



Output feedback Controller design for HVAC system with delayed based Robust control approach

Mahdi Alinaghizadeh ardestani

Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of shamsipour, Tehran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

Arezoo Vakili

Master's Degree Student, Department of Electrical and Computer Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

Received: 01.15.2020 Accepted: 06.23.2020

In this study, we try to control the temperature of a building consisting of four rooms with large time delays. In design process we use Krasovskii- Lyapunov method to guaranteed the stability of time delayed system. Because of difficulty of state estimation, an output feedback controller design method is used. for this purpose, we use linear Matrix Inequalities (LMI) and to solve LMIs, Matlab yalmip toolbox is utilized. Simulation results show that, by using our designed controller, even in presence of delay, uncertainty and disturbance, our system is stable and has proper performance.

Keywords:

Heating Ventilating and Air-Conditioning System, Time Delayed Systems, Output Feedback design, Disturbance, Uncertainty.

طراحی کنترل گر فیدبک خروجی برای سیستم تهویه مطبوع با رویکرد کنترل مقاوم تأخیردار

مهدي علينقي زاده اردستاني*

استاديار، دپارتمان مهندسي برق و کامپيوتر، آموزشگاه شهيد شمسي پور، دانشگاه فني و حرفه‌اي استان تهران، ايران

آرزو وکيلي

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳

چکیده

در این مقاله، برای سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع کنترل گر مقاوم تأخیرداری طراحی شده است که در آن اثر عدم قطعیت‌ها و اغتشاش‌ها طی فرایند طراحی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف، کنترل دمای ساختمانی چهار اتاقه با تأخیر زمانی بزرگ است. مهم‌ترین و مطمئن‌ترین ابزار تحلیل پایداری این نوع سیستم‌ها، استفاده از روش لیاپانوف است. در این مقاله از روش لیاپانوف - کروفسکی استفاده شده است. در این مقاله به طراحی کنترل مقاوم پرداختیم. روش فیدبک خروجی با استفاده از روش حل نامعادله‌های ماتریسی خطی توسط نرم‌افزار متلب و جعبه ابزار Yalmip قابل حل است. شبیه‌سازی نشان می‌دهد کنترل گر فیدبک خروجی طراحی شده، با وجود تأخیر، عدم قطعیت و اغتشاش، سیستم پایدار بوده و عملکرد مناسبی را از خود به نمایش می‌گذارد.

واژگان کلیدی:

سیستم تأخیردار، سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع، طراحی فیدبک خروجی، عدم قطعیت.

۱. مقدمه

بخش جدایی‌ناپذیر علوم و مهندسی سیستم، مدل‌سازی است. با مشاهده پدیده‌های خاص، این وظیفه شامل دو بخش است: ما به توصیف و سپس تعیین رفتار تمایل داریم. در بسیاری از موارد مهم، اطلاعات مفید و مناسب از وضعیت سیستم با استفاده از یک بردار بعد محدود در یک لحظه خاص از زمان شناخته شده است. این یک مدل فضای حالت از طریق معادله‌های دیفرانسیل معمول در سیستم‌های دینامیکی است. در بُعد دیگر، توجه به افزایش پیچیدگی و به هم پیوستگی سیستم‌های فیزیکی رو به رشد است و از عوامل دیگر در فرایند مدل‌سازی است. یکی از عوامل مهم در نرخ تغییرات چند سیستم فیزیکی این است که نه تنها به حالت کنونی خود بلکه به اطلاعات تأخیر در میان اجزای سیستم بستگی دارد. در این پژوهش قصد داریم پایداری ساختمانی چهاراتاقه را با تأخیرهای بزرگ در حضور عدم قطعیت و اغتشاش نشان دهیم. اثبات این کار با شبیه‌سازی فیدبک خروجی انجام می‌پذیرد.

