



E-ISSN: 2676-4253

Journal of Technology in Aerospace Engineering

Vol. 10, No. 1, pp. 45-52, 2026

<https://doi.org/10.22034/jtae.2026.10.1.4>

Journal Homepage: <https://www.jtae.ari.ac.ir>



Original Research Paper

Metaheuristic-Based Flight Control System Design for Simultaneous Optimization of Aircraft Range and Endurance

Nikta Forouzandeh^{1*} and Elias Mohajeri²

*1. Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2. Department of Aerospace, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Tehran Science and Research Branch, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 28 June 2025

Revised 20 September 2025

Accepted 29 September 2025

Available Online 26 October 2025

Keywords:

Maximum range

Flight Endurance

Automatic control system

Optimization

Genetic algorithm

ABSTRACT

The aircraft speed control system maintains a designated speed during the cruise phase, in alignment with mission objectives. This study introduces a multi-objective optimization framework to generate a set of speeds that concurrently maximize flight range and endurance. This enables the control system to select a reference speed in flight while adhering to operational constraints such as fuel limitations and navigation requirements, thereby ensuring mission success. The motivation stems from the need to address complex scenarios, including emergency flights that require extended range to reach remote airports and flights with prolonged flight times to enhance safety. A computational optimization method is used to evaluate trade-offs between range and endurance, and the results are validated against an alternative technique to ensure robustness. A controller adjusts the aircraft's speed to an optimal value in real time. Results demonstrate that precomputed optimal speeds provide reliable references for online flight control, improving adaptability during mission execution. This approach applies to both piloted and autonomous aircraft, offering a practical solution for integrating offline optimization into real-time flight management to enhance performance in critical missions.

* Corresponding Author's E-mail: nikta.frzndh@gmail.com

How to Cite this Article:

N. Forouzande and E. Mohajeri, "Metaheuristic-based flight control system design for simultaneous optimization of aircraft range and endurance," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 45-52, 2026, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2026.10.1.4>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by ARI. This article is an open access article licensed under [the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)





طراحی سیستم کنترل پرواز مبتنی بر الگوریتم‌های متاهوریستیک برای بهینه‌سازی همزمان برد و مداومت پروازی هواپیما

نیکتا فروزنده^{۱*} و الیاس مهاجری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۲- دانشجوی دکتری مهندسی هوافضا، گروه هوافضا، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

چکیده

سیستم کنترل سرعت (Speed control system) هواپیما وظیفه نگهداری سرعت هواپیما بر روی مقدار مشخصی خصوصا در فاز پرواز کروز (Cruise) را دارد که سرعت تنظیمی، وابسته به هدف تعیین شده در پرواز کروز است. در این مقاله سعی شده است با رویکرد مسئله چند هدفه، مجموعه‌ای از سرعت‌های قابل قبول برای بهینه‌سازی همزمان برد و مداومت پروازی ایجاد شده تا در طول پرواز، سیستم کنترلی بتواند با توجه به دیگر محدودیت‌های پروازی، یکی از سرعت‌ها را به‌عنوان مرجع انتخاب کرده و به ادامه پرواز بپردازد. در این مقاله از رویکرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای بهینه‌یابی استفاده شده است و با الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه، مقایسه شده است. در نهایت با استفاده از کنترلر PID، سرعت هواپیما بر روی یکی از مقادیر مطلوب تنظیم می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان از خروجی‌های بهینه‌سازی آفلاین، به‌عنوان مقادیر مرجع در پرواز آنلاین استفاده نمود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۰۷ تیر ۱۴۰۴
بازنگری ۲۹ شهریور ۱۴۰۴
پذیرش ۰۷ مهر ۱۴۰۴
اولین انتشار ۰۴ آبان ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

حداکثر برد
مداومت پروازی
سیستم کنترل خودکار
بهینه‌سازی
الگوریتم ژنتیک

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: nikta.frzndh@gmail.com

How to Cite this Article:

N. Forouzandeh and E. Mohajeri, "Metaheuristic-based flight control system design for simultaneous optimization of aircraft range and endurance," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 45-52, 2026, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2026.10.1.4>.

COPYRIGHTS

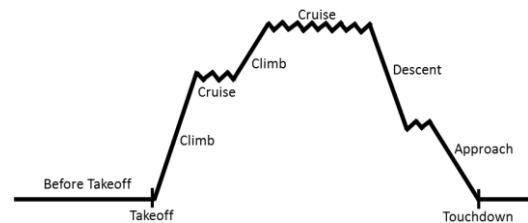
Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by ARI. This article is an open access article licensed under [the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



۱ مقدمه

پرواز هواپیما شامل فازهای مختلفی می‌باشد که در شکل (۱) نشان داده شده‌است:



شکل ۱- فازهای مختلف پروازی [۱].

