

تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID جهت کنترل دما در رساناهای مختلف

امیرحسین عودی^۱، سمانه فرامرزی^۲، مریم حسینی^۱، یگانه داودبیدی^{۳*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: پذیرش مقاله:	کنترل کننده تناسبی-انترگالی-مشتقی (PID)، یک الگوریتم و روش کنترل حلقه بسته با بهره‌گیری از مفهوم بازخوردی است که در بسیاری از فرایندهای صنعتی برای کنترل سرعت موتورهای DC، کنترل فشار، کنترل دما و غیره به کار می‌رود. در این مقاله به طراحی و تنظیم مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده PID پرداخته شده است. جهت این کار یک جسم افقی با رسانایی‌های متفاوت انتخاب شد تا به کنترل دمای آن با تغییر شار حرارتی پرداخته شود. سپس سیستم مورد مطالعه در فضای حالت نوشته شد. که در این روش به کمک تفاضل محدود معادلات با مشتقات جزئی را به معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل کرده سپس کنترل کننده مناسب جهت کنترل دما طراحی گردید. نتایج نشان می‌دهد برای پایداری سیستم‌هایی با رسانایی گرمایی ضعیف (مقدار α کوچک) باید $\frac{K_p}{K_i} = 10$ باشد. برای سیستم‌هایی با رسانایی گرمایی متوسط باید $\frac{K_p}{K_i} = 0.1$ انتخاب باشد. برای سیستم‌هایی با رسانایی گرمایی قوی (مقدار α بزرگ) باید $\frac{K_p}{K_i} = 1$ انتخاب کرد. با توجه به بهینه‌سازی انجام شده K_d در هر سه حالت مقداری کوچک بود بنابراین می‌توان از کنترل کننده PI در چنین سیستم‌هایی استفاده کرد.

۱- مقدمه

انتقال حرارت هدایتی، انتقال انرژی از ذرات دارای انرژی بیشتر به ذرات مجاور با انرژی کمتر است که در جامدات به دو دلیل عمده از جمله ارتعاشات شبکه‌ای و الکترون-های آزاد رخ می‌دهد. برای محاسبه نرخ انتقال حرارت هدایتی از قانون فوریه استفاده می‌شود [۱]. طبق این قانون در انتقال حرارت هدایتی، نرخ انتقال حرارت بین دو نقطه که دمای آن متفاوت است، به گرادیان دما، مساحت سطح عمود بر جهت انتقال حرارت و جنس ماده بستگی دارد [۲]. تابع توزیع دما در مختصات کارتزین که ناپایا و

فقط در جهت x انتقال حرارت دارد در معادله ۱ آمده است [۳و۴].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + bq \quad (1)$$

$$b = \frac{1}{\rho C_p} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (3)$$

α ضریب نفوذ حرارتی، q شار حرارتی (W/m^2)، ρ دانسیته سیال (kg/m^3)، C_p ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ($J/^\circ C.kg$) و k ضریب انتقال حرارت هدایتی ($W/m.^\circ C$) می‌باشد. ضریب نفوذ حرارتی (α) معیاری از توانایی یک ماده در رسانش گرما در مقایسه با ذخیره انرژی گرمایی در آن ماده است. این کمیت به صورت نسبت گرمای عبور کرده به گرمای ذخیره شده توسط واحد حجم ماده است. هر چه مقدار α بزرگتر باشد حرارت سریعتر در ماده پخش می‌شود و بالعکس [۵].

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir
۱. گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
۲. گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۳. گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران

در برخی از فرایندهای صنعتی داشتن عملکرد بهینه، مستلزم کنترل میدان دما به منظور ایجاد یک توزیع مشخص در اجسام جامد با رسانایی متفاوت می‌باشد. مریک از روش گرادیان مزدوج برای حل مسأله‌ی کنترل مرزی دمای یک سیستم غیرخطی به عبارت دیگر خواص حرارتی متغیر با دما، استفاده کرد [۶ و ۷].

مایدی و کوریو [۸]، مدلی برای کنترل گسترده معادله‌ی پخش غیرخطی با استفاده از خطی‌سازی ورودی-خروجی ارائه دادند. طراحی کنترل‌کننده با استفاده مستقیم از معادله‌ی مشتق جزئی (PDE) و بدون هیچ ساده‌سازی یا تقریبی انجام شده است. بونکومکونگ و کوانتاناپریدا [۹]، یک کنترل‌کننده‌ی مرزی بازخوردی برای انتقال حرارت از یک میله با شرایط مرزی نیومن طراحی کردند. اوزدیمیر و بوفستنکو [۱۰]، کنترل مرزی بهینه‌ی تنش حرارتی در یک صفحه را براساس کسر زمانی معادله‌ی هدایت گرمایی بررسی کردند. یانگ و دابجویک [۱۱]، با استفاده از روش نامساوی ماتریسی خطی یک رویکرد و کنترل‌کننده برای معادلات مشتق جزئی سهموی طراحی کردند. لوانگ و همکاران [۱۲]، یک مدل ریاضی غیر خطی از یک محرک پلیمری با رسوب فوق رسانا (SCP) را ارائه کردند که توسط حرارت ژول برای کنترل های بازخورد بر اساس مدل پیش می‌رود. عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی نسبت به یک کنترل‌کننده PID برتر است، زیرا خطاهای ردیابی در مقایسه با کنترل‌کننده‌های PID تقریباً ۱۰ برابر کوچکتر است و در برابر اختلالات خارجی مانند نویز سنسور و خطای مدل سازی محرک قوی‌تر است. وان و همکاران [۱۳]، با الهام از قانون کنترل‌کننده PID، یک روش معکوس از فرآیند هدایت ناپایدار حرارتی ایجاد کردند. مشکل معکوس هدایت ناپایدار حرارت به نوعی از کنترل‌کننده PID تبدیل می‌شود که در این پژوهش، روش بهینه سازی پیچیده برای تنظیم پارامترهای PID پیشنهاد شده است. روش معکوس PID با استفاده از سیگنال انحراف بین خروجی مدل هدایت گرمای مستقیم و دمای اندازه گیری شده، کنترل‌کننده PID را هدایت می‌کند و شار حرارتی مرزی سیستم هدایت گرما از طریق قانون کنترل‌کننده PID در زمان واقعی بازایی می‌شود. روش معکوس PID به دلیل ساختار ساده، پیاده سازی آسان، زمان واقعی و قابلیت ضد تداخل قوی، ارزش عملی بالایی دارد. الکساندرو و پوپازا [۱۴]، روشی ساده برای

