



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

Mahdi Alinaghizadeh Ardestani<sup>1\*</sup> , Arezoo Vakili<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of shamsipour, Tehran Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Master's Degree Student, Department of Electrical and Computer Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 01.15.2020

**Revised:** 05.27.2021

**Accepted:** 06.23.2020

#### Keyword:

Time delayed systems  
Heating ventilating and air-conditioning system  
Output feedback design  
Disturbance  
Uncertainty

### ABSTRACT

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.

#### \*Corresponding Author:

Mahdi Alinaghizadeh Ardestani

**Email:** [ardestani@gmail.com](mailto:ardestani@gmail.com)





دانشگاه فنی و حرفه‌ای  
تهران

کارافان

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

بهار ۱۳۹۹، دوره ۱۷، شماره ۱، ۸۵-۹۵

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.112758

20.1001.1.23829796.1399.17.1.5.7



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

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

مهدی علینقی‌زاده اردستانی<sup>۱\*</sup>، آرزو وکیلی<sup>۲</sup>

- ۱- استادیار، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، آموزشکده شهید شمس‌پور، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان تهران، ایران.
- ۲- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این مقاله، برای سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع کنترل‌گر 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 چهاراتاقه 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 کنترل‌گر فیدبک خروجی طراحی شده، با وجود تأخیر، عدم قطعیت و اغتشاش، سیستم پایدار بوده و عملکرد مناسبی را از خود به نمایش می‌گذارد.

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۰۷

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳

### کلید واژگان:

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

\*نویسنده مسئول: مهدی علینقی‌زاده

اردستانی

پست الکترونیکی:

[ardestani@gmail.com](mailto:ardestani@gmail.com)



© 2020 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 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 بهم‌پیوستگی 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.

## 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، به‌عنوان 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 [۱-۷]؛ 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 به‌درستی 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 همه 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 به‌آرامی 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 قابل اطمینانی 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<sup>۱</sup> LMI مناسب‌تر است، استفاده می‌کنیم. در مرجع شماره [۷]، 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 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 خشک‌کردن و تصفیه هواست. برای انسان، دما و رطوبت لذت‌بخش در داخل محل زندگی، دمای  $\dot{C}22$  و رطوبت نسبی ۵۰ درصد است.

### 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].

### 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:

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

در معادله‌های بالا  $t \in \mathbb{R}$  زمان،  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  حالت،  $u(t) \in \mathbb{R}^m$  ورودی کنترل‌گر،  $w(t) \in \mathbb{R}^q$  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

<sup>1</sup> Linear Matrix Inequality

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.

### سیستم تک تأخیر در ورودی

سیستم با تأخیر ورودی (۲) را در نظر بگیرید.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + B_h u(t-h) + Dw(t) \\ z(t) &= Lx(t), x(t) = \psi(t) \quad \forall t \in [-h, 0] \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  بردار حالت،  $u(t) \in \mathbb{R}^m$  ورودی کنترل گر،  $w(t) \in \mathbb{R}^q$  اغتشاش،  $z(t) \in \mathbb{R}^p$  خروجی،  $h$  مقدار تأخیر سیستم است. جفت  $(A, B)$  کنترل پذیر و  $(A, L)$  مشاهده‌شدنی باشد.

### سیستم تأخیر متعدد در ورودی

سیستم تأخیر متعدد در ورودی زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + \sum_{k=1}^q B_k u(t-h_k) + Dw(t) \\ z(t) &= Lx(t) \end{aligned} \quad (3)$$

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 گر،  $w(t) \in \mathbb{R}^q$  اغتشاش،  $z(t) \in \mathbb{R}^p$  خروجی،  $h$  مقدار تأخیر سیستم، جفت  $(A, B)$  کنترل پذیر و  $(A, L)$  رؤیت پذیر باشد.

### 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 مدل‌نشده 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. کنترل‌کننده‌هایی را که توانایی برخورد با اختلال داشته باشند، کنترل‌کننده مقاوم می‌نامند.