Fig. 1. Different phases of flight..

پارامترهای مهمی از هواپیما و پرواز در این فاز مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند. بهینه‌سازی کردن پارامترهای مهم پروازی از قبیل برد و مداومت پروازی در این فاز انجام می‌شود. در این زمینه پژوهش‌های متنوعی در حوزه بهینه‌سازی سرعت یا ارتفاع صورت گرفته است. [۲-۴]. با توجه به اهداف مختلف پرواز در فاز کروز، هواپیما می‌تواند سرعت‌های مختلفی را دنبال کند. از جمله سرعت حداقل درگ که منجر به کمینه شدن مصرف سوخت خواهد شد. از مقاصد مهم پرواز کروز می‌توان به بهینه‌سازی برد و یا بهینه‌سازی مداومت پروازی اشاره نمود که در این زمینه تحقیقات مختلفی نیز انجام شده‌است [۵]. قاعدتا برای هر نوع از هواپیما (برای مثال جت یا ملخی)، هر یک از مقاصد فوق در سرعت خاصی روی می‌دهد. آنچه که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است آن است که اگر در یک پرواز کروز خاص، هدف بهینه‌سازی کردن همزمان برد و مداومت پروازی باشد، چه مجموعه‌ای از سرعت‌ها در دسترس سیستم کنترل هواپیما جهت دنبال کردن خواهد بود. به‌عنوان ضرورت این هدف می‌توان به پروازی اشاره نمود که در آن پرواز، خلبان متوجه مشکلی در ارباب فرود خود شده و درخواست فرود می‌دهد در حالیکه فرودگاه نسبت به موقعیت فعلی هواپیما در فاصله دوری واقع شده‌است و همچنین بنا به دلایل ایمنی، بایستی سوخت موجود در هواپیما مصرف شود لذا هواپیما نیاز دارد که مدت زمان بیشتری در آسمان باقی بماند. در نتیجه همزمان می‌بایست برد و مداومت پروازی بهینه‌سازی شود. متداول است که برای بهینه‌یابی از روش‌های عددی استفاده می‌شود [۶]. اما در این پژوهش از رویکرد الگوریتم‌های فراابتکاری و روش الگوریتم ژنتیک چندهدفه مشهور به روش (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) استفاده شده‌است و نتایج آن با الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه (Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MPSO) نیز مقایسه

شده‌است [۷]. در همین راستا، پژوهش‌های اخیر نیز نشان داده‌اند که می‌توان از رویکردهای مشابه برای بهینه‌سازی همزمان جنبه‌های مختلف عملکرد پروازی استفاده نمود؛ به‌عنوان مثال، در مقاله *Optimal controllability and allocation design of a blended wing body aircraft* رویکردی برای بهینه‌سازی همزمان کنترل‌پذیری کانال‌های طولی و عرضی ارائه شده‌است. همچنین در حوزه توسعه سامانه‌های کنترل پروازی با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی، مطالعه *Reinforcement Q-learning based flight control for a passenger aircraft under actuator fault* یادگیری تقویتی را در طراحی کنترل پروازی در شرایط وجود خطا در عملگرها مورد بررسی قرار داده‌است [۱۲-۱۳].

بدین جهت این مسئله شامل دو هدف بهینه‌سازی برد و بهینه‌سازی مداومت پروازی می‌باشد که بر اساس ورودی سرعت هواپیما به‌عنوان متغیر تصمیم، فرآیند تولید پاسخ‌های بهینه انجام شده‌است. آنچه که از نتایج بدست آمده مهم است، تولید مجموعه‌ای از سرعت‌های مختلف برای بهینه‌سازی برد و مداومت پروازی است که می‌تواند در اختیار کامپیوتر پرواز هواپیما قرار گرفته تا بسته به شرایط هواپیما و همچنین دیگر معیارهای انتخاب، بتواند یکی از سرعت‌های این مجموعه بهینه را انتخاب کرده و خلبان یا خلبان خودکار هواپیما فرمان مقتضی جهت رسیدن به سرعت مطلوب و حفظ آن را صادر نماید.

