مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1395، دوره 16، شماره 5، ص‌ص 379-388

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

طراحی و بهینه‌سازی تکاملی چند هدفه الگوریتم کنترل سوخت مین- ماکس موتور توربوفن

مرتضی منتظری[1]*، سعید میخ‌چین[2]، علی راستی[3]

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی 163-16765، montazeri@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 21 بهمن 1394
پذیرش: 24 فروردین 1395
ارائه در سایت: 16 خرداد 1395

کلید واژگان:
موتور توربوفن
ساختار نارایکس
کنترلر سوخت مین- ماکس
بهینه‌سازی چند هدفه
الگوریتم ژنتیک

چکیده

در این مقاله طراحی و بهینه‌سازی تکاملی چند هدفه الگوریتم کنترل سوخت مین-ماکس موتور توربوفن ارائه شده است. بدین منظور ابتدا موتور توربوفن در نرم‌افزار جی اس پی مدل شده، سپس براساس داده‌های حاصل از شبیه‌سازی موتور در این نرم‌افزار، مدلی از پارامترهای مختلف موتور با استفاده از ساختار نارایکس شبکه عصبی برای انجام شبیه‌سازی‌های بعدی حاصل شده است. جهت اعتبارسنجی مدل‌های حاصل شده، یک سیگنال سوخت آزمون تولید و صحت عملکرد مدل‌ها با استفاده از آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. در اقدام بعدی نیازمندی‌های کنترلی موتور توربوفن بیان و مطابق با آن کنترلر سوخت موتور به روش مین- ماکس طراحی و حلقه‌های کنترلی مختلف موجود در آن شرح داده شد. هر یک از این حلقه‌ها دارای یک کنترلر تناسبی است که به عنوان ضرایب کنترلی کنترلر شناخته می‌شوند. در مرحله نهایی برای تخمین ضرایب کنترلی کنترلر از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چند هدفه استفاده شده است. در این مسئله بهینه‌سازی، زمان‌های نشست در شتاب‌گیری مثبت و منفی، مقدار سوخت مصرفی و میزان آلاینده‌های تولید شده موتور بعنوان توابع هدف درنظر گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترلر بهینه‌سازی شده و مدل موتور نشان داده است، کنترلر نهایی نه تنها توابع هدف را بهینه می‌کند بلکه تمام مودهای کنترلی موتور را در طول شتابگیری مثبت و منفی برآورده می‌سازد.

Multi-objective Evolutionary Optimization of Turbofan Engine Min-Max Fuel Control Algorithm

Morteza Montazeri*, Saied Mikhchin, Ali Rasti

Department of Mechanical Engineering, Iran University Of Science & Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 16765-163, Tehran, Iran, montazeri@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 February 2016
Accepted 12 April 2016
Available Online 05 June 2016

Keywords:
Turbofan Engine
NARX Structure
Min-Max Fuel Controller
Multi Objective Optimization
Genetic Algorithm

ABSTRACT

In this paper, modeling of Min-Max controller and evolutionary multi-objective optimization for gain tuning controller of turbofan engine are presented. To achieve this purpose, first a turbofan engine is modeled in GSP software. Then engine parameters model, by using extracted GSP simulation data and based on NARX structure of neural network is developed. For model validation a test fuel signal is produced and model performance is assessed. Next, turbofan engines control requirements and constraints are described and a fuel controller based on Min-Max strategy is designed and diverse control loops in controller are described. Each of these loops has a proportional controller known as control gain of the min-max controller. For determining the gains of the controller, gain tuning process is formulated as a Genetic Algorithm Optimization problem in order for GA algorithm to find the best solution via its evolutionary generations. In this optimization problem, the settling time during acceleration and deceleration, engine fuel consumption and the amount of engine emissions are considered as objective functions to be minimized. The obtained results from simulation of optimized controller and engine show the final controller not only optimizes objective functions but also satisfies all control modes of engine during acceleration and deceleration modes.

1- مقدمه

توربین‌های گاز امروزه بطور گسترده در تاسیسات صنعتی و صنایع هوایی به منظور تولید توان و پیشرانش استفاده می‌شوند. مدل‌سازی این موتورها از دیرباز به منظورهای مختلف از جمله بررسی عملکرد، تشخیص عیب و طراحی و مدل‌سازی کنترلر موتور مورد توجه پژوهشگران بوده است. بطور کلی مدل‌سازی موتورهای توربین گاز به دو دسته عمده مدل‌سازی جعبه سفید و جعبه سیاه تقسیم می‌شود. مدل جعبه سفید زمانی استفاده می شود که دانش قبلی و بینش فیزیکی کاملی از سیستم در دسترس باشد [1]. در این موارد، معادلات دینامیکی، روابط ترمودینامیکی، تعادل انرژی و روش‌های خطی‌سازی به کار گرفته می‌شوند تا مدلی از سیستم حاصل شود [2]. در این زمینه می‌توان به تلاش‌های انجام شده توسط یاداو و همکاران [3]، لازارتو و

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Montazeri, S. Mikhchin, A. Rasti, Multi-objective Evolutionary Optimization of Turbofan Engine Min-Max Fuel Control Algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 379-388, 2016 (in Persian)

همکاران [4] و کلنگ و همکاران [5] اشاره کرد. بطور برعکس در مدل‌سازی جعبه سیاه هیچ بینشی از فیزیک مسئله در دسترس نیست و یا استفاده نشده است. اما ساختار مدل انتخاب شده متعلق به دسته‌ایست که به انعطاف-پذیری مناسب و قابل اطمینان در عملکرد گذشته سیستم شناخته می‌شود [7,6]. علاقه قابل توجهی اخیرا در این حوزه با ساختارهای مبتنی بر شبکه-های عصبی، شبکه‌های پایه شعاعی، شبکه موجک و همچنین روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک و مدل‌سازی براساس مجموعه‌های فازی و قوانین فازی وجود دارد [8,7]. در حوزه مدل‌سازی جعبه سیاه می‌توان به پژوهش-های انجام شده توسط لازارتو و همکاران [9]، بتوکچی و همکاران [10] و فست و همکاران [11] اشاره کرد. مدل نارایکس[1] از شبکه عصبی برای آموزش استفاده می‌کند. از این مدل بطور متعدد در پژوهش‌هایی نظیر ایوانس و همکاران [12]، چیراس وهمکاران [13]، باسو و همکاران [14]، فست و همکاران [15] و اصغری و سایرین [16] استفاده شده است. از آنجایی که موتورهای توربین گاز در نزدیکی محدودیت‌های فیزیکی و مکانیکی خود بیشترین بازده را دارند، کنترل موتور در مقابل فرارفت آن از این محدودیت‌ها از مهم‌ترین جنبه‌های یک سیستم کنترل موتور است [17]. از طرفی مهم‌ترین وظیفه سیستم کنترل، اجرای سریع و دقیق دستور خلبان با نگه‌داشتن موتور در وضعیت ایمن و پایدار آن می‌باشد [18]. روش‌های متعددی تاکنون برای سیستم کنترل موتور مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش از روش کنترلی مین- ماکس[2] استفاده شده است. این روش کنترلی در بسیاری از موتورهای توربین گاز و بالاخص در موتورهای توربوفن با نسبت کنارگذر بالا به کار گرفته شده است. این استراتژی شامل تعدادی حلقه کنترلی است تا محدودیت‌های کنترلی موتور را برآورده سازد. ورودی این استراتژی موقعیت تراتل، فشار و سرعت شفت‌های اندازه‌گیری شده توسط سنسورها می‌باشد و خروجی آن جریان سوخت اعمالی به موتور است. از طرف دیگر یک کنترلر زمان‌بندی شده براساس سرعت فن و نقاط کاری حالت پایا برای تخمین جریان سوخت حالت پایا موتور تعبیه شده است. اگر موتور از حالت پایا خارج شود، که معمولا به خاطر تغییر موقعیت تراتل است، دیگر حلقه‌های کنترلی فعال خواهند شد. این حلقه‌ها موتور را در مقابل فرارفت سرعت، دما، فشار، خاموشی شعله در محفظه احتراق و پدیده‌هایی نظیر سرج و استال بیمه می‌کند [19]. در هر یک از این حلقه‌ها یک کنترلر تناسبی برای تنظیم جریان سوخت تعبیه شده است که به ضرایب کنترلر سوخت مین- ماکس معروفند.

در این پژوهش تعیین ضرایب کنترلر برعهده الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چند هدفه نهاده شده است. برای رسیدن به اهداف موردنظر ابتدا مدل‌سازی موتور با استفاده از ساختار نارایکس انجام گرفته است. در مرحله بعد نیازمندی‌های کنترلی موتور بیان و کنترلر سوخت ارائه شده است و در نهایت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی، ضرایب کنترلر تعیین و نتایج حاصل از بهینه‌سازی و شبیه‌سازی ارائه شده است.

