

طراحی کنترل کننده پیش بین مقاوم متمرکز برای سیستم تهویه مطبوع خودرو

پگاه خاوش، امین رضانی و سجاد ازگلی

خنک سازی این سیکل عبارتند از: کمپرسور، شیر انبساط، کندانسور و تبخیر کننده. با توجه به اهمیت عملکرد این سیستم و مسئله ذخیره سازی انرژی، تا کنون تحقیقات متعددی در زمینه کنترل سامانه های A/C انجام گرفته که شامل روش های کنترلی کلاسیک و روش های کنترلی هوشمند می باشد. برخی روش های کنترلی مطرح شده عبارتند از: کنترل ON/Off از طریق یک ترموستات [۲]، کنترل PI دکوپله [۳]، کنترل-کننده PID فازی [۴] و کنترل کننده های فازی و هوشمند [۵] و [۶].

دسته ی دیگری از کنترل کننده ها، مربوط به خانواده ی کنترل کننده پیش بین مبتنی بر مدل^۲ (MPC) هستند. ساختار چندورودی و چندخروجی^۳ (MIMO) سیکل تبرید، وجود محدودیت ها در کران های بالا و پایین متغیرهای حالت و ورودی آن باعث شده است که روش MPC به عنوان یکی از روش های کنترلی کارآمد در سیستم تهویه به حساب آید. از این رو [۷] تا [۱۰]. این روش کنترلی را مورد استفاده قرار داده اند. اما از معایب MPC، نیاز آن به مدل دقیقی از فرآیند می باشد، در حالی که سیستم تهویه مطبوع خودرو^۴ (AAC) به واسطه اثر متقابل با محیط از اغتشاشات مختلفی تأثیر می پذیرد. تغییر سرعت باد منجر به تغییر دبی هوای ورودی به مبدل های حرارتی، و تغییر دمای محیط منجر به تغییر بار خنک سازی اعمال شده می شود. این تغییر شرایط محیطی می تواند عملکرد خنک سازی کابین را مختل کند. در [۱]، عملکرد سیستم در حضور اغتشاش ناشی از تغییر سرعت باد، و در [۴]، [۶] و [۱۱] در حضور اغتشاش ناشی از افزایش دمای محیط مورد بررسی قرار گرفته است. در مراجع نام برده، اغتشاشات به صورت شناخته شده لحاظ شده اند. در [۱۲] برای مقاوم کردن عملکرد سیستم A/C ساختمان در مقابل تغییر دمای محیط، کنترل کننده پیش بین مقاوم^۵ (RMPC) ارائه شده است؛ حال آنکه به دلیل در حرکت بودن خودرو و شرایط گذرای آن، هر دو عامل تغییر سرعت نسبی باد و افزایش دمای محیط به صورت اغتشاشاتی ناشناخته، سیستم AAC را تحت تأثیر قرار می دهند و عملکرد آن را تضعیف می کنند. ژانگ و همکاران در [۱۳] و [۱۴] تغییر دبی جرمی هوا در مبدل های حرارتی را به صورت اغتشاشی ناشناخته لحاظ کرده و با طراحی کنترل کننده های H_∞ عملکرد سیستم را در مقابل آن مقاوم ساخته اند. همین نویسندگان در [۱۵] هر دو اغتشاش نام برده را به صورت ناشناخته در نظر گرفتند و دو فیلتر H_∞ جداگانه، یکی به منظور پس زدن اغتشاش تغییر سرعت نسبی باد و دیگری برای پس زدن اغتشاش ناشی از تغییر دمای کابین طراحی کرده اند. این دو فیلتر H_∞ مجزا، مبتنی بر

چکیده: سیستم تهویه مطبوع خودرو بر مبنای سیکل تبرید کار می کند. ساده ترین مدل این سیکل، چندورودی و چندخروجی و همچنین دارای محدودیت های عملگری می باشد، بنابراین کنترل کننده ی پیش بین مدل، با ویژگی هایی که دارد یک رویکرد مناسب برای کنترل این سیستم به شمار می رود. اما از نیازهای صریح این کنترل کننده، به کارگیری مدل دقیقی از فرآیند می باشد، در حالی که سیستم تهویه خودرو از اغتشاشات ناشناخته ای تأثیر می پذیرد. برای یک خودروی در حال حرکت، تغییر سرعت نسبی باد می تواند منجر به تغییر دبی جرمی هوا در مبدل های حرارتی سیکل تبرید شود. در مقاله پیش رو، طراحی کنترل کننده پیش بین مقاوم بر مبنای نامساوی های ماتریسی خطی برای جبران اثر این اغتشاش انجام شده است. از دیگر اغتشاشات خارجی که بر عملکرد این سیستم تأثیر بسزایی دارد، می توان به افزایش دمای محیط بیرون اشاره کرد که موجب کاهش ضریب عملکرد سیستم تهویه مطبوع خودرو و افزایش بار خنک سازی اعمال شده به آن می شود. در این مقاله، اغتشاش تغییر دمای محیط به مدل سیستم تهویه مطبوع خودرو نیز افزوده شده و سپس طراحی کنترل پیش بین مقاوم متمرکز در حضور هر دو اغتشاش نام برده برای سیستم انجام گرفته است. بدین ترتیب ضعف کنترل پیش بین در پس زدن این اغتشاشات جبران شده است.

کلیدواژه: تهویه مطبوع خودرو، سیکل تبرید، اغتشاشات ناشناخته، کنترل پیش بین مقاوم.

۱- مقدمه

سیستم تهویه مطبوع^۱ (A/C) یکی از بزرگ ترین بارهای جانبی در خودرو است که تأثیر قابل ملاحظه ای در مصرف سوخت آن دارد. بررسی انجام شده در سال ۲۰۰۱ نشان داد که استفاده از سیستم های A/C منجر به مصرف هفت بیلیون گالن بنزین شده است، که این میزان بنزین، معادل پنج و نیم درصد از کل سوخت مصرفی خودروهای شخصی بوده است [۱].

سیستم A/C بر مبنای سیکل تبرید کار می کند. چهارمولفه اصلی

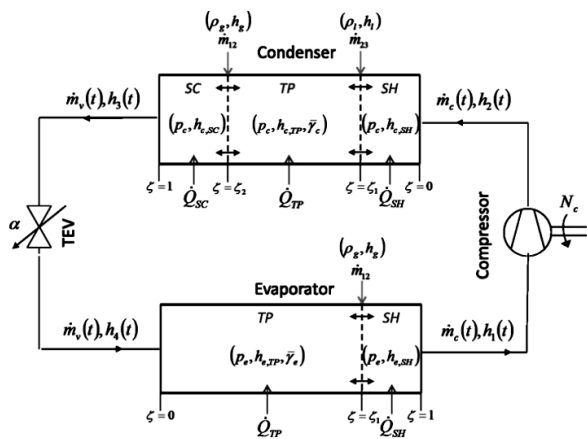
این مقاله در تاریخ ۲۰ اسفند ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۳۱ خرداد ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

پگاه خاوش، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، (email: p.khavash@yahoo.com).

امین رضانی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، (email: ramezani@modares.ac.ir).

سجاد ازگلی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، (email: ozgoli@modares.ac.ir).