۲ مدل ریاضی برد و مداومت پروازی

همان‌طور که گفته شد، برد و مداومت پروازی از معیارهای اساسی در ارزیابی عملکرد هواپیماها به‌شمار می‌روند [۸]. این دو معیار به‌طور مستقیم تحت تأثیر عواملی مانند وزن، سرعت و مصرف سوخت قرار دارند. یکی از روش‌های رایج برای تحلیل و بهینه‌سازی این معیارها در پرواز کروز با سرعت و ضریب برآ ثابت، که به آن پرواز کروز-اوجگیری (Cruise-climb) گفته می‌شود، استفاده از مدل‌های ریاضی مرتبط است. در ادامه به بررسی مدل ریاضی برد و مداومت پروازی در پرواز کروز-اوجگیری برای یک هواپیمای جت پرداخته شده‌است. برای این فاز، رابطه برد و مداومت پروازی به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$E = \frac{1}{C_j} \frac{L}{D} \ln \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \quad (1)$$

$$R = \frac{V}{C_j} \frac{L}{D} \ln \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \quad (2)$$

اساس دو معیار رتبه (Rank) و فاصله ازدحامی (Crowding distance) انجام می‌شود [۷]. شکل (۲) شبه‌کد روش الگوریتم ژنتیک چندهدفه را نشان می‌دهد.

Algorithm 3 NSGA-II algorithm

```

1: procedure NSGA-II( $N', g, f_k(x_k)$ ) ▷  $N'$  members evolved  $g$  generations to solve  $f_k(x)$ 
2: Initialize Population  $\mathbb{P}$ 
3: Generate random population - size  $N'$ 
4: Evaluate Objective Values
5: Assign Rank (level) Based on Pareto dominance - sort
6: Generate Child Population
7: Binary Tournament Selection
8: Recombination and Mutation
9: for  $i = 1$  to  $g$  do
10: for each Parent and Child in Population do
11: Assign Rank (level) based on Pareto - sort
12: Generate sets of nondominated vectors along  $PF_{known}$ 
13: Loop (inside) by adding solutions to next generation starting from the first front until  $N'$  individuals found determine crowding distance between points on each front
14: end for
15: Select points (elitist) on the lower front (with lower rank) and are outside a crowding distance
16: Create next generation
17: Binary Tournament Selection
18: Recombination and Mutation
19: end for
20: end procedure
    
```

شکل ۲- الگوریتم روش NSGA-II [۱۱].

Fig. 2. NSGA-II algorithm [11].

۴ طراحی کنترلر خطی

قبلا توضیح داده شد که پرواز کروز هواپیما می‌تواند به اهداف مختلفی انجام شود. در این مقاله بیشینه‌سازی همزمان دو معیار برد و مداومت پروازی مورد نظر می‌باشد. لذا همان‌طور که در بخش مقدمه تشریح شد، خروجی مسئله دو هدفه مجموعه‌ای از سرعت‌ها خواهد بود که در شکل (۸) می‌توان مشاهده نمود. اکنون خلبان بسته به شرایط پروازی و البته با دخیل کردن دیگر معیارهای مدیریتی-پروازی، می‌تواند یکی از سرعت‌های منتج از بهینه‌سازی چندهدفه را به‌عنوان سرعت کروز انتخاب کرده و سیستم کنترل پرواز هواپیما باید با فرمان مناسب، سرعت هواپیما را بر روی سرعت انتخابی تنظیم کند.

شکل (۳) حلقه کنترلی را نشان می‌دهد. در این شکل ورودی سیستم کنترلی، سرعت معیار به‌دست آمده از الگوریتم‌های فراابتکاری چند هدفه می‌باشد که قرار است خروجی این سیستم کنترلی که همان سرعت هواپیما می‌باشد بر روی آن عدد تنظیم گردد. در این الگو به منظور ساده سازی از یک الگوی خطی مرتبه اول برای سیستم استفاده شده است که برابر است با:

$$\frac{V(s)}{\delta_{th}(s)} = \frac{1}{s + 1} \quad (۵)$$

در روابط فوق، $W_1, W_2, V, C_j, L / D, R, E$ به‌ترتیب معرف وزن ابتدای پرواز کروز، وزن انتهای پرواز کروز، سرعت، مصرف سوخت ویژه، نسبت لیفت به درگ، برد و مداومت پروازی می‌باشند.

با فرض ثابت بودن مصرف سوخت ویژه برای یک هواپیمای جت، به کمک رابطه (۱) قابل اثبات است که مداومت پروازی در سرعت معادل بیشترین نسبت لیفت به درگ، بیشینه خواهد شد که در واقع برابر با سرعت حداقل درگ خواهد بود.

