



حل آنلاین مسئله انتقال حرارت معکوس در یک صفحه یک بعدی با بهره‌گیری از کنترل کننده فازی - تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر

امیر حسین ربیعی، سمیه داودآبادی فراهانی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

تاریخچه داوری:

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

کلمات کلیدی:

شکل‌های مختلف شار حرارتی
روش آنلاین معکوس
نویز
فیلتر
کنترل کننده فازی - تناسبی
انتگرال گیر مشتق گیر

خلاصه: در این نوشتار به ارائه الگوریتمی جدید بر اساس ویژگی‌های کنترل کننده‌های فازی - تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر به منظور برآورد شار حرارتی در مسائل انتقال حرارت معکوس پرداخته شده است. ساختار اصلی سیستم فازی - تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر، کنترل کننده تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر بوده که در آن بهره‌های تناسبی، انتگرال گیر و مشتق گیر توسط سیستم فازی به صورت آنلاین به دست آورده می‌شوند. ورودی الگوریتم دماهای اندازه‌گیری شده است که در هر لحظه کنترل کننده 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 شار حرارتی با مقادیر مختلف نویز موجود در دماهای اندازه‌گیری شده و موقعیت‌های مختلف ترموکوپل در دیواره با دقت خیلی خوبی کاملاً موفق بوده است.

۱- مقدمه

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 ثبت شده 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

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 بر خوردی 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

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



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 شده است. 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.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = q(t) \quad (1)$$

$$T(x, y, 0) = 0$$

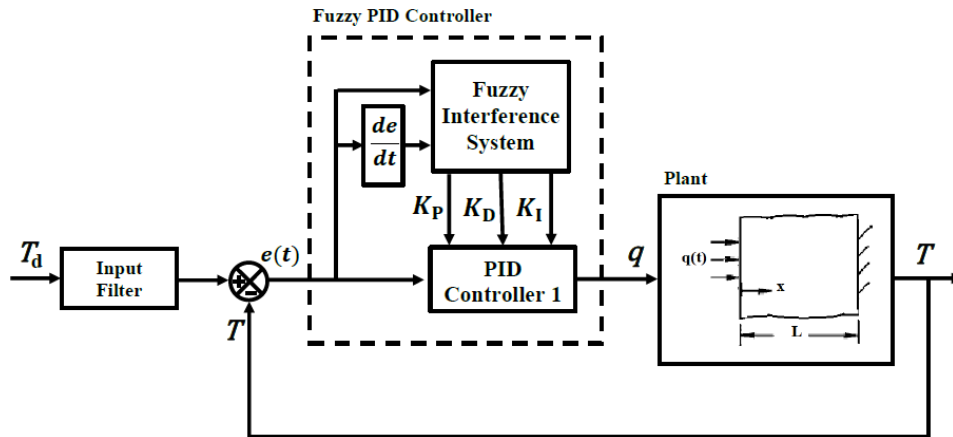
حل دقیق این مسئله و توزیع دما در داخل دامنه حل [۱۲] به صورت زیر است:

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

برای به دست آوردن ضرایب حساسیت^۲ از رابطه (۲) نسبت به

دو بخش روش‌های تمام دامنه و روش‌های دنباله‌ای تقسیم می‌شوند. در روش تمام دامنه به طور کلی اطلاعات تاریخیچه 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 دنباله‌ای 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 تاریخیچه زمانی دمای اندازه‌گیری شده توسط سنسور دوم به عنوان شرط مرزی ارائه دادند. نجفی و همکاران [۸]، روش دیجیتالی فیلتر تیخونو را برای حل مسئله معکوس چند لایه بررسی کردند. روش‌های تمام دامنه‌ای 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، در این مقاله روشی آنلاین پیشنهاد شده است که براساس ویژگی‌های کنترل‌کننده فازی- تناسبی انتگرال‌گیر مشتق‌گیر (پی‌آی‌دی)^۱ برای برآورد شار حرارتی توسعه داده شده است. ورودی الگوریتم، تاریخیچه زمانی دماهای اندازه‌گیری شده در