۲. پژوهش‌های پیشین

نگرانی اصلی مدیریت انرژی سیستم گرمایش و تهویه مطبوع در طراحی انرژی ساختمان، ایجاد محیطی سالم، راحت و باکیفیت برای ساکنان است [۱]. دستیابی به این اهداف نیازمند طراحی سیستم کنترل مناسب است. پس از بحران انرژی در سال ۱۹۷۰، استفاده از منابع طبیعی مانند انواع انرژی، به عنوان مؤلفه مهمی در تمام ساختمان‌ها در نظر گرفته شد. بر اساس نظرسنجی‌ها، مصرف انرژی در تجهیزات گرمایش و تهویه مطبوع در ساختمان‌های مسکونی، تجاری و صنعتی حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد مصرف انرژی در جهان است [۷-۱]؛ بنابراین در سال‌های اخیر، بسیاری از روش‌ها و کنترل‌گرها برای کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع در نظر گرفته شده است. مدیریت انرژی برای ساختمان‌های تجاری، با بهبود کیفیت محیط زیست و صرفه‌جویی انرژی به عملیات ساختمانی کمک می‌کند [۸]. یکی از وظایف عمده برای دستیابی به اتوماسیون ساختمان، اجرای استراتژی کنترل مؤثر در سیستم گرمایش و تهویه مطبوع است. سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع باید به درستی کنترل شوند و درجه حرارت نسبتاً ثابت، راحت و با طیف رطوبت مناسب را به ساکنان ارائه دهند. در طراحی یک سامانه گرمایش و تهویه مطبوع، علوم مختلفی همچون مکانیک سیالات، ترمودینامیک، انتقال حرارت، شناسایی سیستم، بهینه‌سازی مصرف انرژی و کنترل سامانه‌های خطی و غیرخطی نقش ایفا می‌کنند که این مسئله نیازمند همکاری تنگاتنگ میان مهندسان مکانیک، کنترل و شیمی در دستیابی به یک ساختار مهندسی دقیق و کارآمد است.

سیستم گرمایش و تهویه مطبوع در اینجا یک ساختمان متشکل از چندین اتاق به صورت یک مدل چند ورودی - خروجی تحت تأثیر اغتشاش و عدم قطعیت روی پارامترهای موجود در ورودی آن است؛ بنابراین کنترل آن یکی از مشکل‌آفرین‌ترین مسائل در کنترل بوده و هست. تصور کنید کنترل سیستم تأخیردار مدنظر باشد؛ تأخیر می‌تواند مختص چند عضو به‌خصوص از عناصر یا همهٔ عناصر ماتریس تابع تبدیل تأخیردار باشد. در هر صورت، با ورود تأخیر به یک مسئله کنترل، محدودیت‌های شدیدی بر سیستم اعمال می‌شود که کنترل آن را دچار دشواری خاصی می‌کند و دستیابی به پاسخ‌های زمانی سریع‌تر را ناممکن می‌سازد [۹].

در مرجع شماره [۱۰] یک کنترل‌گر تطبیقی برای سیستم گرمایش و تهویه مطبوع غیرخطی چند ورودی - خروجی با پارامترهای ناشناخته مدل شده است تا سیستم گرمایش و تهویه مطبوع به عملکرد خوب و مقاومی دست یابد. این پارامترهای ناشناخته که با تغییر زمان به آرامی تغییر می‌کند، شامل بار حرارتی و رطوبت هستند. یک کنترل‌گر تطبیقی توانایی تطبیق با تغییرات بار و اغتشاش سیستم را دارد. در مرجع شماره [۱۱] بیان شده است که در بسیاری از دستگاه‌های صنعتی از کنترل‌گر PID به دلیل سادگی و قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. اگر پارامترهای PID به گونه‌ای تنظیم شده باشد که عملکرد حلقه‌بسته را به‌خوبی تضمین کند، می‌تواند برای بسیاری از سیستم‌ها عملکرد مقاوم و قابل‌اطمینانی را فراهم کند، اما برای سیستم‌های غیرخطی، کنترل‌گر PID مناسب نیست. کنترل فازی برای سیستم‌های غیرخطی، متغیر با زمان و عدم قطعیت‌ها مناسب‌تر است.

هنوز مشکلات زیادی وجود دارد و هر سال مقاله‌های بسیاری در مقابله با جنبه‌های مختلف کنترل فرایند تأخیر زمانی نوشته می‌شود [۱۲]. این موضوع برای مطالعه رفتار سیستم تأخیر زمانی مختلف استفاده می‌شود. با این موضوع از دیدگاه متفاوت برخورد خواهد شد؛ یعنی از راه مرسوم مبتنی بر پاسخ تابع تبدیل پیروی نمی‌شود، در اینجا ما از فضای حالت سیستم که برای تکنیک‌های بهینه‌سازی مدرن مانند روش نابرابری ماتریس خطی LMI مناسب‌تر است، استفاده می‌کنیم. در مرجع شماره [۵]، مسئله تجزیه و تحلیل مقاوم و راه‌حل نابرابری ماتریسی خطی معرفی شده است. در مرجع شماره [۱۳] راه‌حل وابسته به تأخیر برای مسئله کنترل فیدبک حالت ارائه شده است. در مرجع شماره [۱۴] به چالش عمده‌ای در محدوده رانندگی و عمر وسایل نقلیه (باتری و غیره) پرداخته شده است و علاوه بر موتور الکتریکی در خودروهای الکتریکی، سیستم گرمایش و تهویه مطبوع را عامل مهمی در مصرف برق این خودروها دانسته‌اند.