به دلیل اینکه مدل‌های در دسترس برای طراحی کنترل‌کننده، 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 غیرخطی بوده و دارای پیچیدگی‌های بسیار زیادی است. به دلیل اینکه بین محل نصب گرم‌کننده‌ها 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 این‌گونه سیستم‌ها به‌منظور دستیابی به نتایج رضایت‌بخش، الزامی است.

دینامیک فرایند کنترل دمای یک ساختمان چهاراتاقه با به‌کارگیری روش شناسایی حلقه‌بسته ارائه شده است. هر یک 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.

### 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  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ،  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ،  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  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:

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

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

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

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

$$\begin{cases} A_K = -U^{-1}[A^T + XAY + X(B_1 B_1^T) + (C_1^T C_1 - C_2^T C_2)Y](V^{-1})^T \\ B_K = -U^{-1}C_2^T \\ C_K = -B_2^T (V^{-1})^T \end{cases} \quad (8)$$

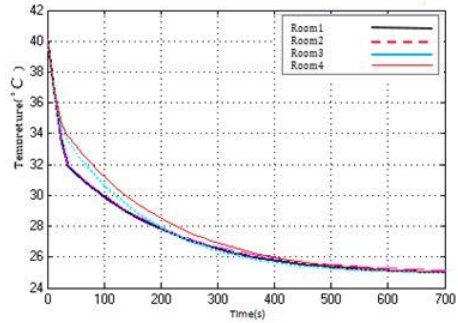
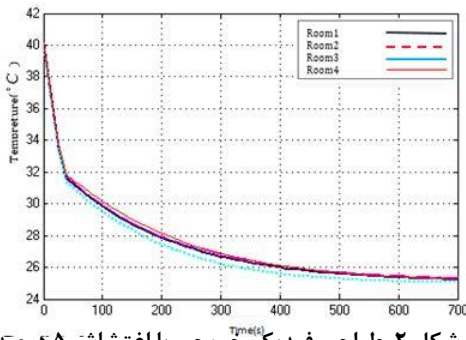
کنترل‌گر فیدبک خروجی به فرم زیر است:

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

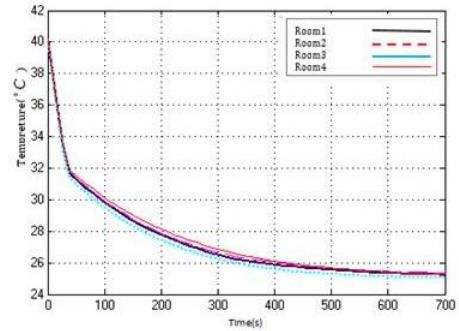
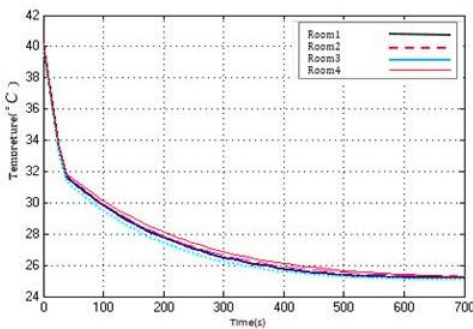
### بحث و نتایج

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

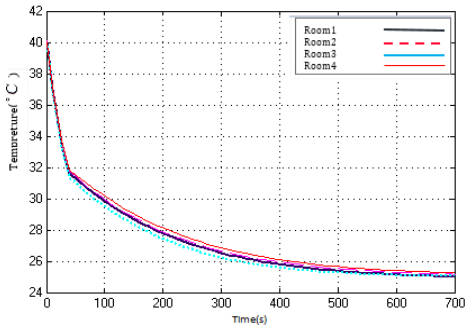
### پاسخ کنترل مقاوم $H_\infty$ فیدبک خروجی مبتنی بر تأخیر



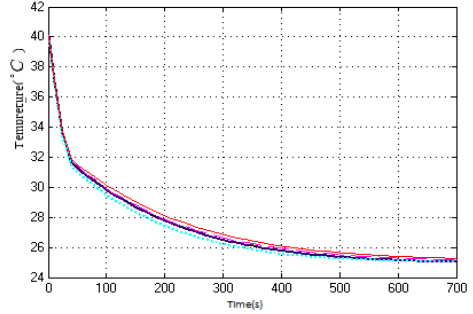
شکل ۱. طراحی فیدبک خروجی بدون اغتشاش و عدم قطعیت  
شکل ۲. طراحی فیدبک خروجی با اغتشاش ۵ درصد و  $T = 100$