2. Model Predictive Control
3. Multiple Input Multiple Output
4. Automotive Air Conditioning
5. Robust Model Predictive Control



شکل ۱: طرح سیستم A/C [۱۴].

مدل کامل سیستم A/C که با اعمال روش‌های قبل ساخته شده، با ۱۵ حالت مشخص می‌شود، که از کاربرد موازنه‌های انرژی و جرم کندانسور و تبخیرکننده نتیجه می‌شود [۱]. حالت‌ها به دو گروه دسته‌بندی شده‌اند. بردار حالت مربوط به مدل تبخیرکننده شامل ۶ حالت و به صورت (۳) است:

$$x_e = [\xi_1 \quad p_e \quad h_{e,SH} \quad T_{e,TP} \quad T_{e,SH} \quad \bar{y}_e]^T \quad (3)$$

در بردارهای حالت، p نشانگر فشار، h آنتالپی، ξ طول ناحیه‌ی فازی، T درجه حرارت دیواره و $\bar{y}$ تخلخل است. بردار حالتی که کندانسور را توصیف می‌کند و شامل ۹ حالت، به صورت (۴) است:

$$x_c = [h_{c,SH} \quad p_c \quad h_{c,SC} \quad \xi_1 \quad \xi_2 \quad T_{c,SH} \quad T_{c,TP} \quad T_{c,SC} \quad \bar{y}_c]^T \quad (4)$$

در نتیجه (۱) و (۲) را می‌توان به صورت (۵) و (۶) بازنویسی کرد [۱۶]

$$\begin{bmatrix} Z_e(x_e, x_c) & \cdot_{6 \times 9} \\ \cdot_{9 \times 6} & Z_c(x_e, x_c) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_e \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_e(x_e, x_c, u, v) \\ f_c(x_e, x_c, u, v) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$y = g(x_e, x_c) \quad (6)$$

روند کاهش مرتبه‌ی مدل، توصیف شده در [۱]، اجازه می‌دهد یک تقریب منطقی از دینامیک‌های سیستم A/C برقرار شود که توسط یک سیستم غیرخطی با تعداد حالت‌های کمتر ارائه می‌شود. این نتیجه، نقطه‌ی شروعی برای تولید یک مدل خطی‌شده‌ی محلی است که سپس برای طراحی کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت دو مدل خطی پیوسته در زمان، با ورودی‌های کنترلی سرعت دور کمپرسور (N_{cmp}) با یکای دور بر دقیقه (rpm) و درصد باز شدن شیر انبساط (α)، از این سیستم ارائه شده است. مورد مد نظر در این پژوهش، برگرفته از [۱۴] می‌باشد:

مدل فضای حالت با بردار حالت $x_e = [\xi_1 \quad p_e \quad h_{e,SH} \quad T_{e,TP} \quad T_{e,SH}]^T$ که این پنج حالت فقط از مجموعه حالت‌های تبخیرکننده می‌باشد، چون عملکرد سیستم AAC عمدتاً وابسته به متغیرهای مدل این مبدل حرارتی می‌باشد. در حقیقت در این مدل، تمرکز اصلی روی تبخیرکننده بوده است. همچنین اغتشاش خارجی ناشی از تغییر دبی جرمی هوا در تبخیرکننده در مدل لحاظ شده است. خروجی‌های این مدل فشار تبخیرکننده (p_e) بر حسب کیلوپاسکال و دمای سوپرهیت تبخیرکننده (SH) بر حسب درجه سانتی‌گراد هستند [۱۴]. منظور از اندیس c برای ماتریس‌ها، حالت پیوسته در زمان مدل‌ها می‌باشد.

FDI می‌باشند. از آنجا که تا کنون کنترل مقاوم سیستم به صورت متمرکز برای پس زدن هر دو اغتشاش ناشناخته تغییر سرعت نسبی باد و افزایش دمای محیط انجام نشده است؛ کاری که در مقاله پیش رو انجام گرفته، طراحی یک کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین مقاوم (RMPC)، بر مبنای نامساوی‌های ماتریسی خطی^۱ (LMI) و بهینه‌سازی محدب برای کنترل متمرکز AAC در حضور هر دو اغتشاش مذکور می‌باشد. البته چون مدل‌هایی که از سیستم AAC در اختیار بود اغتشاش ناشی از افزایش دمای محیط را در خود نداشتند، در این مقاله ابتدا اثر این اغتشاش به کامل‌ترین مدل موجود از AAC افزوده شده و سپس طراحی کنترل‌کننده انجام گرفته است. برای حل مسائل بهینه‌سازی مقاوم از Yalmip Toolbox در نرم‌افزار Matlab استفاده شده است.

ساختار مقاله در بخش‌های زیر سازماندهی شده است؛ در بخش دوم مدل سیستم تهویه مطبوع خودرو توضیح داده شده و سپس اثر اغتشاش ناشی از افزایش دمای محیط به مدل AAC افزوده شده است. در بخش سوم یک نوع روش پیش‌بین مقاوم برای کنترل متمرکز سیستم در حضور اغتشاشات خارجی ناشناخته توضیح داده شده است. در بخش چهارم، الگوریتم کنترلی پیشنهادی برای کنترل AAC شبیه‌سازی می‌گردد. در نهایت، در آخرین بخش، جمع‌بندی کلی از مقاله ارائه می‌گردد.

۲- مدل سیستم تهویه مطبوع خودرو

سیستم تهویه مطبوع خودرو بر مبنای سیکل تراکم بخار^۲ (VCC) یا سیکل تبرید کار می‌کند. چهار مولفه اصلی خنک‌کنندگی این سیکل به همراه نواحی مختلف مبدل‌های حرارتی (تبخیرکننده و کندانسور)، در شکل ۱ نمایش داده شده است. سیکل تبرید حرارت جریان هوای داخل کابین را از طریق تبخیرکننده جذب می‌کند؛ بدین صورت که مبرد یا ماده‌ی سردکننده از حالت دوفازه^۳ (TP) به وضعیت سوپرهیت^۴ (SH) درمی‌آید. در کندانسور با انتقال حرارت به هوای محیط بیرون، مبرد از حالت سوپرهیت به دوفازه به صورت مادون سرد^۵ (SC) تبدیل می‌شود [۱۴].

۲-۱ مدل AAC

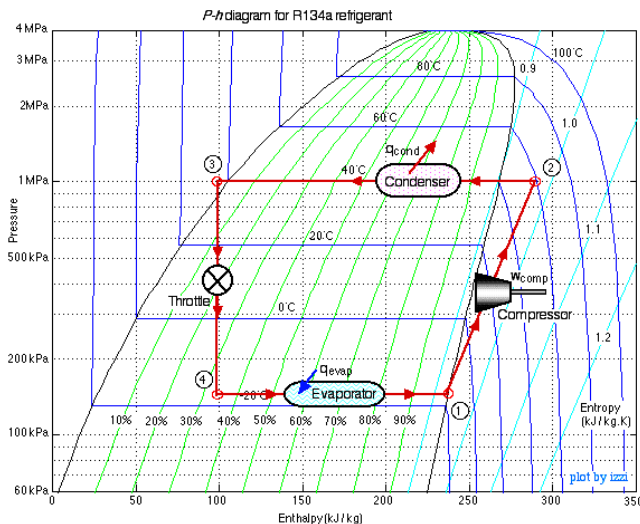
دینامیک‌های مرتبط با انتقال حرارت و جرم در درون مبدل‌های حرارتی با استفاده از روش^۶ MBM توصیف می‌شوند، و قضیه انتقال رینولد که توصیف‌کننده‌ی بقای جرم و انرژی برای جریان تک‌بعدی گذرا می‌باشد، به هر ناحیه‌ی فازی تبخیرکننده و کندانسور با در نظر گرفتن شرایط مرزی و ویژگی‌های مشخص شده در شکل ۱ برای مبرد، اعمال می‌شود [۱۴].