توسعه کنترل‌کننده‌های PID با استفاده از مدل‌های تجزیه و تحلیل حرارتی المان محدود ارائه کردند. مهمترین ایراد چنین کنترل‌کننده‌هایی، فرایند حل تکراری است همزیستی زیر برنامه‌های حل‌کننده با در نظر گرفتن تکرارهای تعادل اضافی مورد نیاز، این پیچیدگی را بیشتر می‌کند. از این رو، استراتژی‌های ساده‌سازی بیشتری مورد نیاز است تا استفاده از چنین کنترل‌کننده‌هایی در عمل موثر باشد.

با توجه به اهمیت موضوع مطرح شده و به علت اینکه تا به حال پژوهش مشخصی در مورد طراحی کنترل‌کننده برای رساناهای مختلف انجام نشده است، در پژوهش حاضر به بررسی میزان انتقال گرما در رساناهای گرمایی مختلف و طراحی و تنظیم مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده PID جهت کنترل دما بر روی یک جسم افقی با جنس‌های مختلف پرداخته شد.

۲- روش تحقیق

کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) در برنامه‌های کاربردی صنعتی برای مدت زمان طولانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کنترل‌کننده‌ها PID از سال ۱۸۹۰ مورد استفاده قرار گرفتند [۱۵]. حتی در حال حاضر، در اکثر برنامه‌های کاربردی صنعتی هنوز از کنترل‌کننده‌های PID استفاده می‌کنند. این میزان استفاده از PID در صنعت می‌تواند به سادگی و سهولت آن مرتبط باشد [۱۶]. اجزای یک کنترل‌کننده PID شامل سه پارامتر بهره نسبی (K_p)؛ بهره انتگرالی (K_i)؛ بهره مشتق (K_d) است که باید با دقت تعیین شود. در معادله ۴، معادله PID نشان داده شده است. طراحی و تنظیم کنترلر با استفاده از معادله ۴ انجام شده است.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (4)$$

شکل ۱ مدار حلقه بسته کنترلی مورد نظر در این پژوهش را نشان می‌دهد.

صورت تفاضل محدود، معادلات وابسته به مکان در زمان جلوتر بسط داده می‌شوند. معادله ۱ را در نظر بگیرید. بسط معادله وابسته به مکان به صورت معادله ۵ و ۶ انجام می‌شود [۲۳].

$$\frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{T(t, x_{i+1}) - T(t, x_i)}{\Delta x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} = \frac{T(t, x_{i+1}) - 2T(t, x_i) + T(t, x_{i-1}))}{\Delta x^2} \quad i = 1, \dots, 10 \quad (6)$$

در معادلات T دما ($^{\circ}\text{C}$)، مکان X (m) و زمان t (s) می‌باشد. معادله ۷ فرم گسسته معادله حرارت را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial T(t, x_i)}{\partial t} = \alpha \frac{T(t, x_{i+1}) - 2T(t, x_i) + T(t, x_{i-1}))}{\Delta x^2} + bQ(t, x_i) \quad i = 1, \dots, 10 \quad (7)$$

شرایط اولیه و مرزی جهت حل معادله انتقال حرارت در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: شرایط اولیه و مرزی جهت حل معادله انتقال حرارت

پارامتر	مقدار
$T(t, 0)$	T_1
$T(t, x_1)$	T_2
$T(0, x)$	T_{∞}

جسم مورد مطالعه به ۱۱ قسمت تقسیم شده است. دما در نقاط ۱ و ۱۱ مشخص است اما برای گره‌های ۲ تا ۱۰ در فضای حالت معادلات نوشته می‌شود.