شکل ۱. شماتیک مسئله حاضر به همراه دیاگرام جعبه‌ای کنترل کننده فازی-پی‌آی‌دی

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

ارسال می‌شود. مقایسه‌گر، سیگنال خطا را که اختلاف بین سیگنال اندازه‌گیری و ورودی مطلوب (مینا) است، محاسبه می‌کند. سپس کنترل کننده 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 کنترل کننده‌های 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.

۱-۳- طراحی کنترل کننده پی‌آی‌دی

در این بخش، یک کنترل کننده پی‌آی‌دی کلاسیک به منظور محاسبه شار حرارتی طراحی می‌شود. کنترل کننده 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 فراجهدش را افزایش می‌دهد. همچنین بهره مشتق‌گیر

شار حرارتی مجهول مشتق گرفته شده است.

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

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

$$T(x,t) = \int_0^t q(\lambda) \frac{\partial X(x,t-\lambda)}{\partial \lambda} d\lambda \quad (4)$$

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^۱ 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 کنترل کننده، مقایسه کننده، عملگر، حسگر و فرآیند هستند. در این سیستم‌ها، در هر لحظه، خروجی توسط حسگر اندازه‌گیری شده و به مقایسه‌گر

1 Feedback control system

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 نرمال شده به دست آورده می‌شوند:

$$K'_P = (K_P - K_P^{min}) / (K_P^{max} - K_P^{min}) \quad (7)$$

$$K'_D = (K_D - K_D^{min}) / (K_D^{max} - K_D^{min}) \quad (8)$$

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:

$$K_I = K_P^2 / (\alpha K_D) \quad (9)$$

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 فازی دو ورودی (e, \dot{e}) ، سه خروجی (K'_P, K'_D, α) استفاده می‌شود. محدوده متغیرهای ورودی به صورت $e \in [-1, 1]$ و $\dot{e} \in [-1, 1]$ و متغیرهای خروجی به صورت $K'_P \in [1, 0]$ ، $K'_D \in [1, 0]$ و در نهایت $\alpha \in [5, 2]$ 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 $\{4, 5\}$ ، $\alpha = \{2, 3\}$ 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

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

$$q(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (5)$$

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:

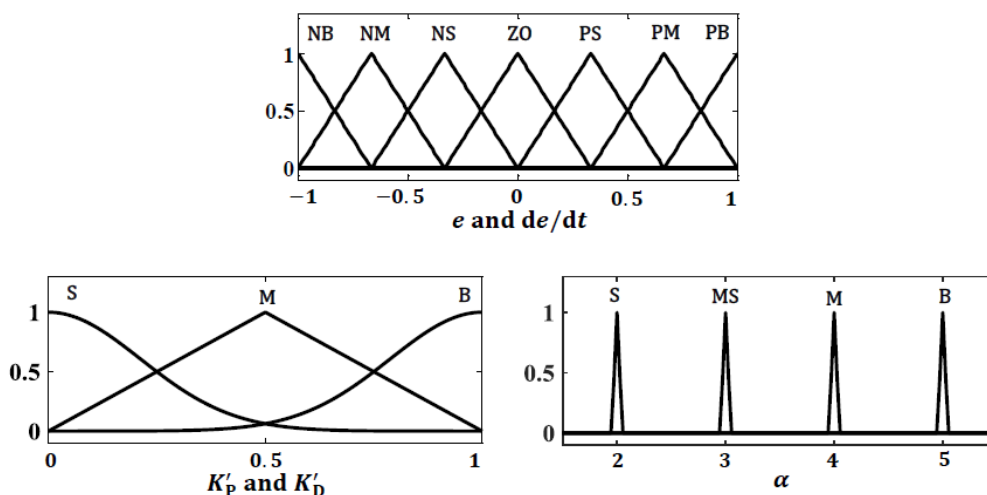
$$e(t) = T_d(t) - T(t), \quad (6)$$

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، زیگلر-نیکولز، 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 به درستی وظایف کنترلی را انجام دهد. از این رو 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