با مجتمع کردن مدل همه‌ی اجزاء، مدل حلقه‌ی کامل A/C در فرم توصیف‌گر به صورت (۱) و (۲) خواهد بود [۱۶]:

$$Z(x) \dot{x} = f(x, u, v) \quad (1)$$

$$y = g(x) \quad (2)$$

1. Linear Matrix Inequalities
2. Vapor Compression Cycle
3. Two-Phase Mode
4. Superheated
5. Subcool
6. Moving Boundary Method



شکل ۲: نمودار فشار-آنتالپی مبرد R-۱۳۴a [۱۹].

بر این اساس، مدل سازی اغتشاش مذکور به این صورت در نظر گرفته شده که یک ضریب افزایشی برای آنتالپی مبرد موجود در ناحیه سوپریت تبخیرکننده لحاظ شده است (nk). برای اینکه سایر حالت های مدل به غیر از دمای سوپریت از این اغتشاش تأثیر نپذیرند، یک ضریب نیز متناظر با فشار تبخیرکننده اختصاص داده شده است (k). نسبت این دو ضریب با سعی و خطا بدست آمده است. در نهایت، با افزودن اثر اغتشاش مربوط به افزایش دمای محیط ($T_{ambient}$) به (۷)، رابطه (۸) حاصل می شود:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) + G_c \dot{m}_{ea}(t) + G_c T_{ambient} \\ y = C_c x(t) \end{cases} \quad (8)$$

که در آن $G_c T_{ambient} = [k \quad 0 \quad 0 \quad 5k]^T$ می باشد. برای مدل سازی این اغتشاش یک ضریب $k > 0$ متناظر با اثر افزایش دمای محیط می باشد که با تغییر این ضریب میزان افزایش دمای سوپریت تغییر می کند. باید $n > 3$ در نظر گرفته شود تا تأثیر افزایش دمای محیط فقط بر دمای سوپریت اثر بگذارد و سایر حالت های سیستم تغییر قابل اغماضی داشته باشند. این مدل به ازای $n = 5$ و چند مقدار متفاوت k مورد بررسی قرار می گیرد.

$G_c T_{ambient}$ به ازای سه مقدار متفاوت k مورد بررسی قرار گرفت. با شبیه سازی مدل AAC در سیمولینک، ابتدا خروجی های سیستم را بدون اعمال هیچ گونه اغتشاشی، با سرعت دور کمپرسور ۲۰۰ rpm و باز کردن شیر انبساط به اندازه ی یک درصد حول نقطه کار متناظرشان، رسم گردید ($k = 0$). سپس همین کار را با اعمال اغتشاش برای $k = 60$ و $k = 80$ تکرار شد. شکل ۳ و مقادیر داده شده در جدول ۱ مشخص می کند که با اعمال اغتشاش $T_{ambient}$ به ازای $k = 60$ و $k = 80$ مقدار افزایش دمای ایجاد شده روی سوپریت را نشان می دهد در حالی که اختلاف ایجاد شده روی فشار تبخیرکننده قابل اغماض می باشد.

۳- استراتژی کنترل

مرجع [۲۰] به طور عمده به رویکردی برای پیش بین مقاوم اختصاص یافته است که کنترل کمینه-بیشینه پیش بین مبتنی بر مدل^۱ نامیده می شود، و اما آنچه با اقتباس از مرجع [۲۰] در این

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) + G_c \dot{m}_{ea}(t) \\ y = C_c x(t) \end{cases} \quad (7)$$

۲-۲ افزودن اغتشاش ناشی از افزایش دمای محیط به مدل AAC

همانطور که پیش تر نیز اشاره شد، سیستم تهویه خودرو از اغتشاشات ناشناخته ی متفاوتی تأثیر می پذیرد. از مهم ترین این اغتشاشات می توان به تغییر دبی جرمی هوا در مبدل های حرارتی، و تغییر بار خنک سازی اعمال شده اشاره کرد. نحوه ی اثرگذاری بسیاری از اغتشاشات روی سیستم تهویه ی یک خودرو و سیستم تهویه ساختمان متفاوت است که علت آن، در حرکت بودن خودرو می باشد. یکی از اغتشاشاتی که نوع اثرگذاری آن بر سیستم های تهویه متحرک و ساکن فرق می کند، تغییر دبی جرمی هوا در مبدل های حرارتی سیستم های A/C می باشد، که می تواند در اثر تغییر سرعت نسبی باد و تغییر سرعت فن های سیستم تهویه باشد. تغییر سرعت نسبی باد برای یک ساختمان، می تواند از قبل قابل پیش بینی باشد پس احتمالاً پروفایل مشخصی خواهد داشت. ولی برای AAC به دلیل در حرکت بودن خودرو با سرعت متغیر، ممکن است سرعت نسبی باد پروفایل نامشخصی داشته باشد، بنابراین تغییر دبی جرمی هوا در مبدل های AAC به صورت یک اغتشاش ناشناخته عمل خواهد کرد. در مدلی که ژانگ و همکارانش در مرجع [۱۴] ارائه داده اند، اغتشاش نامبرده لحاظ شده است.

از دیگر اغتشاشاتی که تأثیر چشمگیری بر عملکرد AAC دارد، افزایش دمای محیط است. با افزایش دمای محیط، دمای کابین، دمای هوای ورودی به تبخیرکننده و در نتیجه بار خنک سازی اعمال شده افزایش می یابد [۱۴]. در [۱۷] نشان داده است که با افزایش دمای محیط ظرفیت خنک سازی سیستم کاهش می یابد. حال آن که برای ایجاد دما و رطوبت مناسب در کابین خودرو، باید ظرفیت خنک سازی AAC متناسب با بار خنک سازی اعمال شده به آن باشد. شرایط عملیاتی مدل خطی مورد استفاده در این پژوهش به گونه ایست که مبرد موجود در تبخیرکننده دارای وضعیت سوپریت است، بنابراین هر گونه حرارت اضافی باعث افزایش دمای سوپریت تبخیرکننده خواهد شد [۱۸]. تاکنون مقالات متعددی نیز اثر این اغتشاش بر سیستم A/C را مورد بررسی قرار داده اند. در [۴] و [۱۱] نیز اثر افزایش دمای محیط و افزایش بار خنک سازی اعمال شده به تبخیرکننده، مورد بررسی و کنترل قرار داده شده که در اثر این اغتشاش، دمای سوپریت تبخیرکننده افزایش یافته است. با توجه به آن که درجه حرارت خروجی تبخیرکننده (T_o) که به کابین خودرو دمیده می شود، مجموع درجه حرارت سوپریت تبخیرکننده و درجه حرارت تبخیر می باشد [۱۱]، بنابراین با زیاد شدن دمای سوپریت، دمای خروجی تبخیرکننده نیز بالا می رود که این امر باعث بر هم خوردن آسایش حرارتی در کابین می شود.