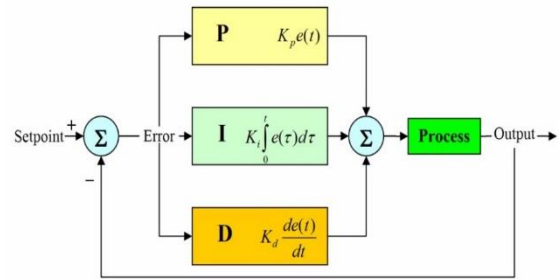
$$\dot{T}_1 = \alpha \frac{T(t, x_2) - 2T(t, x_1) + T(t, x_0)}{\Delta x^2} + bQ(t, x_1) \quad (8)$$

$$\dot{T}_r = \alpha \frac{T(t, x_r) - 2T(t, x_r) + T(t, x_{r-1})}{\Delta x^2} + bQ(t, x_r) \quad (9)$$

$$\dot{T}_{10} = \alpha \frac{T(t, x_{11}) - 2T(t, x_{10}) + T(t, x_9)}{\Delta x^2} + bQ(t, x_{10}) \quad (10)$$

معادله ۱۱ شکل کلی فضای حالت را نشان می‌دهد.

$$\dot{T} = AX + BQ + T_{dist} \quad (11)$$



شکل ۱: مدار حلقه بسته مورد مطالعه

رویکردهای زیادی برای تعیین پارامترهای کنترل کننده PID برای سیستم‌های تک خروجی- تک ورودی (SISO) ایجاد شده است. از جمله رویکردهای شناخته شده می‌توان به روش زیگلر نیکولز (ZN) [۱۷]، روش کوهن کوئن [۱۸]، انتگرال قانون خطای وزن دهی شده (ISE) [۱۹]، انتگرال خطای مطلق (IAE) [۲۰]، روش کنترل مدل داخلی (IMC) [۲۱] و روش حاشیه بهره فاز [۲۲] اشاره کرد. در این مطالعه جهت طراحی کنترل کننده مناسب لازم است که سیستم مورد مطالعه‌ی در فضای حالت نوشته شود. فضای حالت یک روش مهم در مطالعه‌ی دینامیک و طراحی سیستم کنترلی است. در این روش مستقیماً از حالت‌های سیستم برای بررسی دینامیک فرایند استفاده می‌شود. این روش برای تکنیک‌های کامپیوتری مناسب است و به همین دلیل امروزه مورد توجه قرار گرفته است. در این روش معادلات دیفرانسیل بیان کننده فرایند، به صورت معادلات دیفرانسیل مرتبه اول هم‌زمان نوشته می‌شوند.

همانطور که در معادله‌ی ۱ مشخص می‌باشد، معادله‌ی سیستم مورد نظر یک معادله‌ی دیفرانسیل با مشتقات جزئی است. روش‌های حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی شامل روش تفاضل محدود، المان محدود و حجم محدود می‌باشد. روش‌های المان محدود و حجم محدود روش‌های به نسبت دقیق‌تر می‌باشند ولی ایراد آن‌ها پیچیده‌تر بودن و سرعت کم آن‌ها نسبت به روش تفاضل محدود می‌باشد. روش تفاضل محدود به این صورت است که متغیرهای مستقل را به بازه‌های کوچک گره‌بندی می‌کند و در هر گره مقدار متغیرهای وابسته را تعیین می‌کند. وقتی که معادله دیفرانسیل شامل متغیر مستقل زمان باشد روش‌های بسط به صورت روش حل ضمنی و صریح تقسیم می‌شوند. که در اینجا از روش صریح استفاده شده است. در حل عددی معادلات دیفرانسیل به

پارامتر	مقدار
T_{∞} (°C)	۲۵
$(^{\circ}\text{C})T_1$	۰
$(^{\circ}\text{C})T_{11}$	۳۰
T_{target} (°C)	۵۰
b (Kg/m. s ² . °C)	۱
L (m)	۱
α (m ² /s)	متغیر

در معادله ۱۱، X نشان دهنده حالت‌های سیستم است. همچنین فرض می‌شود تنها در گره ۴ شارحرارتی ثابتی به میله وارد می‌شود که سبب کنترل دمای میله می‌گردد:

$$Q(t, x_i) = 0 \quad i = 1:3, 5:11 \quad (12)$$

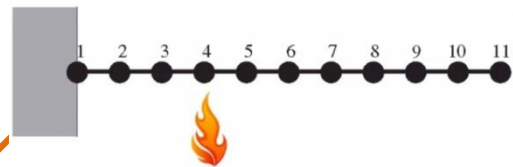
فرم فضای حالت معادلات به صورت معادله ۱۲ می‌باشد.

$$\dot{T} = \frac{\alpha}{\Delta x^2} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X + \frac{\alpha}{\Delta x^2} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} Q \quad (12)$$

شکل ۲ طرحواره‌ای از سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۳- نتایج

در این پژوهش یک جسم افقی با ضرایب نفوذ گرمایی متفاوت در نظر گرفته شده است. با استفاده از نرم‌افزار متلب مقادیر بهینه پارامترهای کنترل‌کننده PID در ۹ حالت برای سه رسانای متفاوت طراحی و تنظیم شده است. مقادیر ضرایب PID برای ۹ حالت در جدول ۳ آورده شده است.