از طرفی به کمک رابطه (۲)، مقدار بیشینه برد در سرعت معادل بیشینه مقدار رابطه $v \frac{L}{D}$ به‌دست خواهد آمد. لذا به‌طور خلاصه خواهیم داشت:

$$\max_v E \equiv \left(\frac{L}{D} \right)_{\max} \Rightarrow V^* = \sqrt{\frac{2W_1}{\rho S \sqrt{\frac{C_{D_0}}{K}}}} \quad (۳)$$

$$\max_v R \equiv \left(V \frac{L}{D} \right)_{\max} \Rightarrow V^* = \sqrt{\frac{2W_1}{\rho S \sqrt{\frac{C_{D_0}}{3K}}}} \quad (۴)$$

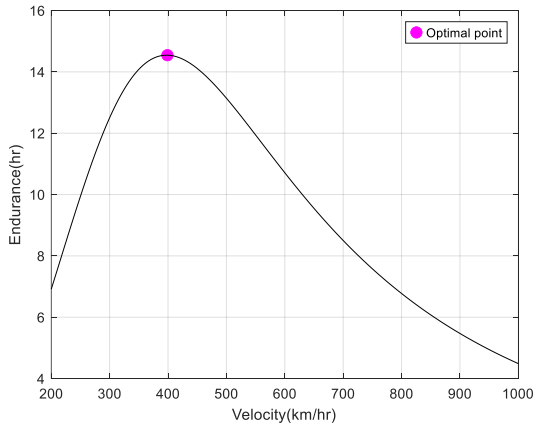
در روابط فوق، ρ, S, K, C_{D_0} به‌ترتیب معرف چگالی ارتفاع پرواز کروز، سطح هواپیما، ثابت رابطه درگ قطبی (Drag polar) و ضریب درگ صفر هواپیما می‌باشند.

رابطه (۳) و (۴) نشان می‌دهد که چنانچه هواپیما بخواند با هدف بیشینه شدن برد پرواز کند می‌بایست با سرعت خاصی پرواز کند که در آن سرعت مقدار درگ کمینه نبوده لذا مداومت پروازی بیشینه نخواهد شد. از طرفی چنانچه هواپیما بخواند با هدف بیشینه شدن مداومت پروازی، طی مسیر کند الزامی است با سرعت خاصی پرواز کند که در آن سرعت مقدار برد بیشینه نخواهد بود. لذا همان‌طور که مشخص است بیشینه کردن تنها یک معیار، در سرعت خاصی رخ می‌دهد که در آن سرعت، معیار دوم بیشینه نخواهد بود.

۳ الگوریتم ژنتیک

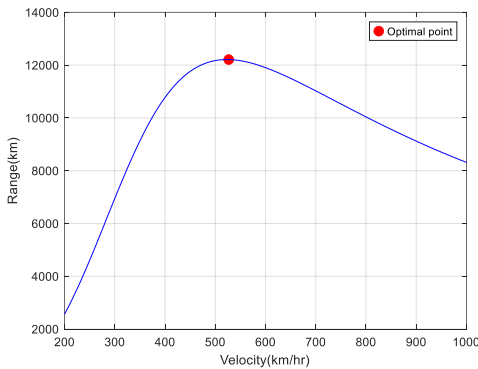
الگوریتم ژنتیک یکی از مهمترین روش‌های بهینه‌سازی تکاملی است که توسط جان هالند معرفی شد [۱۰]. در الگوی پایه این روش، از دو عملگر تقاطع (Crossover) و جهش (Mutation) برای ایجاد نسل‌های جدیدی از پاسخ‌ها استفاده می‌شود. در الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه، تابع هزینه دارای یک مقدار بوده و بر اساس روشی همچون مرتب سازی (Sort) می‌توان بهترین پاسخ در مابین کل جمعیت را به‌دست آورد. این کار در الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II) بر

نتایج مسئله تک‌هدفه مربوط به مداومت پروازی و برد به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده‌است.



شکل ۴- نتیجه الگوریتم ژنتیک جهت بیشینه‌سازی مداومت پروازی.

Fig. 4. Result of the genetic algorithm for maximizing flight continuity.



شکل ۵- نتیجه الگوریتم ژنتیک جهت بیشینه‌سازی برد.

Fig. 5. Result of genetic algorithm for maximizing range.

همانطور که در شکل (۴) و شکل (۵) آمده است مقدار مطلوب سرعت جهت بیشینه کردن مداومت پروازی با مقدار سرعت به دست آمده جهت بیشینه کردن برد پروازی متفاوت می‌باشد. مقدار عددی این دو سرعت در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- سرعت بهینه محاسبه شده در مسئله بهینه‌یابی تک‌هدفه.

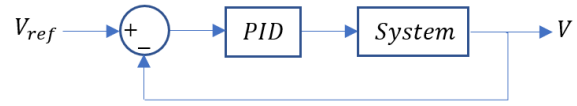
Table 1. Calculated optimal speed in single-objective optimization problem.