نمودار فشار-آنتالپی مبرد R-۱۳۴a (مبرد رایج در خودروهای جدید) در شکل ۲ نمایش داده است [۱۹]. همان طور که مشاهده می شود عملیات تبادل حرارت در نواحی فازی مختلف کندانسور و تبخیرکننده، در فشار ثابت انجام می گیرد. در ناحیه ی دوفاز انتقال حرارت در دمای ثابت، با تغییر آنتالپی و تغییر تعداد مولکول های بخار و مایع همراه است. در نواحی سوپریت و مادون سرد کندانسور، تبادل حرارت باعث تغییر آنتالپی و تغییر دما می شود. به طور مشابه، تبادل حرارت در ناحیه ی سوپریت تبخیرکننده نیز، باعث تغییر آنتالپی و دمای مبرد می شود.

نظر قرار می‌گیرد. تابع هزینه به صورت انحراف از خروجی آینده مطلوب $y_{k+j|k}^r$ و ورودی کنترلی $u_{k+j|k}^r$ بیان می‌شود:

$$\min_u \max_w \sum_{j=0}^{N-1} y_{k+j|k} - y_{k+j|k}^r Q + u_{k+j|k} - u_{k+j|k}^r R \quad (13)$$

رابطه (۱۴) شکل برداری معیار عملکرد مسئله Minimax را نمایش می‌دهد.

$$\begin{aligned} \min_u \max_w (Y - Y_r)^T Q (Y - Y_r) + (U - U_r)^T R (U - U_r) \\ \text{subject to: } U \in \mathbb{U}^N \quad \forall W \in \mathbb{W}^N \\ X \in \mathbb{X}^N \quad \forall W \in \mathbb{W}^N \\ W \in \mathbb{W}^N \quad w \in \mathbb{W} \end{aligned} \quad (14)$$

که در آن، Y نسخه انباشته پیش‌بینی‌ها از خروجی‌های سیستم می‌باشد و به صورت $Y = (y_{k|k}^T, y_{k+1|k}^T, \dots, y_{k+N-1|k}^T)^T$ تعریف می‌شود. برای X ، U و W نیز به طور مشابه. Q و R نیز نسخه انباشته ماتریس‌های وزنی ردیابی خروجی (Q) و ورودی مطلوب (R) می‌باشند. عملگر $\oplus$ (جمع مستقیم) برای تعریف ماتریس‌های بلوکی قطری مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماتریس $G \in \mathbb{R}^{Nm \times Nr}$ و ماتریس‌های وزنی $Q \in \mathbb{R}^{Nm \times Nm}$ و $R \in \mathbb{R}^{Nm \times Nm}$ از طریق (۱۵) حاصل می‌شوند [۲۰].

$$G = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ G & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ AG & \cdot & G & \cdot & \dots & \cdot \\ \vdots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ A^{N-1}G & B & \dots & AG & G & \cdot \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$Q = \oplus_{j=1}^N Q, R = \oplus_{j=1}^N R$$

محدودیت‌های روی حالت‌های پیش‌بینی شده به اغتشاش وابسته هستند و باید در لحظه آدرس‌دهی شوند. بنابراین برآورده شدن مقاوم محدودیت‌ها بدین معناست که

$$\mathcal{E}_x X \leq \mathcal{F}_x \quad \forall W \in \mathbb{W}^N \quad (16)$$

با وارد کردن فرم انباشته (۹) برای X در (۱۶)، (۱۷) حاصل می‌شود

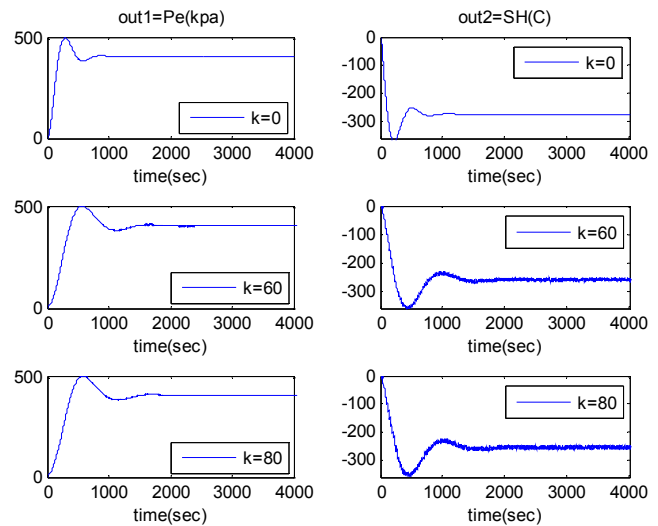
$$\mathcal{E}_x (Ax_{k|k} + BU) + \mathcal{E}_x GW \leq \mathcal{F}_x \quad \forall W \in \mathbb{W} \quad (17)$$

بیشینه هر سطر عبارت نامعین $\mathcal{E}_x GW$ در سطر متناظر ماتریس جدید γ قرار می‌گیرد. بنابراین می‌توان گفت محدودیت‌های حالت به طور مقاوم برآورده می‌شوند اگر داشته باشیم

$$\mathcal{E}_x (Ax_{k|k} + BU) + \gamma \leq \mathcal{F}_x \quad (18)$$

مسئله Minimax ارائه شده در (۱۴) به کمینه کردن حد بالای تابع هزینه تبدیل خواهد شد

$$\begin{aligned} \min_{U, t} t \\ \text{Subject to: } (18), (20), (21) \end{aligned} \quad (19)$$



شکل ۳: رفتار AAC با اعمال اغتشاش ناشی از تغییر دمای محیط به ازای مقادیر مختلف k .

جدول ۱: رفتار سیستم به ازای مقادیر مختلف k ، مربوط به شکل ۳ از نمونه ۲۰۰۰ به بعد.

k	$\Delta P_{e_{\min}}$ (kPa)	$\Delta P_{e_{\max}}$ (kPa)	$\Delta SH_{\min}$ (°C)	$\Delta SH_{\max}$ (°C)
۶۰	-۲	۱	۷	۲۲
۸۰	-۳	۲	۱۰	۲۹

بخش مورد بررسی قرار گرفته، RMPC اعمال شده به سیستم‌هایی با اغتشاش خارجی کران‌دار است.