شکل ۲. توابع عضویت ورودی و خروجی کنترل کننده 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

زیر محاسبه می‌شوند:

$$K_p = K_p'(K_p^{max} - K_p^{min}) + K_p^{min} \quad (10)$$

$$K_d = K_d'(K_d^{max} - K_d^{min}) + K_d^{min} \quad (11)$$

و در نهایت بهره انتگرال گیر 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

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 ، \dot{e} و NB باشد، آنگاه NB می‌شود K_p' ، B می‌شود K_d' و S می‌شود α می‌شود ۲، تعریف می‌شود. در نهایت، با استفاده از استنتاج ممدانی و روش غیرفازی ساز مرکز گرانش^۱، 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

1 Center of gravity

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

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

و خطای 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 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 نويز استفاده شده است.

۴-۱- 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

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، نويز 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^۱ [۱] برای مقایسه مقادیر تخمین زده شده با مقادیر واقعی از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$erms = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{q}_i - q_{exact,i})^2}{n}} \quad (12)$$

خطای بایاس آدر حقیقت میزان خطای روش معکوس در برآورد شار حرارتی را برای حالتی که دماهای اندازه‌گیری شده فاقد نويز 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 نويز موجود در داده‌ها، خطای واریانس، است. خطای واریانس تخمین [۱] را می‌توان از رابطه (۱۳) محاسبه نمود:

$$V = erms^2 - Bias^2 \quad (13)$$

توجه شود که برای مقایسه آسانتر خطاها از مجذور خطای واریانس استفاده شده است. واحد خطای ریشه دوم میانگین مربع خطا

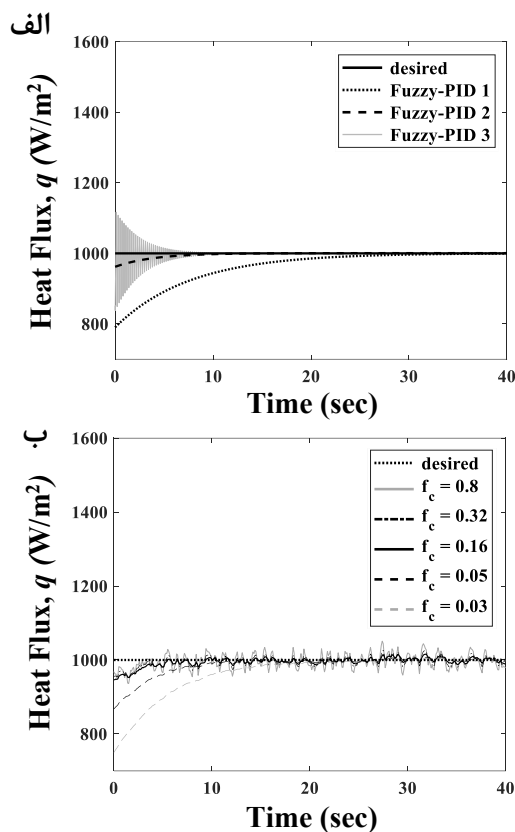
1 Root mean square error

2 Bias

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



شکل ۳. 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

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 کنترل کننده 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 توانسته است 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 شده است. در نتیجه در اینجا، سیستم کنترل فازی-

تناسبی و مشتق‌گیر در این کنترل کننده می‌توانند بر حداکثر تلاش کنترلی^۱ 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 کنترل کننده‌ها، کران پایین $K_p^{min} = K_D^{max} = 0$ در نظر گرفته شده است.

