

طراحی و پیاده‌سازی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل خطی گسسته برای

کنترل سوخت موتور توربوفن

مرتضی منتظری^۱، علی جعفری^۲ و علی راستی جهرمی^۳

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۲)

چکیده

در این مقاله، طراحی و پیاده‌سازی کنترل پیش‌بین مدل برای کنترل سوخت موتور توربوفن انجام شده است. ارضاء قیود عملکردی و ساختاری موتور، چالشی برای طراحی کنترل‌کننده ایجاد می‌کند. سیستم کنترل باید اطمینان دهد که موتور در شرایط سلامت کامل، یعنی بدون فرارفت سرعت محور، استال کمپرسور، خاموشی محفظه احتراق و فرارفت دمای توربین کار می‌کند. در این راستا کنترل‌کننده‌ای مورد نیاز است که بتواند این قیود را ضمن به‌دست‌آوردن سیگنال کنترل بهینه لحاظ کند. به‌همین دلیل، کنترل پیش‌بین مدل برای کنترل سوخت موتور توربوفن با استفاده از یک مدل خطی از موتور در یک نقطه عملکردی طراحی شده است. نتایج عملکرد این کنترل‌کننده نشان می‌دهد که ضمن تولید سیگنال کنترلی بهینه، تمامی قیود در محدوده مورد نظر قرار گرفته‌اند. پس از اطمینان از عملکرد مناسب کنترلر در شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، الگوریتم کنترل سوخت به‌صورت سخت‌افزاری پیاده‌سازی شده است. بدین منظور الگوریتم کنترلی بر روی یک میکروکنترلر پیاده‌سازی شده و تست سخت‌افزار در حلقه انجام گرفته است. نتایج حاصل از تست سخت‌افزار در حلقه، نشان‌دهنده پیاده‌سازی صحیح کنترل پیش‌بین طراحی‌شده بر روی سخت‌افزار مورد نظر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: موتور توربوفن، کنترل سوخت، کنترل پیش‌بین مدل، مدل خطی، سخت‌افزار در حلقه

Design and Implementation of Model Predictive Controller for Turbofan Engine Fuel Control

M. Montazeri-GH, A. Jafari and A. Rasti Jahromi

Mechanical Engineering Department
Iran Science and Technology University

(Received: 02/August/2017 ; Accepted: 21/February/2018)

ABSTRACT

In this paper, design and implementation of model predictive controller for turbofan engine fuel control are proposed. The satisfaction of operational and structural limits of the engine is a controller design challenge. The control system must ensure that the engine operates without any limit violation at all times, i.e. without over-speed of the shaft, compressor stall, combustion chamber blow out and turbine over-temperature. In this regard, a controller is required which can take into account these constraints while obtaining an optimal control input. Therefore, the model predictive control for turbofan engine fuel control using a linear model of the engine at one operating point is designed. The simulation results show that while model predictive control generate optimal control signal, all the constraints are perfectly satisfied. After assuring the valid performance of the controller in computer simulations, the fuel control algorithm is implemented on a hardware framework. For this purpose, the controller algorithm is implemented on a microcontroller and hardware-in-the-loop test is performed. The results of the hardware-in-the-loop simulation indicate the correct implementation of the model predictive controller on the hardware framework.

Keywords: Turbofan Engine, Fuel Control, Model Predictive Control, Linear Model, Hardware-in-the-Loop

۱- استاد (نویسنده پاسخگو): montazeri@iust.ac.ir

۲- کارشناس ارشد: jafari_ali@mecheng.iust.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری: alirasti@iust.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

N_f	سرعت فن، rpm
N_c	سرعت هسته، rpm
N_p	افق پیش‌بینی
N_u	افق کنترل
P_{s3}	فشار استاتیکی خروجی از کمپرسور فشار بالا، bar
r	سیگنال مرجع
SM_{HPC}	حاشیه استال کمپرسور فشار بالا
T_{48}	دمای خروجی از توربین، Kelvin
u	ورودی کنترلی
W_f	دبی سوخت، kg/s
$\frac{W_f}{P_{s3}}$	نسبت سوخت به فشار خروجی کمپرسور فشار بالا، kg/(s*bar)
\hat{y}	خروجی آینده
HIL	تست سخت‌افزار در حلقه
MIL	تست نرم‌افزار در حلقه
علائم یونانی	
λ	تابع وزنی

۱- مقدمه

امروزه در بسیاری از هواپیماهای مسافربری مدرن به دلیل کارایی و قابلیت اطمینان بالای موتورهای توربوفن و همچنین مصرف سوخت کمتر آن‌ها نسبت به سایر موتورهای جت از این موتورها استفاده می‌شود. کنترل موتورهای توربوفن به علت محدودیت‌های عملکردی و ساختاری پارامترهای مختلف مانند سرعت و شتاب دورانی شفت‌ها، دمای ورودی به توربین، حاشیه سرچ کمپرسور و ... اهمیت زیادی دارد [۱-۲].

اصطلاح کنترل پیش‌بین مدل، یک راهبرد کنترل خاص را معین نمی‌کند بلکه محدوده وسیعی از روش‌های کنترل است که به صورت صریح از مدل فرآیند برای به‌دست‌آوردن سیگنال کنترل براساس بهینه‌سازی یک تابع هدف استفاده می‌کند. وجه اشتراک کنترل‌کننده‌های پیش‌بین شامل استفاده صریح از یک مدل فرآیند برای پیش‌بینی خروجی سامانه در زمان‌های آینده است (افق پیش‌بین)، محاسبه سیگنال کنترل براساس کمینه‌سازی یک تابع هدف، استراتژی برگشتی، به طوری که اولین نمونه از سیگنال کنترل محاسبه شده براساس یک افق در تابع هدف، به سامانه اعمال می‌شود. الگوریتم‌های مختلف کنترل پیش‌بین از نظر مدل فرآیند برای

پیش‌بینی، لحاظ کردن نویز و تابع هزینه، باهم اختلاف دارند [۳]. با توجه به مزایای کنترل‌کننده‌های مدل پایه، در این مقاله از کنترل پیش‌بین مدل به دلیل تضمین رعایت همه قیود ورودی و خروجی، سرعت بالا در به‌دست آوردن پاسخ سامانه بدون ایجاد فراجهدش و همچنین محاسبه یک سیگنال کنترل بهینه استفاده شده است. کنترل پیش‌بین مدل از دهه ۱۹۸۰ در صنایع شیمیایی و پالایشگاه‌های نفت به کار می‌رود. به دلیل قابلیت‌های این کنترلر در مواجهه با سیستم‌های دینامیکی مقید و در حضور عدم قطعیت‌ها، در سال‌های اخیر توجه زیاد محققان را برای استفاده در موتورهای توربین‌گاز به خود جلب کرده است [۴ و ۵]. به عنوان نمونه، برونل^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۲ با استفاده از الگوریتم کنترل پیش‌بین غیرخطی به کنترل موتور توربین‌گاز هوایی پرداختند. آنان با استفاده از روش کالمن فیلتر، متغیرهای حالت را در حضور سروصدا و همچنین محدودیت اطلاعات حسگرها تخمین زدند و نشان دادند که روش کنترل پیش‌بین غیرخطی براساس مدل ساده‌شده باعث دستیابی به عملکرد بهتر می‌شود [۶].