Row	Optimal V (km/hr)	Objective
1	399.68	Maximum endurance
2	526.34	Maximum range

طراحی سیستم کنترل سرعت هواپیما بر مبنای نتایج بدست آمده از بیشینه‌سازی ...

$$PID(s) = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \quad (6)$$

در این جا $\delta_{th}, K_i, K_d, K_p$ به ترتیب ضرایب کنترلی و تغییرات دسته گاز است.



شکل ۳- سیستم کنترلی.

Fig. 3. Control system.

۵ نتایج

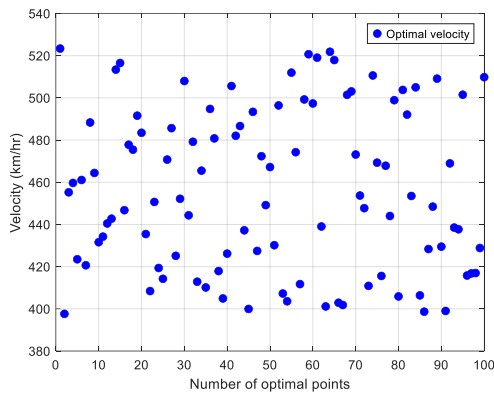
در این بخش، نتایج حاصل از فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه و تحلیل عملکرد سیستم کنترل سرعت هواپیما ارائه شده‌است. ابتدا به بررسی خروجی‌های الگوریتم ژنتیک در مسائل تک‌هدفه و مقایسه‌ی سرعت‌های بهینه‌ی مربوط به بیشینه‌سازی برد و مداومت پروازی پرداخته می‌شود. سپس، با به کارگیری الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II)، مجموعه‌ای از نقاط بهینه (پارتوفران) به دست آمده و رفتار الگوریتم از نظر همگرایی و پایداری مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه نیز نتایج حاصل از مقایسه با الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) و شبیه‌سازی‌های آماری، همراه با تحلیل پاسخ سیستم کنترلی در شرایط مختلف، تشریح می‌گردد. این نتایج مبنایی برای اعتبارسنجی مدل و نشان‌دهنده کارایی رویکرد پیشنهادی در بهینه‌سازی و کنترل سرعت پرواز هستند.

۱.۵ بهینه‌سازی

در این مقاله جهت نشان دادن روند حل مسئله بهینه‌یابی دو هدفه از داده‌های هواپیمای بوئینگ ۷۴۷ استفاده شده‌است. در ابتدا میزان بیشینه برد و مداومت پروازی به صورت جداگانه توسط الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه به دست آمده است. در مسئله تک‌هدفه مربوط به مداومت پروازی و برد، تابع هزینه به ترتیب بر اساس رابطه (۷) و (۸) تعریف شده‌است.

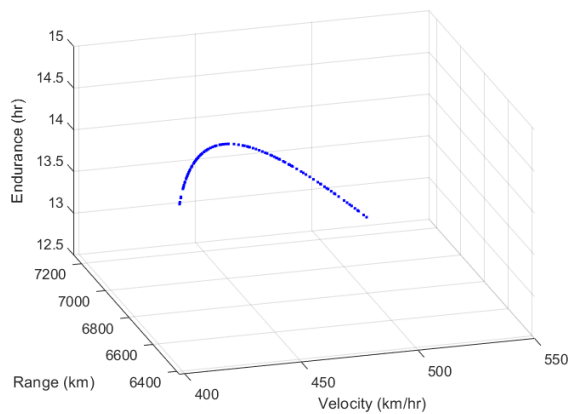
$$E = \frac{1}{C_j} \frac{\frac{2W}{\rho S V^2}}{C_{D_0} + K \left(\frac{2W}{\rho S V^2} \right)^2} \ln \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \rightarrow E = g(V) \quad (7)$$

$$R = \frac{V}{C_j} \frac{\frac{2W}{\rho S V^2}}{C_{D_0} + K \left(\frac{2W}{\rho S V^2} \right)^2} \ln \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \rightarrow R = g'(V) \quad (8)$$



شکل ۸- سرعت‌های بهینه نقاط موجود در جبهه.

Fig. 8. Optimal velocities of points on the front.