شکل ۳-الف و ۳-ب نتایج برآورد شار حرارتی با اعمال کنترل کننده‌های مختلف را به ترتیب برای حالت داده‌های بدون نویز و برای حالتی که دماهای اندازه‌گیری شده به نویز آغشته شده‌اند،

1 Control effort

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

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

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

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

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

فیلتر قطع $f_c = 0/16$ استفاده شده است.

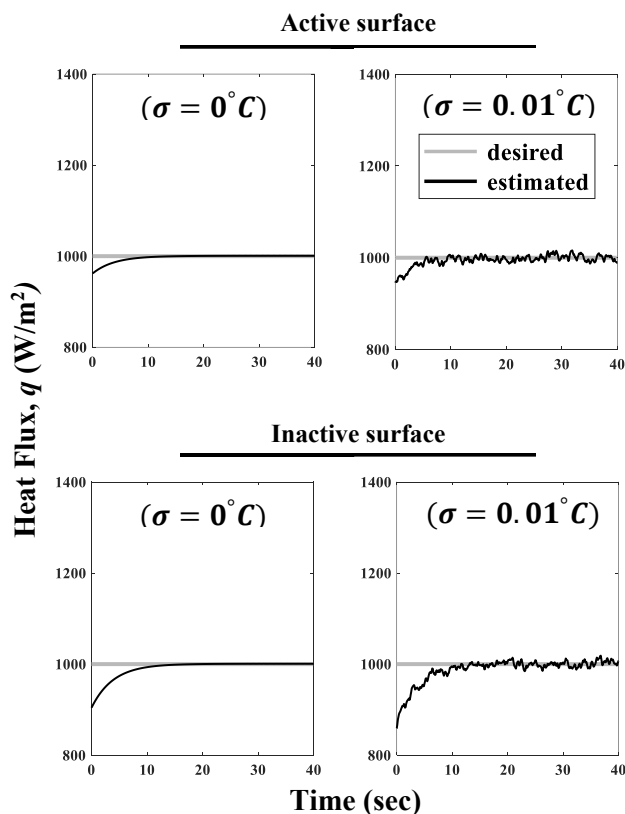
۴-۳- اثر موقعیت ترموکوپل و شکل شار حرارتی

با استفاده از پارامترهای بهینه انتخاب شده، شار حرارتی تخمینی در حالتی که تاریخچه دمای ورودی بدون نویز ($\sigma = 0^\circ C$) و آغشته به نویز ($\sigma = 0/01^\circ C$) 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 در نظر گرفتن شار حرارتی متغییر با زمان (به صورت پله‌ای و مثلثی) با قرار دادن سنسور در سطح غیرفعال، داده‌های اندازه‌گیری با نویز ($\sigma = 0/01^\circ C$) 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 توانسته است 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

پی‌آی‌دی ۲ که بهترین زمان پاسخ را بدون ایجاد نوسان در ورودی کنترلی به دست آورده است و دارای کمترین مقدار خطای 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 و روش تیخونو به صورت آنالین شار حرارتی 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 $1/(1+s/2\pi f_c)$ استفاده شده است. 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 شده است (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 $f_c = 0/16$ توانسته است مصالحه مناسبی بین سرعت پاسخ سیستم و نوسانات شار حرارتی برقرار نماید و دارای کمترین خطای ریشه دوم میانگین مربع خطا است. بنابراین از این به بعد در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای ورودی‌های دارای نویز از



شکل ۴. شار حرارتی تخمینی با استفاده از روش پیشنهادی با داده‌های نویزی و بدون نویز اندازه‌گیری شده در سطح فعال و در سطح غیرفعال
 Fig. 4. Estimated heat flux using the proposed method, with non-noise and noisy data measured on active and inactive surfaces

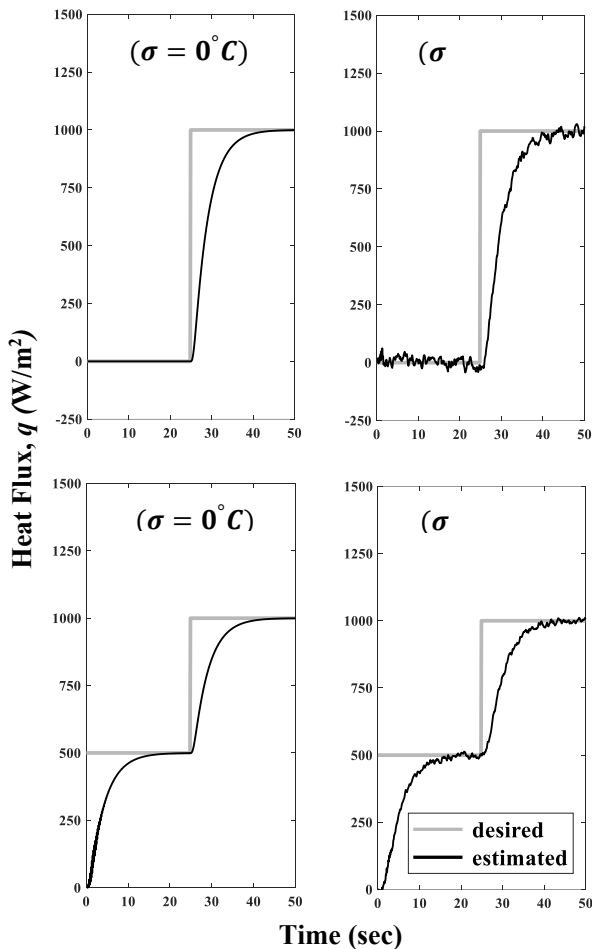
جدول ۶. آنالیز خطای تخمین شار حرارتی با تغییر موقعیت ترموکوپل و شکل شار حرارتی

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

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 توانسته است شکل شار حرارتی ورودی را به خوبی تخمین زند ولی با یک فاصله‌ی زمانی که این به دلیل وجود

شار حرارتی در بخش پاسخ حالت ماندگار سیستم است که در شکل ۵ (شار حرارتی 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 دنباله‌ای بک برای یک بار تنظیم شده و در ادامه قادر خواهد بود، محدوده وسیعی از شارهای حرارتی ورودی را تقریب بزند. در

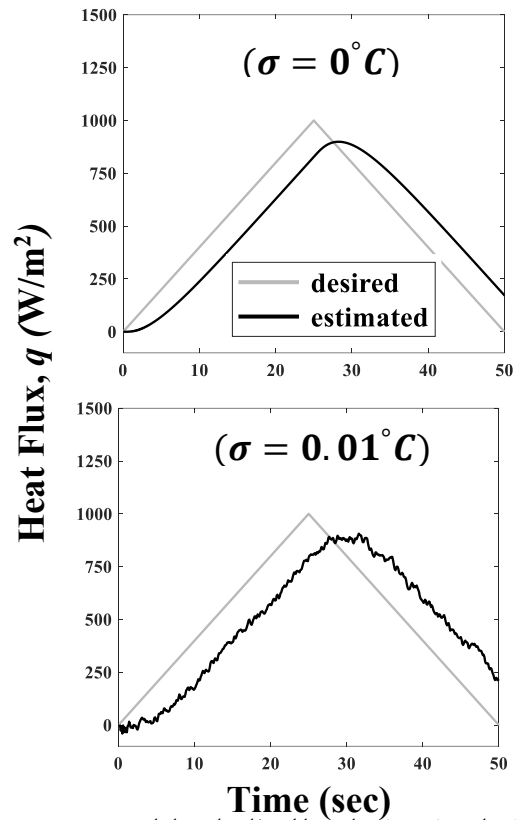


شکل ۵. شار حرارتی پله ایی تخمینی با استفاده از روش پیشنهادی با استفاده از دماهای نویزی و بدون نویز اندازه‌گیری شده در سطح غیرفعال
 Fig. 5. Estimated step form heat flux using the proposed method using non-noise and noisy temperature signals measured at the inactive surface