دی‌کاسترو^۲ در سال ۲۰۰۷ یک استراتژی کنترل پیش‌بین مدل را برای پاسخ سریع کنترل حلقه بسته توسعه داد که در آن هدف تنظیم لقی توربین و همچنین پیش‌بینی و جلوگیری از برخورد تیغه با بدنه توسط بهینه کردن فاصله بوده است [۷]. ریچر^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۸ بر روی قابلیت پیاده‌سازی این کنترلر و کاهش بار محاسباتی آن کار کردند [۸]. سالورو^۴ و یداوالی^۵ نیز در سال ۲۰۱۳ با استفاده از نرم‌افزار C-MAPSS متعلق به سازمان ناسا، یک کنترل پیش‌بین مدل طراحی کرده و آن را جایگزین کنترلر (تناسبی-انترگرال‌گیر- مشتق‌گیر)^۶ موجود در نرم‌افزار کردند. آنها همچنین عملکرد کنترل پیش‌بین مدل را در حضور عیب در یک نقطه عملکردی بررسی نمودند [۹]. علی‌اکبر غفوری رکن‌آبادی و حجت‌اله حمیدی در سال ۱۳۹۵ کنترل مقید یک توربین گاز صنعتی توان‌پایین را با استفاده از الگوریتم کنترل پیش‌بین مدل انجام دادند [۱۰]. با توجه به مطالعات صورت‌گرفته، تاکنون پیاده‌سازی کنترل پیش‌بین مدل برای موتور توربوفن انجام نشده است.

1- Brunell

2- De Castro

3- Richter

4- Saluru

5- Yedavalli

6- Proportional- Integrator- Derivative (PID)

یا سرعت هسته، هستند. قانون نیوتن برای اینرسی چرخشی هریک از شفت‌ها نوشته می‌شود [۸]:

$$\dot{N}_f = f_1(N_f, N_c, u) \quad (1)$$

$$\dot{N}_c = f_2(N_f, N_c, u) \quad (2)$$

در این جا f_1 و f_2 گشتاور خالص تحویل داده شده توسط توربین فشاربالا و فشارپایین است. بردار u شامل اجزای ورودی کنترل است که در دستگاه تک‌ورودی نشان‌دهنده جریان سوخت است. دینامیک موتور از پیچیدگی زیادی به وجود می‌آید مانند رفتار جریان گاز در کمپرسور و توربین (متأثر از هوای ورودی و همچنین شرایط موتور)، اینرسی شفت، تأخیر در انتقال جریان سوخت، احتراق و رفتار حرارتی موتور. باتوجه به هندسه پیچیده قطعات موتور و همچنین پیچیدگی جریان گاز، عبارات جبری برای f_1 و f_2 در دسترس نیست. ذکر این نکته لازم است که این توابع به شدت وابسته به متغیرهای خارجی مانند سرعت هواپیما و شرایط جوی هستند. با استفاده از بسط تیلور روابط ۱ و ۲ داریم [۶]:

$$\Delta \dot{N}_f = \left. \frac{\partial f_1}{\partial N_f} \right|_o \Delta N_f + \left. \frac{\partial f_1}{\partial N_c} \right|_o \Delta N_c + \left. \frac{\partial f_1}{\partial u_1} \right|_o \Delta u_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \right|_o \Delta u_2 + \dots \quad (3)$$

$$\Delta \dot{N}_c = \left. \frac{\partial f_2}{\partial N_f} \right|_o \Delta N_f + \left. \frac{\partial f_2}{\partial N_c} \right|_o \Delta N_c + \left. \frac{\partial f_2}{\partial u_1} \right|_o \Delta u_1 + \left. \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \right|_o \Delta u_2 + \dots \quad (4)$$

خروجی نیز با فرم $y_i = y_i(N_f, N_c, u)$ ، خطی‌سازی می‌شود:

$$\Delta y_i = \left. \frac{\partial y_i}{\partial N_f} \right|_o \Delta N_f + \left. \frac{\partial y_i}{\partial N_c} \right|_o \Delta N_c + \left. \frac{\partial y_i}{\partial u_1} \right|_o \Delta u_1 + \left. \frac{\partial y_i}{\partial u_2} \right|_o \Delta u_2 + \dots \quad (5)$$

بیان این مدل در فرم استاندارد فضای حالت به صورت زیر است:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (6)$$

$$y = Cx + Du \quad (7)$$

زمانی که $x^T = [\Delta N_f \quad \Delta N_c]$ و $y^T = [\Delta y_1 \quad \Delta y_2 \dots]$ باشند، ماتریس‌های A, B, C, D به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$A = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial N_f} \right|_o & \left. \frac{\partial f_1}{\partial N_c} \right|_o \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial N_f} \right|_o & \left. \frac{\partial f_2}{\partial N_c} \right|_o \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial u_1} \right|_o & \left. \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \right|_o & \dots \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial u_1} \right|_o & \left. \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \right|_o & \dots \end{bmatrix} \quad (8)$$

در این مقاله، طراحی و پیاده‌سازی کنترل پیش‌بین مدل برای کنترل سوخت موتور توربوپن ارائه شده است. بدین منظور ابتدا الگوریتم کنترل پیش‌بین مدل در حضور قیود مختلف برای دستگاه چند ورودی و چند خروجی، در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی می‌شود. سپس به همراه مدل خطی فضای حالت در دسترس برای موتور توربوپن، سامانه کنترل سوخت موتور شبیه‌سازی می‌گردد. در پایان نیز الگوریتم طراحی شده به صورت سخت‌افزاری پیاده‌سازی می‌شود و نتایج حاصل از تست سخت‌افزار در حلقه^۱ با نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری مقایسه می‌شود.

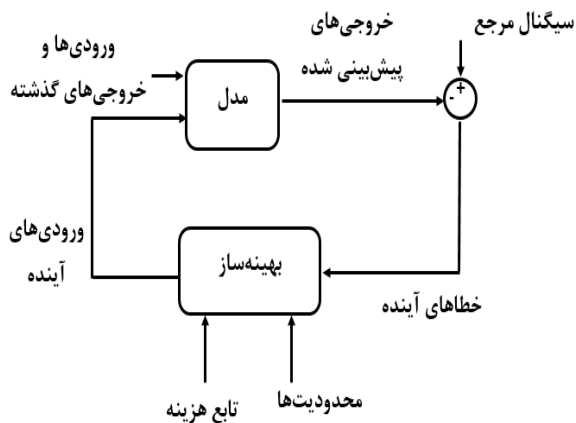
۲- مدل موتور توربوپن

موتور مورد استفاده در این تحقیق، یک موتور توربوپن دومحوره غیرمخلوط شونده است که مناسب برای هواپیماها تجاری متوسط می‌باشد و دارای مشخصات مطابق جدول ۱ است.

جدول (۱): مشخصات نقطه طراحی موتور توربوپن.