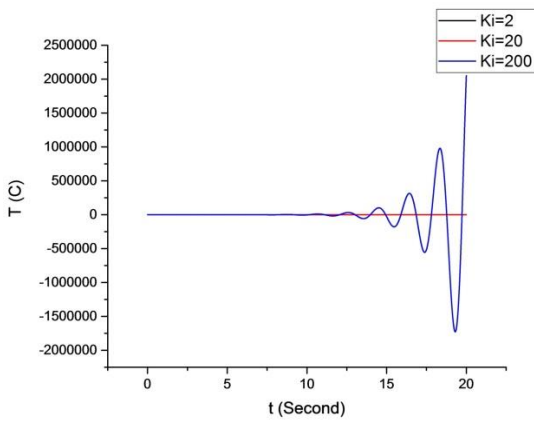
شکل ۲: طرحواره‌ی سیستم مورد مطالعه اطلاعات مساله جهت حل معادله انتقال حرارت در یک جسم افقی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: اطلاعات مساله

جدول ۳: ضرایب PID برای ۹ حالت مختلف

ضرایب PID			α (m ² /s)	حالت
K_p (بدون بعد)	K_i (1/s)	K_d (s)		
۲/۰	۲۰/۰	۱/۰	۰/۱	حالت اول
۲۰/۰	۲۰/۰	۱/۰		
۲۰۰/۰	۲۰/۰	۱/۰		
۲۰/۰	۲/۰	۱/۰	۰/۱	حالت دوم
۲۰/۰	۲۰/۰	۱/۰		
۲۰۰/۰	۲۰/۰	۱/۰		
۲۰/۰	۲۰/۰	۰/۱	۰/۱	حالت سوم
۲۰/۰	۲۰/۰	۱/۰		
۲۰/۰	۲۰/۰	۱۰/۰		
۲/۰	۲۰/۰	۱/۰	۱/۰	حالت چهارم
۲۰/۰	۲۰/۰	۱/۰		
۲۰۰/۰	۲۰/۰	۱/۰		
۲۰/۰	۲/۰	۱/۰	۱/۰	حالت پنجم
۲۰/۰	۲۰/۰	۱/۰		

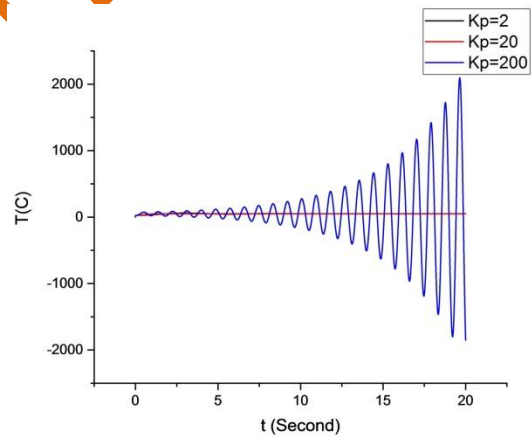
۲۰/۰	۲۰۰/۰	۱/۰	۱/۰	حالت ششم
۲۰/۰	۲۰/۰	۰/۱		
۲۰/۰	۲۰/۰	۱/۰		
۲/۰	۲۰/۰	۱/۰	۱۰/۰	حالت هفتم
۲۰/۰	۲۰/۰	۱/۰		
۲۰۰/۰	۲۰/۰	۱/۰		
۲۰/۰	۲/۰	۱/۰	۱۰/۰	حالت هشتم
۲۰/۰	۲۰/۰	۱/۰		
۲۰/۰	۲۰۰/۰	۱/۰		
۲۰/۰	۲۰/۰	۰/۱	۱۰/۰	حالت نهم
۲۰/۰	۲۰/۰	۱/۰		
۲۰/۰	۲۰/۰	۱۰/۰		



شکل ۴: اثر K_i روی پایداری سیستم در رسانای ضعیف

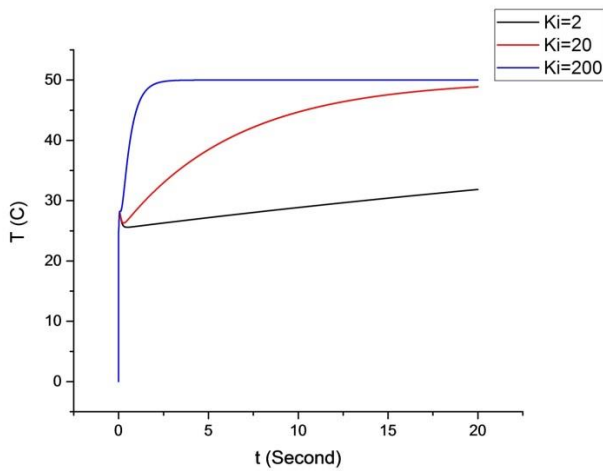
شکل ۵، اثر پارامتر K_d روی رسانای ضعیف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که می‌توان از عامل مشتق‌گیر صرف‌نظر نمود و از کنترل‌کننده PI استفاده کرد.

شکل ۳، اثر پارامتر K_p روی رسانای ضعیف را نشان می‌دهد. با افزایش K_p در رساناهای ضعیف، سیستم به سمت ناپایداری میل می‌کند، بنابراین نباید مقدار K_p در رساناهای ضعیف خیلی مقدار بزرگی در نظر گرفته شود.