۳-۱ مدل نامعینی

سیستم‌های مد نظر در این‌جا، سیستم‌های زمان‌گسسته‌ی خطی با اغتشاشات خارجی می‌باشند:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Gw_k \\ y_k = Cx_k \end{cases} \quad (9)$$

که $x_k \in \mathbb{R}^n$ ، $u_k \in \mathbb{R}^m$ ، $y_k \in \mathbb{R}^p$ و $w_k \in \mathbb{R}^r$ به ترتیب نشان‌گر بردار حالت، ورودی کنترلی، خروجی کنترل شده و اغتشاش خارجی می‌باشد. علاوه بر این، سیستم محدود است، یعنی $u_k \in \mathbb{U}$ و $x_k \in \mathbb{X}$. مجموعه‌های محدودیت $\mathbb{U}$ و $\mathbb{X}$ به صورت چندوجهی فرض شده‌اند:

$$\mathbb{U} = \{u : E_u u \leq f_u\} \quad (10)$$

$$\mathbb{X} = \{x : E_x x \leq f_x\} \quad (11)$$

اغتشاش w_k در بازه‌ای با کران‌های مشخص اتفاق می‌افتد ولی مقدار آن در هر لحظه نامشخص است. مجموعه اغتشاشات ممکن به صورت $\mathbb{W}$ نشان داده می‌شود و این‌گونه فرض شده که $\mathbb{W}$ مجموعه‌ای محدب می‌باشد.

$$w_k \in \mathbb{W} = \mathbb{W}_\infty = \{w : w_\infty \leq 1\} \quad (12)$$

۳-۲ کنترل پیش بین مقاوم

هدف مسئله‌ی کنترل، داشتن خروجی مناسب y_k است که مسیر مرجع مطلوبی را دنبال می‌کند. در چارچوب Minimax پیشنهادی حفظ پایداری سیستم و ردیابی مسیر مطلوب در حضور اغتشاشات ناشناخته مد

$$\begin{pmatrix} t - \sum_{i=1}^s \tau_i & \left(C(Ax_{k|k} + BU) - Y_r \right)^T & (U - U_r)^T & \cdot \\ C(Ax_{k|k} + BU) - Y_r & Q^{-1} & \cdot & CG \\ (U - U_r) & \cdot & R^{-1} & \cdot \\ \cdot & (CG)^T & \cdot & T \end{pmatrix} \geq \cdot \quad (20)$$

$$U \in \mathbb{U}^N = \{U : \mathcal{E}_u U \leq \mathcal{F}_u\} \quad (21)$$

پیش‌بینی‌های فیدبک یک متغیر تنظیم جدید به minimax MPC اضافه می‌کند و آن هم ماتریس فیدبک L است. انتخاب مشخصی برای v وجود ندارد، ولی به عنوان یک پیشنهاد، می‌توان آن را LQR را در نظر گرفت [۲۰].

۴- شبیه‌سازی

در این بخش، از مدل‌های معرفی شده در (۷) و (۸) استفاده می‌شود. از این به بعد (۷) مدل شماره یک و (۸) را مدل شماره دو نامیده می‌شوند. چون RMPC مورد استفاده در این پژوهش، مبتنی بر مدل گسسته می‌باشد، لازم است مدل با زمان نمونه‌برداری مناسب گسسته شود به گونه‌ای که اطلاعات سیستم از دست نرود. زمان گسسته‌سازی مناسب مدل AAC در بازه‌ی $[0.1T_s, 0.2T_s]$ قرار دارد که T_s کوچکترین ثابت زمانی سیستم پیوسته است. با توجه به مقادیر ویژه‌ی ماتریس A_c سیستم، برای این مدل از AAC، $T_s = 1/30.738$ می‌باشد و در شبیه‌سازی‌های کنترل پیش‌بین مقاوم، زمان گسسته‌سازی AAC مساوی $0.1T_s$ ، یعنی 0.007 ثانیه در نظر گرفته شده است.

در شبیه‌سازی کنترل کننده پیش‌بین مقاوم برای AAC، ماتریس‌های A, B, C و G از گسسته‌سازی مدل پیوسته (A_c, B_c, C_c, G_c) حاصل می‌شوند. در RMPC‌های مبتنی بر مدل شماره یک، $G_c = G_{c1} = G_{c_m_{ea}}$ و در موارد استفاده از مدل شماره دو، $G_c = G_{c2} = [G_{c_m_{ea}} \quad vG_{c_T_{ambien}}]$ خواهد بود. در طراحی RMPC، ماتریس G معرفی شده در (۹) در برگیرنده‌ی ضرایب مربوط به اغتشاشاتی می‌باشد که عملکرد مقاوم سیستم در مواجهه با آن‌ها تضمین می‌شود.

در طراحی RMPC، برای مدل شماره یک AAC، $x_k \in \mathbb{R}^5$ ، دو AAC به صورت $x_k \in \mathbb{R}^5$ ، $u_k \in \mathbb{R}^2$ و $y_k \in \mathbb{R}^2$ و این پارامترها در مدل شماره دو AAC به صورت $x_k \in \mathbb{R}^5$ ، $u_k \in \mathbb{R}^2$ و $w_k = [\dot{m}_{ea} \quad T_{ambien}]^T \in \mathbb{R}^2$ می‌باشد. در تمامی شبیه‌سازی‌ها $\dot{m}_{ea}(t)$

ماتریس‌های A, B, C و G به ترتیب از ماتریس‌های A, B, C و G به دست می‌آیند. برای جزئیات بیشتر، به مرجع [۲۰] رجوع کنید.

۳-۳ Minmax MPC با پیش‌بینی‌های فیدبک

کنترل کننده‌ی Minimax بسط داده شده بسیار محافظه کارانه عمل می‌کند و دلیل آن، بهینه‌سازی یک دنباله‌ی کنترلی حلقه‌باز است که با همه‌ی تحقق‌های اغتشاش که ممکن است در آینده اتفاق بیفتد مقابله می‌کند بدون این که اندازه‌گیری‌های آینده را در محاسبات وارد کند. اما در واقع چیزی که بهتر است مدنظر قرار گیرد، حل برنامه‌ی Minimax حلقه‌بسته است که مفهوم اندازه‌گیری‌هایی که به دست خواهند آمد را با مسئله‌ی حلقه‌باز ترکیب می‌کند. این شیوه متغیرهای تصمیم‌گیری جدید $v_{k+j|k}$ را معرفی می‌کند و دنباله‌ی کنترلی آینده بر حسب حالت‌های آینده و $v_{k+j|k}$ پارامتری می‌شود

$$u_{k+j|k} = Lx_{k+j|k} + v_{k+j|k} \quad (22)$$

بدین ترتیب می‌توان گفت که حداقل نوعی از فیدبک در سیستم وجود دارد. اکنون برای ترکیب پیش‌بینی‌های فیدبک با چارچوب قبلی، باید (۲۲) به صورت برداری زیر نوشته شود

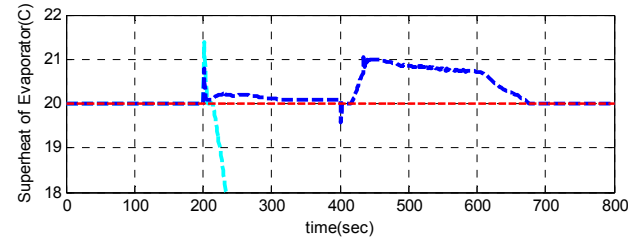
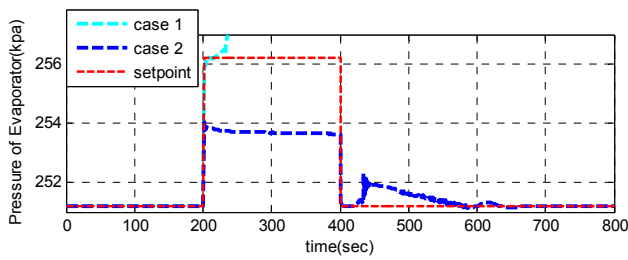
$$U = LX + V \quad (23)$$

با در نظر گرفتن $\Omega = (I - BL)^{-1}$ و اجرای روشی مشابه، مسئله‌ی Minimax MPC با پیش‌بینی‌های فیدبک (FP Minimax MPC) به صورت (۲۲) خواهد بود. تنها تفاوت ایجاد شده در آن است که γ با استفاده از $\begin{pmatrix} \mathcal{F}_x \Omega G \\ \mathcal{F}_u \Omega G \end{pmatrix}$ به دست می‌آید در حالی که در Minimax MPC حلقه‌باز با استفاده از $\mathcal{E}_x G$ به دست می‌آمد.