در مرجع شماره [۱۵] یک ساختار کنترلی ترتیبی برای کنترل سیستم HVAC بیان شده و تأثیر آن

1. Linear Matrix Inequality

روی محیط داخل ساختمان بررسی شده است که در طراحی سیستم، مدیریت انرژی و آسایش ساکنان مد نظر بوده است.

در مرجع شماره [۱۶] سیستم HVAC، از نظر دما، رطوبت و کیفیت هوای داخل ساختمان کنترل می‌شود. وظیفه یک سیستم تهویه مطبوع گرمایش و سرمایش، رطوبت‌دهی و خشک کردن و تصفیه هواست. برای انسان، دما و رطوبت لذت‌بخش در داخل محل زندگی، دمای 22°C و رطوبت نسبی 50% درصد است.

۳. طراحی سیستم‌های تأخیردار

تأخیر در بسیاری از سیستم‌های فیزیکی، صنعتی و مهندسی رخ می‌دهد. تأخیر می‌تواند بسته به سیستم مورد نظر، ثابت و یا متغیر با زمان، شناخته‌شده یا ناشناخته، قطعی یا تصادفی باشد. مسئله وجود تأخیر در سیستم‌ها یکی از مشکل‌آفرین‌ترین مسائل در کنترل بوده و هست. تصور کنید کنترل سیستم چند ورودی خروجی تأخیردار مدنظر باشد. تأخیر می‌تواند مختص چند عضو به‌خصوص از عناصر یا همه عناصر ماتریس تابع تبدیل تأخیردار باشد. در هر صورت، با ورود تأخیر به یک مسئله، کنترل محدودیت‌های شدیدی را بر سیستم اعمال می‌کند که کنترل آن را دشوار کرده و حد بالایی بر سرعت سیستم اعمال می‌کند که دستیابی به پاسخ‌های زمانی سریع‌تر را ناممکن می‌سازد [۸].

۳-۱. انواع سیستم‌های تأخیردار

سیستم‌های تأخیردار را می‌توان به تأخیر در ورودی، تأخیر در حالت و تأخیر در حالت - ورودی دسته‌بندی کرد که ممکن است تأخیر تکی یا متعدد باشد. در اینجا تأخیر در ورودی رخ می‌دهد. به‌طور کلی یک سیستم تأخیردار به فرم زیر است:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + A_d x(t-d) + B_h u(t-h) + D\omega(t) \\ z(t) &= Lx(t), x(t) = \psi(t) \quad \forall t \in [-h, 0] \end{aligned} \quad (1)$$

در معادله‌های بالا $t \in \mathbb{R}_+$ زمان، $x(t) \in \mathbb{R}^n$ حالت، $u(t) \in \mathbb{R}^m$ ورودی کنترل‌گر، $\omega(t) \in \mathbb{R}^q$ اغتشاش، $z(t) \in \mathbb{R}^p$ خروجی، h, d به ترتیب مقدار تأخیر در حالت و ورودی سیستم است. $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ و $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ سیستم بدون تأخیر را نشان می‌دهد؛ در صورتی که جفت $(A-B)$ پایدار باشد. همچنین $A_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$ و $B_h \in \mathbb{R}^{n \times m}$ و $L \in \mathbb{R}^{p \times n}$ باشد و $\psi(t) \in [-\max(d, h), 0]$ تابع مقدار اولیه پیوسته است.

۳-۱-۱. سیستم تک تأخیر در ورودی

سیستم با تأخیر ورودی (۳) را در نظر بگیرید.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + B_h u(t-h) \\ z(t) &= Lx(t), x(t) = \psi(t) \quad \forall t \in [-h, 0] \end{aligned} \quad (۲)$$

که در آن $A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ بردار حالت $x(t) \in \mathbb{R}^n$ ، ورودی کنترل کننده، h تأخیر و ω اغتشاش است. جفت (A, B) کنترل پذیر و (A, L) مشاهده شدنی باشد.