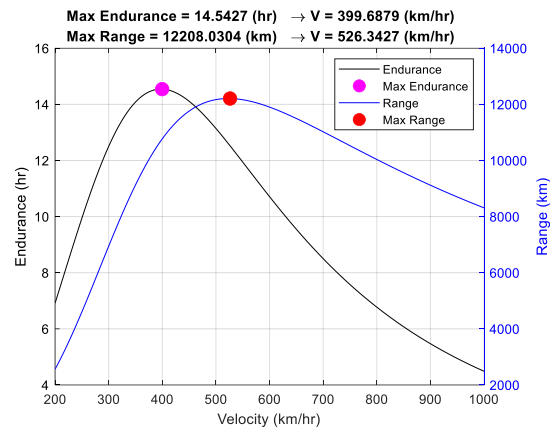


شکل ۹- نمودار سه‌بعدی نقاط موجود در جبهه.

Fig. 9. 3D diagram of points on the front.

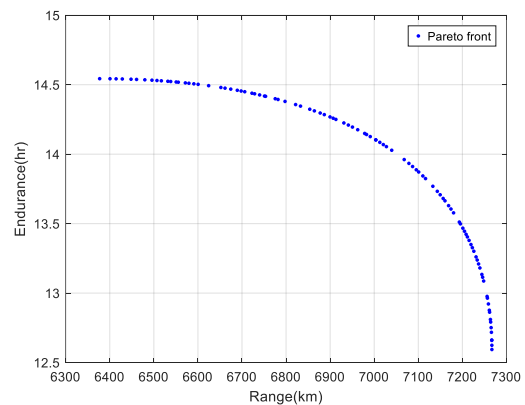
شکل (۷) نتایج مسئله بیشینه کردن همزمان برد و مداومت پروازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل آمده است پاسخ، به‌صورت مجموعه‌ای از نقاط بهینه خواهد بود. به این مجموعه به اصطلاح، پاسخ‌های جبهه اول (پارتوفرانٹ Pareto front) گفته می‌شود. تفاوت مهم در پاسخ مسئله چندهدفه با تک‌هدفه در این است که برخلاف مسائل تک‌هدفه که همواره یک نقطه بهینه وجود دارد، در نوع چند هدفه مجموعه‌ای از پاسخ‌ها وجود دارد که این مجموعه پاسخ‌ها می‌تواند در اختیار سیستم کنترل پرواز هواپیما قرار گرفته تا بر اساس یک الگوی انتخابی، سرعت هواپیما را بر روی یکی از نقاط نشان داده شده در شکل (۷) تنظیم نماید. در جدول (۲) پارامترهای الگوریتم ژنتیک چند هدفه و مقدار آن‌ها معرفی شده‌است. شکل (۸) و شکل (۹) به‌ترتیب سرعت‌های بهینه موجود در جبهه اول و نمودار سه‌بعدی نقاط موجود در جبهه اول را نشان می‌دهد.

شکل (۶) نتایج بهینه‌سازی تک‌هدفه را توأم‌ان نشان می‌دهد و تاییدکننده این نکته است که سرعت بیشینه کننده برد، بیشتر از سرعت بیشینه کننده مداومت پروازی می‌باشد که از روابط تئوری (۳) و (۴) نیز قابل اثبات است.



شکل ۶- مقایسه نتایج بهینه‌سازی در مسئله تک‌هدفه.

Fig. 6. Comparison of optimization results in a single-objective problem.



شکل ۷- برد و مداومت پروازی بیشینه در الگوریتم بهینه‌یابی دو هدفه.

Fig. 7. Maximum flight range and endurance in the dual-objective optimization algorithm.

جدول ۲- پارامترهای الگوریتم ژنتیک چند هدفه (NSGA-II).

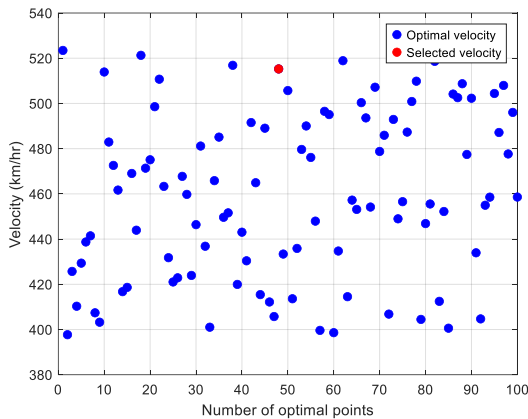
Table 2. Parameters of Multi-Objective Genetic Algorithm (NSGA-II).