2- مدل‌سازی موتور با ساختار نارایکس

شبکه عصبی مصنوعی یک سامانه پردازشی داده‌ها است که از مغز انسان ایده گرفته و پردازش داده‌ها را به عهده پردازنده‌های کوچک و بسیار زیادی سپرده که به صورت شبکه‌ای به هم پیوسته و موازی با یکدیگر رفتار می‌کنند تا یک مسئله را حل نمایند.

در بین انواع روش‌های مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی، مدل نارایکس به دلیل مدل‌سازی رنج وسیعی از رفتار غیرخطی سیستم، سادگی انتخاب پارامترهای این ساختار، سرعت بالا در همگرایی و موثرتر بودن آموزش در آن برای مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [20]. "شکل 1" ساختار نارایکس را نشان می‌دهد.

بطور کلی مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی به عنوان مسئله انتخاب یک تابع غیرخطی تقریبی بین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم مطرح شده است [21]. تعیین پارامترهای ساختار نارایکس یعنی تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نورون در هر لایه و همچنین انتخاب رگرسورهای مناسب از مواردی است که باید توسط طراح تعیین شوند که در این پژوهش به روش سعی و خطا تعیین شده است. رابطه (1) بیان کننده مدل ریاضی ساختار نارایکس می‌باشد:

$$y(t) = G(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n_y), u(t-1), u(t-2), \dots, u(t-n_u)) \quad (1)$$

پارامترهای مورد نیاز موتور برای مدل‌سازی در این پژوهش شامل دورهای فن، هسته، فشار خروجی کمپرسور و آلاینده‌هایی نظیر دوده[3]، مونوکسید کربن[4] و ناکس[5] می‌باشد.

داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی توسط نرم‌افزار جی اس پی[6] تولید شده است. بدین منظور ابتدا موتور مورد بررسی در این نرم‌افزار مدل شده و سپس یک سیگنال شبه تصادفی باینری متناوب دامنه متغیر[7] سوخت مطابق "شکل 2" تولید و به این نرم‌افزار اعمال شده است. در نهایت از داده‌های خروجی این نرم‌افزار برای مدل‌سازی استفاده شده است. همچنین در جدول 1 پارامترهای ساختار نارایکس شناسایی شده برای مدل‌سازی پارامترهای موتور و همچنین مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها ارائه شده است.

برای اعتبارسنجی مدل‌های حاصل شده، سیگنال سوختی مطابق "شکل 3" تولید و به نرم‌افزار جی اس پی و مدل‌ها اعمال شده است. سپس خروجی مدل و نرم‌افزار مربوط به هر پارامتر موتور در کنار هم رسم شده است.

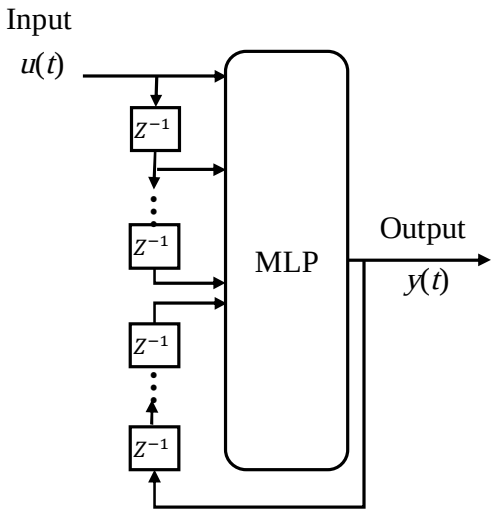

Fig. 1 General scheme of NARX structure

شکل 1 شماتیک کلی ساختار نارایکس

[1] NARX
[2] Min-Max

[3] Smoke Number
[4] Co
[5] NOx
[6] GSP
[7] Amplitude Pseudo Random Binary Sequence

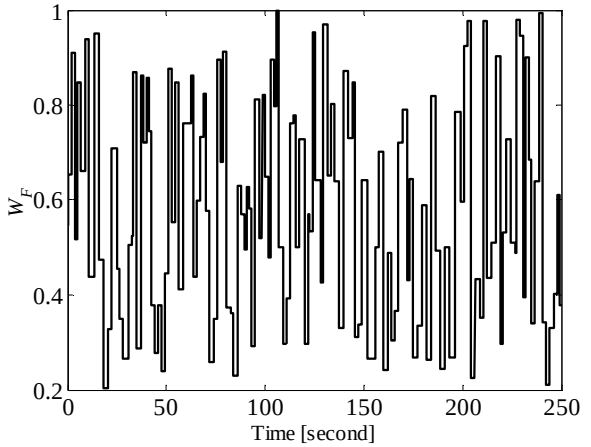

Fig. 2 Fuel signal for training model versus time

شکل 2 سیگنال سوخت آموزش مدل بر حسب زمان

جدول 1 مشخصات و ویژگی‌های مدل‌ها

Table 1 Attributes and properties of models

پارامتر موتور	لایه و نورون رگرسورها	NRMSE	μ	σ	Regression
*N*1	(10 10 10 8) (0:1,1:2)	0.0008	0.402	1.923	1
*N*2	(10 10 10 8) (0:1,1:2)	0.0008	0.270	3.705	1
*Ps*3	(15 12 12 10) (0:3,1:4)	0.0015	0.005	0.054	0.9999
NOx	(10 10 10 10 8) (0:1,1:2)	0.0015	0.004	0.037	0.9999
Co	(10 10 10 10 8 6) (0:3,1:4)	0.0023	0.001	0.006	0.9998
SN	(10 10 10 10 8 6) (0:2,1:3)	0.0017	-0.003	0.027	0.9999

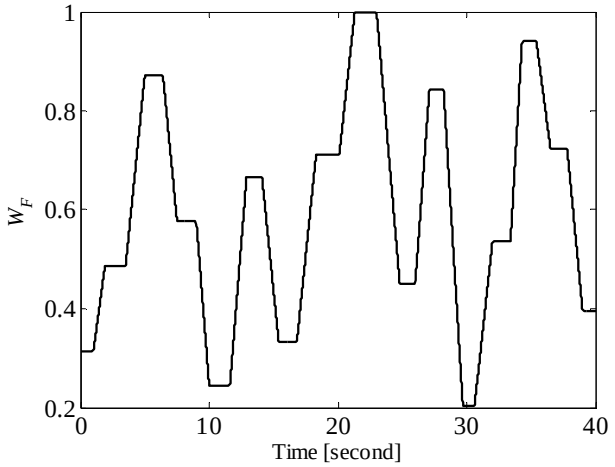

Fig. 3 Fuel signal for testing model versus time

شکل 3 سیگنال سوخت تست مدل بر حسب زمان

در "شکل 4" پارامترهای موتور حاصل از مدل و نرم‌افزار جی اس پی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در نمودارهای این شکل خطوط توپر مربوط به خروجی هر پارامتر از نرم‌افزار جی اس پی و خطوط نقطه‌چین مربوط به خروجی همان پارامتر از مدل می‌باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود خروجی مدل‌ها مطابقت بالایی نسبت به خروجی نرم‌افزار جی اس پی دارد. همانطور که از مجموع شاخص‌های ارزیابی موجود در جدول 1 و این نمودارها مشهود است، مدل‌ها به خوبی از سیستم اصلی که همان داده‌های خروجی از

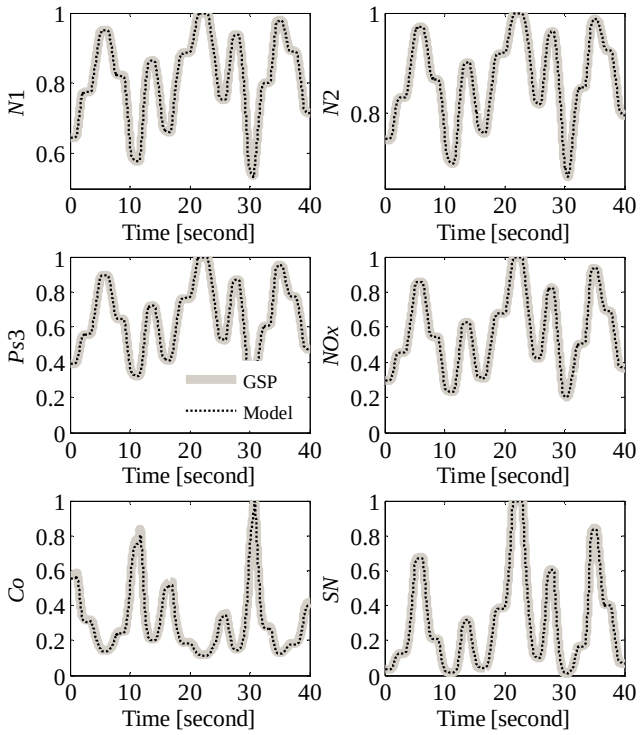

Fig. 4 Comparison between testing results and GSP outputs

شکل 4 مقایسه نتایج تست با خروجی‌های نرم‌افزار جی اس پی

نرم‌افزار جی اس پی است پیروی می‌کنند که نه تنها نشان‌دهنده دقت عملکردی بالای مدل‌های حاصله است، بلکه مبین این مطلب است که مدل‌ها به خوبی معرف سیستم نیز می‌باشند و می‌توانند در انجام شبیه‌سازی‌ها جایگزین سیستم اصلی شوند.

نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که در این مقاله تمام پارامترهای موتور بر مقدار ماکزیمم‌شان تقسیم شده‌اند. این کار بدین جهت صورت گرفته است که پارامترها و نحوه تغییرات آن‌ها نسبت به هم قابل قیاس باشند. لذا این پارامترها بی بعد شده‌اند.

3- نیازمندی‌های کنترلی موتور توربوفن

توربین‌های گاز، هوا را بعنوان سیال عامل در کمپرسور گرفته و سپس هوای فشرده شده را با سوخت در محفظه احتراق ترکیب می‌کنند تا تراست مورد نیاز را براساس اندازه‌های متفاوتی از انرژی جنبشی حاصل از سوختن سوخت تولید نمایند [22] و از آنجا که موتورهای توربین گاز عملکرد ترمو مکانیکی دارند، با محدودیت‌های زیادی در عملکرد روبرو هستند [23]. لازم به ذکر است چون اجزای موتور غیر قابل تغییر درنظرگرفته شده‌اند، تنها متغیر کنترلی موتور سوخت اعمالی به محفظه احتراق می‌باشد.

سیستم کنترل سوخت باید بتواند با کمترین مصرف سوخت به تراست درخواستی پاسخ دهد. همچنین باید موتور را در مقابل با فرارفت‌های زیر بیمه کند [23]:

1- ماکزیمم سرعت فن

2- ماکزیمم سرعت هسته

3- ماکزیمم دمای توربین

4- مینیمم حاشیه استال در فن

5- مینیمم حاشیه استال در کمپرسور

6- ماکزیمم فشار تخلیه کمپرسور
7- مینیمم فشار تخلیه کمپرسور
8- خاموشی شعله در محفظه احتراق

این محدودیت‌ها موتور را در محدوده‌های کاری مشخص قرار می‌دهند بطوریکه تجاوز از این محدودیت‌ها موجب آسیب دیدن موتور می‌شود. "شکل 5" این محدودیت‌ها و همچنین محدوده کاری موتور را نشان می‌دهد.

ناپایداری‌های دینامیکی و گذرا که موتور را به سمت خارج این محدوده‌ها هدایت کنند، می‌توانند منجر به آسیب موتور و کاهش تراست تولید شده شوند. یک سیستم کنترل حلقه بسته با تعدادی حلقه شامل تمام محدودیت‌ها طراحی شده تا موتور را در مقابل فرارفت از محدوده‌های مجاز ایمن کند.

4- سیستم کنترل

هدف هر سیستم کنترل موتور آن است که اجازه دهد موتور تحت هر شرایطی در ماکزیمم راندمان خود کار کند. به علاوه تمام محدودیت‌های کنترلی را رعایت کند. بنابراین عدم حضور کنترلر باعث فرارفت پارامترهای موتور از محدودیت‌های مجاز می‌شود.

بطور کلی جریان سوخت ورودی به موتور به دو بخش جریان سوخت حالت پایا و جریان سوخت حالت گذرا تقسیم می‌شود. جریان سوخت حالت پایا که توسط کنترلر سوخت حالت پایا تعیین می‌شود، شامل تعداد نقاط بسیار زیادی از عملکرد موتور در حالت پایاست. این کنترلر وظیفه دارد سوخت موتور را با توجه به شرایط عملکردی که موتور در آن قرار دارد، تامین کند [24]. از طرف دیگر کنترلر جریان سوخت حالت گذرا برای کنترل عملکرد موتور در شرایط گذرا درنظرگرفته می‌شود تا علاوه بر رعایت تمام محدودیت‌های کنترلی موتور، سوخت حالت گذرا را برای پاسخی مقتضی به دستور خلبان تامین کند. در این پژوهش جریان سوخت حالت گذرا براساس استراتژی کنترلی مین- ماکس تعیین می‌شود.

4-1- الگوریتم کنترلی مین- ماکس

خروجی‌های موتور مانند دمای خروجی توربین، حاشیه استال و غیره، باید همیشه در یک محدوده ایمن قرار داشته باشند. برخی از محدودیت‌های موتور مانند حداکثر دمای خروجی توربین، حداکثر سرعت شفت‌ها، حداکثر فشار تخلیه خروجی کمپرسور و حداکثر شتاب شفت نیازمند مینیمم‌سازی

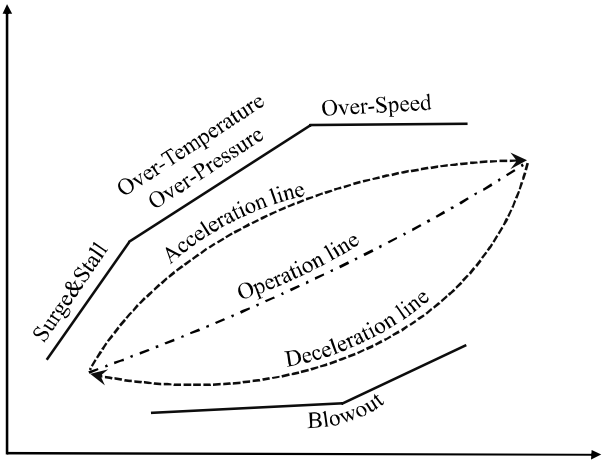

Fig. 5 Turbofan engine requirements and constraints
شکل 5 نیازمندی‌های کنترلی موتور توربوفن

است و در مقابل برخی دیگر مانند حداقل جریان سوخت، حداقل فشار تخلیه کمپرسور و حداقل شتاب شفت نیازمند ماکزیمم‌سازی است [25]. لذا برای طراحی کنترلر مطلوب باید از توابع مینیمم‌ساز و ماکزیمم‌ساز استفاده شود تا بتوان تمام محدودیت‌ها را کنترل کرد. بدین ترتیب الگوریتم کنترلی مین- ماکس پا به عرصه ظهور گذاشت تا علاوه بر جلوگیری از فرارفت از این محدودیت‌ها از حد مجاز، به موتور اجازه دهد در ماکزیمم راندمان خود کار کند. در این الگوریتم تعدادی حلقه‌های کنترلی برای کنترل محدودیت‌های موتور درنظر گرفته می‌شود تا هر یک از این حلقه‌ها یکی از محدودیت‌ها را کنترل کند. هر یک از این حلقه‌ها دارای یک کنترلر تناسبی هستند که به عنوان تنظیم‌کننده سوخت آن حلقه شناخته می‌شوند. به مجموعه این ضرایب، ضرایب کنترلی کنترلر مین- ماکس می‌گویند. این ضرایب در عملکرد موتور به ویژه در میزان مصرف سوخت، زمان نشست سیستم و میزان تولید آلاینده‌ها نقش بسزایی دارند.

4-2- حلقه‌های کنترلی کنترلر مین - ماکس

در این پژوهش شش حلقه کنترلی برای محاسبه سوخت حالت گذرا درنظر گرفته شده است تا علاوه بر تامین سوخت، محدودیت‌های مختلف عملکردی موتور را در عملکرد حالت گذرا کنترل کنند [27,26].

1- حلقه کنترلی فرمان خلبان: این حلقه وظیفه دارد سوخت لازم برای اجرای فرمان خلبان را مهیا کند. این حلقه، اصلی‌ترین حلقه تامین جریان سوخت در عملکرد حالت گذرای موتور است.

2- حلقه ماکزیمم سرعت شفت‌ها: این حلقه برای جلوگیری فرارفت سرعت از حد مجاز آن ایجاد می‌شود تا مانع شکست و خرابی در اجزای دوار موتور شود.

3- حلقه حداکثر فشار تخلیه کمپرسور: این حلقه موظف است از فرارفت فشار تخلیه کمپرسور از حد مجاز آن جلوگیری کند.