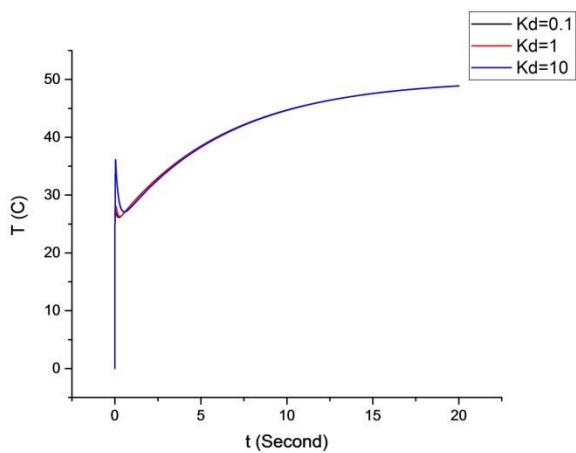
شکل ۳: اثر K_p روی پایداری سیستم در رسانای ضعیف

شکل ۴، اثر پارامتر K_i روی رسانای ضعیف را نشان می‌دهد. با افزایش K_i در رساناهای ضعیف، سیستم به سمت فاصله از مقدار مقرر پیش می‌رود و سبب خطای حالت ماندگار می‌شود، بنابراین نباید مقدار K_i در رساناهای ضعیف خیلی مقدار بزرگی در نظر گرفته شود.



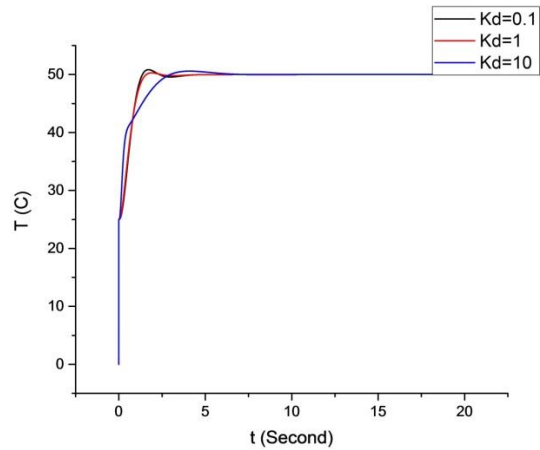
شکل ۷: اثر K_i روی پایداری سیستم در رسانای متوسط

شکل ۸، اثر پارامتر K_d روی رسانای متوسط را نشان می‌دهد. تغییرات بهره مشتق در رساناهای متوسط تقریباً بی‌تأثیر می‌باشد و در این نوع از رساناها حتی می‌توان از کنترل‌کننده PI استفاده کرد.



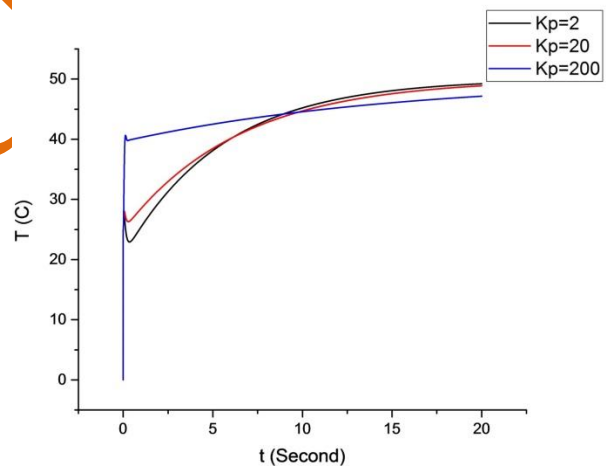
شکل ۸: اثر K_d روی پایداری سیستم در رسانای متوسط

شکل ۹، اثر پارامتر K_p روی رسانای قوی را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، با کاهش K_p از مقدار مقرر فاصله می‌گیریم، بنابراین باید مقداری بزرگ برای K_p در نظر گرفته شود.



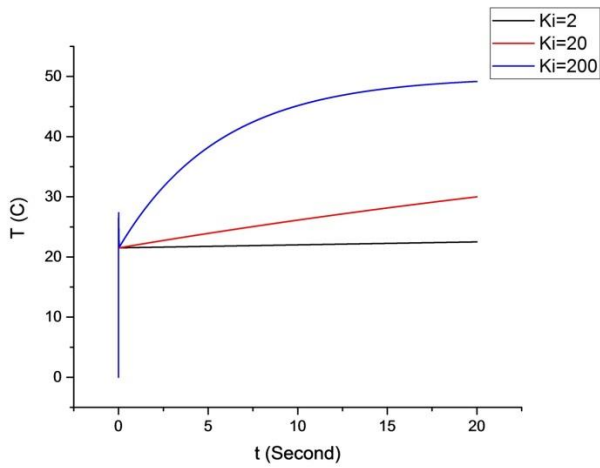
شکل ۵: اثر K_d روی پایداری سیستم در رسانای ضعیف

شکل ۶، اثر پارامتر K_p روی رسانای متوسط را نشان می‌دهد. هرچقدر مقدار K_p بیشتر باشد، از دمای هدف که همان 50°C می‌باشد، بیشتر فاصله می‌گیریم، بنابراین نباید از یک مقدار مشخص بزرگتر باشد. همچنین افزایش K_p باعث سریعتر شدن پاسخ می‌گردد اما سبب نوسانی شدن و گاهی ناپایداری سیستم می‌گردد.



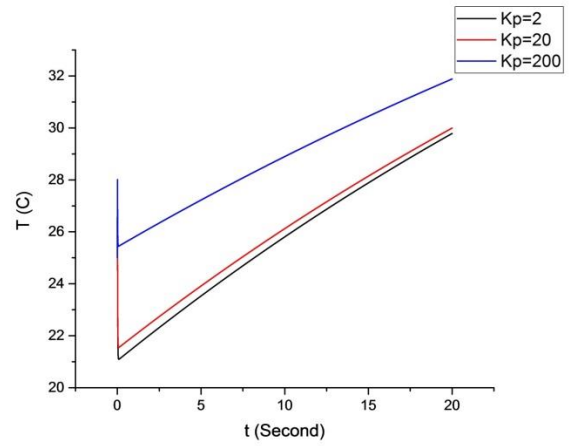
شکل ۶: اثر K_p روی پایداری سیستم در رسانای متوسط

شکل ۷، اثر پارامتر K_i روی رسانای متوسط را نشان می‌دهد. با افزایش K_i در رساناهای متوسط، سیستم به سمت مقدار مقرر میل می‌کند، بنابراین باید مقدار K_i در رساناهای متوسط مقدار بزرگی در نظر گرفته شود.



شکل ۱۰: اثر K_i روی پایداری سیستم در رسانای قوی

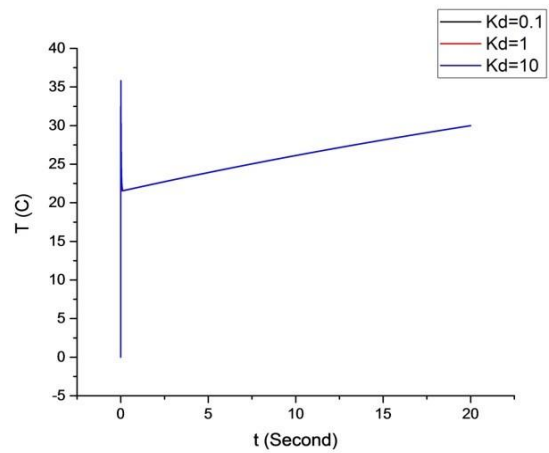
شکل ۱۱، اثر پارامتر K_d روی رسانای قوی را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، باتوجه به اینکه نمودارهای هر سه حالت روی یکدیگر افتادند، بنابراین در رساناهای قوی پارامتر K_d اثر خاصی ندارد و می‌شود برای کنترل دمای رساناهای قوی از کنترل‌کننده PI استفاده نمود.



شکل ۹: اثر K_p روی پایداری سیستم در رسانای قوی

شکل ۱۰، اثر پارامتر K_i روی رسانای قوی را نشان می‌دهد. هرچه قدر K_i بزرگتر باشد، سیستم سریعتر به مقدار مقرر نزدیک می‌باشد.

UNCORRECTED PROOF



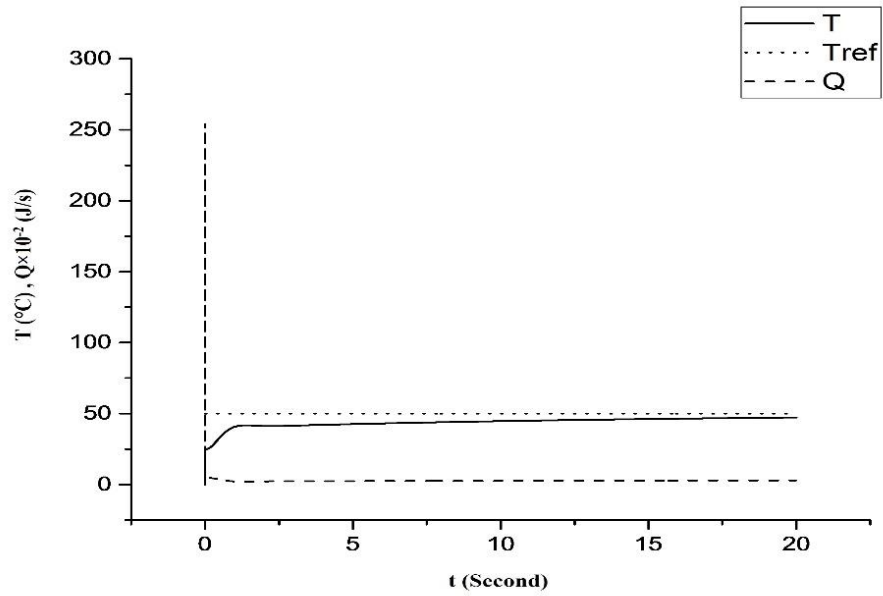
K_d	K_i	K_p	α	
۰/۱	۲	۲۰	۰/۱	حالت ۱
۰/۱	۲۰۰	۲۰	۱	حالت ۲
۰/۱	۲۰۰	۲۰۰	۱۰	حالت ۳