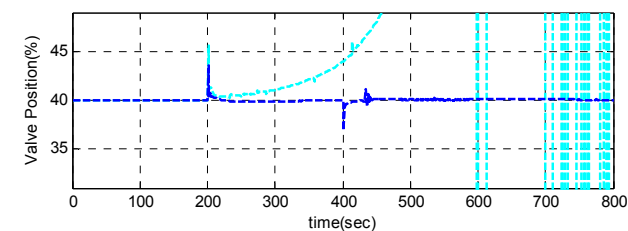
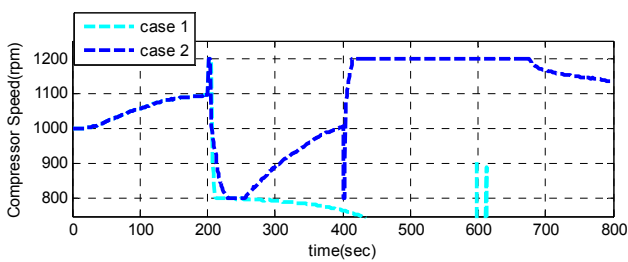
$$\begin{aligned} \min_{U, t, t} \\ \text{Subject to: } (25), (26) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{pmatrix} t - \sum_{i=1}^s \tau_i & \left(C\Omega(Ax_{k|k} + BV) - Y_r \right)^T & \left(L\Omega(Ax_{k|k} + BV) + V - U_r \right)^T & \cdot \\ * & Q^{-1} & \cdot & C\Omega G \\ * & \cdot & R^{-1} & L\Omega G \\ \cdot & * & * & T \end{pmatrix} \geq \cdot \quad (25)$$

$$\begin{pmatrix} \mathcal{E}_x(Ax_{k|k} + BV) \\ \mathcal{E}_u(L\Omega(Ax_{k|k} + BV) + V) \end{pmatrix} + \gamma \leq \begin{pmatrix} \mathcal{F}_x \\ \mathcal{F}_u \end{pmatrix} \quad (26)$$



شکل ۴: خروجی‌های AAC برای مورد اول و دوم شبیه‌سازی.



شکل ۴: ورودی‌های AAC برای مورد اول و دوم شبیه‌سازی.

با کم کردن محافظه‌کاری، ردیابی مناسبی حاصل می‌شود. در این روش، ماتریس‌های وزنی مربوط به کنترل‌کننده L به صورت

$$R_{LQ} = \begin{bmatrix} 10^{-8} & 0 \\ 0 & 10^{-8} \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad Q_{LQ} = C^T \times Q \times C \quad \text{در نظر گرفته شده‌اند.}$$

خروجی‌های سیستم در مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد اول در شکل ۴ و ورودی‌های کنترلی در شکل ۵ نیز رسم شده‌اند. در حقیقت با افزودن پیش‌بینی‌های فیدبک به سیستم کنترل حلقه باز Minmax MPC و طراحی سیستم کنترلی حلقه بسته، از محافظه‌کاری سیستم کاسته شده و ردیابی مناسب خروجی‌ها با رعایت محدودیت‌های لازم انجام گرفته است.

مورد سوم: طراحی RMPC با رویکرد Minmax MPC مبتنی بر مدل شماره یک AAC، زمانی که سیستم از اغتشاش $\dot{m}_{ea}(t)$ و اغتشاش $T_{ambient}$ به ازای $k = 80$ تأثیر می‌پذیرد.

زمانی که در مدل AAC، برای اغتشاش $T_{ambient}$ ، $k = 80$ لحاظ می‌شود بدین معنا خواهد بود که تغییرات دمای محیط بیرون بین ۱۰ تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد است. هدف از این شبیه‌سازی، بررسی مقاوم بودن سیستم در برابر این تغییرات شدید دمای هوا و همچنین اغتشاش ناشی از تغییر سرعت نسبی باد است.

نتایج مورد سوم از شبیه‌سازی‌ها در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با این مقادیر محدودیت‌ها و

جدول ۲: ماتریس‌های وزنی، افق‌ها و محدودیت‌های اعمالی در حالت‌های مختلف طراحی RMPC.

	موارد اول و دوم	موارد سوم و چهارم
u_{max}	$\begin{bmatrix} 1200 \\ 48 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1500 \\ 60 \end{bmatrix}$
u_{min}	$\begin{bmatrix} 800 \\ 32 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 500 \\ 20 \end{bmatrix}$
y_{max}	$\begin{bmatrix} 258/2 \\ 22 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 275/2 \\ 29 \end{bmatrix}$
y_{min}	$\begin{bmatrix} 244/2 \\ 18 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 227/2 \\ 11 \end{bmatrix}$
Q	$\begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0.001 \end{bmatrix}$
R	$\begin{bmatrix} 10^{-8} & 0 \\ 0 & 10^{-8} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10^{-10} & 0 \\ 0 & 10^{-12} \end{bmatrix}$
N	۵	۵

عدد تصادفی، بین صفر و یک، و $T_{ambient}(t)$ نیز عددی تصادفی، صفر یا یک در نظر گرفته شده است.

جدول ۲ مقادیر عددی محدودیت‌های اعمال شده $(u_{max}, u_{min}, y_{max}, y_{min})$ ، ماتریس‌های وزنی ورودی‌ها، R ، و خروجی‌ها، Q ، و افق پیش‌بینی، N ، برای موارد مختلف طراحی RMPC برای AAC نمایش می‌دهد.

حالت‌های مختلفی که برای شبیه‌سازی‌ها مدنظر قرار گرفته‌اند، که در ادامه شرح داده می‌شود.

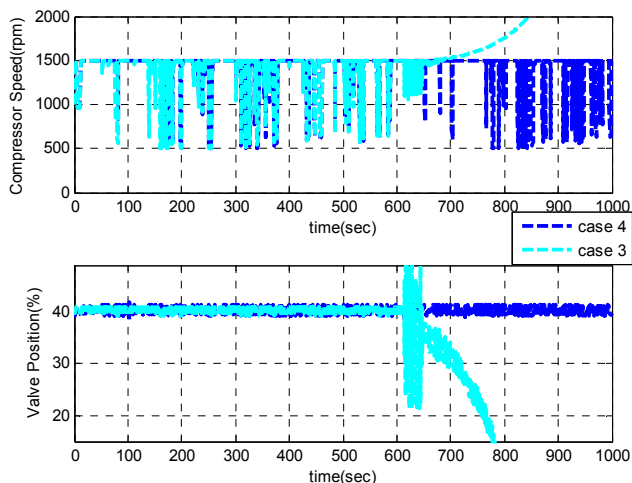
مورد اول: طراحی RMPC مبتنی بر مدل شماره یک AAC، زمانی که سیستم فقط از اغتشاش $\dot{m}_{ea}(t)$ تأثیر می‌پذیرد.

