reading, MA, 1994.

[14] C. Killian, Modern Control Technology: Components and Systems, Thompson Delmar, 2005.

[15] K. Zhou, J.C. Doyle, K. Glover, Robust and optimal control, Prentice hall New Jersey, 1996.

[16] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, V. Petar, Nonlinear and adaptive control design, Wiley New York, 1995.

[17] H. Gao, W. He, C. Zhou, C. Sun, Neural network control of a two-link flexible robotic manipulator using assumed mode method, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15(2) (2018) 755-765.

[18] Z.-Y. Zhao, M. Tomizuka, S. Isaka, Fuzzy gain scheduling of PID controllers, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 23(5) (1993) 1392-1398.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A.H. Rabiee, S.D. Farahani, Real Time Solution for Inverse Heat Conduction Problem in One-Dimensional Plate Utilizing Fuzzy- Proportional–Integral–Derivative Controller, Amirkabir J. Mech Eng., 53(1) (2021) 303-316.

DOI: 10.22060/mej.2019.16092.6269