۳-۱-۲. سیستم تأخیر متعدد در ورودی

سیستم تأخیر متعدد در ورودی زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + \sum_{k=1}^q B_k u(t-h_k) + D \omega(t) \\ Z(t) &= Lx(t) \end{aligned} \quad (۳)$$

که در آن $A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ سیستم نامی بدون تأخیر را نشان می‌دهند؛ در صورتی که جفت (A, B) پایدار پذیر باشند. $x(t) \in \mathbb{R}^n$ بردار حالت، $u(t) \in \mathbb{R}^m$ ورودی کنترل کننده، h تأخیر و ω اغتشاش، $D \in \mathbb{R}^{n \times q}, B_k \in \mathbb{R}^{n \times m}$ کنترل پذیر و (A, L) رؤیت پذیر باشد.

۴. طراحی کنترل گر مقاوم

کنترل مقاوم یکی از استراتژی‌های طراحی سیستم‌های کنترل است که در آن بر پایداری و مقاومت عملکرد سیستم کنترلی در مقابل تغییرات و ناپیچینی‌ها، تأکید می‌شود. هدف از طراحی، ایجاد یک سیستم کنترلی است که تغییرات در شرایط سیستم، کمترین اثر را در خروجی داشته باشد. به عبارت دیگر، افزایش قابلیت اطمینان سیستم، مهم‌ترین هدفی است که در طراحی کنترل مقاوم مد نظر قرار می‌گیرد؛ به‌ویژه تأمین عملکرد مناسب یا پایداری در حضور عوامل ناپیچین، دینامیک‌های مدل نشده یا عوامل مزاحم مانند اغتشاش و ورودی‌های ناخواسته، تأخیر از جمله اصلی‌ترین اهداف در طراحی سیستم‌های کنترل مقاوم است. یکی از مسائل مطرح در سیستم کنترل، حذف یا کاهش اثر اختلال است. کنترل کننده‌هایی را که توانایی برخورد با اختلال داشته باشند، کنترل کننده مقاوم می‌نامند.

به دلیل اینکه مدل‌های در دسترس برای طراحی کنترل کننده، همواره تقریبی از مدل‌های واقعی سیستم‌ها هستند، طراحی سیستم کنترل در چهارچوب تئوری کنترل مقاوم، امری اجتناب‌ناپذیر است. در این مقاله، هدف کنترل دمای محیطی متشکل از چهار اتاق است. در حالت کلی، مدل فرایند حرارتی غیر خطی بوده و دارای پیچیدگی‌های بسیار زیادی است. به دلیل اینکه بین محل نصب گرم کننده‌ها و

محلی که دما را اندازه‌گیری می‌کنیم، فاصله وجود دارد، انتقال حرارت از محل خنک‌کننده تا محل اندازه‌گیری دما با تأخیر صورت می‌پذیرد. با این تفاسیر، استفاده از تئوری کنترل مقاوم برای کنترل این گونه سیستم‌ها به منظور دستیابی به نتایج رضایت‌بخش، الزامی است.

دینامیک فرایند کنترل دمای یک ساختمان چهاراتاقه با به‌کارگیری روش شناسایی حلقه‌بسته ارائه شده است. هریک از کمیته‌های مربوط به درایه‌های ماتریس تابع تبدیل فرایند با انجام آزمایش پله حلقه‌بسته فراهم آورده شده‌اند. این ماتریس که بیانگر مدل فرایند است، به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-0.098}{122s+1} e^{-34s} & \frac{-0.036}{149s+1} e^{-34s} & \frac{-0.014}{158s+1} e^{-34s} & \frac{-0.017}{155s+1} e^{-34s} \\ \frac{-0.043}{147s+1} e^{-34s} & \frac{-0.092}{130s+1} e^{-34s} & \frac{-0.011}{156s+1} e^{-34s} & \frac{-0.012}{157s+1} e^{-34s} \\ \frac{-0.012}{153s+1} e^{-34s} & \frac{-0.016}{151s+1} e^{-34s} & \frac{-0.102}{118s+1} e^{-34s} & \frac{-0.033}{146s+1} e^{-34s} \\ \frac{-0.013}{156s+1} e^{-34s} & \frac{-0.015}{159s+1} e^{-34s} & \frac{-0.029}{144s+1} e^{-34s} & \frac{-0.108}{128s+1} e^{-34s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

سیستم بالا دارای تأخیرهای بزرگ و متفاوت است. تأخیرها به خاطر فاصله از سیستم خنک‌کننده تا اتاق‌ها به وجود آمده است. همچنین مشاهده می‌شود تمامی قطب‌ها سمت چپ قرار گرفته‌اند و در نتیجه پایداری سیستم را نتیجه می‌دهد.