در حالتی که بار خنک‌سازی اعمال شده به خودرو افزایش می‌یابد و یا به هر علتی نیاز به دمای پایین‌تری در کابین خودرو می‌باشد، با نقطه تنظیم پایین‌تری برای فشار تبخیرکننده (که متناظر با دمای تبخیر پایین‌تری نیز هست)، ردیابی سریع خروجی متناظر و ثابت ماندن SH، تبخیرکننده می‌تواند ضمن این که هوای خنک‌تری به کابین خودرو می‌دمد، ذخیره‌سازی انرژی مناسبی نیز داشته باشد [۳]. با این تفاسیر، هدف این بخش، طراحی RMPC با رویکرد Minmax MPC مبتنی بر مدل شماره یک AAC برای ردیابی سیگنال مرجع پله p_e و در حضور اغتشاش ناشناخته $\dot{m}_{ea}$ می‌باشد.

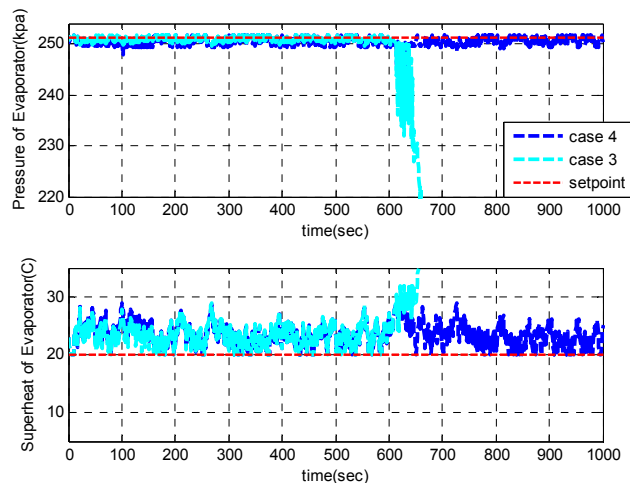
برای حل مسائل بهینه‌سازی مقاوم از Yalmip Toolbox در نرم‌افزار Matlab استفاده شده است. در طراحی Minimax MPC با این مقادیر پارامترهای تنظیم و این محدودیت‌ها، یک بار از حل‌کننده LMILAB برای حل این مسئله استفاده شد که پاسخ شدنی حاصل نشد و یک بار نیز از SDPT3 استفاده گردید که نتایج آن در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سیستم ناپایدار شده، که علت آن، محافظه‌کاری زیاد این کنترل‌کننده می‌باشد.

مورد دوم: طراحی RMPC با رویکرد Feedback Prediction Minmax MPC مبتنی بر مدل شماره یک AAC، زمانی که سیستم فقط از اغتشاش $\dot{m}_{ea}(t)$ تأثیر می‌پذیرد.

حال با طراحی Minimax MPC با Feedback Prediction، با کم



شکل ۷: ورودی‌های AAC برای مورد سوم و چهارم شبیه‌سازی.



شکل ۸: خروجی‌های AAC برای مورد سوم و چهارم شبیه‌سازی.

محیط ناپایدار می‌شد و ما با طراحی RMPC با رویکرد Minimax-MPC توانستیم عملکرد مقاوم سیستم را در حضور هر دو اغتشاش یادشده تضمین کنیم.

مراجع

- [1] Q. Zhang, M. Canova, and G. Rizzoni, "Sliding mode control of an automotive air conditioning system," in *Proc. American Control Conf.*, pp. 5748-5753, Washington, DC, USA, 17-19 Jun. 2013.
- [2] F. Wicks, "2nd law analysis of on/off vs. frequency modulation control of a refrigerator," in *Proc. 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf. and Exhibit*, vol. 1, pp. 340-344, Las Vegas, NV, USA, 24-28 Jul. 2000.
- [3] M. Hattori, T. Nomura, Y. Ueno, and H. Kato, "Automotive refrigeration system controller with a simple precompensator," in *Proc. 29th IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 1590-1591, Honolulu, HI, USA, 5-7 Dec. 1990.
- [4] R. Q. Zhu, X. Q. Zheng, and Y. Z. Wu, "Fuzzy-PID methods for controlling evaporator superheat," in *Proc. International Refrigeration and Air Conditioning Conf.*, Paper 500, West Lafayette, IN, USA, 25-28 Jul. 2000.
- [5] Y. Farzaneh and A. A. Tootoonchi, "Controlling automobile thermal comfort using optimized fuzzy controller," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, no. 14, pp. 1906-1917, Oct. 2008.
- [6] H. Khayyam, et al., "Intelligent energy management control of vehicle air conditioning via look-ahead system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 16, pp. 3147-3160, Nov. 2011.
- [7] M. Razi, M. Farrokhi, M. H. Saeidi, and A. R. F. Khorasani, "Neuro-predictive control for automotive air conditioning system," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Engineering of Intelligent Systems*, 6 pp., Islamabad, Pakistan, 22-23 Apr. 2006.
- [8] B. C. Ng, I. Z. M. Darus, H. Jamaluddin, and H. M. Kamar, "Application of adaptive neural predictive control for an automotive air conditioning system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, no. 1, pp. 1244-1254, Dec. 2014.
- [9] M. S. Elliott and B. P. Rasmussen, "Decentralized model predictive control of a multi-evaporator air conditioning system," *Control Engineering Practice*, vol. 21, no. 12, pp. 1665-1677, Dec. 2013.
- [10] D. Leducq, J. Guilpart, and G. Trystram, "Non-linear predictive control of a vapour compression cycle," *International Journal of Refrigeration*, vol. 29, no. 5, pp. 761-772, Aug. 2006.
- [11] K. Vinther, C. H. Lyhne, E. B. Sorensen, and H. Rasmussen, "Evaporator superheat control with one temperature sensor using qualitative system knowledge," in *Proc. American Control Conf.*, pp. 374-379, Montreal, Canada, 27-29 Jun. 2012.
- [12] H. Nagpal, A. Staino, and B. Basu, "Robust model predictive control of HVAC systems with uncertainty in building parameters using linear matrix inequalities," *Advances in Building Energy Research*, vol. 14, no. 3, 17 pp., 2020.
- [13] Q. Zhang and M. Canova, "Modeling and output feedback control of automotive air conditioning system," *International Journal of Refrigeration*, vol. 58, pp. 207-218, Oct. 2015.
- [14] Q. Zhang and M. Canova, "Improving tracking performance of automotive air conditioning system via μ synthesis," *Science and*

پارامترهای تنظیم، خروجی‌ها قادر به ردیابی سیگنال مرجع مرتبطشان نیستند و سیستم در حضور چنین اغتشاشی ناپایدار می‌شود.