شکل ۱۱: اثر K_d بر روی پایداری سیستم در رسانای قوی

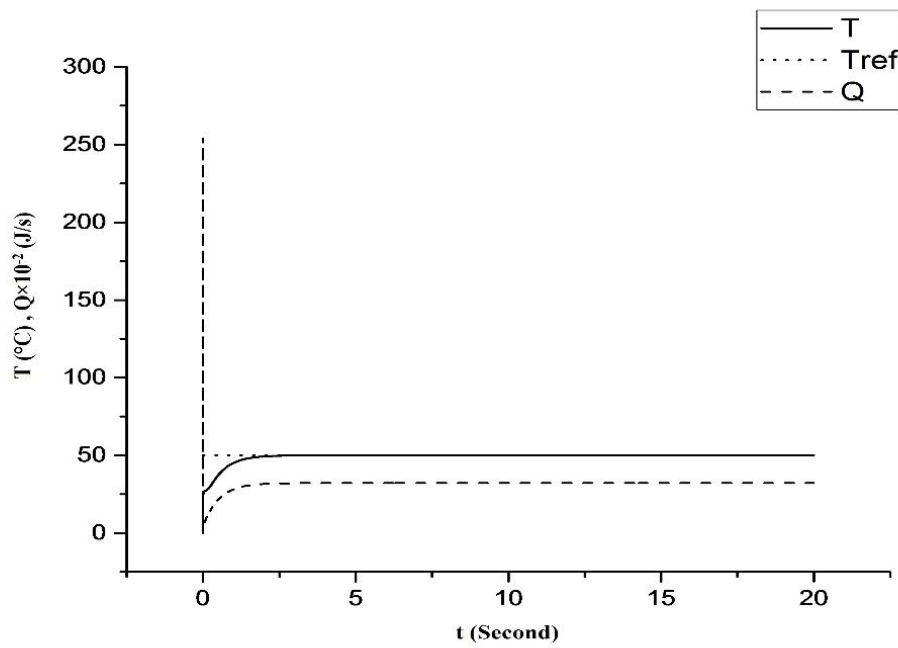
در جدول ۴ مقدار بهینه ضرایب کنترل کننده برای سه حالت مختلف رسانا آورده شده است. همچنین در شکل - های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ شرایط بهینه به همراه میزان شار حرارتی ورودی برای حالت های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۴: مقادیر بهینه ضرایب کنترل کننده

UNCORRECTED PROOF



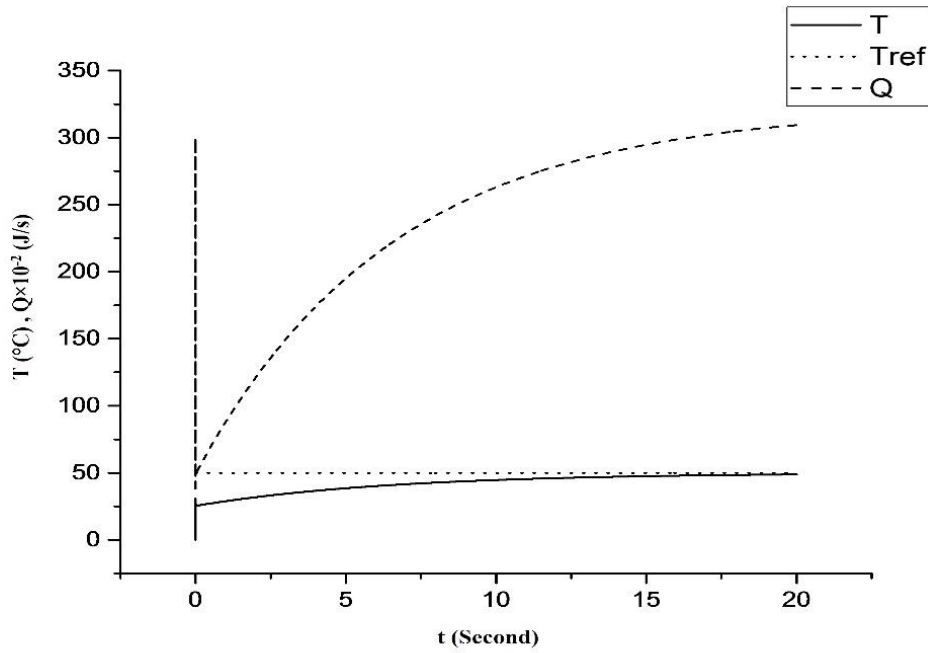
شکل ۱۲: مقادیر بهینه ضرایب کنترل کننده برای $\alpha = 1/10$



شکل ۱۳: مقادیر بهینه ضرایب کنترل کننده برای $\alpha = 1$

UN

UN



شکل ۱۴: مقادیر بهینه ضرایب کنترل کننده برای $\alpha = 10$

کنترل دمای جسم‌های افقی می‌توان از کنترل کننده PI استفاده کرد.

۴- نتیجه گیری

فهرست علائم اختصاری

α	ضریب نفوذ حرارتی	m^2/s
q''	شار حرارتی	W/m^2
ρ	دانسیته سیال	kg/m^3
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت	$J/^\circ C.kg$
k	ضریب انتقال حرارت هدایتی	$W/m.^\circ C$
T	دما	$^\circ C$
x	مکان	m
t	زمان	s

در این مطالعه به بررسی تاثیر ضرایب PID بر روی پایداری سیستم یک جسم افقی با ضرایب نفوذ گرمایی متفاوت پرداخته شده است. برای این کار با استفاده از نرم افزار متلب مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده PID طراحی و تنظیم گردید. برای به دست آوردن مقادیر بهینه ضرایب PID، حالت مختلف برای سه رسانای ضعیف با ضریب نفوذ گرمایی ۰/۱، رسانای متوسط با ضریب نفوذ گرمایی ۱ و رسانای قوی با ضریب نفوذ گرمایی ۱۰ در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده، برای رساناهای ضعیف مقادیر بهینه $K_p=20$ و $K_i=2$ گزارش شد. برای رساناهای متوسط مقدار بهینه $K_p=20$ و $K_i=200$ و برای رساناهای قوی مقدار بهینه $K_p=200$ و $K_i=200$ گزارش شد. با توجه به بهینه سازی انجام شده در هر سه حالت مقدار $K_d=0/1$ به دست آمد که تقریباً عدد کوچکی می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت برای