Row	Value	Parameter
1	100	Maximum iterations
2	100	Initial population
3	80	Crossover rate
4	10	Mutation rate

۵.۲ فرامین کنترلی

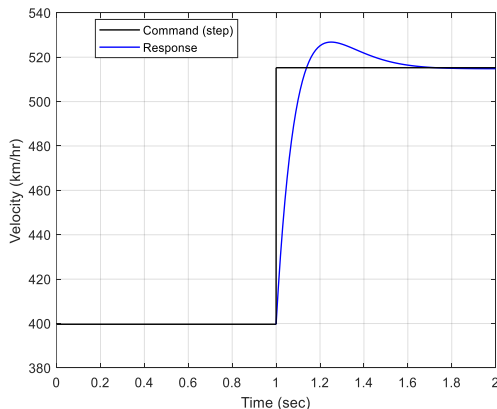
همان‌طور که قبلاً گفته شد، سیستم کنترلی بر اساس یکی از سرعت‌های انتخابی از جبهه اول به‌عنوان مرجع، سرعت هواپیما را بسته به نوع سیستم (مرتبه یک یا دو یا بالاتر) و البته تنظیم پارامترهای کنترلر PID، تنظیم خواهد کرد.

فرض کنید که هواپیما با سرعت معادل بیشترین مداومت پروازی (۳۹۹/۶۸ کیلومتر بر ساعت) در حال حرکت بوده است که بنا به دلایل خلبان تصمیم می‌گیرد که همزمان با پیشینه کردن مداومت پروازی، برد هواپیما را نیز پیشینه سازد. لذا بسته به شرایط موجود، سرعت نشان داده شده در شکل (۱۱) را به‌عنوان سرعت مطلوب (۵۱۵/۲۶ کیلومتر بر ساعت) انتخاب می‌کند. شکل (۱۲) به خوبی نشان می‌دهد که سیستم کنترلی فرمان پله جهت تغییر سرعت را اعمال کرده و سیستم توانسته است بر اساس دو معیار حداکثر فراجش ۱۰ درصد و زمان نشست ۰/۵ ثانیه با تنظیم دقیق پارامترهای کنترلر PID، فرمان کنترلی را دنبال کند.



شکل ۱۱ - انتخاب یکی از نقاط موجود در جبهه.

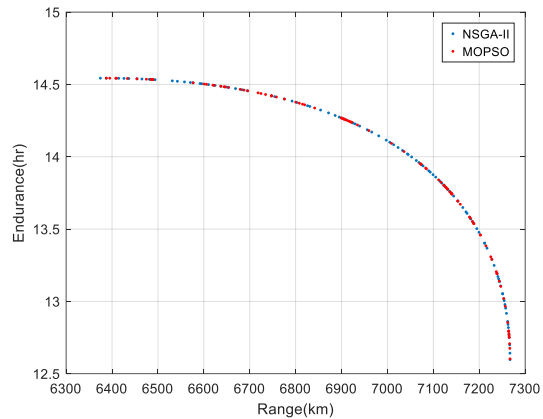
Fig. 11. Selecting one of the points on the front.



شکل ۱۲ - فرمان کنترلی و پاسخ سیستم.

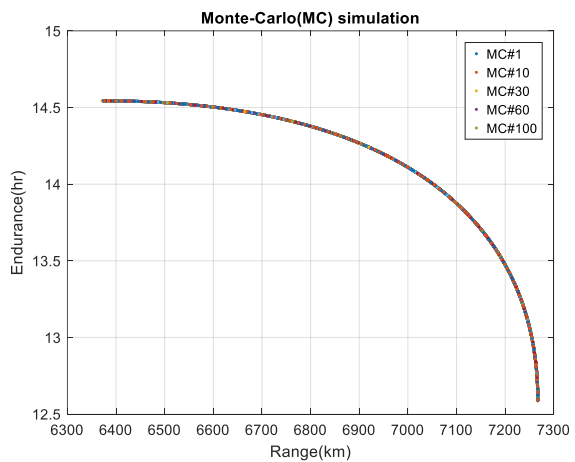
Fig. 12. Control command and system response.

شکل (۱۰) مقایسه خروجی الگوریتم ژنتیک چند هدفه با الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۱۱) شبیه‌سازی مونت کارلو به تعداد ۵۰۰ مرتبه برای پهنه‌یابی که از جهت آماری نشان دهنده قابلیت این الگوریتم جهت یافتن پارتوفرانته می‌باشد.



شکل ۱۰ - مقایسه نتایج الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات چندهدفه.

Fig. 10. Comparison of results of genetic algorithm and multi-objective particle swarm.



شکل ۱۱ - شبیه‌سازی مونت کارلو جهت تولید پارتوفرانته.

Fig. 11. Monte Carlo simulation for partofront generation.

توجه داشته باشید که از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به پرواز در فاز کروز و مدل‌سازی برد و مداومت پروازی با فرض ساده‌کننده سرعت و ضریب لیفت ثابت اشاره نمود. همچنین ضروری است که به محدودیت‌های سخت افزاری و اثرات آن بر سرعت اجرای الگوریتم پهنه‌یابی چند هدفه نیز توجه داشت.

