

(علمی-پژوهشی)

بهینه‌سازی یک هواپیمای بی‌سرنشین با استفاده از منطق فازی و بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی

در این تحقیق سعی شده است تا با ارائه یک روش، مشکلات مربوط به بهینه‌سازی‌های چندهدفه مقید (بیاده‌سازی، زمان محاسبات و سادگی) تا حدودی برطرف شود. این روش که بر مبنای منطق فازی است یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه مقید را به یک مساله بهینه‌سازی تک هدفه نامقید تبدیل می‌کند و به این شکل بسیاری از مشکلات ذکر شده برطرف می‌شود. جهت نشان دادن کارایی روش، سه بهینه‌سازی طراحی یک هواپیمای بی‌سرنشین انجام شده است. هدف بهینه‌سازی اول، مقایسه عملکرد این روش با دو روش معروف بهینه‌سازی چندهدفه است. هدف از بهینه‌سازی‌های دوم و سوم نیز نشان دادن این قابلیت از روش پیشنهادی است که برحسب ضرورت طراح می‌تواند به شکل آگاهانه درجه اهمیت را روی توابع هدف و یا قیود تغییر دهد. نتایج بهینه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که زمان محاسبات با استفاده از روش پیشنهادی کاهش یافته و همچنین با تغییر درجه اهمیت، دو طرح کاملا متفاوت به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چندهدفه، بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی، منطق فازی، الگوریتم ژنتیک، هواپیمای بی‌سرنشین

محمدرضا ستاینده^{۱*} و علیرضا بابایی^{۱**}

۱- مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران، کدپستی: ۱۵۸۷۵۱۷۷۴

* دانش‌آموخته دکتری (نویسنده پاسخگو)، ایمیل: setayande@mut-es.ac.ir

** استادیار

Optimization of an Unmanned Aerial Vehicle Using Fuzzy Logic and Multidisciplinary Design Optimization

This research tries to propose a method to solve problems related to constrained multi-objective optimizations (implementation, computation time, and simplicity). This method, based on fuzzy logic, converts constrained multi-objective optimization problem into unconstrained single-objective optimization problems so many of the mentioned problems are solved. To demonstrate the efficiency of this method, three multidisciplinary design optimizations of an unmanned aerial vehicle have been performed. The aim of the first optimization is to compare the performance of the proposed method with two well-known methods of multi-objective optimizations. The purpose of the second and third optimizations is to show this capability of the proposed method that the designer, according to need, can consciously change the degree of importance on the objective functions or constraints. The results of the optimizations show that the computational time has been reduced, and two different optimal designs have been obtained by changing the degree of importance.

Keywords: Multi-objective Optimization, Multidisciplinary Design Optimization, Fuzzy Logic, Genetic Algorithm, Unmanned Aerial Vehicle

M.R. Setayandeh^{1*} and A. babaei^{1**}

1- Mechanical University Complex, Malek-ashtar University of Technology, Iran, Postal Code: 158751774, Isfahan, IRAN

* Assistant Professor (Corresponding Author): Email:

setayande@mut-es.ac.ir

** Ph.D. Holder

۱- فهرست علائم

| | |
|--|---------------------|
| نسبت منظری بال | AR |
| نسبت منظری دم افقی | AR_{ht} |
| نسبت منظری دم عمودی | AR_{vt} |
| قید نام | C_i |
| منطق فازی | FL |
| تابع برتری قیود | F_C |
| تابع برتری توابع هدف | F_J |
| تابع نماینده | F_R |
| زاویه نصب دم افقی (deg) | i_H |
| مساحت دم افقی (m^2) | S_{ht} |
| مساحت دم عمودی (m^2) | S_{vt} |
| مساحت بال (m^2) | S_w |
| حاشیه پایداری | SM |
| ثابت زمانی مود رل (s) | T_{roll} |
| ثابت زمانی مود اسپیرل (s) | T_{spiral} |
| فاصله طولی بال از دماغه هواپیما (m) | X_{Aw} |
| علائم یونانی | |
| نسبت باریک‌شوندگی بال | λ |
| نسبت باریک‌شوندگی دم افقی | λ_{ht} |
| نسبت باریک‌شوندگی دم عمودی | λ_{vt} |
| زاویه سوئیچ لبه حمله بال (deg) | Λ_{LE} |
| زاویه سوئیچ لبه حمله دم افقی (deg) | $\Lambda_{LE_{ht}}$ |
| زاویه سوئیچ لبه حمله دم عمودی (deg) | $\Lambda_{LE_{vt}}$ |
| زاویه حمله (deg) | α |
| اولین زاویه از boat tail بدنه (deg) | δ_1 |
| دومین زاویه از boat tail بدنه (deg) | δ_2 |
| زاویه انحراف الویتور (deg) | δ_E |
| زاویه پیچش بال (deg) | ε |
| ضریب میرایی مود داچرل | ξ_{dr} |
| ضریب میرایی مود پرپود بلند | ξ_{ph} |
| ضریب میرایی مود پرپود کوتاه | ξ_{sp} |
| تابع عضویت فازی | μ |
| فرکانس مود حرکتی داچرل ($rads^{-1}$) | ω_{dr} |
| فرکانس مود حرکتی پرپود بلند ($rads^{-1}$) | ω_{ph} |
| فرکانس مود حرکتی پرپود کوتاه ($rads^{-1}$) | ω_{sp} |
| زیر نویس‌ها | |
| فاز پروازی سیر | cr |
| فاز پروازی گردش | tu |
| فازهای پروازی pull-up و pull-down | $pu \ \& \ pd$ |

۲- مقدمه

تا چند دهه قبل دستیابی به یک طرح بهینه در فاز طراحی مفهومی و در یک بازه زمانی مناسب از نیازهای اصلی مهندسان هوافضا بود. این نیاز از آنجا ناشی می‌شد که روش‌های طراحی سنتی عموماً زمان‌بر (پرهزینه) بودند و در نهایت یک طرح نزدیک به بهینه (و نه کاملاً بهینه) را پیشنهاد می‌دادند. روش‌های بهینه‌سازی طراحی یک جایگزین مناسب برای روش‌های طراحی سنتی شدند که توانستند به خوبی نقاط ضعف این روش‌ها را در فاز طراحی مفهومی پوشش دهند. یکی از معروفترین نگرش‌های روش‌های بهینه‌سازی طراحی، نگرش بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی^۱ است. افزایش سرعت طراحی، دستیابی به حل‌های بهینه و افزایش انعطاف‌پذیری در مقابل تغییرات از مهمترین مزایای این نگرش می‌باشند [۱-۲].

اگرچه نگرش بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی توانست زمان طراحی را کاهش دهد، اما به دلیل اینکه در این نگرش باید همه موضوعات درگیر طراحی به شکل همزمان در نظر گرفته شوند و از سوی دیگر به دلیل ماهیت پیچیده مسائل واقعی مهندسی، چالش‌های جدیدی از نقطه‌نظر پیاده‌سازی و زمان محاسباتی مقابل این نگرش ایجاد شد. در ابتدای ظهور این نگرش عموماً از روش‌های بهینه‌سازی گرادیانی جهت حل مسائل استفاده می‌شد. این روش‌های بهینه‌سازی اگرچه سرعت همگرایی خوبی دارند، اما در تقابل با مسائل بهینه‌سازی مهندسی عملکرد چندان موفقیتی در یافتن حل بهینه کلی ندارند. با پیدایش الگوریتم‌های تکاملی^۲ مشکل یافتن حل بهینه کلی برطرف شد، اما این روش‌ها عموماً در قیاس با روش‌های گرادیانی کندتر می‌باشند [۳]. این مشکل (سرعت پائین روش‌های گرادیانی) در مسائلی با بیش از یک تابع هدف دو چندان می‌شود. علاوه بر مشکل زمان محاسباتی برای مسائل پیچیده، اعمال و پیاده‌سازی قیود بهینه‌سازی نیز دیگر مشکل روش‌های بهینه‌سازی مذکور (اعم از گرادیانی و تکاملی) می‌باشد. ضرورت استفاده از ابزارهای آنالیز با دقت بالا^۳ در مواجهه با مسائل پیچیده، چالش جدید دیگری است که در مقابل نگرش بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی قرار دارد. اگرچه پیدایش مفهوم مدل‌های جانشین^۴ توانسته است تا حدی در برطرف کردن این چالش مؤثر باشد، اما ایجاد یک مدل جانشین نیز پیچیدگی‌ها و ظرافت‌های مخصوص بخود را داراست.