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 در آن با اضافه کردن فاکتوری به تابع مربعات خطا باعث کاهش نوسانات در تابع مجهول نظیر شار

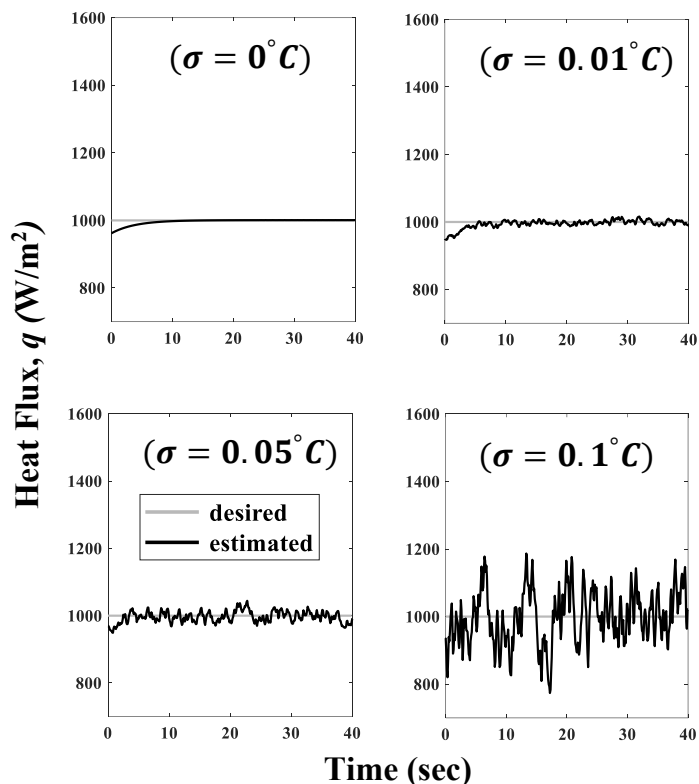


شکل ۶. شار حرارتی مثلثی تخمینی با استفاده از روش پیشنهادی با استفاده از دماهای نویزی و بدون نویز اندازه‌گیری شده در سطح غیرفعال
 Fig. 6. Estimated triangular form heat flux using the proposed method using non-noise and noisy temperature signals measured at the inactive surface

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

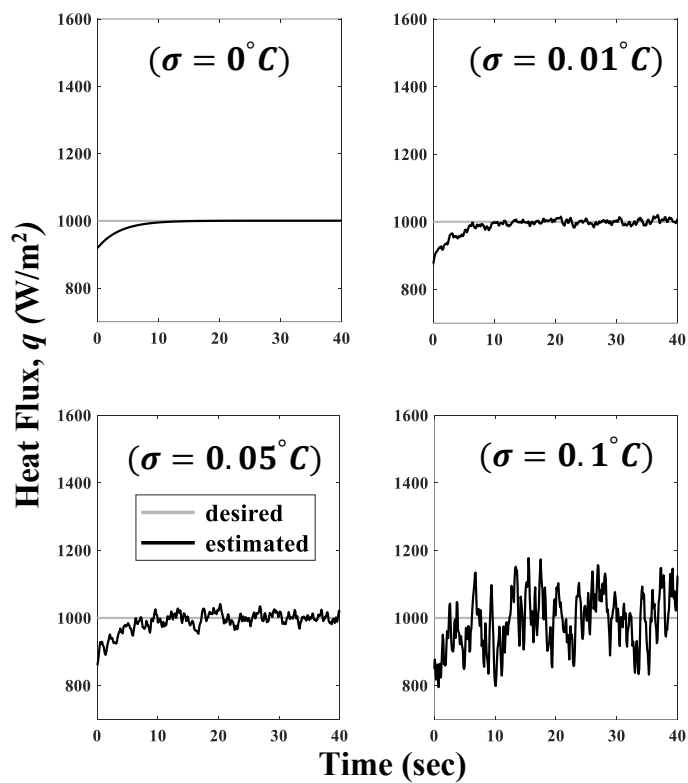
۴-۴- اثر مقدار نویز موجود در دماهای اندازه‌گیری شده