۶ نتیجه گیری

بیشینه‌سازی برد و مداومت پروازی به‌عنوان معیارهای مهم پرواز کروز، یکی از دغدغه‌های همیشگی طراحان هواپیما جهت بالابردن کارایی هواپیما بوده است. تئوری‌های تحلیلی و همچنین تست‌های پروازی نشان می‌دهد که بیشینه کردن برد موجب کاهش مداومت پروازی و بالعکس می‌شود. اما بعضی مواقع در پرواز با شرایطی روبرو هستیم که بایستی هر دو معیار بیشینه گردند. لذا عملاً با یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه روبرو خواهیم بود. هدف از این مقاله طراحی سیستم کنترلی و تغییر سرعت به‌عنوان متغیر کنترلی، جهت بیشینه‌سازی همزمان این دو معیار با استفاده از نتایج بهینه‌یابی دوهدفه بود. در این مقاله از رویکرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) جهت بیشینه‌سازی همزمان برد و مداومت پروازی استفاده شد و از نتایج آفلاین به‌دست آمده در قالب سرعت‌های موجود در جبهه اول (پارتوفران‌ت)، به‌صورت آنلاین در طول پرواز استفاده شد. نتایج به خوبی نشان دهنده موفقیت سیستم کنترلی در تولید فرامین و پاسخ مناسب سیستم با توجه به عملکرد صحیح کنترلر PID می‌باشد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده‌است

مراجع

- and level flight segments," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Minneapolis, Minnesota, 2012, AIAA 2012-4772 <https://doi.org/10.2514/6.2012-4772>.
- [5] A. Delgado, C. Rubio, D. Domínguez, and A. Escapa, "Cruise range optimization of a propeller-driven light aircraft using a direct transcription method with a regularization term," *Aerospace*, vol. 11, no. 10, 2024, Art. no. 794, <https://doi.org/10.3390/aerospace11100794>.
- [6] G. Huang, Y. Lu, and Y. Nan, "A survey of numerical algorithms for trajectory optimization of flight vehicles," *Science China Technological Sciences*, vol. 55, no. 9, pp. 2538–2560, 2012, <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4946-y>.
- [7] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002, <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.
- [8] W. A. Mair and D. L. Birdsall, *Aircraft Performance (Cambridge Aerospace Series)*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511607134>.
- [9] T. Young, *Performance of the Jet Transport Airplane: Analysis Methods, Flight Operations, and Regulations*. 2017, <https://doi.org/10.1002/9781118534786>.
- [10] A. Lambora, K. Gupta, and K. Chopra, "Genetic algorithm-a literature review," in *International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon)*, 2019, pp. 380–384, <https://doi.org/10.1109/COMITCon.2019.8862255>.
- [11] C. Coello, D. Veldhuizen, and G. Lamont, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, 2nd ed. Springer, 2007, <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36797-2>.
- [12] M. Khadiv, M. Tayefi, J. Asghari, and D. Ghorghi, "Optimal controllability and allocation design of a blended wing body aircraft," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, vol. 97, no. 5, pp. 624–635, 2025, <https://doi.org/10.1108/AEAT-03-2025-0080>. [ORCID+1](https://orcid.org/10.1108/AEAT-03-2025-0080).
- [13] N. Mohammadi, M. Ebrahimi, M. Tayefi, and A. Nikkhah, "Reinforcement Q-learning based flight control for a passenger aircraft under actuator fault," *Discover Mechanical Engineering*, vol. 4, art. no. 9, 2025, <https://doi.org/10.1007/s44245-025-00090-x>.
- [1] V. Goblet, N. Fala, and K. Marais, "Identifying phases of flight in general aviation operations," in *15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, Dallas, TX, 2015, Paper AIAA 2015-2851, <https://doi.org/10.2514/6.2015-2851>.
- [2] R. Oruc and T. Baklacioglu, "Cruise range modeling of different flight strategies for transport aircraft using genetic algorithms and particle swarm optimization," *Energy*, vol. 294, 2024, Art. no. 130917, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130917>.
- [3] V. A. Alexandrov *et al.*, "Aircraft cruise altitude and speed profile optimization in a real atmosphere," *Automation and Remote Control*, vol. 84, no. 4, pp. 327–336, 2023, <https://doi.org/10.1134/S0005117923040021>.
- [4] B. Dancila, R. Botez, and D. Labour, "Altitude optimization algorithm for cruise, constant speed