4- حلقه حداکثر شتاب: این حلقه کار مراقبت شتاب از فرارفت از حد مجاز آن را برعهده دارد و برای کنترل حاشیه استال مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که حاشیه استال در کمپرسور قابل اندازه‌گیری نیست، برای جلوگیری از وقوع استال و سرج، بطور غیر مستقیم از کنترل شتاب شفت هسته استفاده می‌شود.

5- حلقه حداقل فشار تخلیه کمپرسور: این حلقه موظف است از فرورفت فشار تخلیه کمپرسور از حد مجاز آن جلوگیری کند. همچنین این حلقه به نوبه خود مانع از خاموشی شعله در محفظه احتراق می‌شود.

6- حلقه حداقل شتاب: این حلقه نیز از فرورفت حداقل شتاب از مقدار مجاز آن جلوگیری می‌کند تا مانع از وقوع سرج و استال در فرآیند کاهش تراست در عملکرد حالت گذرا موتور شود. همچنین این حلقه به صورت ثانویه مانع خاموش شدن شعله در محفظه احتراق می‌شود.

4-3- استراتژی انتخاب مین - ماکس

در عملکرد حالت گذرای موتور بسته به نقطه عملکردی موتور یکی از حلقه‌ها فعال شده و کار تامین سوخت موتور را بر عهده می‌گیرد. انتخاب حلقه مناسب بر عهده استراتژی مین- ماکس است. با توجه به کنترلر طراحی شده در این پژوهش، این استراتژی از الگوریتم منطقی رابطه (2) برای انتخاب حلقه‌ها استفاده می‌کند:

$$W_{F-\mathrm{Transient}} = \max(\min(W_{F-\mathrm{PLA}}, W_{F-N2\max}, W_{F-PS3\max}, W_{F-\mathrm{Acc}}), W_{F-PS3\min}, W_{F-\mathrm{Dec}}) \quad (2)$$

"شکل 6" کنترلر نهایی سوخت را نشان می‌دهد که شامل کنترلر حالت پایا و حالت گذراست. سوخت نهایی اعمالی به موتور مجموع سوخت محاسبه شده توسط این دو کنترلر است و در هر لحظه توسط رابطه (3) محاسبه می‌شود:

$$W_{F-\mathrm{Total}} = W_{F-\mathrm{Transient}} + W_{F-\mathrm{Steady}} \quad (3)$$

روش سنتی یافتن ضرایب بهینه کنترلر، روش سعی و خطاست که بسیار به تجربه و دقت طراح وابسته است. اما این روش در نهایت یک کنترلر بهینه و قابل اطمینان به دست نخواهد داد. برای دست‌یابی به عملکرد مطلوب کنترلر و موتور لازم است از یک الگوریتم بهینه‌سازی برای تعیین ضرایب استفاده شود تا با استفاده از عملکرد بهینه‌یابی خود بهترین جواب ممکن را در فضای جستجو به دست دهد.

5- الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

این الگوریتم اولین بار توسط هلند مطرح گردید. او به توضیح چگونگی اعمال قوانین تکاملی طبیعت بر یک مسأله بهینه‌سازی پرداخته و اولین الگوریتم ژنتیک را ارائه داد [29,28]. الگوریتم ژنتیک از مجموعه ای از راه‌حل‌های تصادفی اولیه به نام جمعیت آغاز می شود. اعضا این جمعیت براساس تابع برازندگی یا هدف، ارزیابی شده و یک مقدار برازندگی به آن‌ها اختصاص داده می‌شود. فرزندان یا اعضای جمعیت نسل بعد با انتخاب برخی والدها براساس معیار انتخاب و اعمال ترکیب و جهش بر آن‌ها ایجاد می‌شوند. سپس با ارزیابی جمعیت اولیه و اعضای حاصل از ترکیب و جهش، جمعیت نسل بعد ایجاد می‌شود. این روند تا برآورد شرط یا شروط خاتمه بهینه‌سازی ادامه دارد [30]. در این پژوهش به دلیل غیرخطی بودن رابطه بین متغیرها و تابع هدف، ذات سویچینگ استراتژی کنترل، عدم وابستگی به مقدار اولیه، عدم گیر کردن الگوریتم در نقاط بهینه محلی و مقاوم بودن در اجراهای مکرر برای یافتن نقطه بهینه مطلق در فضا جستجو از الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی استفاده شده است.

در بسیاری از مسائل واقعی بهینه‌سازی، معمولا باید چند هدف بطور هم‌زمان بهینه شوند. یک راه حل برای مسائلی که دارای چند هدف بهینه‌سازی‌اند این است که این مسائل را توسط تعیین یک بردار وزن‌ها به یک مسأله بهینه‌سازی تک هدفه تقلیل داد. عیب این روش این است که جواب نهایی بدست آمده بسیار به بردار وزن‌ها وابسته می‌باشد. راه‌حل دیگر این است که مجموعه اهداف را بصورت یک بردار در نظر گرفت و همزمان آن‌ها را

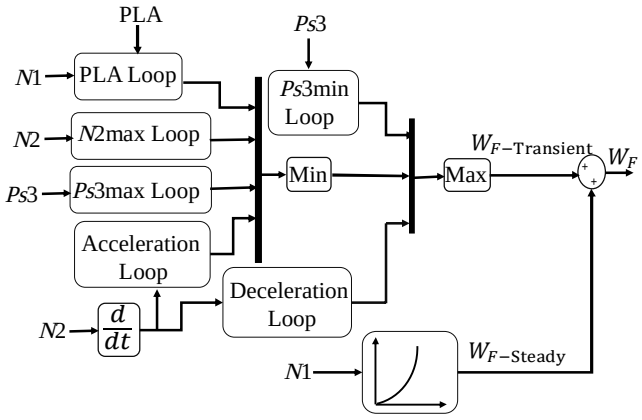

Fig. 6 Min-Max Fuel controller

شکل 6 کنترلر سوخت مین- ماکس

بهینه کرد. در واقع با این روش بردار وزن‌ها حذف می‌شود. لذا در بهینه‌سازی‌های چند هدفه یک دسته جواب بهینه بدست می‌آید. هر یک از مجموعه جواب‌های بدست آمده را پرتو می‌گویند. از این مجموعه‌ها، پرتو اول به عنوان جواب بهینه شناخته می‌شود که دارای چند نقطه بهینه برای حل مسأله است. هیچ یک از این نقاط برتری نسبت به هم ندارند و بسته به نظر طراح است که کدام نقطه را برای انجام فعالیت‌های بعدی خود انتخاب کند [32,31]. الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه درنظرگرفته شده در این پژوهش، الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب-2[1] می‌باشد که توسط سرینیواس و دب ارائه شد. در این روش چون تابع هدف بصورت بردار است، یک جواب مسأله یا عضو جمعیت، بر اعضا دیگر غالب نمی‌شود. چرا که ممکن است در یک تابع هدف از بقیه جواب‌ها بهتر باشد اما در توابع دیگر خیر [34,33].

5-1- مراحل الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب

این الگوریتم در طی مراحل مشخص و با تکرار برخی از آن‌ها به بهینه‌سازی مسأله می‌پردازد. مراحل این الگوریتم همانند "شکل 7" است [35-37].

5-2- تعریف مسأله بهینه‌سازی

مسأله بهینه‌سازی در این پژوهش، تنظیم ضرایب حلقه‌های کنترلی تنظیم‌کننده سوخت حالت گذرای کنترلر مین- ماکس طراحی شده برای موتور توربوفن، به منظور بهینه نمودن اهداف بهینه‌سازی درنظرگرفته شده می‌باشد. اساسا مسأله بهینه‌سازی پیش‌رو یک مسأله مینیمم‌سازی است و چون برای رعایت مودهای محدودیت‌های فیزیکی نیاز به تعریف قیدهایی برای آن بوده، مسأله مورد بحث بطور کلی یک مسأله بهینه‌سازی مینیمم چند هدفه مقید نامیده می‌شود. هر مسأله بهینه‌سازی دارای متغیرهایی می‌باشد که همان مجهولات مسأله است. علاوه بر آن نیازمند تابع هدف است تا معیاری برای تعیین متغیرها باشد.