مورد چهارم: طراحی RMPC با رویکرد Minmax MPC مبتنی بر مدل شماره دو AAC، زمانی که سیستم از اغتشاش $\dot{m}_{ea}(t)$ و اغتشاش $T_{ambient}$ به ازای $k=80$ تأثیر می‌پذیرد. به منظور مقایسه با سومین مورد شبیه‌سازی، این نتایج نیز در شکل‌های ۶ و ۷ به‌نمایش درآمده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌گردد، در مورد چهارم با در نظر گرفتن ماتریس مربوط به اغتشاش افزایش $T_{ambient}$ در ماتریس G مربوط به کنترل‌کننده Minimax MPC، کنترل‌کننده توانسته با رعایت محدودیت‌های موجود روی ورودی‌های کنترلی، فشار تبخیرکننده و دمای سوپرهیت را در بازه‌ی تعیین شده‌ی مرتبطشان نگه دارد و عملکرد مقاوم سیستم را در مواجهه با این بازه از تغییرات دما، تضمین کند.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به این که سیستم تهویه خودرو بر مبنای سیکل تبرید کار می‌کند و این سیکل چندورودی و چندخروجی و همچنین دارای محدودیت‌های عملکردی می‌باشد، MPC بنا به ویژگی‌هایی که دارد یک رویکرد مناسب برای کنترل AAC به شمار می‌آید. کنترل پیش‌بین مدل، در کنار مزایایی که دارد، دارای عیب‌هایی نیز می‌باشد؛ از ضعف‌های MPC نیاز داشتن به مدل دقیقی از فرآیند است در حالی که سیستم AAC از اغتشاشات نامعینی تأثیر می‌پذیرد. یکی از این اغتشاشات، تغییر دبی جرمی هوای ورودی به مبدل‌های حرارتی می‌باشد. بنابراین یکی از کارهایی که در این پژوهش انجام شد، طراحی کنترل پیش‌بین مقاوم با رویکرد Minimax MPC برای AAC با تعریف سیگنال مرجع متغیر، برای مقاوم‌سازی عملکرد سیستم در مواجهه با اغتشاش مذکور می‌باشد. بدلیل زیاد محافظه‌کار بودن Minimax MPC، پاسخ شدنی حاصل نشد. در ادامه با افزودن پیش‌بینی‌های فیدبک به ساختار Minimax MPC، مشاهده شد که خروجی‌ها به گونه‌ای مناسب سیگنال‌های مرجعشان را دنبال می‌کنند.

یکی از چالش‌های مهم دیگری که سیستم تهویه مطبوع خودرو با آن مواجه است، افزایش دمای محیط می‌باشد. با افزایش دمای محیط، میزان بار خنک‌سازی اعمال شده افزایش، و ضریب عملکرد سیستم کاهش می‌یابد. از کارهای دیگری که در این پژوهش انجام شده، افزودن اثر این اغتشاش به مدل AAC می‌باشد. سیستم در حضور تغییرات زیاد دمای

امین رضائی مدرک کارشناسی مهندسی برق از دانشگاه شهید بهشتی تهران سال ۱۳۸۰، و مدرک کارشناسی ارشد سیستم‌های کنترل دانشگاه صنعتی شریف، تهران، سال ۱۳۸۳ و دکترای تخصصی رشته مهندسی برق از دانشگاه تهران، در سال ۱۳۹۰ اخذ کرد. از سال ۲۰۱۲، عضو هیأت علمی گروه کنترل و اتوماسیون ابزار دقیق دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران است. ایشان مسئول آزمایشگاه کنترل پیشرفته است و به عنوان عضو کمیته علمی در چندین کنفرانس داخلی و خارجی و سردبیر و داور با مجلات بین‌المللی در زمینه سیستم‌های کنترل همکاری دارد. زمینه‌های پژوهشی فعلی او شامل سیستم‌های کنترل تحمل‌پذیر عیب، شبکه‌های یادگیری عمیق، سیستم‌های کنترل یادگیرنده و پیش‌بینی مبتنی بر مدل، سیستم‌های کنترل تصادفی، سیستم‌های هیبریدی و کاربرد کنترل پیشرفته در سیستم‌های قدرت است. دکتر رضائی عضو IEEE از سال ۲۰۰۵ و عضو مهندسين ابزار و کنترل جامعه ایرانی از سال ۲۰۱۲ است. او دارای بیش از ۵۰ مقاله در مجلات و ۱۰۰ مقاله کنفرانس علمی است.

سجاد ازگلی در سال ۱۳۷۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق و در سال ۱۳۷۸ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شریف دریافت نمود. ایشان در سال ۱۳۷۰ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی گردید. دکتر ازگلی دوره پسادکتری خود را در دانشگاه Leicester انگلستان در سال ۱۳۸۵ به اتمام رساند و اینک نیز عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه نام‌برده شامل موضوعاتی مانند کنترل غیرخطی، کنترل مقاوم، مدلسازی سامانه های متحرک و رباتیک می‌باشد.

Technology for the Built Environment, vol. 21, no. 4, pp. 448-461, 2015.

- [15] Q. Zhang and M. Canova, "Fault detection and isolation of automotive air conditioning systems using first principle models," *Control Engineering Practice*, vol. 43, pp. 49-58, Oct. 2015.
- [16] Q. Zhang, L. Fiorentini, and M. Canova, " H_{∞} Robust control of an automotive air conditioning system," in *Proc. American Control Conf.*, Portland, OR, USA, pp. 5748-5753, 4-6 Jun. 2014.
- [17] S. N. Shehab, "Computer simulation of an automobile air-conditioner with ambient temperature effects," *Journal of Al-Ma'moon College*, no. 18, pp. 84-99, Feb. 2011.
- [18] M. Schnubel, *Today's Technician: Automotive Heating & Air Conditioning Classroom Manual and Shop Manual*, Cengage Learning, 2012.
- [19] I. . Urieli, "Refrigerators and heat pumps," *Engineering Thermodynamics: A Graphical Approach*, Ohio University, Ch. 4c, https://people.ohio.edu/urieli/thermo/intro/chapt.1_6/chapter4c.html.
- [20] J. Löfberg, *Minimax Approaches to Robust Model Predictive Control*, Ph.D. Thesis, no. 812, Linköping University, Sweden, 2003.

پگاه خاوش مدرک کارشناسی مهندسی برق از دانشگاه شهید چمران اهواز سال ۱۳۹۲ اخذ نموده و استعداد درخشان این دوره بودند. ایشان مدرک کارشناسی ارشد سیستم‌های کنترل از دانشگاه تربیت مدرس تهران را در سال ۱۳۹۴ اخذ نموده و در دوره ارشد زمینه تحقیقاتی کنترل پیش‌بین را دنبال کرد و کنترل‌کننده پیش‌بین بهبودیافته برای سیستم تهویه مطبوع خودرو شبیه‌سازی و مقاله مرتبط در مجله برق مدرس چاپ گردید. در ادامه با طراحی کنترلر پیش‌بین مقاوم در حضور اغتشاشات محیطی برای سیستم مذکور طراحی شد و در مقاله ارسالی حاصل کار ارائه گردید. ایشان از سال ۱۳۹۷ تا کنون مدرس دانشگاه آزاد اسلامی و همچنین دانشگاه صنعتی خاتم‌التبایا است.