مراجع

- [1] Aschemann, H., Kostin, G. V., Rauh, A., & Saurin, V. V. (2010). Approaches to control design and optimization in heat transfer problems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 49(3), 380-391.
- [2] Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2013). *Principles of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- [3] Grenkin, G. V., Chebotarev, A. Y., Kovtanyuk, A. E., Botkin, N. D., & Hoffmann, K. H. (2016). Boundary optimal control problem of complex heat transfer model. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 433(2), 1243-1260.
- [4] Hahn, D. W., & Özisik, M. N. (2012). *Heat conduction*. John Wiley & Sons.
- [5] Holman, J. P. (2002). Free convection from vertical planes and cylinders. *Heat Transfer*, 321-328.
- [6] Meric, R. A. (1979). Finite element analysis of optimal heating of a slab with temperature dependent thermal conductivity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 22(10), 1347-1353.
- [7] Meric, R. A. (1979). Finite element and conjugate gradient methods for a nonlinear optimal heat transfer control problem. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 14(12), 1851-1863.
- [8] Maudi, A., & Corriou, J. P. (2014). Distributed control of nonlinear diffusion systems by input-output linearization. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 24(3), 389-405.
- [9] Boonkumkrong, N., & Kuntanapreeda, S. (2014). Backstepping boundary control: An application to rod temperature control with Neumann boundary condition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 228(5), 295-302.
- [10] Özdemir, N., Povstenko, Y., Avci, D., & İskender, B. B. (2014). Optimal boundary control of thermal stresses in a plate based on time-fractional heat conduction equation. *Journal of Thermal Stresses*, 37(8), 969-980.
- [11] Yang, Y., & Dubljevic, S. (2014). Linear matrix inequalities (LMIs) observer and controller design synthesis for parabolic PDE. *European Journal of Control*, 20(5), 227-236.
- [12] Luong, T. A., Cho, K. H., Song, M. G., Koo, J. C., Choi, H. R., & Moon, H. (2018). Nonlinear tracking control of a conductive supercoiled polymer actuator. *Soft robotics*, 5(2), 190-203.
- [13] Wan, S., Xu, P., Wang, K., Yang, J., & Li, S. (2020). Real-time estimation of thermal boundary of unsteady heat conduction system using PID algorithm. *International Journal of Thermal Sciences*, 153, 106395.
- [14] Alexandru, T. G., & Pupaza, C. (2021). The development of PID temperature controllers based on FEM thermal analysis. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 342, p. 06008). EDP Sciences.
- [15] Bennett, S. (1993). A history of control engineering, 1930-1955 (No. 47). IET.
- [16] Astrom, K. J. (1995). *PID controllers. Theory, Design, and Tuning*.
- [17] Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, 64(11).
- [18] Cohen, G., & Coon, G. A. (1953). Theoretical consideration of retarded control. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 75(5), 827-834.
- [19] Pessen, D. W. (1994). A new look at PID-controller tuning.

[20] Coughanowr, D. R., & Koppel, L. B. (1965). Process systems analysis and control (Vol. 2). New York: McGraw-Hill.

[21] Morari, M., & Zafiriou, E. (1989). Robust process control. Morari.

[22] Ho, W. K., Hang, C. C., & Cao, L. S. (1995). Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specifications. *Automatica*, 31(3), 497-502.

[23] Godunov, S., & Bohachevsky, I. (1959). Finite difference method for numerical computation of discontinuous solutions of the equations of fluid dynamics. *Matematičeskij sbornik*, 47(3), 271-306.

UNCORRECTED PROOF

Adjustment of optimal parameters to control the temperature in different conductors

Amirhossein Oudi ¹, Samaneh Faramarzi ², Maryam Hosseini ¹, Yegane Davoodbeygi *³

1. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

2. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

3. Department of Chemical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

*Corresponding Author: Y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir

ARTICLE INFO

Keywords:
PID controller,
Temperature control,
Conductive heat
transfer,
Conductive horizontal
object,

ABSTRACT

PID controller is a closed-loop control algorithm and method using the concept of feedback that is used in many industrial processes to control the speed of DC motors, pressure control, temperature control, and so on. For this purpose, a horizontal object with different conductivities was chosen to control its temperature by changing the heat flux. Then the studied system was written in the state space. In this method, partial differential equations were converted into ordinary differential equations with the help of finite difference, then a suitable controller was designed for temperature control. In this method, the differential equations expressing the process were written as simultaneous first order differential equations. The results show that for the stability of systems with poor thermal conductivity (small α value), should be $\frac{K_p}{K_i} = 10$ For systems with medium thermal conductivity should be $\frac{K_p}{K_i} = 0.1$. For systems with strong thermal conductivity (large α value) should be $\frac{K_p}{K_i} = 1$. According to the optimization done, K_d was a small value in all three cases, so the PI controller can be used in such systems.