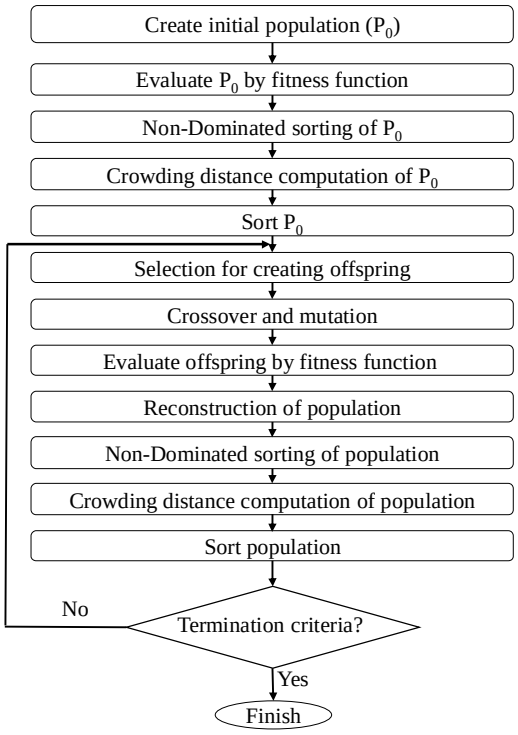

Fig. 7 Non-dominated sorting of Genetic algorithm steps

شکل 7 مراحل الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب

[1] Non-dominated sorting of genetic algorithm-II

5-2-1- متغیرهای طراحی

هدف الگوریتم بهینه‌سازی تنظیم متغیرهای بهینه‌سازی است به نحوی که مقدار تابع هدف تعریف شده بهینه شود. ضرایب حلقه‌های کنترلی که شامل ضرایب حلقه کنترلی فرمان خلبان، حلقه کنترلی دور ماکزیمم، حلقه کنترلی شتابگیری مثبت، حلقه کنترلی شتابگیری منفی، حلقه کنترلی حداکثر دمای ورودی توربین، حلقه کنترلی فشار ماکزیمم و حلقه کنترلی فشار مینیمم می‌باشد، به عنوان متغیرهای این مسأله بهینه‌سازی تعریف شده است.

5-2-2- اهداف مسأله بهینه‌سازی

هدف نهایی الگوریتم بهینه‌سازی، ماکزیمم یا مینیمم کردن تابع هدف است. هدف الگوریتم بهینه‌سازی در این مسأله مینیمم‌کردن مقدار تابع هدف بصورت رابطه (4) خواهد بود [37].

$$J = F(X) \tag{4}$$

در دنیای امروز حداقل کردن سوخت مصرفی برای تولید توان مشخص، از اهداف استراتژیک در هر زمینه‌ای است. از طرفی کاهش تولید آلاینده‌ها برای سلامت موتورها و محیط زیست از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین سرعت پاسخ موتور به توان یا تراست خواسته شده برای مانورهای سریع در شرایط اضطراری از موارد مورد توجه طراحان به شمار می‌آید. اهداف درنظرگرفته شده برای بهینه‌سازی ضرایب کنترلر، حداقل کردن سوخت مصرفی، زمان‌های نشست و میزان تولید آلاینده‌های موتور می‌باشد که به صورت روابط (5) فرمول‌بندی شده‌اند:

$$J_a = \frac{t_{\mathrm{Acc1}} + t_{\mathrm{Acc2}} + t_{\mathrm{Dec}}}{\mathrm{sim-time}} \tag{5-الف}$$

$$J_b = \int_0^{\mathrm{sim-time}} \frac{W_F}{\{W_F\}_{\max} \times \frac{\mathrm{sim-time}}{\mathrm{sample-time}}} dt \tag{5-ب}$$

$$J_c = \frac{\prod NOx}{\{NOx\}_{\max} \times \frac{\mathrm{sim-time}}{\mathrm{sample-time}}} + \frac{\prod Co}{\{Co\}_{\max} \times \frac{\mathrm{sim-time}}{\mathrm{sample-time}}} + \frac{\prod SN}{\{SN\}_{\max} \times \frac{\mathrm{sim-time}}{\mathrm{sample-time}}} \tag{5-ج}$$

5-2-3- تعریف قیدهای مسأله بهینه‌سازی

برای آنکه نتیجه شبیه‌سازی حاصل از خروجی الگوریتم قابل قبول باشد، باید تمام محدودیت‌های فیزیکی موتور را رعایت کند. به منظور اطمینان از این مهم، محدودیت‌های فیزیکی موتور به عنوان قیدهای مسأله بهینه‌سازی تعریف می‌شود. قیدهای تعریف شده در این پژوهش شامل فرارفت از سرعت ماکزیمم هسته، ماکزیمم و مینیمم شتاب و همچنین ماکزیمم و مینیمم فشار خروجی کمپرسور فشار بالا می‌شود. در این مقاله از تابع جریمه تاگوچی و یاکوتا[1] در مسائل مینیمم سازی برای تعریف نوع تابع جریمه استفاده شده است که به صورت رابطه (6) است:

$$P = 1 + \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\Delta b_i}{b_i}\right), \Delta b_i = \mathrm{Max}\{0, \max(|g_i(x)| - b_i\} \tag{6}$$

در این مسأله ترکیب تابع جریمه با تابع هدف به صورت ضرب تعریف می‌شود. حسن این روش در کاهش عملیات ریاضی در بهینه‌یابی می‌باشد.

5-3- نحوه اعمال الگوریتم ژنتیک بر مسأله

"شکل 8" نحوه اعمال الگوریتم بر مسأله را نشان می‌دهد. ارتباط الگوریتم ژنتیک و تابع هدف تعریف شده با پارامترها یا متغیرهای مسأله توسط شبیه

[1] Taguchi & Yakota

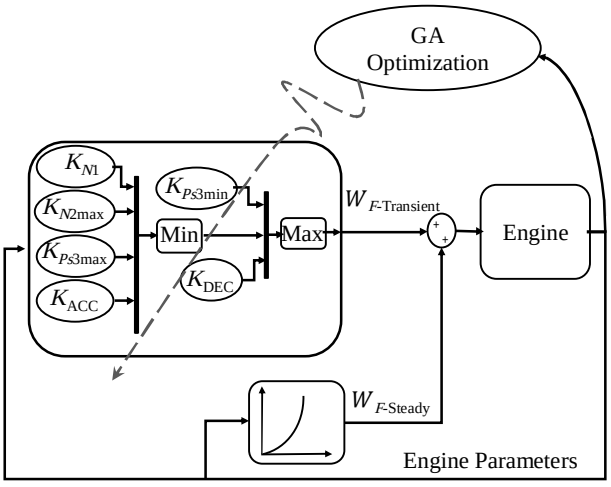

Fig. 8 Applying genetic algorithm to the problem

شکل 8 نحوه اعمال الگوریتم ژنتیک بر مسأله

سازی کنترلر در کنار موتور صورت می‌گیرد. بدین صورت که الگوریتم ژنتیک ابتدا با انتخاب یک دسته جواب برای مسأله آن را به شبیه‌سازی اعمال می‌کند. سپس با توجه به خروجی‌های تعریف شده از شبیه‌سازی و توابع هدف تعیین شده جمعیت اولیه را بوجود می‌آورد. سپس در مراحل بعد، پس از انجام آمیزش و جهش، دسته جواب حاصل را به شبیه‌سازی اعمال کرده و مقادیر توابع هدف را براساس خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی برای هریک محاسبه نموده و جمعیت‌های نظیر را شکل می‌دهد. در نهایت با چینش تمام اعضا براساس معیار انتخاب بهترین جواب‌ها، تعداد اعضا اول معادل با جمعیت اولیه را به عنوان جواب نهایی تولید نسل اول انتخاب و مابقی جمعیت که دارای مقادیر توابع هدف نامطلوب‌تری هستند را حذف کرده و نتایج را ارائه می‌دهد. سپس الگوریتم وارد مرحله تولید نسل بعدی می‌شود.

5-4- پارامترهای الگوریتم ژنتیک

هر الگوریتم بهینه‌سازی دارای پارامترهای مشخص در ذات خود می‌باشد که آن الگوریتم را تشکیل می‌دهد. بعضا با تغییر این پارامترها جواب نهایی مسأله بهبود پیدا می‌کند. تنظیمات صورت گرفته برای مسأله بهینه‌سازی موردنظر در پژوهش، شرایط رسیدن به جواب نهایی را بهبود بخشیده است. تنظیم این پارامترها به قرار جدول 2 است.

مسأله مهم در انجام شبیه‌سازی‌های متوالی الگوریتم ژنتیک، انتخاب نوع فرمان خلبان به عنوان ورودی شبیه‌سازی است که در انجام هر شبیه‌سازی برای تولید ورودی‌های توابع هدف نقش اساسی ایفا می‌کند. لذا فرمان خلبان به صورت "شکل 9" تعریف شده است.