بررسی اثر نویز موجود در داده‌ها در دقت روش پیشنهادی با در نظر گرفتن نویز (σ) با مقادیر 0.01°C ، 0.05°C و 0.1°C در برآورد شار حرارتی برای حالتی که توزیع شار حرارتی اعمالی با زمان ثابت است، بررسی شده است. 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 در جدول 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 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



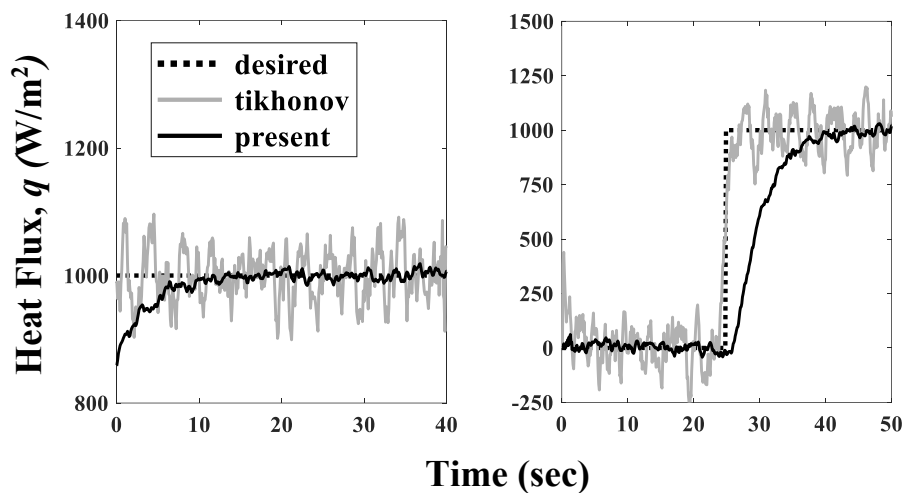
شکل ۸. بررسی اثر مقدار نویز موجود در دماهای اندازه‌گیری شده در سطح غیرفعال بر تخمین شار حرارتی

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

$\sigma = 0.1$	$\sigma = 0.05$	$\sigma = 0.01$	$\sigma = 0$	خطا	
0.081	0.017	0.013	0.008	ریشه دوم میانگین مربع خطا	سطح فعال
0.008	0.008	0.008	0.008	بایاس	
0.080	0.015	0.010	0.000	واریانس	
0.083	0.030	0.025	0.017	ریشه دوم میانگین مربع خطا	سطح غیرفعال
0.017	0.017	0.017	0.017	بایاس	
0.081	0.025	0.018	0.000	واریانس	



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

$$X_p(x_{sensor}, t) = \frac{\partial T(x_{sensor}, t)}{\partial q} \quad (15)$$

برای دریافت جزئیات بیشتر در باره روش تیخونو مرتبه 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

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

$$q = [X^T X + \alpha I]^{-1} X^T (Y - T_0) \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، α پارامتر تنظیم و X ماتریس ضریب حساسیت است. در مسائل معکوس [۱]، تغییرات دما به ازاء تغییر در پارامتر 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 شار حرارتی (رابطه (۱۵)) محاسبه نمود:

جدول ۸. آنالیز خطای تخمین شار حرارتی با استفاده از روش تیخونو مرتبه صفر با $\sigma = 0.01$

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	$2/6-10 \times 8$	۰/۰۷۴۲
پله ۱	سطح غیرفعال	$2/6-10 \times 8$	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.

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

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

- 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.
- 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,

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](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16092.6269)