ردیف	پارامتر عملکردی	مقدار در نقطه طراحی
۱	نسبت کنارگذر	۵/۵
۲	نسبت فشار کلی موتور	۳۴
۳	بیشینه تراست تولیدی (KN)	۱۳۴
۴	دبی هوای ورودی به موتور (Kg/s)	۴۲۷
۷	سرعت دورانی محور فشار پایین (RPM)	۵۰۰۰
۸	سرعت دورانی محور فشار بالا (RPM)	۱۴۴۶۰

دینامیک موتور توربوپن به دلیل اینرسی چرخشی، نقش بسیار مهمی را در تعیین رفتار گذرای موتور دارد. درحقیقت سرعت شفت موتور توربوپن به طور مستقیم با دبی جرمی عبوری از موتور و همچنین تراست که خروجی اصلی است، مرتبط است. خروجی‌های مدل دینامیکی می‌توانند شامل دمای توربین، نسبت فشار، حاشیه سرج کمپرسور و ... باشند که متغیرهای حالت آن سرعت زاویه‌ای شفت بین کمپرسور فشارپایین و توربین فشارپایین یا سرعت فن و همچنین سرعت زاویه‌ای شفت بین کمپرسور فشاربالا و توربین فشاربالا



شکل (۲): ساختار پایه کنترل پیش‌بین مدل [۳].

۳-۱- مراحل طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین مدل

به‌طور کلی مراحل طراحی کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مدل را می‌توان متشکل از چهار مرحله دانست:

۱- تعیین مدلی برای سامانه تحت کنترل، برای پیش‌بینی خروجی‌های آینده سامانه و استفاده از آن‌ها در بهینه‌سازی تابع هدف.

۲- تعیین تابع هدف مناسب که با بهینه‌سازی آن سیگنال کنترلی مناسب به‌دست می‌آید.

۳- تعیین یک مسیر مرجع مناسب برای هدایت خروجی به مقدار دلخواه.

۴- تعیین روش بهینه‌سازی تابع هدف.

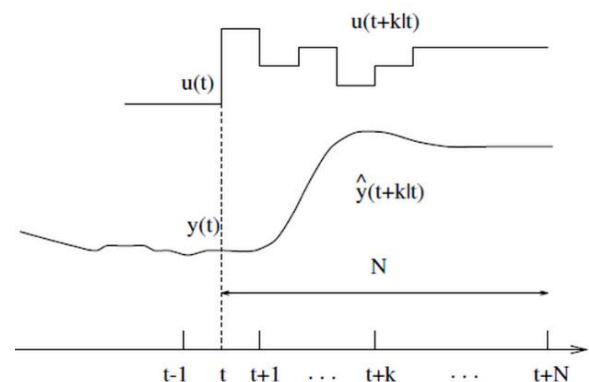
۴- مدل و پیش‌بینی خروجی

باتوجه به شکل ۲، بلوک اول وظیفه پیش‌بینی خروجی در افق موردنظر براساس مدلی که برای فرآیند در نظر گرفته می‌شود، است. فرآیند مدل نقش مهمی را در کنترلر ایفا می‌کند. مدل انتخاب‌شده باید توانایی جذب فرآیند دینامیکی برای پیش‌بینی خروجی‌های آینده را داشته باشد و همچنین به سادگی قابل اجرا و درک باشد. از آنجایی که کنترل پیش‌بین مدل یک روش منحصربه‌فرد نیست، انواع بسیاری از مدل‌های مورد استفاده در فرمولاسیون‌های مختلف وجود دارد. یکی از معروف‌ترین مدل‌های مورد استفاده، مدل فضای حالت است که محاسبات کنترلر آن حتی برای موارد چندورودی و چندخروجی بسیار ساده است و استفاده آن در تحقیقات دانشگاهی، گسترده‌تر است. توصیف فضای حالت برای یک بیان ساده‌تر از معیار پایداری و مقاوم بودن، مناسب‌تر است [۳].

$$C = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial y_1}{\partial N_f} \right|_0 & \left. \frac{\partial y_1}{\partial N_c} \right|_0 & \dots \\ \left. \frac{\partial y_2}{\partial N_f} \right|_0 & \left. \frac{\partial y_2}{\partial N_c} \right|_0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial y_1}{\partial u_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial y_1}{\partial u_2} \right|_0 & \dots \\ \left. \frac{\partial y_2}{\partial u_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial y_2}{\partial u_2} \right|_0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (9)$$

۳- استراتژی کنترل پیش‌بین مدل

استراتژی کنترل در کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مدل مطابق شکل ۱ است. همان‌طور که مشخص است، هدف کنترل پیش‌بین مدل دنبال کردن مسیر مرجع تعریف‌شده برای سامانه، توسط خروجی‌ها در افق پیش‌بینی تعریف شده برای آن می‌باشد. به‌همین منظور با توجه به شکل ۲ به کمک اطلاعات مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های قبلی سامانه، خروجی‌های آینده پیش‌بینی شده و به کمک این اطلاعات جدید و نیز با توجه به مسیر مرجع، اغتشاشات و استراتژی کنترلی، در نهایت سیگنالی از ورودی‌های مناسب در یک افق تعریف‌شده کنترل برای عملکرد صحیح سامانه محاسبه می‌شود [۳]. اگر اغتشاشات وجود نداشته باشد و همچنین مسأله بهینه‌سازی بتواند برای افق‌های نامحدود حل شود، سیگنال ورودی به‌دست‌آمده می‌تواند برای تمام زمان‌های بعدی به سامانه اعمال گردد. این مسأله در حالت کلی ممکن نیست، به‌علت اینکه در نتیجه وجود اغتشاشات و عدم تطابق مدل فرآیند، رفتار سامانه از رفتار پیش‌بینی شده متفاوت است و همچنین در عمل نمی‌توان افق‌ها را نامحدود در نظر گرفت. بنابراین، ورودی کنترلی حلقه باز به‌دست‌آمده از حل مسأله بهینه‌سازی تنها تا زمان در دسترس قرارگرفتن اندازه‌گیری‌های بعدی به سامانه اعمال می‌گردد [۳].



شکل (۱): استراتژی کنترل پیش‌بین مدل [۳].

معیارهای مختلفی در انتخاب تابع هدف می‌توان در نظر گرفت از جمله: خطای خروجی از مقدار مطلوب، میزان افزایش ورودی، اندازه سیگنال ورودی و خروجی، خطای ورودی از ورودی محاسبه‌شده در حالت ماندگار و انحراف محدودیت‌های خروجی و ورودی [۱۱].

هدف کلی تابع هدف این است که خروجی آینده بر روی یک افق مشخص، یک سیگنال مشخص مرجع (r) را دنبال کند و در عین حال تغییرات ورودی کنترلی لازم برای انجام این کار باید جریمه شود. بیان کلی برای چنین تابع هدفی به صورت زیر است:

$$J = \Delta^T \hat{u} [H^T H + \lambda I] \Delta \hat{u} + 2[x_a^T P^T H - r^T H] \Delta \hat{u} \quad (19)$$

که در آن، بردار حالت افزوده‌شده در هر لحظه است. یکی از مزایای کنترل پیش‌بین مدل این است که اگر تغییرات آینده مرجع از پیش معلوم باشد، سامانه می‌تواند پیش از آن که تغییری در مرجع رخ دهد، از خود عکس‌العمل نشان داده و بنابراین، تأثیرات تأخیر را در پاسخ پروسه از بین ببرد. حتی اگر مرجع ثابت باشد، می‌توان با دانستن لحظه‌ای که مقدار آن تغییر می‌کند به بهبود قابل ملاحظه‌ای در کارایی کنترل‌کننده دست یافت.

۶- تعیین ورودی کنترلی بهینه

باتوجه به شکل ۲، بلوک تعیین ورودی کنترلی بهینه، وظیفه تعیین ورودی کنترلی بهینه را در افق کنترل معین براساس قانون کنترلی تعریف‌شده و خروجی‌های پیش‌بینی شده، دارد. در واقع مهم‌ترین پارامترهای کنترلی در این قسمت قابل تغییر و تنظیم هستند. بعد از انتخاب مدل مناسب فرآیند در بلوک پیش‌بینی، خروجی‌های آینده سیستم محاسبه‌شده و در اختیار این بلوک قرار می‌گیرند. با توجه به یک مسیر مرجع که می‌تواند مسیری دلخواه، نقطه تنظیم و یا هر راهبرد مناسب دیگر باشد، ورودی مناسب کنترلی با توجه به حل یک مسئله بهینه‌سازی به دست می‌آید. با محاسبه سیگنال ورودی مناسب در افق کنترل، می‌توان ورودی یک یا چندگام جلوتر یا مجموعی از آن‌ها را براساس یک سری توابع پایه محاسبه کرد و به‌عنوان ورودی اعمالی به سیستم در نظر گرفت. عملیات محاسبه دنباله ورودی بهینه عمدتاً با تعریف یک تابع هدف مربعی انجام می‌پذیرد [۳]. با استفاده از معادله ۱۹ و مشتق گرفتن نسبت به تغییرات ورودی کنترلی، می‌توان تغییرات ورودی کنترلی بهینه را به صورت زیر محاسبه کرد:

در این مقاله از یک مدل خطی گسسته فضای حالت، برای موتور توربوفن و همچنین مدل مرجع کنترل پیش‌بین مدل استفاده شده است. یک دستگاه گسسته خطی زمان ثابت را در فرم فضای حالت در نظر بگیرید [۹]:

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k \quad (10)$$

$$y_k = C_d x_k + D_d u_k \quad (11)$$

جهت ایجاد عمل انتگرال‌گیر در قانون کنترلی و همچنین آسان کردن مدل‌سازی، ورودی کنترلی به شکل زیر فرض می‌شود.

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k \quad (12)$$

که در آن، تغییرات سوخت بهینه‌شده، به وسیله قانون کنترل پیش‌بین مدل است. با استفاده از معادله ۱۲ و تعریف بردار متغیرهای حالت جدید، به صورت معادله ۱۳، معادلات فضای حالت جدید به فرم نشان داده شده در معادلات ۱۴ و ۱۵ تبدیل می‌شود:

$$x_a = \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ u_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_d & B_d \\ 0 & I_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_d \\ I_m \end{bmatrix} \Delta u_k \quad (14)$$

$$y_k = \begin{bmatrix} C_d & D_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix} + D_d \Delta u_k \quad (15)$$

با توسعه معادلات ۱۰ و ۱۱، به صورت متوالی در یک افق پیش‌بینی، معادلات خروجی پیش‌بینی شده سیستم به فرم زیر به دست می‌آیند:

$$\hat{y} = P x(k) + H \hat{u} \quad (16)$$

که در آن، ماتریس‌های P و H به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \begin{bmatrix} C_d A_d \\ C_d A_d^2 \\ \vdots \\ C_d A_d^{N_p} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$H = \begin{bmatrix} C_d B_d & D_d & 0 & \dots \\ C_d A_d B_d & C_d B_d & D_d & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_d A_d^{N_p} B_d & C_d A_d^{N_p-2} B_d & C_d A_d^{N_p-3} B_d & \dots \end{bmatrix} \quad (18)$$

۵- تابع هدف

الگوریتم‌های مختلف کنترل پیش‌بین مدل، توابع هدف مختلفی را برای به دست آوردن قانون کنترل پیشنهاد کردند.

۸- شبیه‌سازی کامپیوتری کنترل پیش‌بین مدل

در این مقاله دینامیک موتور با استفاده از روش مدل‌سازی ترمودینامیکی، به دست آمده و در یک نقطه عملکردی ($N_1 = 4700 \text{ (rpm)}$)، خطی‌سازی شده است [۱۲]. ماتریس‌های مدل خطی‌سازی شده موتور به صورت زیر هستند:

$$A = \begin{bmatrix} -1.91 & 0.1905 \\ -1.916 & -0.8703 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 2401 \\ 5379 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0.01456 & -0.00216 \\ 0.008618 & 9.061 \times 10^{-7} \\ -0.1017 & 0.00515 \\ -1.036 \times 10^{-5} & -2.457 \times 10^{-7} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -22.5 \\ 6.085 \\ 449.7 \\ 0.02567 \end{bmatrix}$$

مدل موتور به دست آمده، در نرم‌افزار سیمولینک شبیه‌سازی شده و با استفاده از کنترل پیش‌بین، شبیه‌سازی کنترل سوخت موتور توربوفن انجام شده است. با توجه به شکل ۳، ورودی مورد نظر به موتور توربوفن، دبی سوخت می‌باشد و خروجی‌های موتور به ترتیب سرعت فن، سرعت هسته، حاشیه استال کمپرسور فشار بالا، فشار استاتیکی خروجی از کمپرسور فشار بالا، دما خروجی از توربین، نسبت سوخت به فشار خروجی کمپرسور فشار بالا هستند.

در طراحی کنترل‌کننده، به دلیل این که اندازه‌گیری تراست به طور عملی امکان‌پذیر نیست، از پارامتر معادل تراست یعنی سرعت دورانی فن استفاده می‌شود. در این تحقیق نیز تنها، سرعت دورانی فن (N_1) به عنوان پارامتر کنترلی در نظر گرفته شده است و بقیه خروجی‌های موتور به عنوان خروجی مقید در نظر گرفته شده‌اند. محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای این خروجی‌ها مطابق جدول ۲ می‌باشند.

جهت شبیه‌سازی رفتار دینامیکی موتور و کنترلر، فرمان ورودی به صورت ورودی پله مطابق شکل ۴ مدل می‌شود تا بحرانی‌ترین حالت تغییرات فرمان را شبیه‌سازی کند. با توجه به ثابت‌زمانی سیستم که حدود یک ثانیه می‌باشد، انتخاب بازه‌های ۵ ثانیه‌ای جهت رسیدن پاسخ کنترلر به مقدار پاسخ نهایی (دنبال کردن مسیر مرجع)، برای ورودی پله کافی می‌باشد. همچنین پارامترهای کنترل پیش‌بین مدل به صورت نشان داده شده در جدول ۳ در نظر گرفته شده است:

$$\Delta u = (H^T H + \lambda I)^{-1} H^T (r - P x_a) \quad (20)$$

۷- محدودیت‌ها

در عمل همه فرآیندها دارای محدودیت‌هایی هستند. محرک‌ها یک حوزه کاری محدود دارند که با موقعیت‌های کاملاً باز و بسته محدود می‌شوند و همچنین نرخ جابه‌جایی معینی برای محرک‌ها و شیرها وجود دارد که به وسیله نرخ پاسخ دینامیکی آن‌ها محدود می‌گردد. دلایل ساختاری ادوات و یا عوامل ایمنی و محیطی و حتی میدان عمل حسگرها می‌توانند محدودیت‌هایی را بر روی متغیرهای پروسه مثلاً سطح درون تانک‌ها، جریان داخل لوله‌ها و یا حداکثر فشار و دماهای مجاز، ایجاد نماید. به علاوه شرایط عملیاتی به طور طبیعی به وسیله محل تلاقی محدودیت‌های معین، تعریف می‌شوند (به دلایل اقتصادی) به گونه‌ای که سیستم کنترل نزدیک به مرزها عمل خواهد کرد. محدودیت‌های نرمال در اندازه و نرخ تغییرات سیگنال کنترلی و محدودیت‌های خروجی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$u_{\min} \leq u(k+i) \leq u_{\max} \quad i = 0, 1, \dots, N_{u-1} \quad (21)$$

$$y_{\min} \leq y(k+i) \leq y_{\max} \quad i = 0, 1, \dots, N_p \quad (22)$$

با توسعه معادله ۲۱، محدودیت‌های ورودی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$C_c \Delta u \leq L(u_{\max} - u(k-1)) \quad (23)$$

$$-C_c \Delta u \leq -L(u_{\min} - u(k-1)) \quad (24)$$

که در آن، ماتریس‌های C_c و L به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$C_c = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & \dots \\ I & I & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I & I & I & \dots \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} I \\ I \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} \quad (25)$$

با توسعه معادله ۲۲ و به کمک معادله ۱۶، محدودیت‌های خروجی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

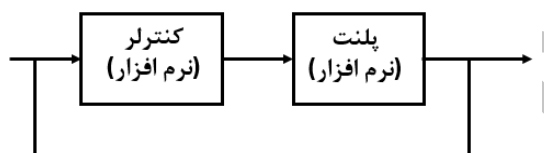
$$H \Delta u \leq \begin{bmatrix} y_{\max} \\ y_{\max} \\ \vdots \\ y_{\max} \end{bmatrix} - P x_a \quad (26)$$

$$-H \Delta u \leq -\begin{bmatrix} y_{\min} \\ y_{\min} \\ \vdots \\ y_{\min} \end{bmatrix} + P x_a \quad (27)$$

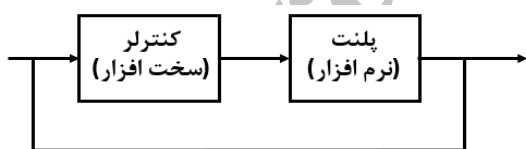
۹- پیاده‌سازی سخت‌افزاری کنترل پیش‌بین مدل

یکی از روش‌های شبیه‌سازی زمان واقعی، شبیه‌سازی نرم‌افزار در حلقه^۱ می‌باشد که در آن تمام زیرسیستم‌ها، یعنی مدل موتور و کنترلر به صورت نرم‌افزاری مدل‌سازی می‌شوند. شماتیک کلی این روش در شکل ۵ مشاهده می‌شود. علاوه بر این روش در شبیه‌سازی زمان واقعی، شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه که یکی از روش‌های پرکاربرد در آزمایش سیستم‌های کنترل می‌باشد نیز وجود دارد. این روش در حدود سال ۱۹۹۰ به عنوان روشی برای کاهش زمان و هزینه تولید اجزاء الکترونیکی و مکانیکی پیشنهاد شده است. در این روش مطابق شکل ۶، برخی از زیرسیستم‌ها مانند مدل موتور، در نرم‌افزار مدل‌سازی می‌شوند و برخی دیگر مانند کنترلر، به صورت سخت‌افزاری پیاده‌سازی می‌شوند.

جهت انجام تست سخت‌افزار در حلقه از روش‌های ارتباطی مختلفی مانند ارتباط آنالوگ، ارتباط دیجیتال و ارتباط سریال بین سخت‌افزار و کامپیوتر استفاده می‌شود [۱۴-۱۵].

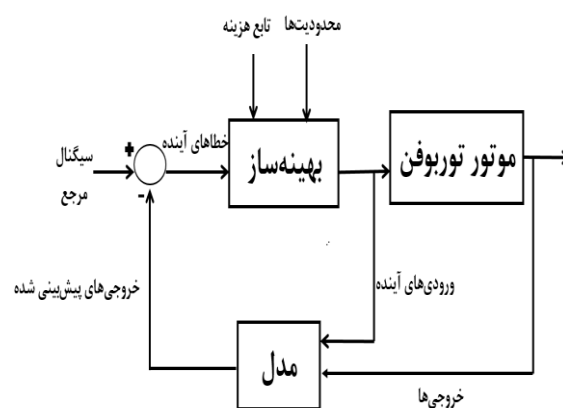


شکل (۵): شماتیک کلی شبیه‌سازی نرم‌افزار در حلقه [۱۶].

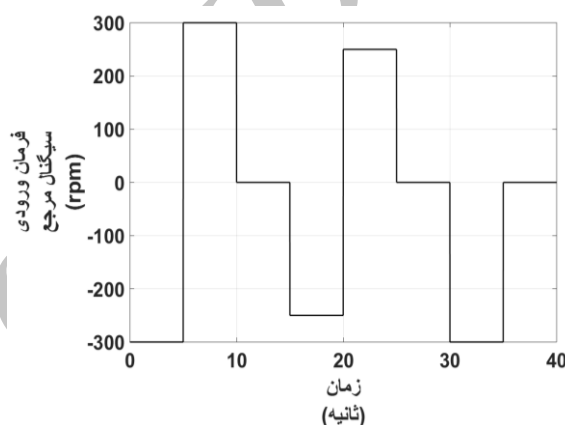


شکل (۶): شماتیک کلی شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه [۱۶].

برای پیاده‌سازی کنترل پیش‌بین مدل طراحی شده جهت کنترل سوخت موتور توربو فن، از یک آردوینو^۲ مدل دوو^۳ که دارای میکروکنترلر AT91SAM3X8E می‌باشد، استفاده شده است. مشخصات این سخت‌افزار در جدول ۴ آورده شده است. آردوینوها، بردهای الکترونیکی کوچکی هستند که از میکروکنترلرهای AVR ساخته شده‌اند. این بردهای الکترونیکی



شکل (۳): ساختار کنترل سوخت موتور توربو فن [۱۳].



شکل (۴): فرمان ورودی.

جدول (۲): قیدهای مربوط به خروجی‌های مقید موتور.

قید	پارامتر	مقدار بیشینه	مقدار کمینه
۱	$\Delta N_2 (rpm)$	۵۵۰	-
۲	$\Delta S_m HPC (%)$	-	-۲/۷
۳	$\Delta P_s 3 (bar)$	۴/۱	-
۴	$\Delta T_{48} (K)$	۶۵	-
۵	$\Delta \frac{W_f}{P_s} (\frac{Kg}{s * bar})$	-	-۰/۰۰۳

جدول (۳): پارامترهای کنترل پیش‌بین مدل.

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	N_p	۷
۲	N_u	۳
۳	λ	۰/۰۱

1- Model in the loop (MIL)

2- Arduino

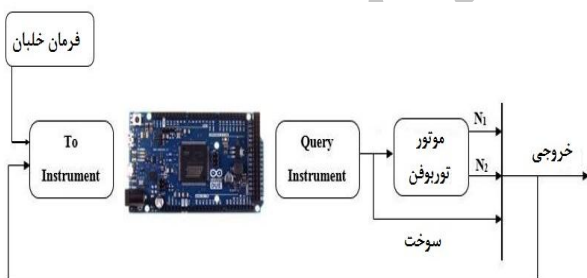
3- DUE

از یک‌سری صفر و یک تشکیل می‌شوند، باید از قوانین مشترکی مانند سرعت انتقال داده‌ها، طول بیت داده‌ها و ... برای ارسال و دریافت داده‌ها بین فرستنده و گیرنده، استفاده کرد [۱۷]. قوانین استفاده‌شده در این مقاله جهت برقراری ارتباط سریال، در جدول ۵ آورده شده‌اند.

جدول (۵): پارامترهای ارتباط سریال.

ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
۱	سرعت انتقال داده	۹۶۰۰	Bit/s
۲	طول بیت داده	۸	-
۳	بیت آغاز	۰	-
۴	بیت پایان	۱	-
۵	بیت توازن	بدون بیت	-

بلوک دیاگرام موردنظر جهت انجام تست سخت‌افزار در حلقه در شکل ۸ آورده شده است. مدل موتور توربو فن به دست آمده، در نرم‌افزار سیمولینک شبیه‌سازی شده و پارامترهای لازم جهت محاسبه سوخت، از مدل موتور به دست آمده و همراه با فرمان ورودی توسط بلوک موردنظر، از طریق پورت سریال به آردوینو ارسال می‌شود. آردوینو، پس از محاسبه مقدار سوخت لازم به کمک الگوریتم کنترل پیش‌بین مدل، خروجی را به سیمولینک ارسال می‌کند.



شکل (۸): نمودار بلوکی برای پیاده‌سازی سخت‌افزار در حلقه [۱۸].

۹- نتایج و بحث

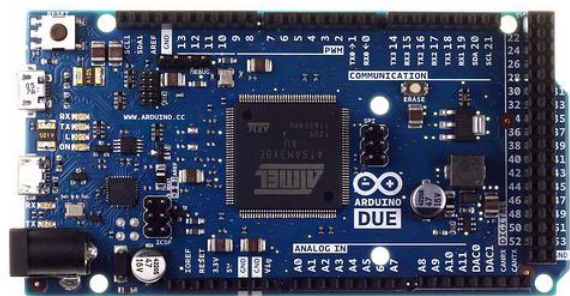
در این قسمت نتایج حاصل از پیاده‌سازی سخت‌افزار در حلقه کنترل پیش‌بین طراحی شده بر روی موتور ارائه می‌گردد و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی کامپیوتری کنترلر، مقایسه می‌شوند. فرمان ورودی به عنوان مسیر مرجع

از دو قسمت تشکیل شده‌اند که عبارتند از: قسمت میکروکنترلر که پردازش داده‌های ورودی و خروجی را توسط الگوریتم کنترل پیش‌بین مدل انجام می‌دهد، قسمت مبدل USB به سریال که داده‌های ورودی را دریافت و داده‌های خروجی را از طریق پورت سریال ارسال می‌کند. شکل ۷ برد الکترونیکی استفاده‌شده در این مقاله جهت انجام تست سخت‌افزار در حلقه را نشان می‌دهد.

پارامترهای مهم موتور توربو فن مانند سرعت فن و سرعت هسته که برای تعیین سوخت مورد نیاز هستند توسط درگاه سریال، از طریق USB به برد الکترونیکی ارسال می‌شوند و میکروکنترلر به کمک الگوریتم کنترل پیش‌بین مدل پیاده‌شده بر روی آن، مقدار سوخت را محاسبه می‌کند و آن را به صورت خروجی و از طریق درگاه سریال به کامپیوتر ارسال می‌کند.

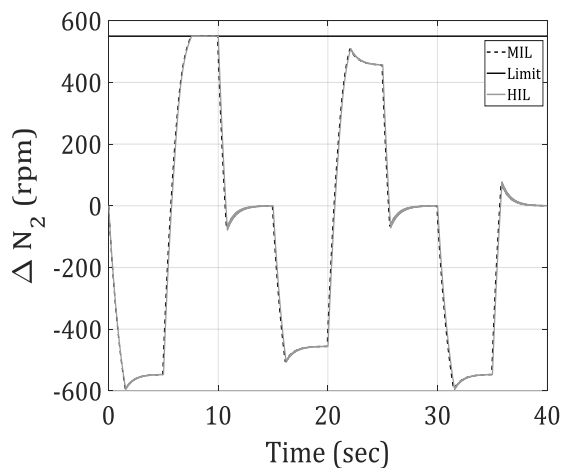
جدول (۴): مشخصات آردوینو دوو.

ردیف	مشخصه	مقدار
۱	ولتاژ کاری	۳٫۳۷
۲	ولتاژ ورودی	۶-۱۶۷
۳	تعداد ورودی - خروجی دیجیتال	۵۴
۴	تعداد ورودی آنالوگ	۱۲
۵	تعداد خروجی آنالوگ	۲
۶	حافظه	۵۱۲ KB
۷	سرعت پردازنده	۸۴ MHz



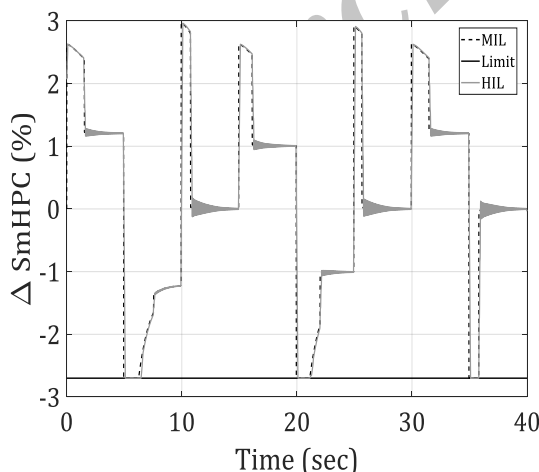
شکل (۷): برد آردوینو دوو.

در برقراری ارتباط سریال بین کامپیوتر و سخت‌افزار مورد نظر، بیت‌ها به صورت سری و پشت سر هم از طریق یک سیم ارسال می‌شوند. در روش انتقال سریال، به دلیل این که داده‌ها



شکل (۱۰): تغییرات سرعت هسته با زمان.

شکل ۱۱ بیانگر تغییرات حاشیه استال کمپرسور فشار بالا نسبت به زمان است. حاشیه استال نیز مانند سرعت هسته، دینامیک سریعی دارد و نسبت به تغییرات ناگهانی سوخت از خود عکس‌العمل نشان داده است. در کمپرسور فشار بالا احتمال عبور از خط سرچ در شرایط شتاب‌گیری ناگهانی وجود دارد. به‌علاوه، بیشینه عملکرد موتور در نزدیکی خط سرچ کمپرسور اتفاق می‌افتد. اما همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، کنترل پیش‌بین طراحی شده با رعایت قید سرچ کمپرسور و تضمین رد نشدن از آن باعث شده است که موتور در نزدیک‌ترین شرایط به خط سرچ که بیشینه عملکرد خود را دارد، به‌طور ایمن کار کند.

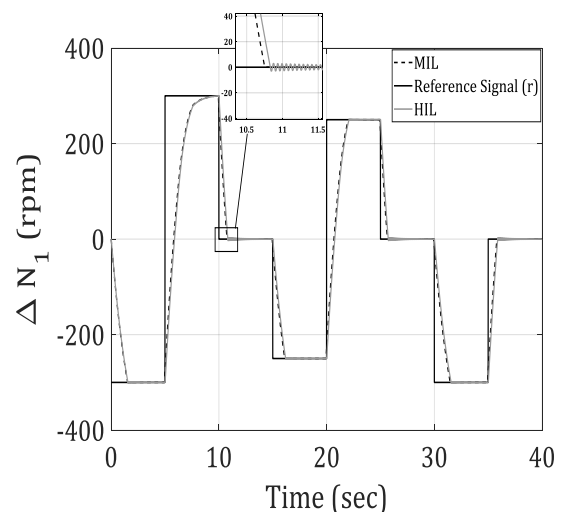


شکل (۱۱): تغییرات حاشیه استال کمپرسور فشار بالا با زمان.

شکل ۱۲ نشان‌دهنده تغییرات فشار خروجی از کمپرسور فشار بالا با زمان است. با کاهش سوخت موتور، فشار کاهش می‌یابد و با افزایش آن فشار افزایش می‌یابد. دینامیک فشار به

پله، به‌صورت سریع و ناگهانی به موتور اعمال گردیده تا از عملکرد درست موتور توسط کنترلر اطمینان حاصل شود.

شکل ۹ نشان‌دهنده تغییرات سرعت فن نسبت به زمان است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کنترل پیش‌بین مدل طراحی شده در رسیدن به پاسخ نهایی که همان دنبال کردن مسیر مرجع مورد نظر است، سرعت بالایی داشته است. همچنین نتیجه حاصل از پیاده‌سازی سخت‌افزار در حلقه، نشان‌دهنده درستی طراحی و پیاده‌سازی کنترلر بر روی سخت‌افزار مورد نظر است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، تست سخت‌افزار در حلقه نسبت به تست نرم‌افزار در حلقه، دارای تأخیر بسیار اندکی است. این تأخیر حدود ۰/۰۱ ثانیه می‌باشد که باتوجه به زمان نمونه‌برداری سیستم که ۰/۰۱ ثانیه، این تأخیر به اندازه زمان نمونه‌برداری می‌باشد. این تأخیر با واقعیت نیز سازگار است زیرا در عمل تمام سیستم‌ها دارای تأخیر اندکی هستند. همچنین در نمودار حاصل از تست سخت‌افزار در حلقه، سیستم دچار فرافشش اندکی شده است که مقدار فرافشش آن برابر ۰/۴ درصد است.

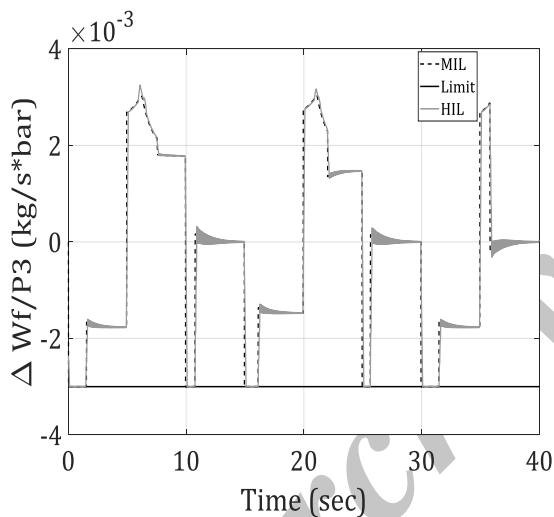


شکل (۹): تغییرات سرعت فن با زمان.

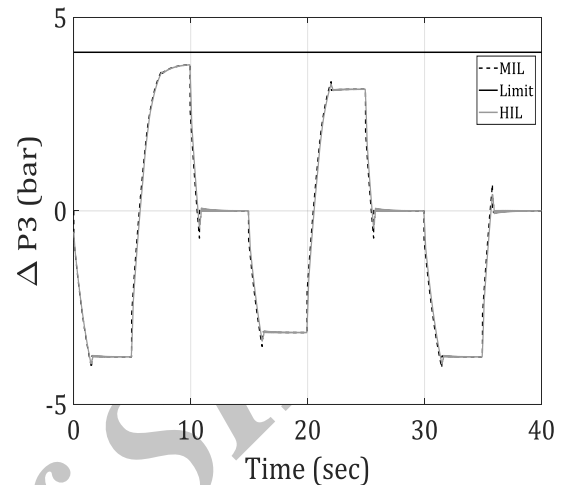
شکل ۱۰ نشان‌دهنده تغییرات سرعت هسته با زمان است. باتوجه به شکل، با کاهش سوخت موتور، سرعت هسته کم شده و با افزایش آن سرعت هسته زیاد شده است. در هنگام تغییر ناگهانی سوخت، سرعت هسته به‌دلیل دینامیک سریع آن، از خود عکس‌العمل نشان داده و باعث ایجاد نقاط پیک در نمودار شده است اما با این وجود کنترل پیش‌بین طراحی شده به‌خوبی عمل کرده و رد نکردن قیود را تضمین کرده است.

را توسط کنترل کردن پارامتر نسبت دبی سوخت به فشار استاتیکی خروجی از کمپرسور فشار بالا برآورده کرد. شکل ۱۴ نشان‌دهنده تغییرات نسبت سوخت به فشار خروجی از کمپرسور با زمان است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در شرایط شتاب‌گیری منفی یا به عبارت دیگر کاهش سرعت که احتمال خاموشی شعله وجود دارد کنترل‌کننده طراحی شده رد نشدن این پارامتر را از قید تعیین شده تضمین نموده است.

در انتها شکل ۱۵ نیز بیانگر تغییرات سوخت موتور توربوفن یا پارامتر کنترلی مورد استفاده نسبت به زمان است. با توجه به شکل، سوخت ورودی به موتور توربوفن در محدوده قابل قبولی قرار گرفته است و همچنین با توجه به ویژگی کنترل پیش‌بین مدل سیگنال سوخت به دست آمده یک سیگنال سوخت بهینه نیز می‌باشد.



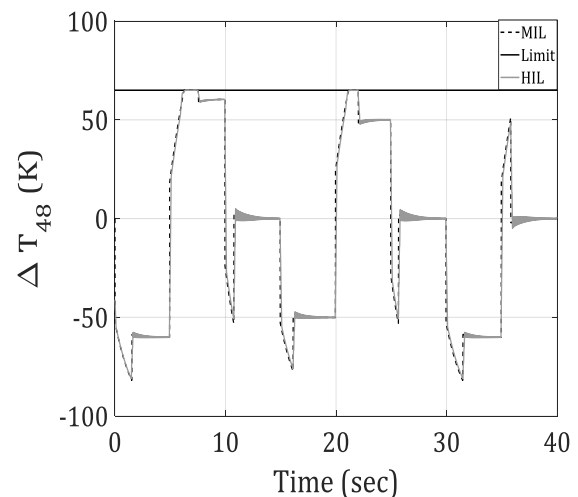
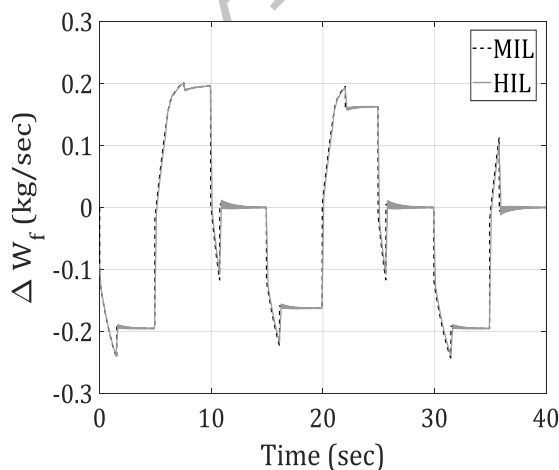
اندازه دینامیک دما سریع نیست و لذا فراجهی در پاسخ آن وجود ندارد. در عین حال کنترل پیش‌بین طراحی شده، قید بیشینه فشار خروجی از کمپرسور را نیز رعایت نموده است.



شکل (۱۲): تغییرات فشار استاتیکی خروجی از کمپرسور فشار بالا با زمان.

شکل ۱۳ بیانگر تغییرات دمای خروجی از توربین نسبت به زمان است. دمای خروجی از توربین نسبت به فشار خروجی از کمپرسور دارای دینامیک سریع‌تری است و به همین دلیل پاسخ آن با یک فراجهی همراه است. اما همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، کنترل‌کننده طراحی شده مانع از فرارفت دمای خروجی از توربین از مقدار مجاز خود شده است.

شکل (۱۴): تغییرات نسبت سوخت به فشار کمپرسور با زمان.



شکل (۱۳): تغییرات دمای خروجی از توربین فشار بالا با زمان.

شکل (۱۵): تغییرات سوخت با زمان.

یکی دیگر از قیودی که در موتور باید رعایت شود قید خاموشی شعله در شرایط استاتیکی است که می‌توان این قید

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی و پیاده‌سازی کنترل پیش‌بین مدل برای کنترل سوخت موتور توربوپن انجام شد. بدین‌منظور ابتدا الگوریتم کنترل پیش‌بین مدل در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و سپس با استفاده از مدل خطی‌سازی شده موتور توربوپن، کنترلر پیش‌بین مدل برای کنترل سوخت موتور طراحی شد. پس از آن الگوریتم کنترلر طراحی‌شده در سخت‌افزار آردوینو پیاده‌سازی شد و با استفاده از ارتباط سریال، تست سخت‌افزار در حلقه برای کنترل سوخت موتور توربوپن انجام شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده کنترلر پیش‌بین طراحی‌شده رعایت محدودیت پارامترهای مختلف موتور مانند سرعت دورانی، دمای ورودی به توربین و حاشیه سرج کمپرسور را تضمین می‌کند درعین‌حال، که بیشینه عملکرد موتور نیز حاصل می‌شود و همچنین کنترلر طراحی‌شده دارای سرعت پاسخ بالا در ضمن عدم به‌وجود آمدن فراجاهش است. همچنین نتایج به‌دست آمده از تست سخت‌افزار در حلقه، عملکرد صحیح کنترلر را از نظر طراحی و نیز پیاده‌سازی نشان می‌دهد.

۱۱- مراجع

- DeCastro, J. A. "Rate-Based Model Predictive Control of Turbofan Engine Clearance", *J. Propulsion and Power*, Vol. 23, No. 4, pp. 804-813, 2007.
- Richter, H., Singaraju, A. V., and Litt, J. S. "Multiplexed Predictive Control of a Large Commercial Turbofan Engine", *J. Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 31, No. 2, pp. 273-281, 2008.
- Saluru, D. C., Yedavalli, R. K., and Belapurkar, R. K. "Active Fault Tolerant Model Predictive Control of a Turbofan Engine Using C-MAPSS40k"; ASME 5th Annual Dynamic Systems and Control Conf. joint with the JSME 11th Motion and Vibration Conf., Fort Lauderdale, Florida, USA, 2012.
- Roknabadi, A. A. G. "Constrained Control of a Low-Power Industrial Gas Turbine Based on Predictive Model"; Proc. of 1ST Int. Conf. on Advances Research on Electrical and Computer Eng., Tehran, Iran, 2016 (In Persian).
- Richter, H. "Advanced Control of Turbofan Engines", Springer Science & Business Media, USA, 2011.
- Montazeri-GH, M., and Rasti, A. "Modeling and Performance Analysis of a Two-Spool Turbofan Engine in Off-Design Conditions"; Proc. of 4th National Conf. on Gas Turbines, Tehran, Iran, 2015 (In Persian).
- Sá, H., Neto, M., Meggiolaro, M., and Ferreira, A. "Fuzzy Shared Semi-Autonomous Control System for Military Vehicles", SAE Technical Paper No. 2015-36-0270, 2015.
- Fathy, H. K., Filipi, Z. S., Hagen, J., and Stein, J. L. "Review of Hardware-in-the-Loop Simulation and its Prospects in the Automotive Area"; Proc. of SPIE, Ann Arbor, Michigan, 2006.
- Frangos, C. "Control System Analysis of a Hardware-in-the-Loop Simulation", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 666-669, 1990.
- Isermann, R., Schaffnit, J., and Sinsel, S. "Hardware-in-the-loop Simulation for the Design And Testing of Engine-Control Systems", Control Eng. Practice, Vol. 7, No. 5, pp. 643-653. 1999.
- Rebeschies, S. "MIRCOS-Microcontroller-Based Real Time Control System Toolbox for Use with Matlab/Simulink"; Proc. of the IEEE Int. Symp. on Computer Aided Control System Design, Kohala Coast, HI, USA, 1999.
- Lu, P., and Geng, Q. "Real-Time Simulation System for UAV Based on Matlab/Simulink"; IEEE 2nd Int. Conf. on Computing, Control and Industrial Eng. (CCIE), Wuhan, China, 2011.
- Jaw, L.C., and Mattingly, J.D. "Aircraft Engine Controls: Design, System Analysis, and Health Monitoring", American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- Linke-Diesinger, A. "Systems of Commercial Turbofan Engines: An Introduction to Systems Functions", Springer Science & Business Media, 2008.
- Camacho, E.F., and Bordons, C. "Model Predictive Control", 2nd ed., Springer Science & Business Media, London, 2007.
- Martin-Sanchez, J.M., and Rodellar, J. "Adaptive Predictive Control, from the Concepts to Plant Optimization", Prentice-Hall International (UK), 1996.
- Kashefi, S. "Predictive Adaptive Autopilot for STT Missile Based on Model Reference Method and Lyapanov Theorem", Aerospace Mechanics J., Vol. 8, No. 3, pp. 91-100, 2012 (In Persian).
- Brunell, B. J., Bitmead, R. R., and Connolly, A. J. "Nonlinear Model Predictive Control of an Aircraft Gas Turbine Engine"; Proc. of the 41st IEEE Conf. on Decision and Control, Las Vegas, NV, USA, 2002.

Archive of SID