جدول 2 تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک

Table 2 Genetic algorithm parameters

	پارامترها	مقدار
1	اندازه جمعیت	50
2	مقیاس‌بندی برازندگی	Rank
3	روش انتخاب اعضا نسل جدید	Tournament (4)
4	روش آمیزش	Uniform
5	احتمال آمیزش	0.8
6	احتمال جهش	0.1
7	توابع جریمه	Taguchi & Yakota
8	تعداد تکرار (شرط توقف)	100

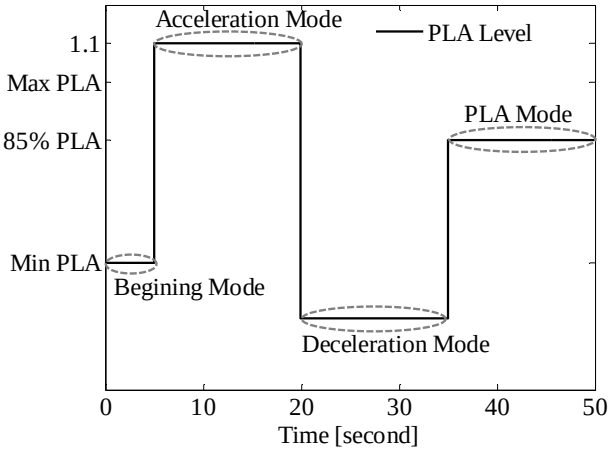

Fig. 9 Pilot command for simulating all modes

شکل 9 فرمان خلبان برای شبیه‌سازی تمام مودها

این فرمان طوری طراحی شده است که نه تنها تمام مودهای عملکردی موتور را پوشش دهد، بلکه بتواند تمام نیازهای توابع هدف را نیز برآورده سازد. این فرمان شامل مودهای شروع، مود شتابگیری مثبت، مود شتابگیری منفی و یک مود رایج عملکرد موتور یعنی اوج‌گیری[1] که معادل 85% تراست ماکزیمم است می‌باشد. همانطور که مشخص است، این فرمان همه نیازها یا ورودی‌های توابع هدف مانند زمان‌های شتابگیری مثبت و منفی و غیره را برآورده می‌سازد.

6- نتایج و ارزیابی

نتایج بهینه‌سازی و شبیه‌سازی عملکرد کنترلر در کنار موتور در این بخش ارائه شده است. ابتدا نتایج بهینه‌سازی ارائه می‌شود و با انتخاب یک جواب از پرتو اول، شبیه‌سازی عملکرد کنترلر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

6-1- نتایج بهینه‌سازی ضرایب کنترلر

"شکل 10" و "شکل 11" نتایج بهینه‌سازی را نشان می‌دهند. در "شکل 10" پرتو جواب‌های حاصل با توجه به سه تابع هدف درنظرگرفته شده برای بهینه‌سازی ارائه شده است. در این شکل هر کدام از توابع هدف میزان سوخت مصرفی و تولید آلاینده‌ها بر حسب تابع هدف سوم یعنی زمان نشست سیستم رسم شده‌اند تا نسبت به یکدیگر قابل قیاس باشند. جواب‌های موجود در پرتو اول، جواب مسئله بهینه‌سازی است. این جواب‌ها دارای ارزش یکسان هستند و بسته به اینکه کدام تابع هدف ارزش بیشتری داشته باشد، یک جواب بعنوان جواب نهایی بهینه‌سازی انتخاب می‌شود. در این تحقیق برای انتخاب یک جواب از پرتو جهت شبیه‌سازی فرض شد که ارزش توابع هدف نسبت به یکدیگر یکسان است. لذا جوابی که کمترین اندازه برای بردار هدف را به دست داد بعنوان جواب نهایی انتخاب گردید. این جواب در "شکل 10" و "شکل 11" بصورت دایره مشخص شده است. اندازه بردار هدف مطابق با رابطه (7) محاسبه شده است که در آن توابع هدف نرمال شده می‌باشند.

$$|J| = \sqrt{J_a{}^2 + J_b{}^2 + J_c{}^2} \qquad (7)$$

علاوه بر آن، در "شکل 11" بهترین جواب هر نسل رسم شده است. بهترین جواب هر نسل نیز با معیار داشتن کوچکترین اندازه بردار هدف در آن نسل انتخاب شده است.

[1] Climb Out

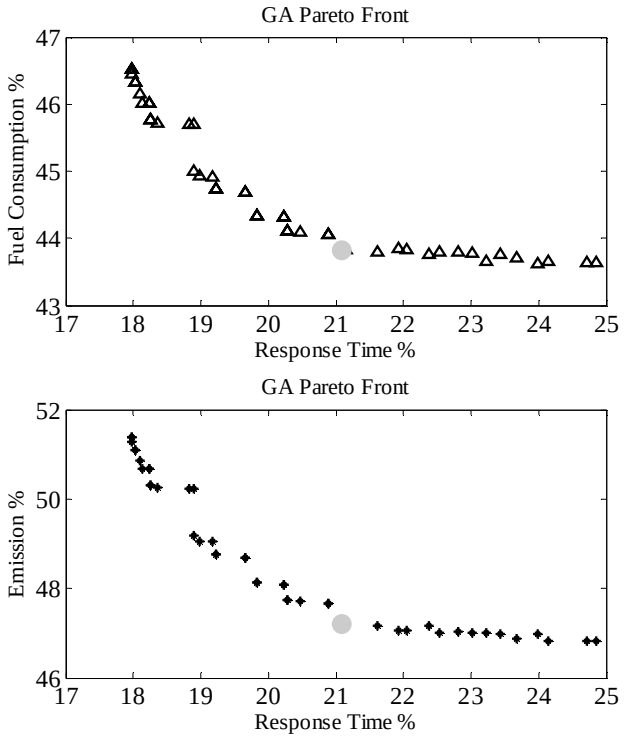

Fig. 10 Pareto for optimization problem

شکل 10 پرتو برای مسئله بهینه‌سازی

6-2- نتایج شبیه‌سازی عملکرد کنترلر

براساس جواب انتخابی در مرحله قبل، شبیه‌سازی عملکرد کنترلر در کنار موتور صورت گرفته و نتایج ارائه شده است.

در "شکل 12-a" خلبان به اشتباه مقدار بیشتر و کمتر از مقدار مجاز تراست را درخواست می‌کند اما کنترلر با توجه به حلقه‌های کنترلی مختلف

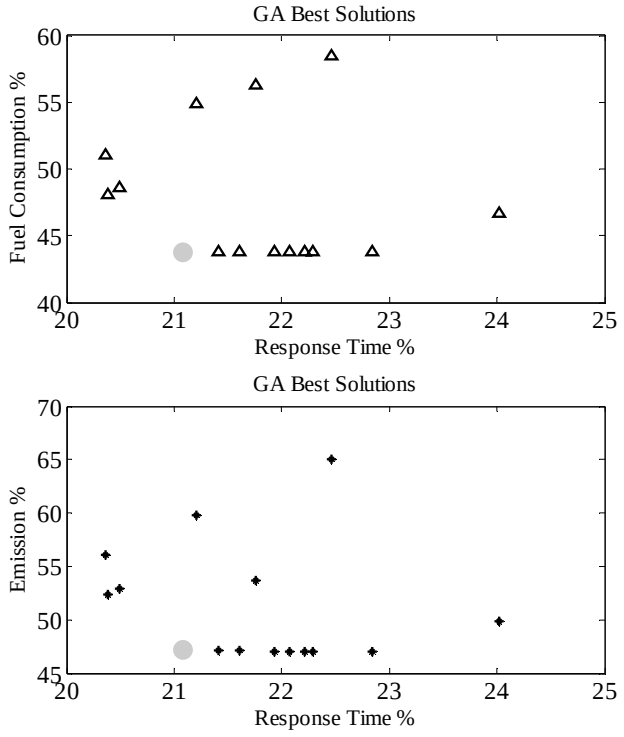

Fig. 11 Best solution of generations

شکل 11 بهترین جواب نسل‌ها

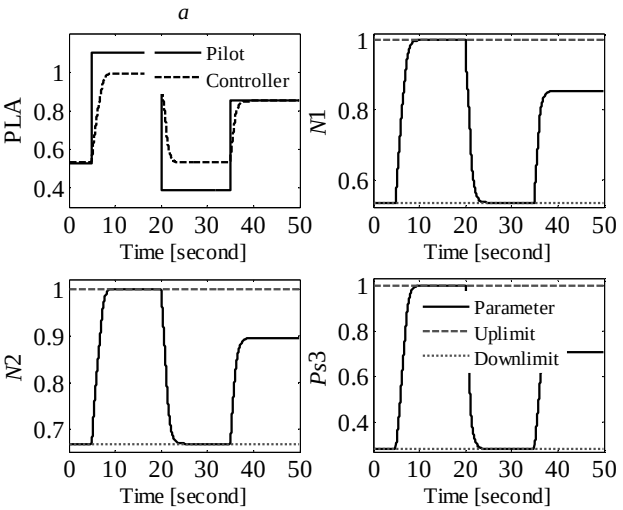

Fig. 12 Controller and engine simulation diagram

شکل 12 نتایج شبیه‌سازی کنترلر در کنار موتور

خود، مقدار مجاز سوخت را به موتور اعمال می‌کند تا از فرارفت سرعت و همچنین خاموشی شعله در محفظه احتراق جلوگیری کند. اشکال دیگر موجود در "شکل 12" رعایت محدودیت‌های پارامترهای موتور را نشان می‌دهند که از عملکرد مطلوب کنترلر حکایت می‌کند.