۴-۱. طراحی فیدبک خروجی مبتنی بر تأخیر

سیستم شماره ۵ را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t-h_{\max}) \\ Y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ بردار حالت، $u(t) \in \mathbb{R}^m$ ورودی کنترل‌کننده، $u(t) = 0$ برای $t < 0$ و h بزرگ‌ترین تأخیر است. جفت (A, B) کنترل‌پذیر و (A, C) مشاهده‌شدنی هستند؛ بنابراین می‌توان نامعادله ماتریسی را به فرم (۶ و ۷) نوشت:

$$W_1 = \begin{bmatrix} (A+BK)Y + Y(A+BK) + BB^T & YC^T \\ CY & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} (A+BK)^T X + X(A+BK) + C^T C & XB \\ B^T X & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (7)$$

که با استفاده از مکمل شور می‌توان این نامعادله غیرخطی را به یک نامعادله ماتریسی خطی تبدیل کرد.

می‌توان فرمول شماره ۸ را جای گذاری کرد. با انتخاب خاص $\begin{cases} U = X \\ V = X^{-1} - Y \end{cases}$ یا $\begin{cases} U = Y^{-1} - X \\ V = Y \end{cases}$

$$\begin{cases} A_k = -U^{-1}[A^T + XAY + X(B_1B_1^T) + (C_1^T C_1 - C_2^T C_2)Y](V^{-1})^T \\ B_k = -U^{-1}C_2^T \\ C_k = -B_2^T(V^{-1})^T \end{cases} \quad (8)$$

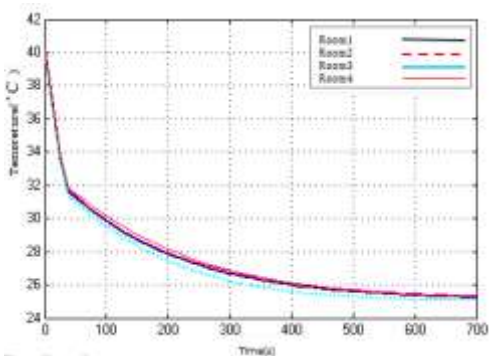
کنترل گر فیدبک خروجی به فرم زیر است:

$$K(s) = \begin{bmatrix} \frac{-0.0008033}{s+0.008197} & \frac{-0.0002952}{s+0.006803} & \frac{-7.843e-05}{s+0.006536} & \frac{-8.333e-05}{s+0.00641} \\ \frac{-0.0002416}{s+0.006711} & \frac{-0.0007077}{s+0.007692} & \frac{-0.000106}{s+0.006623} & \frac{-9.434e-05}{s+0.006289} \\ \frac{-8.861e-05}{s+0.006329} & \frac{-7.051e-05}{s+0.00641} & \frac{-0.0008644}{s+0.008475} & \frac{-0.0002014}{s+0.006944} \\ \frac{-0.0001097}{s+0.006459} & \frac{-7.643e-05}{s+0.006369} & \frac{-0.000226}{s+0.006849} & \frac{-0.0008437}{s+0.007512} \end{bmatrix} \quad (9)$$

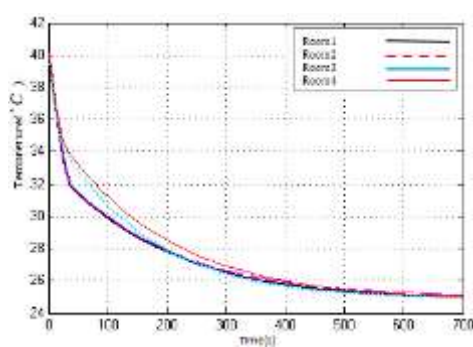
۵. نتایج و بحث روی نتایج

در این بخش برای پایداری و مقاومت عملکرد سیستم کنترلی در مقابل تغییرات و عدم قطعیت‌ها به طراحی فیدبک خروجی پرداخته شده است.

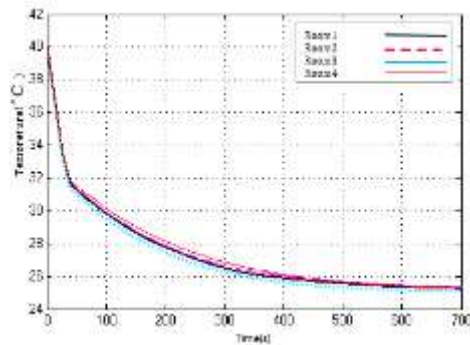
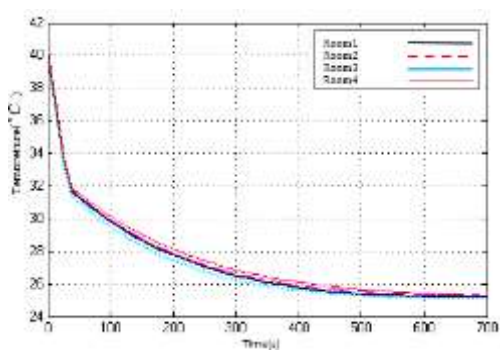
۵-۱. پاسخ کنترل مقاوم H_{∞} فیدبک خروجی مبتنی بر تأخیر



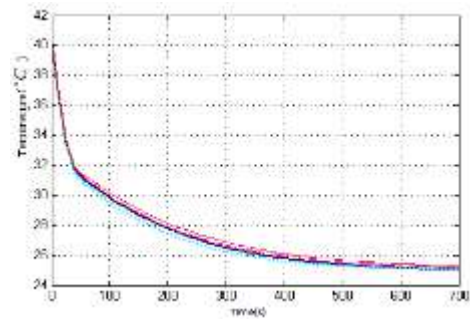
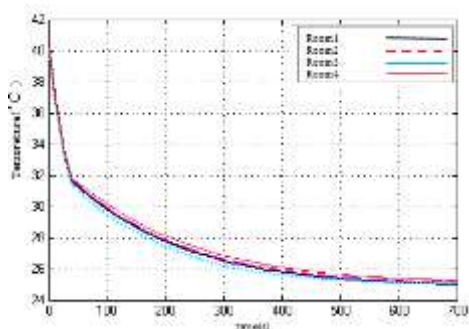
شکل شماره ۲. طراحی فیدبک خروجی با اغتشاش ۵ درصد و با $T=100$



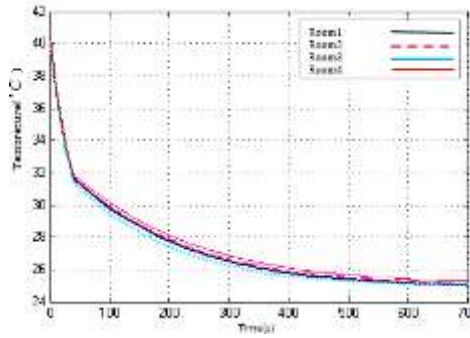
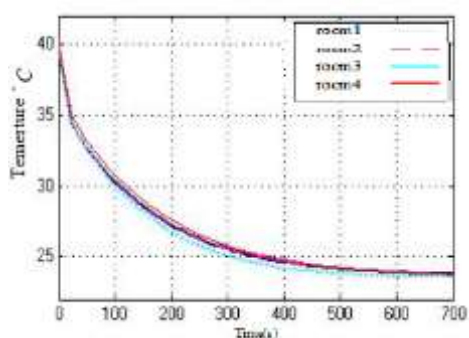
شکل شماره ۱. طراحی فیدبک خروجی بدون اغتشاش و عدم قطعیت



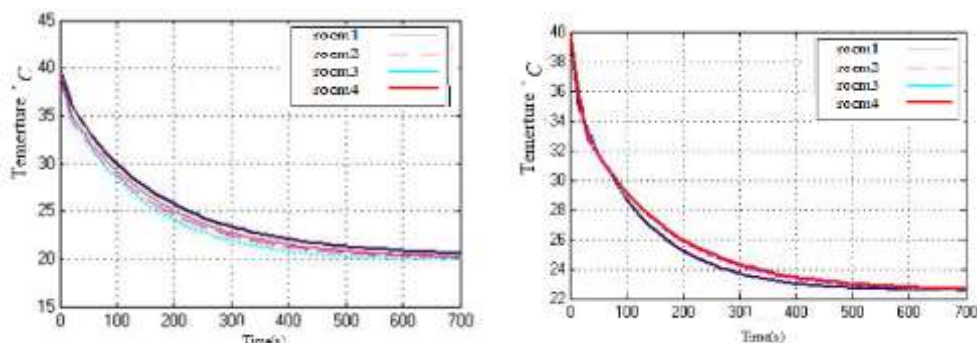
شکل شماره ۳. طراحی فیدبک خروجی با اغتشاش شکل شماره ۴. طراحی فیدبک خروجی با اغتشاش
 ۵ درصد و با $T=0.00$



شکل شماره ۵. طراحی فیدبک خروجی با اغتشاش شکل شماره ۶. طراحی فیدبک خروجی با اغتشاش
 ۱۰ درصد و با $T=0.00$



شکل شماره ۷. طراحی فیدبک خروجی با اغتشاش شکل شماره ۸. طراحی فیدبک خروجی با عدم
 قطعیت ۵ درصد و با $T=0.00$



شکل شماره ۹. طراحی فیدبک خروجی با عدم قطعیت ۱۰ درصد
 شکل شماره ۱۰. طراحی فیدبک خروجی با عدم قطعیت ۲۰ درصد

۶. نتیجه گیری

جدول شماره ۱. فیدبک خروجی با در نظر گرفتن تأخیر

Settling time	$\int e^2 dt$	$\int e dt$	وضعیت	مدل کنترل گر
۲۲۸	۱۵۰۶۸	۱۲/۰۵۹	بدون در نظر گرفتن اغتشاش و عدم قطعیت	فیدبک خروجی با در نظر گرفتن تأخیر
۱۹۳	۱۴۹۴۳	۱۲/۰۰۹	با در نظر گرفتن اغتشاش ۵ درصد	
۱۹۲	۱۴۹۴۱	۱۲/۰۰۸	با در نظر گرفتن اغتشاش ۱۰ درصد	
۱۹۲	۱۴۹۴۱	۱۲/۰۰۰	با در نظر گرفتن اغتشاش ۲۰ درصد	
۱۲۴	۱۴۶۶۸	۱۱/۸۶۱	با در نظر گرفتن عدم قطعیت ۵ درصد	
۱۱۳	۱۴۳۷۵	۱۱/۵۷۲	با در نظر گرفتن عدم قطعیت ۱۰ درصد	
۱۰۱	۱۲۶۲۰	۱۰/۳۱۶	با در نظر گرفتن عدم قطعیت ۲۰ درصد	

همان طور که نتایج شبیه سازی نشان می دهند، کنترل کننده طراحی شده کارایی مطلوبی در پایداری و دفع اغتشاش ها داشته است. در مقابل، تأخیر زمانی از مقاومت مطلوبی برخوردار است. در ادامه برای ارزیابی بهتر عملکرد کنترل گر پیشنهادی، از شاخص عددی مطابق جدول استفاده کردیم و به ازای تغییر در میزان اغتشاش پله، زمان نشست و انتگرال مجذور خطا را محاسبه کردیم. همان طور که پیش تر هم گفته شد، در اینجا سیستم ما یک خنک کننده است که در شکل های بالا نیز قابل مشاهده است، زیرا دما را از $40^{\circ}C$ به $25^{\circ}C$ (دمای اتاق) کاهش می دهد. در طراحی فیدبک خروجی بدون اغتشاش و عدم قطعیت، هیچ عامل ناشناخته ای در شکل ها مشاهده نمی شود، ولی در طراحی فیدبک خروجی با در نظر گرفتن اغتشاش در زمان های مورد نظر، عامل ناخواسته ای وارد می شود و به دلیل پایداری سیستم به حالت عادی خود باز می گردد و عامل ناخواسته از میان می رود.

تاکنون پژوهش‌های زیادی برای طراحی سیستم‌های HVAC و کنترل آن انجام شده است. برای مثال، در طراحی کنترل‌گر تطبیقی برای سیستم HVAC، سیستم به عملکرد خوب و مقاومی دست می‌یابد. همچنین سیستم کنترل PID روی خودتنظیم فازی طراحی شده است که به تغییرات برخاسته از تأخیر زمانی روی سیستم غلبه کرده و زمان صعود، نشست و فراجهش پاسخ سیستم را کاهش می‌دهد. از کنترل‌گر PI برای بهینه‌سازی عملکرد حلقه‌بسته سیستم HVAC استفاده شده است که مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. اکنون برای مقاوم‌سازی بیشتر در این پژوهش از LMI یا ناتساوی ماتریسی خطی شبیه‌سازی استفاده شده و پس از طراحی کنترل‌گر و شبیه‌سازی به صورت، پایداری هرچه بیشتر سیستم مشاهده می‌شود و مصرف انرژی کاهش یافته است.

در این مقاله، معادله‌های فضای حالت را از روی تابع تبدیل سیستمی به دست آوردیم؛ همچنین به طراحی یک فیدبک حالت، فیدبک خروجی و فرمول‌های آن پرداختیم. سپس به طراحی کنترل مقاوم H_{∞} فیدبک خروجی با در نظر گرفتن اغتشاش‌های متفاوت و تأخیر زمانی سیستم گرمایش و تهویه مطبوع مورد نظر پرداخته شده است. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، پایداری هرچه بیشتر سیستم، و پاسخ مطلوب‌تر در برابر اغتشاش‌ها به‌وضوح قابل مشاهده است.

همان‌طور که در جدول شماره ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش تأخیر، زمان نشست و انتگرال خطا افزایش یافته است و افزایش اغتشاش نیز سبب کندشدن زمان نشست و افزایش نسبی خطا می‌شود.

۷. فهرست علائم

اغتشاش	ω	ماتریس ثابت	A
خروجی	L	ماتریس ثابت	B
تابع مقدار اولیه	Ψ	حالت کنترل‌گر	X
ماتریس خروجی	A_k	ورودی کنترل‌گر	u
ماتریس خروجی	B_k	تأخیر در حالت	h
ماتریس خروجی	C_k	تأخیر در ورودی	d
		زمان	t

1. Dounis A. I.; Caraiscos, C. (2009), "Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment-A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 1246-1261.
2. Mirinejad, H.; Sadati, S. H.; Ghasemian M.; Torab, H. (2008), "Control Techniques in Heating", *Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems*.
3. Soyguder, S.; Karakose M.; Alli, H. (2009), "Design and simulation of self-tuning PID-type fuzzy adaptive control for an expert HVAC system", *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, pp. 4566-4573.
4. Shen, Y.; Cai, W. -J.; Li, S. (2010), "Normalized decoupling control for high-dimensional MIMO processes for application in room temperature control HVAC systems," *Control Engineering Practice*, Vol. 18, pp. 652-664.
5. Xie, L.; Fu, M.; Li, H. (1998), "Passivity analysis and passification for uncertain signal processing systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 46, pp. 2394-240.
6. Alcalá, R.; Benítez, J. M.; Casillas, J.; Cordon, O. Pérez, R. (2003), "Fuzzy control of HVAC systems optimized by genetic algorithms," *Applied Intelligence*, Vol. 18, pp. 155-177.
7. Li, S.; Zhang, X.; Xu, J.; Cai, W. (2006), "An improved fuzzy RBF based on cluster and its application in HVAC system," in (2006) *6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 6455-6459.
8. Fong, K. F.; Hanby, V. I.; Chow, T. T. (2006), "HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming," *Energy and Buildings*, Vol. 38, pp. 220-231.
9. Mahmoud, M. S. (2000), *Robust control and filtering for time-delay systems*, CRC Press.
10. Ming-Li, C.; Li-Chen, Fu. (2006), "Hybrid System Based Adaptive Control for the Nonlinear HVAC System," *American Control Conference*, Minneapolis, Minnesota, USA, pp 5324-5329.
11. Jiangjiang, W.; Chunfa, Z.; Youyin, J. (2008), "Fuzzy Immune Self-tuning PID Control of HVAC System," *International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 678-683.
12. Ebenbauer, C.; Raff, T.; Allgöwer, F. (2009), "Dissipation inequalities in systems theory: An introduction and recent results," in *Invited lectures of the international congress on industrial and applied mathematics*, pp. 23-42.
13. Fridman E.; Shaked, U. (2003), "Delay-dependent stability and H_∞ control: constant and time-varying delays," *International journal of control*, Vol. 76, pp. 48-60.
14. Al Faruque M. A.; Vatanparvar, K. (2016), "Modeling, analysis, and optimization of Electric Vehicle HVAC systems", in *2016 21st Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, pp. 423-428.
15. Rui, Y.; Lingfeng, W. (2015), "Control Strategy Optimization for Energy Efficiency and Comfort Management in HVAC Systems," *Department of Electrical Engineering and Computer Science*, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, pp 1-5.
16. Chang, S. K.; Jong, P.; Mignon, P.; Jaeho, B. (2014), "Novel Modeling and Control Strategies for a HVAC System Including Carbon Dioxide Control," *Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University*, Seoul 120-749, Korea, pp. 3599-3617.