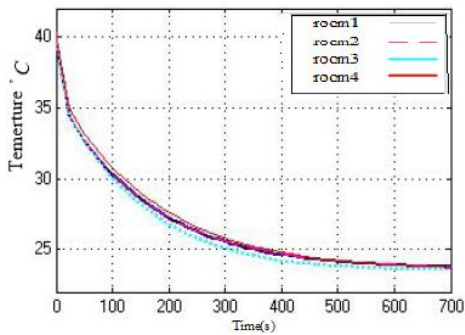
شکل ۳. طراحی فیدبک خروجی با اغتشاش ۵ درصد و  $T = 500$   
شکل ۴. طراحی فیدبک خروجی با اغتشاش ۵ درصد و  $T = 300$



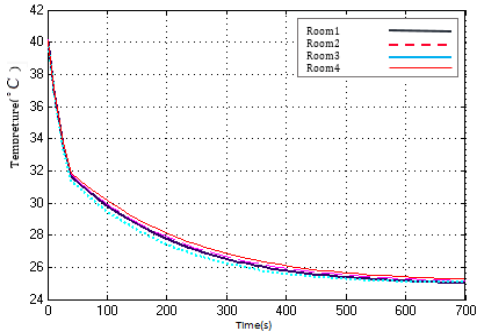
شکل ۶. طراحی فیدبک خروجی با اغتشاش ۱۰ درصد و با  $T=300$



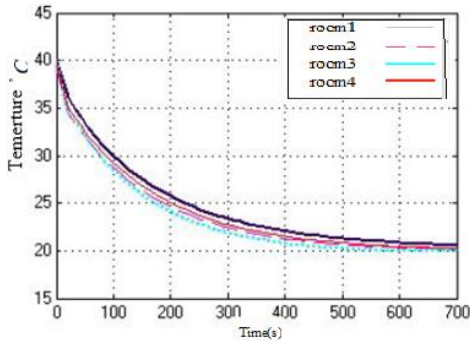
شکل ۵. طراحی فیدبک خروجی با اغتشاش ۱۰ درصد و با  $T=100$



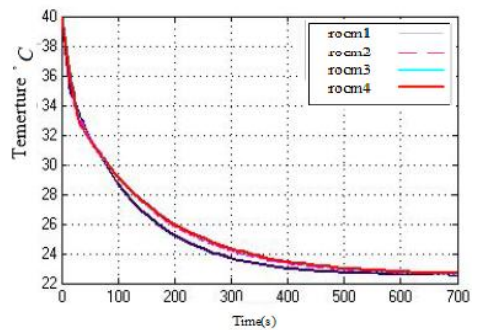
شکل ۸. طراحی فیدبک خروجی با عدم قطعیت ۵ درصد



شکل ۷. طراحی فیدبک خروجی با اغتشاش ۱۰ درصد و با  $T=500$



شکل ۱۰. طراحی فیدبک خروجی با عدم قطعیت ۲۰ درصد



شکل ۹. طراحی فیدبک خروجی با عدم قطعیت ۱۰ درصد



## نتیجه گیری

جدول ۱. فیدبک خروجی با در نظر گرفتن تأخیر

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

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 پژوهش های زیادی برای طراحی سیستم های HVAC و کنترل آن انجام شده است. برای مثال، در طراحی کنترل گر تطبیقی برای سیستم HVAC، سیستم به عملکرد خوب و مقاومی دست می یابد. 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 می دهد. از کنترل گر PI برای بهینه سازی عملکرد حلقه بسته سیستم HVAC استفاده شده است که مصرف انرژی را کاهش می دهد. اکنون برای مقاوم سازی بیشتر در این پژوهش از LMI یا ناتساوی ماتریسی خطی شبیه سازی استفاده شده و پس از طراحی کنترل گر و شبیه سازی به صورت پایداری هرچه بیشتر سیستم مشاهده می شود و مصرف انرژی کاهش یافته است.