1. Multidisciplinary Design Optimization
2. Evolutionary Algorithms
3. High fidelity Analysis Tools
4. Surrogate Model

بابایی و همکارانش [۲] بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی یک هواپیمای بی‌سرنشین را مورد بررسی قرار داده‌اند. از آنجاکه مساله بهینه‌سازی در این تحقیق یک مساله چندهدفه بوده است، از تابع درجه رضایت‌مندی فازی جهت انتخاب حل نهایی از میان جبهه پرتو فرانت استفاده شده است. آلیسون^۱ و همکارانش [۴] یک پارچوب بهینه‌سازی و آنالیز چندموضوعی تدوین کرده‌اند که هدف از آن انجام طراحی مفهومی یک وسیله هوایی مافوق صوت ذکر شده است. سان^۲ و همکارانش [۵] یک محیط آنالیز و بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی را ایجاد کرده‌اند. از ویژگی‌های کلیدی این محیط طراحی، قابلیت انعطاف مناسب و استقلال آن بیان شده است. در این تحقیق، کاربرد این محیط در طراحی یک هواپیمای جت تجاری مافوق صوت مورد بررسی قرار گرفته است. روشنی‌یان و همکارانش [۶] با استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه به طراحی یک هواپیمای هوانوردی عمومی پرداخته‌اند. در این تحقیق دو تابع هدف در نظر گرفته شده است که با استفاده از روش بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه ژنتیک، جبهه پرتو فرانت ایجاد شده است. سپالودا^۳ و همکارانش [۷] بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی یک هواپیمای بی‌سرنشین جنگی را مورد بررسی قرار داده‌اند. ماژول آنالیز چندموضوعی در این تحقیق قابلیت انجام آنالیز با درجه دقت‌های مختلف را دارا است. لویی^۴ و همکارانش [۸] یک الگوریتم ژنتیک چندهدفه هیبریدی برای به دست آوردن حل‌های عملی در بهینه‌سازی طراحی هواپیما ارائه داده‌اند. جعفریان و همکارانش [۹] یک روش جدید برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از منطق فازی پیشنهاد داده‌اند. یکی از مزیت‌های این روش آن است که طراح به شکل پیوسته با این روش در تعامل است تا یک حل بهینه مناسب از نقطه‌نظر طراح حاصل شود. هوانگ^۵ و همکارانش [۱۰] روشی را بر مبنای منطق فازی برای مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه داده‌اند که با استفاده از آن می‌توان جبهه پرتو فرانت با حداکثر درجه رضایت‌مندی و حداقل فاصله از حل ایده‌آل ایجاد نمود. حل بهینه نهایی با استفاده از بررسی ماتریس ارزیابی انتخاب می‌شود. نویسندگان این مقاله ادعا کرده‌اند که با استفاده از این روش مشکلات مسائل بهینه‌سازی چندهدفه کاهش می‌یابد. وانگ^۶ و همکارانش [۱۱] یک استراتژی بهینه‌سازی چندهدفه فازی توسعه داده‌اند که بر مبنای

آن یک شاخص عملکردی بهبود یافته ایجاد می‌شود و بر اساس آن می‌توان بین توابع هدف متضاد سازش حاصل کرد. هدف این مقاله آن است که یک روش بر مبنای منطق فازی برای مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شود تا با استفاده از آن بتوان یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه مقید را به یک مساله بهینه‌سازی تک هدفه نامقید تبدیل نمود. با این استراتژی می‌توان ادعا نمود که مشکلات مربوط به پیاده‌سازی و بهینه‌سازی مسائل چندهدفه (زمان محاسبات و اعمال قیود) برطرف می‌شود. این موضوع اولین مزیت روش ارائه شده است. دومین مزیت این روش آن است که در صورت نیاز طراح می‌تواند به شکل آگاهانه بین توابع هدف و قیود وزن‌دهی‌های مختلفی انجام دهد. اگرچه با روش مجموع وزن‌دهی^۷ نیز می‌توان بین توابع هدف و قیود وزن‌دهی‌های مختلفی انجام داد، اما در این روش تغییر وزن‌ها عموماً به شکل سعی و خطا و بدون آگاهی است که کیفیت جواب‌های به دست آمده به شدت به تعیین این وزن‌ها وابسته است. سومین مزیت این روش نیز آن است که طراح می‌تواند تجربه و دانش خود را با استفاده از قوانین فازی در بهینه‌سازی مساله وارد نماید. این مزیت، نقطه قوت روش‌های طراحی کلاسیک می‌باشد که همیشه از آن به عنوان یک عیب روش بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی یاد می‌شود. بنابراین با استفاده از این روش، این فقدان نیز تاحدی برطرف می‌شود. جهت نشان دادن کارایی روش ارائه شده، بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی یک هواپیمای بی‌سرنشین مورد بررسی قرار گرفته است و با انجام بهینه‌سازی‌های مختلف سه مزیت عنوان شده اثبات شده است.

در ادامه و در بخش دوم روش پیشنهادی بیان شده است. بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی هواپیمای بی‌سرنشین در بخش سوم ارائه شده است. بخش چهارم به بیان نتایج شبیه‌سازی اختصاص یافته است. در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری این تحقیق بیان شده است.

۲- روش پیشنهادی

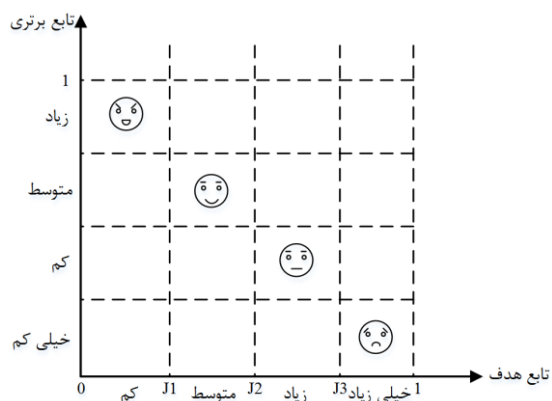
در این بخش سعی بر آن است تا روش پیشنهاد شده به شکل کامل توضیح داده شود. روش پیشنهادی شامل دو مرحله است. در مرحله اول، برای هر تابع هدف و قید مساله بهینه‌سازی، تابعی تحت عنوان تابع برتری ایجاد می‌شود. این تابع با استفاده از منطق فازی تشکیل شده و می‌توان بیان نمود که تجربه طراح به واسطه تشکیل این تابع (از طریق قوانین فازی) برای هر تابع

1. Allison
2. Sun
3. Sepulveda
4. Lui
5. Huang
6. Wang

7. Sum Weighted Method (SWM)

(علمی-پژوهشی)
محمدرضا ستاینده و علیرضا بابایی

مندی و عدد یک به معنای حداکثر رضایت‌مندی می‌باشد. جهت ایجاد تابع برتری تابع هدف (یا قید) به این شکل عمل می‌شود که در ابتدا یک نمودار دو بعدی $(X-Y)$ را در نظر بگیرید که محور X آن تابع هدف (یا قید) و محور Y آن تابع برتری متناظر را نشان می‌دهد. در ابتدا طراح باید محور X را به چند ناحیه عددی تقسیم نماید و برای هر ناحیه از نقطه‌نظر رضایت‌مندی رفتار محور X یک متغیر کیفی اختصاص دهد. در مرحله بعد باید محور Y (که بین صفر و یک است) را به چند ناحیه عددی تقسیم نماید و همانند قبل برای هر ناحیه یک متغیر کیفی اختصاص دهد. این فرآیند در شکل ۲ نشان داده شده است. همانگونه که واضح است در یک مساله کمینه‌سازی هرچه مقدار تابع هدف کمتر باشد، بهتر است. بنابراین، در ناحیه بین عدد صفر و $J1$ بیشترین درجه رضایت‌مندی و در ناحیه بزرگتر از $J3$ کمترین درجه رضایت‌مندی وجود دارد. تقسیم‌بندی محورهای X و Y اولین استفاده از تجربه فرد طراح است چراکه کاملاً متکی به نقطه‌نظر و عقیده طراح می‌باشد. در ادامه باید ارتباطی بین محور X و Y ایجاد شود. از آنجاکه یکی از اهداف بیان شده آن است که بتوان تجربه طراح در فرآیند بهینه‌سازی اعمال شود، بنابراین این ارتباط از طریق منطق فازی انجام می‌گیرد. با برقراری این ارتباط برای هر تابع هدف و هر قید یک تابع برتری ایجاد می‌شود. این مرحله یکی از مهمترین قسمت‌های روش پیشنهادی است چراکه در این مرحله تجربه طراح به شکل هوشمندانه در فرآیند بهینه‌سازی اعمال می‌شود.