همانطور که در "شکل 13" مشخص است، دمای خروجی توربین و مقادیر آلاینده‌ها نیز از اندازه مجاز آن‌ها فراتر نرفته است. همچنین مقادیر تولید آلاینده‌ها در طی پرواز مطابق با بهینه‌سازی کمینه شده است.

با توجه به "شکل 14" با درخواست افزایش تراست از طرف خلبان در ثانیه 5، ابتدا حلقه کنترلی شتاب ماکزیمم فعال می‌شود تا از افزایش بیش از حد شتاب که می‌تواند موجب پدیده‌های سرج و استال در موتور شود، جلوگیری کند. سپس حلقه ماکزیمم فشار تخلیه کمپرسور وارد عمل شده و برای مدت کوتاهی میزان سوخت حالت گذرا را کنترل می‌کند. بعد از آن تعیین میزان سوخت حالت گذرا با حلقه ماکزیمم دور است تا از فرارفت دور موتور جلوگیری شود. لازم به ذکر است حلقه‌های کنترلی زمانی وارد عمل می‌شوند که درخواست افزایش تراست از سوی خلبان از مقدار معین مجاز برای آن حلقه بیشتر باشد؛ برای مثال اگر افزایش تراست طوری صورت بگیرد که شتاب همواره کمتر از ماکزیمم شتاب باشد، یعنی در طول زمان زیاد

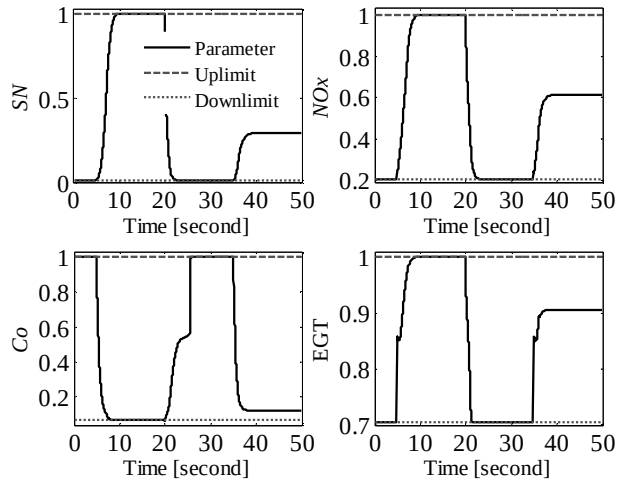

Fig. 13 Emission production diagram during flight

شکل 13 منحنی تولید آلاینده‌ها در طول پرواز

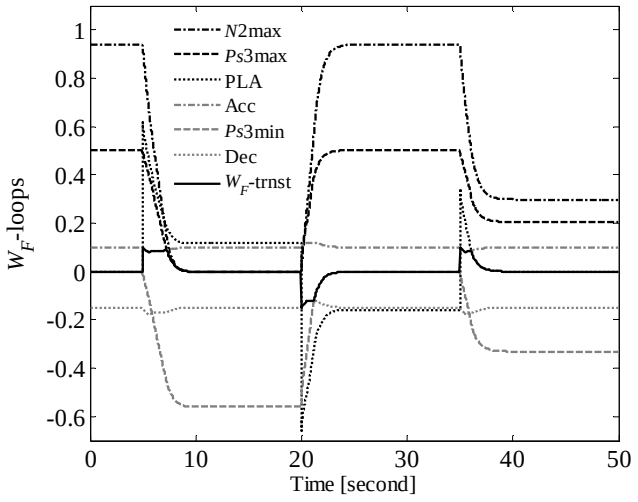

Fig. 14 Calculated fuel by loops

شکل 14 سوخت محاسبه شده توسط حلقه‌ها

صورت پذیرد، آنگاه هرگز حلقه کنترلی ماکزیمم شتاب فعال نخواهد شد، این در حالی است که ممکن است دیگر حلقه‌ها فعال شوند. در ثانیه 20 با دستور خلبان مبنی بر کاهش تراست، ابتدا حلقه مینیمم شتاب فعال شده تا از کاهش بیش از حد مجاز سوخت که ممکن است باعث خاموش شدن شعله در محفظه احتراق شود، جلوگیری کند. سپس حلقه کنترلی مینمم فشار تخلیه فعال شده و میزان سوخت حالت گذرا را تعیین می‌کند. بعد از آن با افزایش تراست درخواستی خلبان در ثانیه 35 دوباره حلقه کنترلی ماکزیمم شتاب فعال می‌شود. بعد از مدت کوتاهی بدون آنکه سایر حلقه‌ها وارد عمل شوند، تعیین سوخت به حلقه خلبان باز می‌گردد. بطور کلی می‌توان گفت در شرایط ماکزیمم تراست، تعیین سوخت حالت گذرا بر عهده حلقه ماکزیمم سرعت و در شرایط مینیمم تراست بر عهده مینیمم فشار تخلیه است و در شرایط مابین تعیین سوخت حالت گذرا درنهایت بر عهده حلقه خلبان خواهد بود.

"شکل 15" نمودار سوخت اعمالی به موتور و تغییرات شتاب شفت هسته را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست، تغییرات سوخت بر حسب زمان بدون نوسان است که نشان از سوئیچ مطلوب بین حلقه‌های مختلف کنترلی است و منحنی شتاب در محدوده مجاز قرار دارد. شبیه‌سازی انجام شده به ازای کمترین مصرف سوخت، کمترین زمان نشست و کمترین میزان تولید آلاینده‌ها انجام شده است.

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی و بهینه‌یابی کنترلر سوخت موتور توربوفن بر اساس

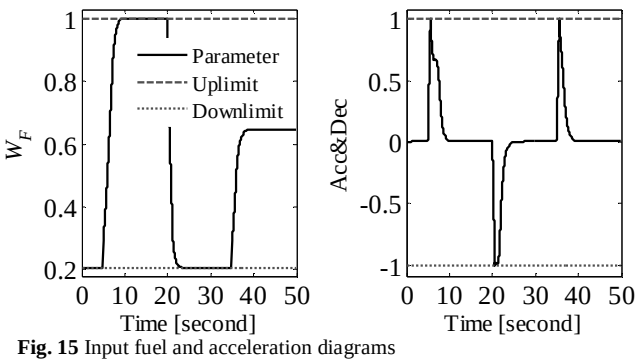

Fig. 15 Input fuel and acceleration diagrams

شکل 15 منحنی‌های سوخت ورودی به موتور و شتاب هسته

الگوریتم کنترلی مین- ماکس ارائه شده است. در این راستا ابتدا نیازمندی‌های کنترلی موتور توربوفن شرح داده شد و همچنین مدل‌سازی موتور برای انجام شبیه‌سازی‌ها براساس ساختار نارایکس صورت پذیرفت. نتایج نشان داد مدل‌ها از دقت بالایی برخوردار بوده و به خوبی معرف مشخصه‌های عملکردی موتور توربوفن هستند. سپس برای کنترل این نیازمندی‌ها، حلقه‌های کنترلی متعددی در کنترلر درنظرگرفته شد تا نیازمندی‌های موتور توربوفن را برآورده سازند. کنترلر حاصل دارای پارامترها و یا ضرایب کنترلی در حلقه‌ها می‌باشد که سوخت آن حلقه را تنظیم می‌کند. با توجه به این که تغییر این پارامترها در عملکرد کنترلر و به تبع آن موتور نقش بسزایی دارد، عملکردهای مطلوب موتور مانند کم بودن سوخت مصرفی، زمان‌های نشست و همچنین میزان تولید آلاینده‌ها بعنوان توابع هدف مطرح گردید تا با سپردن پارامترهای کنترلی به یک الگوریتم بهینه‌سازی، این پارامترها طوری تعیین گردند که اهداف مسئله برآورده شوند. بدین منظور الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک بصورت چند هدفه شرح داده شد و به منظور یافتن تمام شرایط عملکردی بهینه کنترلر، الگوریتم چند هدفه انتخاب و بهینه‌سازی انجام گرفت. مطابق یک جواب بهینه با درجه اهمیت یکسان توابع مختلف هدف، شبیه‌سازی عملکرد کنترلر در کنار موتور انجام و نتایج ارائه گردید. براساس این نتایج، کنترلر به درستی تمام نیازمندی‌های کنترلی موتور توربوفن را برآورده ساخته است.