در این مقاله، معادله های فضای حالت را از روی تابع تبدیل سیستمی به دست آوردیم؛ همچنین به طراحی یک فیدبک حالت، فیدبک خروجی و فرمول های آن پرداختیم. سپس به طراحی کنترل مقاوم  $H_{\infty}$  فیدبک خروجی با در نظر گرفتن اغتشاش های متفاوت و تأخیر زمانی سیستم گرمایش و تهویه مطبوع مورد نظر پرداخته شده است. با توجه به شبیه سازی های انجام شده، پایداری هرچه بیشتر سیستم، و پاسخ مطلوب تر در برابر اغتشاش ها به وضوح قابل مشاهده است.

همان طور که در جدول شماره ۱ مشاهده می شود، با افزایش تأخیر، زمان نشست و انتگرال خطا افزایش یافته است و افزایش اغتشاش نیز سبب کند شدن زمان نشست و افزایش نسبی خطا می شود.

## فهرست علائم

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

## References

- [1] Dounis, A. I., & Caraiacos, C. (2009). Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1246-1261. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.015>
- [2] Alcalá, R., Benítez, J. M., Casillas, J., Cordón, O., & Pérez, R. (2003). Fuzzy Control of HVAC Systems Optimized by Genetic Algorithms. *Applied Intelligence*, 18(2), 155-177. <https://doi.org/10.1023/A:1021986309149>
- [3] Mirinejad, H., Sadati, H., Maryam, G., & Hamid, T. (2008). Control Techniques in Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems 1. *Journal of Computer Science*, 4(9), 777-783. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2008.777.783>
- [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*, 18, 652-664. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.03.006>
- [5] Li, S., Zhang, X., Xu, J., & Cai, W. (2006, June 21-23). An Improved Fuzzy RBF Based on Cluster and Its Application in HVAC System. 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1714328>
- [6] 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*, 36(3, Part 1), 4566-4573. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.05.031>
- [7] Xie, L., Fu, M., & Li, H. (1998). Passivity analysis and passification for uncertain signal processing systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 46(9), 2394-2403. <https://doi.org/10.1109/78.709527>
- [8] Fong, K. F., Hanby, V. I., & Chow, T. T. (2006). HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming. *Energy and Buildings*, 38(3), 220-231. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.05.008>
- [9] Mahmoud, M. (2000). Robust Control and Filtering for Time-Delay Systems. In. CRC Press. [https://www.researchgate.net/publication/225075622\\_Robust\\_Control\\_and\\_Filtering\\_for\\_Time-Delay\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/225075622_Robust_Control_and_Filtering_for_Time-Delay_Systems)
- [10] Chiang, M.-L., & Fu, L. C. (2006, June 14-16). Hybrid system based adaptive control for the nonlinear HVAC system. 2006 American Control Conference, Minneapolis, MN, USA. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1657569>

- [11] Wang, J., Zhang, C., & Jing, Y. (2008, August 5-8). Fuzzy immune self-tuning PID control of HVAC system. 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, Japan. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4798838>
- [12] Ebenbauer, C., Raff, T., & Allgöwer, F. (2009). Dissipation inequalities in systems theory: An introduction and recent results. *Invited Lectures of the International Congress on Industrial and Applied Mathematics 2007*, 23–42. <https://doi.org/10.4171/056-1/2>
- [13] Fridman, E., & Shaked, U. (2003). Delay-dependent stability and  $H_\infty$  control: Constant and time-varying delays. *International Journal of Control*, 76(1), 48-60. <https://doi.org/10.1080/0020717021000049151>
- [14] Al Faruque, M. A., & Vatanparvar, K. (2016, January 25-28). Modeling, analysis, and optimization of Electric Vehicle HVAC systems. 2016 21st Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC), Macao, China. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7428048>
- [15] Yang, R., & Wang, L. (2015, February 18-20). Control strategy optimization for energy efficiency and comfort management in HVAC systems. 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, USA. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7131863>
- [16] Kang, C.-S., Park, J.-I., Park, M., & Baek, J. (2014). Novel Modeling and Control Strategies for a HVAC System Including Carbon Dioxide Control. *Energies*, 7(6), 3599-3617. <https://doi.org/10.3390/en7063599>