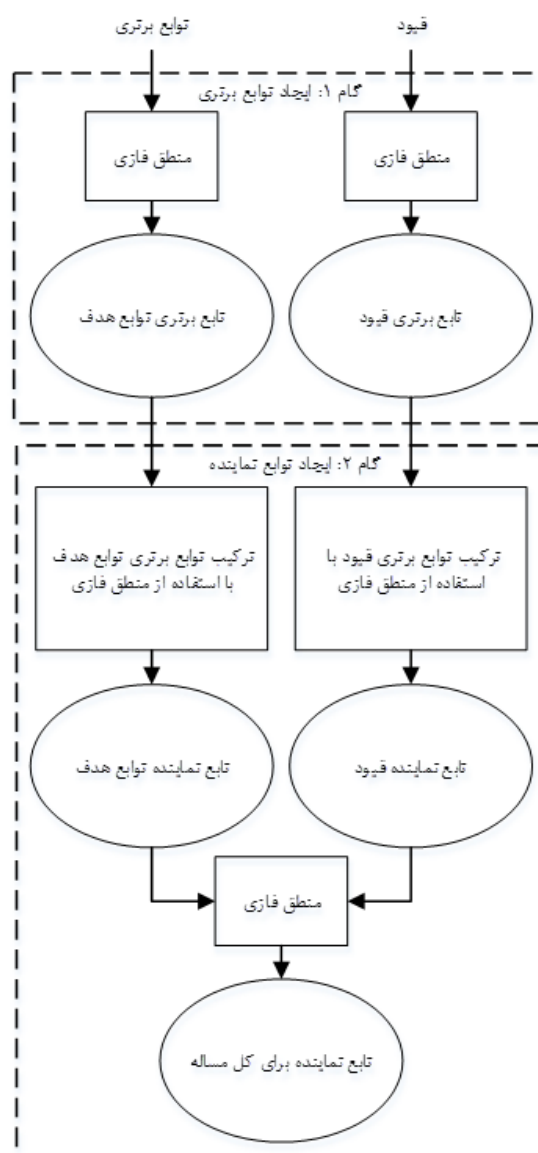


شکل (۲): مثالی از تقسیم‌بندی محورهای X و Y برای یک مساله کمینه‌سازی.

۲-۲- تابع نماینده

برای ایجاد تابع نماینده باید توابع برتری ایجاد شده برای توابع هدف و قیود در مرحله قبل و در چندین مرحله به شکل مجزا و با فرآیندی مشابه با فرآیند ایجاد تابع برتری از طریق منطق فازی با یکدیگر ترکیب شوند. برای ایجاد تابع نماینده قیود، توابع برتری قیود در چندین مرحله ترکیب می‌شوند و در نهایت

هدف و قید می‌تواند در فرآیند بهینه‌سازی اعمال شود. در مرحله دوم، یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه مقید از طریق منطق فازی به یک مساله بهینه‌سازی تک هدفه نامقید تبدیل می‌شود. در این مرحله، توابع برتری توابع هدف با یکدیگر و توابع برتری قیود نیز با یکدیگر و در چندین مرحله با هم ترکیب می‌شوند تا در نهایت دو تابع نماینده برای توابع هدف و قیود مساله ایجاد شود. در آخرین گام نیز این دو تابع نماینده از طریق منطق فازی با هم ترکیب شده و یک تابع نماینده برای کل مساله به دست می‌آید. این فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): فلوچارت روش پیشنهادی.

۲-۱- تابع برتری

به شکل ساده تابع برتری تابعی است که درجه رضایت‌مندی توابع هدف و قیود مساله را نشان می‌دهد. مقدار عددی این تابع بین صفر و یک است که عدد صفر به معنای حداقل رضایت-

ساختار امکان‌پذیری طراحی چندموضوعی^۱ استفاده شده است. جهت نشان دادن کارایی این روش، سه بهینه‌سازی در این بخش انجام شده است که به شرح زیر می‌باشند:

• در بهینه‌سازی اول به مزیت کاهش زمان محاسباتی و بهبود کیفیت جواب‌های به دست آمده به واسطه اعمال تجربه طراح پرداخته می‌شود. در تدوین قوانین فازی در این بهینه‌سازی، تمرکز بین توابع هدف و همچنین بین قیود به شکل مساوی در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، درجه اهمیت توابع هدف و کلیه قیود برای طراح یکسان می‌باشد و طراح به دنبال طرحی است که هم توابع هدف را به شکل یکسان بهینه نماید و هم قیود مساله به شکل یکسان لحاظ شوند.

• در ایجاد تابع نماینده در بهینه‌سازی دوم، تمرکز طراح بر روی قیود است. به عبارت دیگر، طراح تمایل دارد به طرح بهینه‌ای برسد که در آن کلیه قیود لحاظ شده به شکل کامل برآورده شوند. در واقع، در این حالت درجه اهمیت برآورده شدن قیود برای طراح بالاتر از درجه اهمیت توابع هدف می‌باشد.

• بهینه‌سازی سوم برخلاف بهینه‌سازی دوم است. در واقع طراح به دنبال طرح بهینه‌ای است که درجه اهمیت توابع هدف در ایجاد تابع نماینده بالاتر از قیود می‌باشد. به عبارت دیگر، برآورده نشدن نسبی برخی از قیود برای طراح مهم نیست، چراکه هدف اصلی او کاهش توابع هدف می‌باشد.

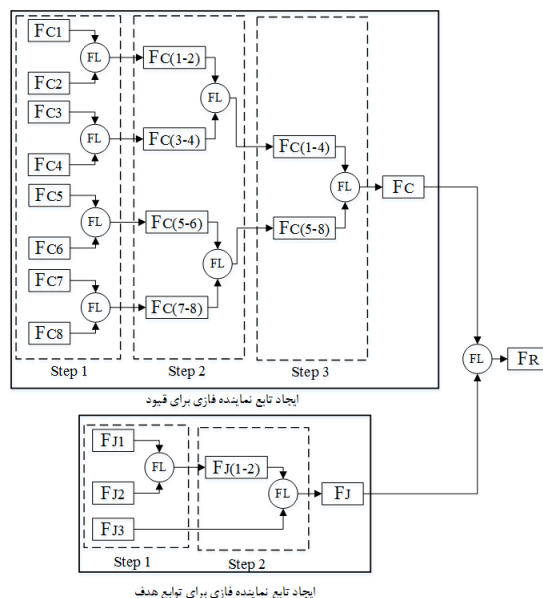
شایان ذکر است که در بهینه‌سازی دوم و سوم به این مزیت روش پرداخته شده است که برحسب الزامات طراحی و یا نیاز مشتری، طراح می‌تواند با آگاهی و به شکل هوشمندانه تمرکز را بر قیود و یا توابع هدف تغییر دهد. بار دیگر تأکید می‌شود که تفاوت بین سه بهینه‌سازی انجام شده تنها در تدوین قوانین فازی برای تشکیل تابع نماینده می‌باشد.

۳-۱- توابع هدف، متغیرهای طراحی و قیود طراحی

در هر سه بهینه‌سازی انجام شده کمینه‌سازی وزن برخاست و نیروی پسا فاز سیر، توابع هدف در نظر گرفته شده می‌باشند. همچنین، جداول ۱ و ۲ به ترتیب متغیرها و قیود طراحی همراه با حدود آنها را بیان می‌کنند. مبنای انتخاب قیود براساس سه الزام پایداری، تریب و کیفیت خوددستی می‌باشد تا طرح بهینه به دست آمده بتواند الزامات واقعی موجود را برآورده سازد. بنابر توضیحات داده شده مساله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده یک

این تابع نماینده ایجاد می‌شود. این موضوع برای ایجاد تابع نماینده توابع هدف نیز صادق است. پس از ایجاد توابع نماینده قیود و توابع هدف و در آخرین گام این دو تابع نماینده نیز با یکدیگر ترکیب شده و یک تابع نماینده کل (که بیانگر رفتار توابع هدف و قیود مساله است) به دست می‌آید. به این ترتیب در این مرحله، یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه مقید به یک مساله بهینه‌سازی تک‌هدفه نامقید تبدیل می‌شود. شکل ۳ این فرآیند را برای یک مساله با سه تابع هدف و هشت قید نشان داده است. همانگونه که در شکل ۳ مشخص است به ترتیب در سه و دو مرحله تابع نماینده قیود و توابع هدف ایجاد شده‌اند. در نهایت این دو تابع نیز با استفاده از منطق فازی با یکدیگر ترکیب شده و تابع نماینده کل مساله ایجاد گردیده است.

شایان ذکر است که در این فاز نیز تجربه طراح در تدوین قوانین فازی جهت ترکیب توابع برتری و چگونگی ترکیب توابع برتری (در هر مرحله کدامیک از توابع برتری با یکدیگر ترکیب شوند) اعمال می‌شود. مزیت دیگر این روش آن است که در این مرحله، طراح با آگاهی می‌تواند بین توابع هدف و قیود وزن‌دهی انجام دهد و بنابر الزامات طراحی، طراحی‌های مختلفی به دست آورد. این موضوع با تغییر قوانین فازی در هر مرحله قابل وصول است.



شکل (۳): ایجاد تابع نماینده.

۳- بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی هواپیمای بی‌سرنشین

در این بخش جهت اعتبارسنجی، بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی یک هواپیمای بی‌سرنشین با استفاده از روش ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته است. در کلیه بهینه‌سازی‌ها از

(علمی-پژوهشی)
محمد رضا ستاینده و علیرضا بابایی

جدول (۳): مأموریت در نظر گرفته شده

| ارتفاع سیر (m) | سرعت سیر (m/s) | مداومت پروازی (hr) | وزن محموله (kg) | مسافت برخاست (m) |
|----------------|----------------|--------------------|-----------------|------------------|
| 12000 | 240 | 1.5 | 60 | 480 |

۳-۳- موضوعات در نظر گرفته شده در حلقه طراحی

شکل ۴ موضوعات مدل‌سازی شده در ماژول آنالیز چندموضوعی را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که مدل‌سازی‌ها در نرم‌افزار متلب انجام شده‌اند و قابلیت انجام آنالیز برای هواپیماهای بی‌سرنشین با موتور جت یا موتور پیستونی را دارا است.

• عملکرد

در این بخش محاسبات عملکردی کلیه فازهای پروازی انجام می‌شود. روابط استفاده شده جهت مدل‌سازی این بخش از مرجع [۱۲] می‌باشد. تراست یا توان مورد نیاز، وزن سوخت، پروفیل سرعت، پروفیل سرعت واماندگی، مسافت نشست، نرخ اوجگیری و مدت زمان انجام هر فاز پروازی از مهم‌ترین خروجی‌های این بخش می‌باشند.

• وزن

وزن برخاست، وزن خالی، وزن قطعات مختلف هواپیما و وزن کل هواپیما در فازهای مختلف پروازی در این بخش محاسبه می‌شوند. از مرجع [۱۳] جهت مدل‌سازی این بخش استفاده شده است.

• آیرودینامیک

خصوصیات آیرودینامیکی کل پروفیل پروازی شامل ضرائب برآ و پسا و مشتقات پایداری و کنترل در این بخش محاسبه می‌شوند. برای مدل‌سازی این بخش از مرجع [۱۴] استفاده شده است.

• مرکز جرم و ممان‌های اینرسی

این بخش بر اساس مرجع [۱۵] مدل‌سازی شده است و مهم‌ترین خروجی‌های آن عبارتند از: موقعیت مرکز جرم و ممان‌های اینرسی هواپیما در کل پروفیل پروازی.

• ترمیم

هدف از این بخش محاسبه زوایای حمله، سرش جانبی و زاویه‌های انحراف سطوح کنترل جهت انجام یک پرواز متعادل است. در اصل خروجی‌های این بخش، قسمتی از قیود مساله بهینه‌سازی را تشکیل می‌دهند. روابط مرجع [۱۵] برای مدل‌سازی استفاده شده است.

مساله کمینه‌سازی چندهدفه کاملاً مقید است که با استفاده از روش ارائه شده (استفاده از مفهوم تابع برتری و به حداکثر رساندن درجه رضایت‌مندی) این مساله به یک مساله بهینه‌سازی تک‌هدفه نامقید تبدیل می‌شود.

جدول (۱): متغیرهای طراحی.

| حد پایینی | حد بالایی | متغیرهای طراحی |
|-----------|-----------|---------------------------|
| 0.8 | 1.8 | $S_W (m^2)$ |
| 15 | 35 | $\Lambda_{LE} (deg)$ |
| 3.5 | 5.5 | AR |
| 0.4 | 0.8 | λ |
| 1.9 | 2.3 | $X_{AW} (m)$ |
| -3 | 0 | $\varepsilon (deg)$ |
| 0.2 | 0.4 | $S_{ht} (m^2)$ |
| 15 | 30 | $\Lambda_{LE_{ht}} (deg)$ |
| 3.5 | 5.5 | AR _{ht} |
| 0.2 | 0.6 | λ_{ht} |
| -3 | 0 | $i_H (deg)$ |
| 0.1 | 0.3 | $S_{vt} (m^2)$ |
| 25 | 45 | $\Lambda_{LE_{vt}} (deg)$ |
| 0.5 | 2 | AR _{vt} |
| 0.2 | 0.6 | λ_{vt} |
| 5 | 15 | $\delta_1 (deg)$ |
| 5 | 15 | $\delta_2 (deg)$ |

جدول (۲): قیود طراحی.

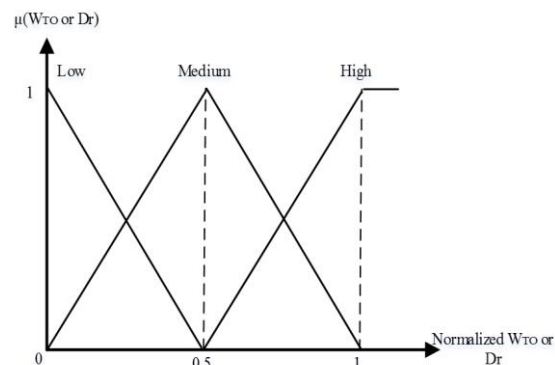
| ردیف | قیود | واحد |
|------|--|-------|
| 1 | $-3 \leq \alpha_{cr} \leq 3$ | deg |
| 2 | $-3 \leq \delta_{E_{cr}} \leq 3$ | deg |
| 3 | $0 \leq \alpha_{tu} \leq 8$ | deg |
| 4 | $0 \leq \alpha_{pu \& pd} \leq 8$ | deg |
| 5 | $-15 \leq \delta_{E_{tu}} \leq 15$ | deg |
| 6 | $-15 \leq \delta_{E_{pu \& pd}} \leq 15$ | deg |
| 7 | $0.03 \leq Min(SM) \leq 0.06$ | - |
| 8 | $Min(\omega_{sp}) \geq 0.5$ | rad/s |
| 9 | $0.2 \leq Min(\xi_{sp}) \leq 0.6$ | - |
| 10 | $0.05 \leq Min(\omega_{ph}) \leq 1$ | rad/s |
| 11 | $0.05 \leq Min(\xi_{ph}) \leq 0.4$ | - |
| 12 | $Min(\omega_{dr}) \geq 1$ | rad/s |
| 13 | $0.05 \leq Min(\xi_{dr}) \leq 0.6$ | - |
| 14 | $Max(T_{spial}) \geq 1$ | s |
| 15 | $0 \leq Max(T_{roll}) \leq 1$ | s |

۳-۲- پروفیل پروازی و مأموریت

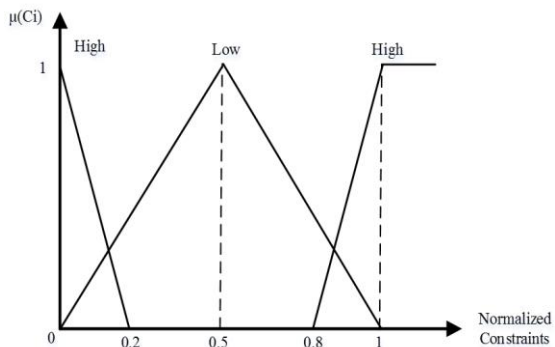
یکی دیگر از قابلیت‌های این تحقیق آن است که ساختار بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی تدوین شده این قابلیت را دارد که کل پروفیل پروازی را در ماژول آنالیز چندموضوعی در نظر بگیرد. بنابراین، پروفیل پروازی در نظر گرفته شده شامل فازهای برخاست، اوجگیری، سیر، مانور، کاهش ارتفاع و فرود می‌باشد. مأموریت در نظر گرفته شده در جدول ۳ بیان شده است.

• پایداری

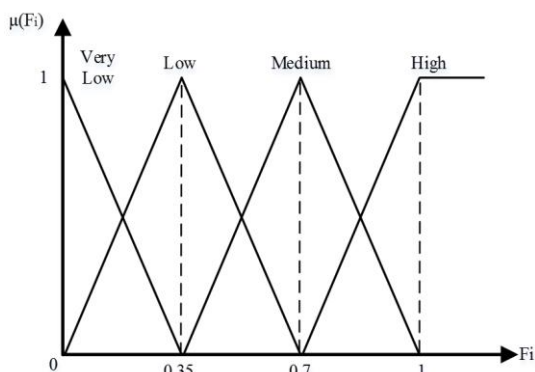
خصوصیات پایداری هواپیمای بی‌سرنشین که شامل فرکانس‌ها، ضرائب میرایی و ثابت‌های زمانی مودهای مختلف حرکتی است، خروجی‌های این بخش می‌باشند که تکمیل کننده قیود در نظر گرفته شده می‌باشند. این بخش نیز بر اساس مرجع [۱۵] مدل شده است.



شکل (۵): تابع عضویت توابع هدف.



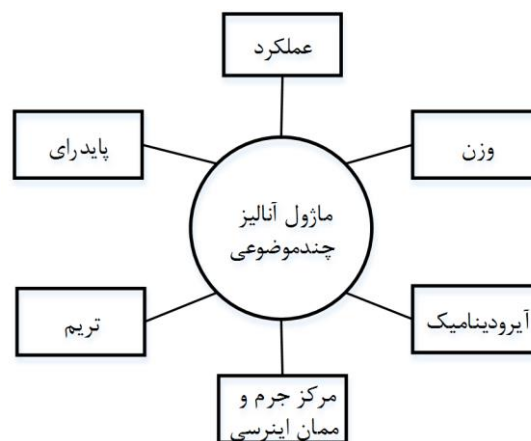
شکل (۶): تابع عضویت قیود.



شکل (۷): تابع عضویت تابع برتری.

جدول (۴): قوانین فازی برای ایجاد تابع برتری توابع هدف.

| قوانین فازی برای توابع هدف | |
|---|--|
| ۱) اگر مقدار تابع هدف زیاد باشد، آنگاه تابع برتری آن خیلی کم است. | |
| ۲) اگر مقدار تابع هدف متوسط باشد، آنگاه تابع برتری آن متوسط است. | |
| ۳) اگر مقدار تابع هدف کم باشد، آنگاه تابع برتری آن زیاد است. | |
| جدول (۵): قوانین فازی برای ایجاد تابع برتری قیود. | |
| قوانین فازی برای قیود | |
| ۱) اگر مقدار قیود زیاد باشد، آنگاه تابع برتری آن خیلی کم است. | |
| ۲) اگر مقدار قیود کم باشد، آنگاه تابع برتری آن زیاد است. | |



شکل (۴): ماژول آنالیز چندموضوعی.

۳-۳- ایجاد تابع برتری

همانگونه که بیان شد، در روش ارائه شده باید برای هر تابع هدف و هر قید، تابع برتری متناظر آنها به کمک منطق فازی ایجاد شود. بعد از این مرحله بجای استفاده از مقادیر عددی توابع هدف و قیود با مقادیر متناظر تابع برتری آنها سروکار داریم و هدف آن است که مقدار تابع برتری بیشینه (حداکثر درجه رضایت‌مندی) شود. جهت ایجاد تابع برتری از مقادیر نرمالیزه شده توابع هدف و قیود استفاده می‌شود. دلیل این امر آن است که:

• مقدار تابع برتری متناظر بین صفر و یک است بنابراین اگر مقادیر توابع هدف و قیود نیز بین صفر و یک باشند، ایجاد ارتباط بین دو متغیر با یک محدوده یکسان در تدوین قوانین فازی آسان تر است.

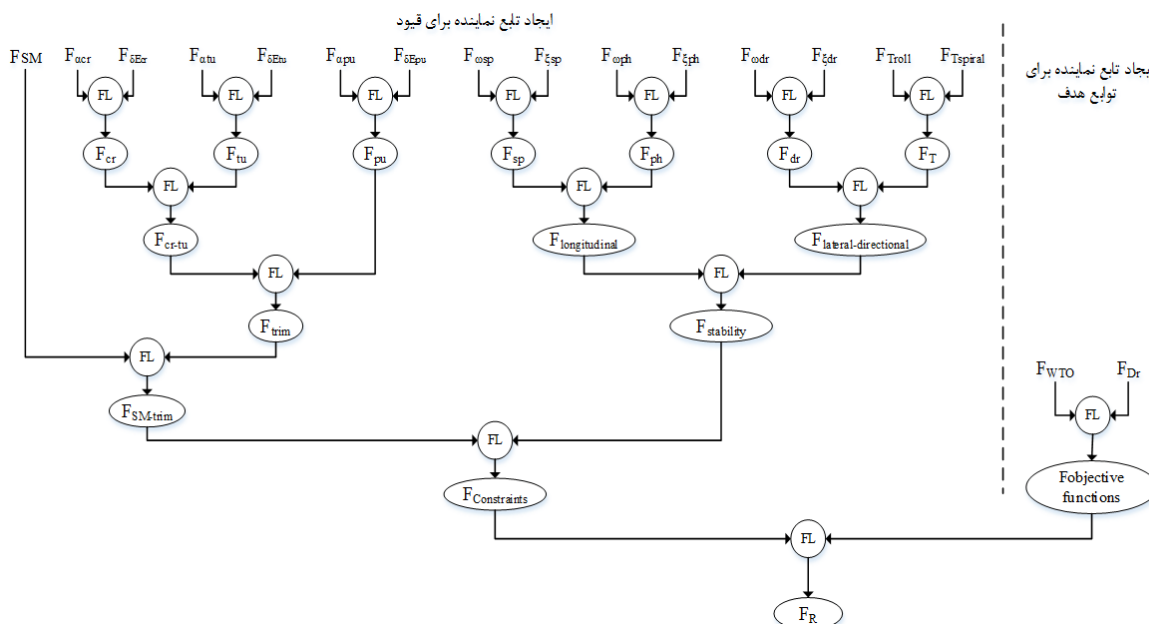
• در صورت تغییر مساله بهینه‌سازی، نیاز به تغییر قوانین فازی نیست چراکه این قوانین برای مقادیر بین صفر و یک نوشته شده‌اند. این موضوع یکی دیگر از مزیت‌های این روش است.

بنابراین ورودی منطق فازی جهت ایجاد تابع برتری، مقادیر نرمالیزه شده توابع هدف و قیود می‌باشند. توابع عضویت، توابع هدف، قیود و تابع برتری (به عنوان خروجی منطق فازی) در اشکال ۷-۵ نشان داده شده است. درباره تابع عضویت قیود باید بیان شود که بین ناحیه صفر تا یک، قیود کاملاً برآورده می‌شوند، بنابراین کل این ناحیه با یک تابع عضویت تعریف

۳-۴- ایجاد تابع نماینده

پس از ایجاد تابع برتری متناظر با توابع هدف و قیود مساله، در این مرحله باید این توابع برتری در مراحل مختلف و به شکل گام به گام با یکدیگر ترکیب و توابع برتری جدیدی ایجاد شده و در نهایت یک تابع نماینده برای کل مساله حاصل شود. توابع عضویت توابع برتری در این مرحله مشابه شکل ۷ است. شایان ذکر است که در تدوین قوانین فازی این مرحله است که طراح می‌تواند با

توجه به الزام مساله، درجه اهمیت را بین دو تابع برتری تغییر دهد. قوانین فازی تدوین شده برای شبیه‌سازی‌های در نظر گرفته شده متفاوت می‌باشند و در ادامه برای هر حالت بیان خواهد شد. گام‌های مختلف جهت ترکیب توابع برتری و در نهایت ایجاد تابع نماینده برای کل مساله در شکل ۸ نشان داده شده است. اینکه در هر گام کدامیک از توابع برتری با یکدیگر ترکیب شوند، نیز بستگی به نظر طراح دارد و براساس تجربه آن انجام می‌گیرد.



شکل (۸): ایجاد تابع نماینده برای مساله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده.

هدفه و استفاده از الگوریتم ژنتیک معمولی) و کارایی روش ارائه شده است. به همین دلیل مساله مورد نظر با استفاده از دو روش دیگر (الگوریتم ژنتیک با مفهوم مرتب‌سازی نامغلوب و روش مجموع وزن‌دهی) دوباره حل و نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شایان ذکر است که در حل مساله بهینه‌سازی با استفاده از دو روش دیگر، از مفاهیم تابع برتری و تابع نماینده استفاده نشده و از مقادیر عددی توابع هدف و قیود بهره گرفته شده است.

قوانین فازی جهت ایجاد تابع نماینده توابع هدف در جدول ۶ بیان شده است. از آنجاکه بیان شد در ترکیب توابع برتری مختلف دیدگاه یکسانی وجود دارد، بنابراین قوانین فازی جهت ایجاد تابع نماینده قیود و ایجاد تابع نماینده کل همانند جدول ۶ می‌باشند. در نهایت با انجام بهینه‌سازی طراحی با استفاده از روش ارائه شده، الگوریتم ژنتیک با مفهوم مرتب‌سازی نامغلوب و روش مجموع وزن‌دهی سه طرح بهینه به دست آمد که در جدول ۷ بیان شده است. نتایج جدول ۷ نشان می‌دهند که روش ارائه شده دارای عملکرد قابل قبولی در

۴- نتایج بهینه‌سازی

همانگونه که بیان شد در این تحقیق سه بهینه‌سازی طراحی انجام شده که نتایج هر کدام در ادامه بیان شده است. هدف از انجام این بهینه‌سازی‌ها، نشان دادن قابلیت‌های مختلف روش ارائه شده است. با توجه به قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک در یافتن حل بهینه در مسائل پیچیده مهندسی، از این نوع الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده است.

بهینه‌سازی اول: درجه اهمیت یکسان در تدوین قوانین فازی

در این حالت در تدوین قوانین فازی جهت ایجاد تابع نماینده، بین توابع هدف و قیود مختلف نگاه یکسانی وجود دارد. به عبارت دیگر، از نقطه نظر طراح درجه اهمیت توابع هدف و قیود یکسان است و باید با دیدگاه یکسانی به هر دو نگرسته شود. هدف از انجام این بهینه‌سازی نشان دادن مزیت کاهش زمان محاسبات (به واسطه تبدیل یک مساله بهینه‌سازی تک

جدول (۷): مقادیر توابع هدف طرح‌های بهینه.

| طرح به دست آمده از | وزن برخاست (Kg) | پسأ (N) |
|--------------------|-----------------|---------|
| روش پیشنهادی | 341.52 | 453.43 |
| روش NSGA | 334.1 | 494.02 |
| روش WSM | 344.93 | 512.47 |

جدول (۸): زمان محاسباتی سه روش مختلف.

| روش | روش پیشنهادی | روش NSGA | روش WSM |
|-------------------------------|--------------|----------|---------|
| زمان انجام بهینه‌سازی (دقیقه) | 25 | 120 | 27 |

شاخص دیگر جهت مقایسه روش‌های استفاده شده، سادگی اعمال روش می‌باشد. به واسطه آنکه روش‌های الگوریتم ژنتیک با مفهوم مرتب‌سازی نامغلوب و مجموع وزن‌دهی یک مسئله بهینه‌سازی مقید را باید حل نمایند بنابراین اعمال قیود در این روش‌ها ساده نخواهد بود. این موضوع در مسائلی که دارای قیود زیادی می‌باشند دوچندان می‌شود. موضوع دیگر درباره روش الگوریتم ژنتیک با مفهوم مرتب‌سازی نامغلوب آن است که بعد از انجام بهینه‌سازی این روش مجموعه‌ای از حل‌های بهینه (جبهه پرتو فرانت) را پیشنهاد می‌دهد که انتخاب یک حل نهایی از میان جبهه پرتو فرانت ساده نخواهد بود. استفاده از روش مجموع وزن‌دهی جهت بهینه‌سازی‌های چندهدفه مقید نیازمند تعیین وزن است که همانگونه که بیان شد روش مشخصی جهت تعیین آنها وجود ندارد (لذا زمان بر است) و کیفیت حل‌های به دست آمده نیز کاملاً به این وزن‌ها وابسته است. جهت جمع‌بندی مقایسه روش‌های استفاده شده جدول ۹ ارائه شده است. شاخص‌های مقایسه مقادیر توابع هدف، زمان محاسباتی و سادگی پیاده‌سازی می‌باشد. معیار نمره‌دهی بر اساس همان تابع برتری (درجه رضایت‌مندی) است. به این معنا که اگر یک روش در یک شاخص بهترین عملکرد را داشته باشد، تابع برتری آن ۱ (حداکثر درجه رضایت‌مندی) است و اگر عملکرد متوسطی داشته باشد، تابع برتری آن ۰.۵ و در غیر اینصورت تابع برتری آن صفر است. نتایج نشان می‌دهند که میانگین تابع برتری روش ارائه شده از نقطه نظر شاخص‌های لحاظ شده از دو روش دیگر بالاتر است.

جدول (۹): مقایسه روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده.

| روش ارائه شده | روش NSGA | روش WSM |
|--------------------|----------|---------|
| وزن برخاست | 0.5 | 1 |
| نیروی پسأ | 1 | 0 |
| زمان | 1 | 0 |
| سادگی | 1 | 0.5 |
| میانگین تابع برتری | 0.875 | 0.375 |

پیدا کردن طرح بهینه دارد چرا که این روش توانسته است طرح بهینه مناسب‌تری از نقطه نظر توابع هدف نسبت به دو روش معروف دیگر ارائه دهد. اگرچه طرح پیشنهادی روش الگوریتم ژنتیک با مفهوم مرتب‌سازی نامغلوب دارای وزن برخاست کمتری است اما هم از نظر نیروی پسأ و هم از نظر زمان محاسباتی و سادگی پیاده‌سازی، روش ارائه شده دارای برتری قابل توجهی می‌باشد. جدول ۸ زمان محاسباتی مورد نیاز برای انجام بهینه‌سازی طراحی مورد نظر با استفاده از سه روش ذکر شده را نشان می‌دهد. نتایج جدول ۸ نشان می‌دهند که الگوریتم ژنتیک با مفهوم مرتب‌سازی نامغلوب به واسطه اضافه شدن عملگرهای ضروری برای انجام بهینه‌سازی چندهدفه، زمان محاسباتی بالایی نیاز دارد. اگرچه روش مجموع وزن‌دهی نیز دارای زمان محاسباتی مشابه با روش ارائه شده است اما نتایج نشان دادند که از حیث مقادیر توابع هدف کارایی مناسبی ندارد (کیفیت حل‌های به دست آمده از این روش به شدت به تعیین وزن‌ها وابسته است و تعیین وزن‌ها نیز یک فرآیند سعی و خطایی است که زمان بر می‌باشد).

جدول (۶): قوانین فازی برای ایجاد تابع نماینده توابع هدف.

| قوانین فازی برای ایجاد تابع نماینده |
|--|
| ۱) اگر مقدار F_{Dr} خیلی کم و F_{WTO} خیلی کم باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ خیلی کم است. |
| ۲) اگر مقدار F_{Dr} خیلی کم و F_{WTO} کم باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ خیلی کم است. |
| ۳) اگر مقدار F_{Dr} خیلی کم و F_{WTO} متوسط باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ کم است. |
| ۴) اگر مقدار F_{Dr} خیلی کم و F_{WTO} زیاد باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ متوسط است. |
| ۵) اگر مقدار F_{Dr} کم و F_{WTO} خیلی کم باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ خیلی کم است. |
| ۶) اگر مقدار F_{Dr} کم و F_{WTO} کم باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ خیلی کم است. |
| ۷) اگر مقدار F_{Dr} کم و F_{WTO} متوسط باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ کم است. |
| ۸) اگر مقدار F_{Dr} کم و F_{WTO} زیاد باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ متوسط است. |
| ۹) اگر مقدار F_{Dr} متوسط و F_{WTO} خیلی کم باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ کم است. |
| ۱۰) اگر مقدار F_{Dr} متوسط و F_{WTO} کم باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ کم است. |
| ۱۱) اگر مقدار F_{Dr} متوسط و F_{WTO} متوسط باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ متوسط است. |
| ۱۲) اگر مقدار F_{Dr} متوسط و F_{WTO} زیاد باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ زیاد است. |
| ۱۳) اگر مقدار F_{Dr} زیاد و F_{WTO} خیلی کم باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ متوسط است. |
| ۱۴) اگر مقدار F_{Dr} زیاد و F_{WTO} کم باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ متوسط است. |
| ۱۵) اگر مقدار F_{Dr} زیاد و F_{WTO} متوسط باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ زیاد است. |
| ۱۶) اگر مقدار F_{Dr} زیاد و F_{WTO} زیاد باشد، آنگاه $F_{Obj. fun.}$ زیاد است. |

(علمی-پژوهشی)

محمدرضا ستاینده و علیرضا بابایی

شکل آگاهانه درجه اهمیت را برای هر قید، هر تابع هدف و حتی بین تابع هدف و قیود (در ایجاد تابع نماینده) تغییر دهد. در این بهینه‌سازی فرض شده است که درجه اهمیت قیود برای طراح بالاتر از درجه اهمیت توابع هدف است. بنابراین، در تدوین قوانین فازی جهت ترکیب تابع نماینده قیود و تابع نماینده توابع هدف، درجه اهمیت بر تابع نماینده قیود گذاشته شده است. از این‌رو، قوانین فازی استفاده شده در این بهینه‌سازی همانند بهینه‌سازی اول است به غیر از قوانین فازی جهت ایجاد تابع نماینده کل که در جدول ۱۲ بیان شده است. همانگونه که بیان شد حتی در ترکیب دو قید نیز می‌توان برحسب ضرورت درجه اهمیت را به قید دلخواه تغییر داد اما در این بهینه‌سازی تنها درجه اهمیت تابع نماینده قیود افزایش یافته است. با انجام بهینه‌سازی طراحی نتایج موجود در جداول ۱۴-۱۶ به دست آمد. این نتایج بخوبی نشان می‌دهند که با این تغییر در قوانین فازی، قیود نسبت به بهینه‌سازی اول به شکل سختگیرانه‌تری برآورده شده‌اند که نتیجه آن افزایش در مقادیر توابع هدف می‌باشد.

جدول (۱۲): قوانین فازی برای ایجاد تابع نماینده کل در بهینه‌سازی دوم.

| قوانین فازی برای ایجاد تابع نماینده کل | |
|---|--|
| ۱) اگر مقدار F_{const} خیلی کم و $F_{obj. fun.}$ خیلی کم باشد، آنگاه F_R خیلی کم است. | |
| ۲) اگر مقدار F_{const} خیلی کم و $F_{obj. fun.}$ کم باشد، آنگاه F_R خیلی کم است. | |
| ۳) اگر مقدار F_{const} خیلی کم و $F_{obj. fun.}$ متوسط باشد، آنگاه F_R خیلی کم است. | |
| ۴) اگر مقدار F_{const} خیلی کم و $F_{obj. fun.}$ زیاد باشد، آنگاه F_R کم است. | |
| ۵) اگر مقدار F_{const} کم و $F_{obj. fun.}$ خیلی کم باشد، آنگاه F_R خیلی کم است. | |
| ۶) اگر مقدار F_{const} کم و $F_{obj. fun.}$ کم باشد، آنگاه F_R خیلی کم است. | |
| ۷) اگر مقدار F_{const} کم و $F_{obj. fun.}$ متوسط باشد، آنگاه F_R کم است. | |
| ۸) اگر مقدار F_{const} کم و $F_{obj. fun.}$ زیاد باشد، آنگاه F_R کم است. | |
| ۹) اگر مقدار F_{const} متوسط و $F_{obj. fun.}$ خیلی کم باشد، آنگاه F_R کم است. | |
| ۱۰) اگر مقدار F_{const} متوسط و $F_{obj. fun.}$ کم باشد، آنگاه F_R کم است. | |
| ۱۱) اگر مقدار F_{const} متوسط و $F_{obj. fun.}$ متوسط باشد، آنگاه F_R متوسط است. | |
| ۱۲) اگر مقدار F_{const} متوسط و $F_{obj. fun.}$ زیاد باشد، آنگاه F_R متوسط است. | |
| ۱۳) اگر مقدار F_{const} زیاد و $F_{obj. fun.}$ خیلی کم باشد، آنگاه F_R متوسط است. | |
| ۱۴) اگر مقدار F_{const} زیاد و $F_{obj. fun.}$ کم باشد، آنگاه F_R متوسط است. | |
| ۱۵) اگر مقدار F_{const} زیاد و $F_{obj. fun.}$ متوسط باشد، آنگاه F_R زیاد است. | |
| ۱۶) اگر مقدار F_{const} زیاد و $F_{obj. fun.}$ زیاد باشد، آنگاه F_R زیاد است. | |

در این بهینه‌سازی نشان داده شد که روش ارائه شده دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به دو الگوریتم معروف دیگر در انجام بهینه‌سازی‌های چندهدفه دارد. شایان ذکر است که روش الگوریتم ژنتیک با مفهوم مرتب‌سازی نامغلوب، مجموعه‌ای از حل‌های بهینه را ارائه داد که بهترین حل آن به عنوان حل نهایی در نظر گرفته شد. همچنین باید ذکر شود که هر سه روش توانستند قیود در نظر گرفته شده را به شکل مناسبی برآورده سازند که با توجه به محدودیت طول مقاله از بیان آنها خودداری شده است. متغیرهای طراحی و قیود مربوط به حل بهینه ناشی از روش ارائه شده در جداول ۱۰ و ۱۱ بیان شده است.

جدول (۱۰): متغیرهای طراحی طرح بهینه ناشی از بهینه‌سازی اول.

| متغیرهای طراحی | مقدار عددی | واحد |
|--------------------|------------|-------|
| S_W | 0.81 | m^2 |
| Δ_{LE} | 17.76 | deg |
| AR | 4.78 | - |
| λ | 0.44 | - |
| X_{AW} | 2.11 | m |
| ε | -0.8 | deg |
| S_{ht} | 0.21 | m^2 |
| $\Delta_{LE_{ht}}$ | 17.8 | deg |
| AR_{ht} | 3.8 | - |
| λ_{ht} | 0.2 | - |
| i_H | -0.8 | deg |
| S_{vt} | 0.11 | m^2 |
| $\Delta_{LE_{vt}}$ | 27.5 | deg |
| AR_{vt} | 0.78 | - |
| λ_{vt} | 0.33 | - |
| δ_1 | 7.9 | deg |
| δ_2 | 7.9 | deg |

جدول (۱۱): قیود طراحی طرح بهینه ناشی از بهینه‌سازی اول.

| قید | مقدار عددی | واحد |
|-------------------------|------------|-------|
| α_{cr} | 1.38 | deg |
| $\delta_{E_{cr}}$ | -1.13 | deg |
| α_{tu} | 3.3 | deg |
| $\alpha_{pu \& pd}$ | 5.4 | deg |
| $\delta_{E_{tu}}$ | -0.5 | deg |
| $\delta_{E_{pu \& pd}}$ | -2.3 | deg |
| $Min(SM)$ | 0.02 | - |
| $Min(\omega_{sp})$ | 0.62 | rad/s |
| $Min(\xi_{sp})$ | 0.29 | - |
| $Min(\omega_{ph})$ | 0.07 | rad/s |
| $Min(\xi_{ph})$ | 0.12 | - |
| $Min(\omega_{dr})$ | 0.85 | rad/s |
| $Min(\xi_{dr})$ | 0.04 | - |
| $Max(T_{spial})$ | 49 | s |
| $Max(T_{roll})$ | 0.85 | s |

بهینه‌سازی دوم: درجه اهمیت بر روی قیود

در این بهینه‌سازی و بهینه‌سازی بعدی به این قابلیت از روش ارائه شده پرداخته می‌شود که طراح برحسب نیاز می‌تواند به

جدول (۱۴): مقادیر توابع هدف در بهینه‌سازی‌های دوم و سوم.

| تابع هدف | بهینه‌سازی دوم | بهینه‌سازی سوم |
|-----------------|----------------|----------------|
| وزن برخاست (Kg) | 361.2 | 334.2 |
| پسا (N) | 517.9 | 438 |

جدول (۱۵): متغیرهای طراحی طرح بهینه ناشی از بهینه‌سازی‌های دوم و سوم.

| متغیرهای طراحی | بهینه‌سازی دوم | بهینه‌سازی سوم | واحد |
|------------------|----------------|----------------|-------|
| S_w | 0.82 | 0.82 | m^2 |
| Λ_{LE} | 27.5 | 18.9 | deg |
| AR | 5.33 | 4.22 | - |
| λ | 0.58 | 0.44 | - |
| X_{AW} | 2.12 | 2.13 | m |
| ε | -1.78 | -0.63 | deg |
| S_{ht} | 0.21 | 0.21 | m^2 |
| Λ_{LEht} | 26.9 | 24 | deg |
| AR_{ht} | 5.1 | 3.52 | - |
| λ_{ht} | 0.46 | 0.27 | - |
| i_H | -1.55 | -1.32 | deg |
| S_{vt} | 0.12 | 0.11 | m^2 |
| Λ_{LEvt} | 32.1 | 35.5 | deg |
| AR_{vt} | 1.82 | 0.68 | - |
| λ_{vt} | 0.29 | 0.2 | - |
| δ_1 | 7.4 | 8 | deg |
| δ_2 | 7.4 | 8 | deg |

جدول (۱۶): قیود طراحی طرح بهینه ناشی از بهینه‌سازی‌های دوم و سوم.

| قیود | بهینه‌سازی دوم | بهینه‌سازی سوم | واحد |
|----------------------|----------------|----------------|-------|
| α_{cr} | 0.05 | 1.66 | deg |
| δ_{Ecr} | 1.95 | -0.55 | deg |
| α_{tu} | 3.8 | 3.7 | deg |
| $\alpha_{pu \& pd}$ | 3.6 | 6.3 | deg |
| δ_{Etu} | 2.12 | -0.31 | deg |
| $\delta_{Epu \& pd}$ | 1.03 | -2 | deg |
| $Min(SM)$ | 0.025 | 0.08 | - |
| $Min(\omega_{sp})$ | 0.68 | 0.67 | rad/s |
| $Min(\xi_{sp})$ | 0.3 | 0.23 | - |
| $Min(\omega_{ph})$ | 0.064 | 0.075 | rad/s |
| $Min(\xi_{ph})$ | 0.14 | 0.1 | - |
| $Min(\omega_{dr})$ | 1 | 0.75 | rad/s |
| $Min(\xi_{dr})$ | 0.039 | 0.039 | - |
| $Max(T_{spial})$ | 21.3 | 52.5 | s |
| $Max(T_{raii})$ | 0.48 | 0.96 | s |

۵- نتیجه گیری

در این مقاله سعی شد تا با ارائه یک روش چالش‌ها و مشکلات بهینه‌سازی‌های چندهدفه مقید تا حدی بر طرف شود. برای این منظور یک روش بر مبنای منطق فازی ارائه شد که با استفاده از آن می‌توان یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه مقید را به یک مساله بهینه‌سازی تک هدفه نامقید تبدیل نمود. این روش شامل دو مرحله است. در مرحله اول برای هر تابع هدف و هر قیود باید تابع برتری متناظر آن با استفاده از منطق فازی ایجاد

بهینه‌سازی سوم: درجه اهمیت بر روی توابع هدف

طراح در این بهینه‌سازی برخلاف حالت قبل تمایل دارد که درجه اهمیت بر روی توابع هدف گذاشته شود. به عبارت دیگر، بنابر دیدگاه طراح تجاوز نسبی برخی قیود از محدوده‌های در نظر گرفته شده چندان مهم نیست و در عوض کمینه کردن توابع هدف قابل توجه است. قوانین فازی تدوین شده مشابه بهینه‌سازی اول است به غیر از قوانین فازی جهت ایجاد تابع نماینده کل که در جدول ۱۳ بیان شده است. نتایج این بهینه‌سازی نیز در جداول ۱۶-۱۴ بیان شده است. با دقت بر نتایج به وضوح تفاوت بین دو طرح بهینه ناشی از بهینه‌سازی‌های دوم و سوم آشکار است. بنابراین، دیده شد که طراح بر حسب ضرورت و با استفاده از روش ارائه شده می‌تواند نظرات و دیدگاه‌های خود را در فرآیند بهینه‌سازی به شکل آگاهانه اعمال نماید.

جدول (۱۳): قوانین فازی برای ایجاد تابع نماینده کل در بهینه‌سازی سوم.

| قوانین فازی برای ایجاد تابع نماینده کل |
|---|
| ۱) اگر مقدار F_{const} خیلی کم و $F_{obj. fun.}$ خیلی کم باشد، آنگاه F_R خیلی کم است. |
| ۲) اگر مقدار F_{const} خیلی کم و $F_{obj. fun.}$ کم باشد، آنگاه F_R خیلی کم است. |
| ۳) اگر مقدار F_{const} خیلی کم و $F_{obj. fun.}$ متوسط باشد، آنگاه F_R خیلی کم است. |
| ۴) اگر مقدار F_{const} خیلی کم و $F_{obj. fun.}$ زیاد باشد، آنگاه F_R کم است. |
| ۵) اگر مقدار F_{const} کم و $F_{obj. fun.}$ خیلی کم باشد، آنگاه F_R خیلی کم است. |
| ۶) اگر مقدار F_{const} کم و $F_{obj. fun.}$ کم باشد، آنگاه F_R خیلی کم است. |
| ۷) اگر مقدار F_{const} کم و $F_{obj. fun.}$ متوسط باشد، آنگاه F_R کم است. |
| ۸) اگر مقدار F_{const} کم و $F_{obj. fun.}$ زیاد باشد، آنگاه F_R متوسط است. |
| ۹) اگر مقدار F_{const} متوسط و $F_{obj. fun.}$ خیلی کم باشد، آنگاه F_R خیلی کم است. |
| ۱۰) اگر مقدار F_{const} متوسط و $F_{obj. fun.}$ کم باشد، آنگاه F_R خیلی کم است. |
| ۱۱) اگر مقدار F_{const} متوسط و $F_{obj. fun.}$ متوسط باشد، آنگاه F_R متوسط است. |
| ۱۲) اگر مقدار F_{const} متوسط و $F_{obj. fun.}$ زیاد باشد، آنگاه F_R زیاد است. |
| ۱۳) اگر مقدار F_{const} زیاد و $F_{obj. fun.}$ خیلی کم باشد، آنگاه F_R خیلی کم است. |
| ۱۴) اگر مقدار F_{const} زیاد و $F_{obj. fun.}$ کم باشد، آنگاه F_R کم است. |
| ۱۵) اگر مقدار F_{const} زیاد و $F_{obj. fun.}$ متوسط باشد، آنگاه F_R متوسط است. |
| ۱۶) اگر مقدار F_{const} زیاد و $F_{obj. fun.}$ زیاد باشد، آنگاه F_R زیاد است. |

(علمی-پژوهشی)
محمد رضا ستاینده و علیرضا بابایی

سادگی انجام بهینه‌سازی اشاره نمود. جهت نشان دادن کارایی روش ارائه شده، با استفاده از روش بهینه‌سازی طراحی چندموضوعی یک هواپیمای بی‌سرنشین با اهداف کمینه‌سازی وزن برخاست و نیروی پس‌آی فاز سیر، بهینه‌سازی شد. نتایج حاکی از عملکرد مناسب روش ارائه شده نسبت به دیگر روش‌های بهینه‌سازی می‌باشد.

شود. در مرحله دوم و در طی چند گام این توابع برتری با استفاده از منطق فازی با یکدیگر ترکیب شده و یک تابع نماینده برای کل مساله به دست می‌آید. اکنون هدف بهینه‌سازی بیشینه کردن این تابع (بیشینه کردن درجه رضایت‌مندی) است. از مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به کاهش زمان محاسباتی، اعمال تجربه طراح حین بهینه‌سازی، اعمال درجه اهمیت‌های مختلف بین توابع هدف و قیود و

۶- مراجع

- [1] Wang, P., Tian, H., Zhu, H., and Cai, G., "Multi-Disciplinary Design Optimization with Fuzzy Uncertainties and Its Application in Hybrid Rocket Motor Powered Launch Vehicle", *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 33, No. 5, pp. 1454-1467, 2020.
- [2] Babaei, A. R., Setayandeh, M.R., and Farrokhfal, H., "Multidisciplinary Design Optimization of an Unmanned Air Vehicle and Final Solution Selection Based on Fuzzy Satisfaction Degree Function", *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 107-122, 2019.
- [3] Gonzales, L.F., Periaux, J., Srinivas, K., and Whitney, E.J., "A Generic Framework for the Design Optimization of Multidisciplinary Uav Intelligent Systems Using Evolutionary Computing", *Proceedings of The 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Nevada, USA, January 1-20, 2006.
- [4] Allison, D.L., Morris, C.C., Schetz, J.A., Kapania, R.K., Watson, L.T., and Deaton, J.D., "Development of a Multidisciplinary Design Optimization Framework for an Efficient Supersonic Air Vehicle", *Advances in Aircraft and Spacecraft Science*, Vol. 2, No. 1, pp. 17-44, 2015.
- [5] Sun, Y. and Smith, H., "Low-boom low-drag Optimization in a Multidisciplinary Design Analysis Optimization Environment", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 94, No. 1, pp. 1-29, 2019.
- [6] Roshanian, J., Bataleblu, A.A., Farghadani, M.H., and Ebrahimi, B., "Multi-objective Multidisciplinary Design Optimization of a General Aviation Aircraft", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 199-210, 2017.
- [7] Sepulveda, E., Smith, H., and Sziroczak, D., "Multidisciplinary Analysis of Subsonic Stealth Unmanned Combat Aerial Vehicles", *CEAS Aeronautical Journal*, Vol. 10, No. 2, pp. 431-442, 2019.
- [8] Lui, T., Chen, C., and Chou, J., "Optimization of Short-haul Aircraft Schedule Recovery Problems Using a Hybrid Multi-objective Genetic Algorithm", *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, No. 3, pp. 2307-2315, 2010.
- [9] Jafarian, E., Razmi, J., and Baki, M.F., "An Flexible Programming Approach Based on Intuitionistic Fuzzy Optimization Abd Geometric Programming for Solving Multi-objective Nonlinear Programming Problems", *Expert Systems with Applications*, Vol. 93, No. 3, pp. 245-256, 2018.
- [10] Huang, H. Z., Gu, Y.K., and Du, X., "An Interactive Fuzzy Multi-objective Optimization method for Engineering Design", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 19, No. 5, pp. 451-460, 2006.
- [11] Wang, Y., Wei, T., and Qu, X., "Study of Multi-objective Fuzzy Optimization for Path Planning", *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 25, No. 1, pp. 51-56, 2012.
- [12] Anderson, J.D., *Aircraft Performance and Design*, First Edition, WCB McGraw-Hill, New York, USA, 1999.
- [13] Sadraey, M.H., *Aircraft Design: a Systems Engineering Approach*, First Edition, Wiley, New York, USA, 2013.
- [14] Roskam, J., *Aircraft Design: preliminary calculation of aerodynamic, thrust, and power characteristics*, Second Edition, Roskam Aviation and Engineering Corporation, Kansas, USA, 1990.
- [15] Roskam, J., *Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls*, First Edition, pp. 243-448, Roskam Aviation and Engineering Corporation, Kansas, USA, 1979.