8- فهرست علائم

b_i	مقدار محدودیت iام
Δb_i	میزان تخلف از محدودیت iام
Co	مونوکسید کربن (gkg^{-1})
EGT	دمای گازهای خروجی (K)
F	توابع هدف
G	تابع غیرخطی از رگرسورها
$g_i(x)$	جواب محدودیتiام حاصل از شبیه‌سازی
GA	الگوریتم ژنتیک
J	بردار تابع هدف
J_i	مقدار توابع هدف
K	ضرایب کنترلی کنترلر
m	تعداد محدودیت‌ها
$N1$	دور فن (rpm)
$N2$	دور هسته (rpm)
NOx	ناکس (gkg^{-1})
NRMSE	ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده
n_u	تعداد ورودی‌های قبلی
n_y	تعداد خروجی‌های قبلی
P	مقدار نهایی تابع جریمه
$Ps3$	فشار استاتیکی (bar)
Regression	نسبت داده واقعی به داده خروجی از مدل دوده
SN	
sim – time	زمان شبیه‌سازی
sample – time	گام زمانی شبیه‌سازی
t	زمان (s)
trnst	حالت گذرا
u	ورودی
W_F	دبی سوخت (kgs^{-1})
y	خروجی

علائم یونانی

σ	واریانس یا شاخص پراکندگی خطا
μ	مقدار میانگین خطا

زیرنویس‌ها

Transient	حالت گذرا
Steady	حالت پایا
PLA	فرمان خلبان
$Ps3$	فشار استاتیکی
Acc	شتابگیری مثبت
Dec	شتابگیری منفی
Total	کلی

9- مراجع

[1] J. Sjoberg, Q. Zhang, L. Ljung, Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview, *Automatica*, Vol. 31, No. 12, pp. 1691-1724, 1995.
[2] H. Asgari, M. Venturini, X. Chen, R. Sainudin, Modeling and simulation of the transient behavior of an industrial power plant gas turbine, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 136, No. 6, pp. 061601-10, 2014.
[3] N. Yadav, I. Khan, S. Grover, Modeling and analysis of simple open-cycle gas turbine using graph networks, *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, Vol. 4, No. 8, pp. 559-567, 2010.
[4] A. Lazzaretto, A. Toffolo, Prediction of performance and emissions of a two-shaft gas turbine from experimental data, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 17, pp. 2405-2415, 2008.
[5] H. Klang, A. Lindholm, *Modelling and simulation of a gas turbine*, Ph.D Thesis, Department of Science and Technology, Linköping University, Sweden, 2005.
[6] R. Romijn, L. ozkan, S. Weiland, J. Ludlage, A grey-box modeling approach for the reduction of nonlinear systems, *Journal of Process Control*, Vol. 18, No. 9, pp. 906-914, 2008.
[7] E. N. Dragoi, C. A. Horoba, I. Mamaliga, S. Curteanu, Grey and black-box modelling based on neural networks and artificial immune systems applied to solid dissolution by rotating disc method, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 82, No. 73, pp. 173-184, 2014.
[8] L. Piroddi, M. Farina, M. Lovera, Black box model identification of nonlinear input–output models: a Wiener–Hammerstein benchmark, *Control Engineering Practice*, Vol. 20, No. 11, pp. 1109-1118, 2012.
[9] A. Lazzaretto, A. Toffolo, Analytical and neural network models for gas turbine design and off-design simulation, *International Journal of Applied Thermodynamics*, Vol. 4, No. 4, pp. 173-182, 2001.
[10] R. Bettocchi, M. Pinelli, P. R. Spina, M. Venturini, Artificial intelligence for the diagnostics of gas turbines part II: neuro-fuzzy approach, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 129, No. 3, pp. 720-729, 2007.
[11] M. Fast, M. Assadi, S. De., Condition based maintenance of gas turbines using simulation data and artificial neural network: a demonstration of feasibility, *Proceedings of the American Society Of Mechanical Engineers Turbo Expo Conference*, Berlin, Germany , June 9-13, pp. 153-161, 2008.
[12] C. Evans, D. Rees, D. Hill, Frequency-domain identification of gas turbine dynamics, *Control Systems Technology*, Vol. 6, No. 5, pp. 651-662, 1998.
[13] N. Chiras, C. Evans, D. Rees, Global nonlinear modeling of gas turbine dynamics using NARMAX structures, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 124, No. 4, pp. 817-826, 2002.
[14] M. Basso, L. Giarre, S. Groppi, G. Zappa, NARX models of an industrial power plant gas turbine, *Control Systems Technology*, Vol. 13, No. 4, pp. 599-604, 2005.

Propulsion Conference & Exhibit, Nashville, July 25–28, 2010.
[27] J. A. DeCastro, J. S. Litt, D. K. Frederick, A modular aero-propulsion system simulation of a large commercial aircraft engine, *Proceedings of The 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Hartford, July 21-23, 2008.
[28] J. Holland, *Adaption in Natural and Artificial Systems*, First Edition, Michigan, pp. 1-20, The University of Michigan Press, 1975.
[29] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, First Edition, pp. 2-4, Massachusetts, the Massachusetts Institute of Technology press, 1998.
[30] S. Sivanandam, S. Deepa, *Introduction to Genetic Algorithms*, First Edition, pp. 1-10, Heidelberg, Springer, 2008.
[31] K. Deb, *Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, First Edition, pp. 227-230, Chichester, Wiley, 2001.
[32] N. Srinivas, K. Deb, Muiltiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms, *Evolutionary Computation*, Vol. 2, No. 3, pp. 221-248, 1994.
[33] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap, T. Meyarivan, *A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II*, Lecture notes in computer science, France, pp. 849-858, 2000.
[34] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 182-197, 2002.
[35] A. M. Zalzala, P. J. Fleming, *Genetic Algorithms in Engineering Systems*, First Edition, pp. 170-178, London: The Institution of Electrical Engineers, 1997.
[36] M. Montazeri-Gh, A. Safari, Tuning of fuzzy fuel controller for aero-engine thrust regulation and safety considerations using genetic algorithm, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 183-192, 2011.
[37] S. Jafari, M. Montazeri-Gh, Evolutionary optimization for gain tuning of jet engine min-max fuel controller, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 27, No. 5, pp. 1015-1023, 2011.
[15] M. Fast, T. Palme, M. Genrup, A novel approach for gas turbine condition monitoring combining CUSUM technique and artificial neural network, *ASME Proceedings: Controls, Diagnostics and Instrumentation*, pp. 567-574, 2009.
[16] H. Asgari, X. Chen, M. B. Menhaj, R. Sainudiin, Artificial neural network–based system identification for a single-shaft gas turbine, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 135, No. 9, pp. 092601-7, 2013.
[17] H. A. Spang, A. H. Brown, Control of jet engines, *Control Engineering Practice*, Vol. 7, No. 9, pp. 1043-1059, 1999.
[18] H. I. H. Saravanamuttoo, G. F. C. Rogers, H. Cohen, *Gas Turbine Theory*, Fifth Edition, pp. 392-395, Harlow, Prentice Hall, 2001.
[19] J. S. Litt, D. K. Frederick, T. H. Guo, The case for intelligent propulsion control for fast engine, *Infotech and Aerospace Conference*, Seattle, Washington, April, 2009.
[20] E. Diaconescu, The use of NARX neural networks to predict chaotic time series, *WSEAS Transactions on Computer Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 182-191, 2008.
[21] G. P. Liu, *Nonlinear Identification and Control: A Neural Network Approach*, First Edition, pp. 78-81, Heidelberg, springer, 2001.
[22] J. D. Mattingly, *Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets*, Second Edition, pp. 244-252, Virginia, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
[23] S. Garg, Aircraft turbine engine control research at NASA Glenn research center, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 422-438, 2013.
[24] M. Montazeri-Gh, A. Safari, S. Jafari, Optimization of turbojet engine fuel control system for safety consideration, *7th Iranian Aerospace Society Conference*, Sharif University of technology, Tehran, Iran, February 19-21, 2008.
[25] H. Richter, *Advanced Control of Turbofan Engines*, First Edition, pp. 141-176, New York, Springer, 2012.
[26] R. D. May, J. Csank, T. M. Lavelle, J. S. Litt, T. H. Guo, A high-fidelity simulation of a generic commercial aircraft engine and controller, *Proceedings of The 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint*