



Designing and Comparing Two Configurations of Space System Flying Simulator with Cold Gas Thrusters

Seyedali Saadatdar Arani ¹, Mehran Nosratollahi ^{2*}, Amirhossein Adami Dehkordi ³, Alireza Ahangarani Farahani ³

¹ Ph.D. Student, Faculty of Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

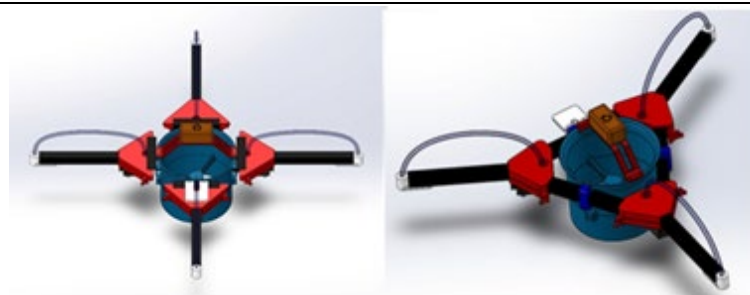
² Associate Professor, Faculty of Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Faculty of Aerospace Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Designing and proposing two space simulator flying platform designs with four and three cold gas thrusters.
- Dynamic model extraction and Attitude control design for each model using PD controller.
- Comparison of two model with criteria of weight, cost, accuracy and control effort.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 14 January 2024

Received in revised form: 6 February 2024

Accepted: 17 March 2024

Available online: 18 June 2024

*Correspondence:

nosratollahi@mut.ac.ir

How to cite this article:

S.S. Arani., M. Nosratollahi., A.A. Dehkordi., A.A. Farahani. Designing and comparing the configuration of two space system flying simulators with cold gas thrusters. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2024; 20(2): 55-67.

Keywords:

Spacecraft simulator

Space maneuver

Cold gas thrusters

Attitude control

PD controller

ABSTRACT

In the design of aerospace systems, certain requirements such as efficiency, weight, and cost are highly significant. This article presents the design and configuration of two flying platforms for simulation of space systems, using cold gas thrusters for in-space maneuvering, in SolidWorks software. In the first drone, three cold gas thrusters are mounted at the end of three arms, each installed with a 120-degree angle difference. The second platform design features four thrusters, and the angle difference between the arms where the nozzles are installed is 90 degrees. After extracting the dynamic model and analyzing the two systems, a PD controller with optimal coefficients was designed and simulated using the genetic algorithm optimization method to control their status. The simulation and data analysis results reveal that the platform with four cold gas thrusters performs better in accuracy and control effort, while the other with three thrusters performs better in weight and cost. By comparing and analyzing the results, the user and designer can make the appropriate choice for the intended operation.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.





طراحی و مقایسه دو پیکربندی پرنده شبیه‌ساز سامانه فضایی با عملگرهای گاز سرد

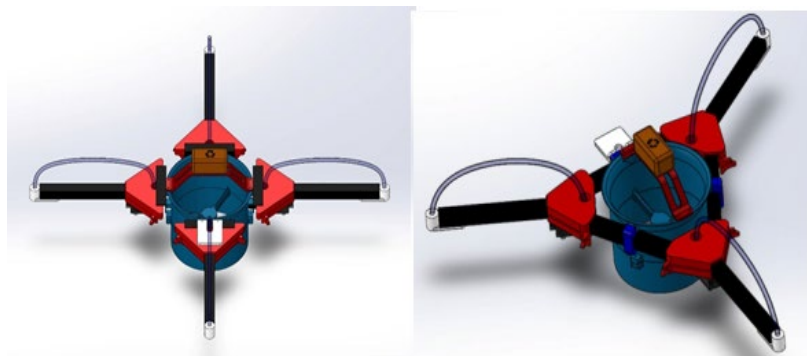
سیدعلی سعادت‌دار آرانی^۱، مهران نصرت‌الهی^{۲*}، امیرحسین آدمی دهکردی^۳، علیرضا آهنگرانی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۲ دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۳ استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- طراحی و تحلیل دو طرح شبیه‌ساز سامانه فضایی با چهار و سه پیشران گاز سرد.
- استخراج مدل دینامیکی و طراحی کنترل وضعیت برای هر یک از نمونه‌ها با استفاده از کنترل‌کننده PD
- مقایسه دو طرح با معیارهای وزن، هزینه، دقت و تلاش کنترلی.

چکیده

در طراحی سیستم‌های هوافضایی برخی از الزامات همچون کارایی، وزن و هزینه بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله، دو پلتفرم پرنده شبیه‌ساز سامانه فضایی با عملگرهای گاز سرد برای استفاده در سیستم مانور فضایی در نرم‌افزار SolidWorks به منظور تست‌های آزمایشگاهی طراحی و پیکربندی شده است. در طرح اول، از سه پیشران گاز سرد استفاده شده که در انتهای سه بازو نصب شده‌اند و هر یک از بازوها با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه قرار دارند. نمونه طراحی شده دوم دارای چهار پیشران بوده که اختلاف زاویه بین بازوهای محل نصب نازل‌ها ۹۰ درجه است. در ادامه برای بررسی و تحلیل دو سیستم بعد از استخراج مدل دینامیکی، برای کنترل وضعیت آن‌ها کنترل‌کننده PD استفاده شده است. در اینجا ضرایب مطلوب کنترل‌کننده با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استخراج گردیده‌اند. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل داده‌ها بیانگر این است که در دقت و مصرف انرژی، پرنده با چهار پیشران گاز سرد عملکرد بهتری را نشان می‌دهد در حالی که در وزن و هزینه، پرنده با سه پیشران گاز سرد نتیجه بهتری دارد. با توجه به مقایسه و تحلیل صورت گرفته در این مقاله، کاربر و طراح می‌تواند انتخاب مناسب را برای عملیات مورد نظر داشته باشد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴
بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷
پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۷
ارائه برخط: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹
*نویسنده مسئول:

nosratolahi@mut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:
شبیه‌ساز سامانه فضایی
مانور فضایی
پیشران گاز سرد
کنترل وضعیت
کنترل‌کننده PD



۱- مقدمه

با توجه به ویژگی‌های محیط فضا، یکی از چالش‌های اصلی در سیستم‌های فضایی همچون ماهواره‌ها، پلتفرم‌های مانور مداری، فضاپیماها و ماه‌نشین‌ها، روش و ابزارهای کنترل وضعیت آن‌ها است [۱-۳]. یکی از ابزارهای قدرتمند و پرکاربرد برای کنترل وضعیت سیستم‌های فضایی استفاده از پیشران‌های گاز سرد است [۴]. می‌توان نشان داد که عملگرهای پیشران گاز سرد دارای قابلیت اطمینان بالا، هزینه پایین، پیچیدگی کم، مصرف انرژی پایین و سرعت بالا هستند [۵]. در کنار مزایای ذکر شده، چالش این عملگرها، نوع روشن-خاموش آن‌ها بوده که با توجه به تولید گشتاورهای زیاد، سریع و گسسته، فرآیند کنترل را تا حدودی دشوار می‌نماید. در این سیستم‌ها، رانش با بیرون راندن یک گاز (که احتمالاً برای افزایش عملکرد به مقدار کمی گرم شده است) از طریق نازل ایجاد می‌شود. این رانشگرهای گاز سرد با بیرون راندن گاز پرفشار، قابلیت دوران حول محورهای سیستم برای رسیدن به یک وضعیت مطلوب را می‌دهند [۶ و ۷]. با توجه به ماهیت عملگرهای روشن-خاموش، معمولاً برای کنترل پیشران گاز سرد از استراتژی کنترل بنگ-بنگ استفاده می‌شود [۸]. برای پیاده‌سازی این نوع رویکرد کنترلی باید شیر برقی پیشران را با تکنیک مدولاسیون عرض پالس کنترل نمود [۹]. مدولاسیون پهنای پالس، روشی برای تنظیم میزان روشن خاموش بودن است در این روش با تغییر دادن زمان قطع و وصل شدن منبع توان به بار در هر سیکل، می‌توان زمان روشن و خاموش بودن آن را کنترل نمود [۱۰]. پرنده‌های با پیشران گاز سرد می‌توانند برای استفاده در سیستم‌های فضایی همچون ماه‌نشین‌ها و کاوشگرها و همچنین برای مانور فضایی بسیار مفید باشند. در این پلتفرم‌ها می‌توان انواع روش‌های کنترل وضعیت را پیاده‌سازی و تست نمود و نتایج را برای اطمینان استفاده در سیستم فضایی بررسی کرد [۱۱].

در این مقاله، دو پلتفرم پرنده با پیشران گاز سرد به‌عنوان ایده جدید و خلاقانه برای استفاده در شبیه‌سازی و تست آزمایشگاهی شش درجه آزادی مانورهای فضایی طراحی و مقایسه شده است. در اینجا، پرنده اول دارای سه پیشران گاز سرد بوده که در انتهای سه بازو با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه نصب شده‌اند. پرنده دوم دارای چهار پیشران گاز سرد بوده که

این نازل‌ها در انتهای چهار بازو به‌صورت بعلاوه نصب گردیده‌اند. با توجه به اینکه این پیشران‌ها به‌صورت روشن خاموش بوده از آن‌ها برای کنترل وضعیت دو زاویه غلت و فراز استفاده می‌شود و همچنین از دو موتور داکتدفن که در مرکز پرنده‌ها قرار دارند برای غلبه بر نیروی برا (برای تست آزمایشگاهی) و کنترل زاویه سمت بهره می‌برد. با توجه به حساسیت پیشران‌های گاز سرد، در ادامه مدل دینامیک هر یک از این دو پرنده برای دو زاویه غلت و فراز استخراج شده و برای هر یک از آن‌ها کنترل‌کننده PD طراحی شده است. ضرایب کنترل‌کننده برای هر یک از طرح‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک استخراج شده است. سپس با شبیه‌سازی‌های انجام شده، دقت کنترل وضعیت در دو زاویه غلت و فراز هر یک از آن‌ها تحلیل شده است. در انتها با توجه به معیارهایی همچون وزن، هزینه، مصرف انرژی و دقت کنترل وضعیت، تحلیل و مقایسه بین هر یک از طرح‌ها صورت گرفته است. با مقایسه بین این دو پرنده پیشنهاد شده، کاربر می‌تواند با توجه شرایط کاری و محیطی انتخاب مناسب را داشته باشد. ساختار مقاله به این صورت است که ابتدا طرح‌های پیشنهادی توسعه داده شده و مشخصات فیزیکی هر یک از طرح‌ها بیان می‌گردد. بخش سوم دینامیک پیکربندی دو پلتفرم شبیه‌ساز فضایی ارائه شده و همچنین دینامیک پیشران‌های گاز سرد به‌طور کامل توضیح داده خواهد شد. بخش چهارم به طراحی کنترل‌کننده، چالش‌های طراحی و اثبات پایداری آن پرداخته خواهد شد. در بخش پنجم شبیه‌سازی برای دو مسئله رگولاسیون و ردیابی انجام شده و با تحلیل نتایج مقایسه بین دو طرح پیشنهادی ارائه خواهد شد.

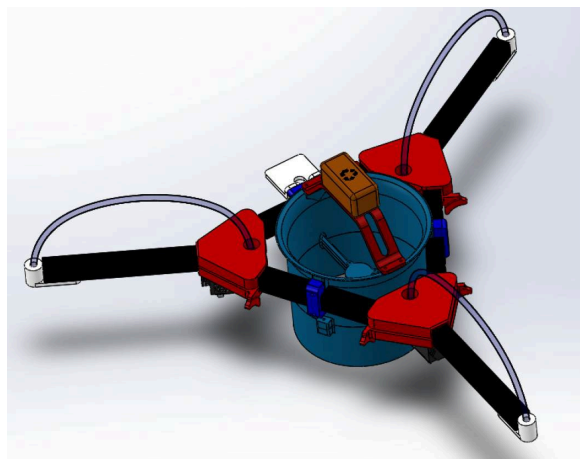
۲- ارائه طرح پلتفرم‌های پرنده پیشنهادی

برای شبیه‌سازی سیستم مانور فضایی دو طرح پیشنهاد شده است که هر یک از طرح‌ها مزایا و معایبی دارند.

۲-۱- پرنده با چهار پیشران گاز سرد

در ابتدا پیکربندی پرنده با چهار پیشران گاز سرد ارائه و بررسی خواهد شد. شماتیکی از این طرح در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

زاویه غلت و فراز، طراح با یک سیستم بالای تحریک (Over Actuated) روبرو است. از طرفی نوع قرارگیری پیشران‌ها به صورتی است که برای کنترل هریک از دو زاویه نیاز به ترکیب هر سه پیشران است که همین موضوع فرآیند کنترلی را بسیار دشوار می‌کند و برخلاف پیکربندی قبلی نمی‌توان زوایا را به صورت مستقل از یکدیگر کنترل نمود و در فرآیند کنترل، کوپلینگ بسیار بالایی وجود دارد. مشخصات جرمی این طراحی در جدول ۲ آورده شده است.

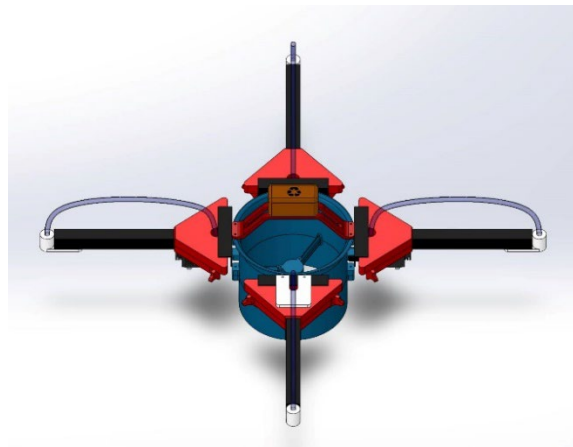


شکل (۲): پیکربندی پرنده با سه پیشران گاز سرد.

جدول (۱): پارامترهای فنی و جرمی پرنده با چهار پیشران.

پارامتر	واحد	مقدار
وزن کل	(g)	۱۵۴۷
وزن سازه	(g)	۷۴۷
وزن باتری و سیستم الکتریکی	(g)	۳۰۰
وزن سیستم پیشران	(g)	۵۰۰
ممان اینرسی	(kgm ²)	$I = \begin{bmatrix} 0.0267 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0349 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0267 \end{bmatrix}$
طول بازوها	(cm)	۲۰
شعاع بازوها	(cm)	۲
قطر بخش مرکزی	(cm)	۱۵

مشخصات جرمی این پرنده نشان می‌دهد که وزن طرح با سه پیشران نسبت به پیکربندی چهار پیشران حدود ۲۰۰ گرم



شکل (۱): پیکربندی پرنده با چهار پیشران گاز سرد.

در طراحی این پلتفرم از چهار پیشران گاز سرد استفاده شده است که شیر برقی مربوط به آن‌ها در ابتدای چهار بازو متصل به بدنه اصلی پرنده و نازل‌ها در انتهای بازوها قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود بازوهای این پرنده به صورت بعلاوه و با اختلاف زاویه ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر نصب شده‌اند. استفاده از چهار پیشران برای کنترل وضعیت دو زاویه غلت و فراز، فرآیند کنترلی را تا ساده‌تر می‌کند در این پیکربندی می‌توان از دو عملگر که در یک راستا قرار گرفته‌اند و گشتاور مخالف یکدیگر تولید می‌کنند برای کنترل زاویه غلت و از دو پیشران دیگر برای کنترل زاویه فراز استفاده نمود؛ بنابراین، در این طراحی می‌توان فرآیند کنترل دو زاویه را به صورت مستقل از یکدیگر انجام داد. با توجه به طراحی انجام شده مشخصات جرمی و حجمی این پرنده از نرم‌افزار SolidWorks استخراج شده که در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۱ وزن سیستم پیشران با در نظر گرفتن شیربرقی‌ها، نازل‌ها، تأمین‌کننده هوای فشرده و شلنگ‌ها است.

۲-۲- پرنده با سه پیشران گاز سرد

شماتیک طراحی شده در نرم‌افزار SolidWorks برای پرنده با سه پیشران کنترلی در شکل ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ساختار این پلتفرم از سه پیشران گاز سرد استفاده شده است که گشتاورهای مخالف ایجاد می‌کنند. باید توجه نمود که این سه پیشران در انتهای سه بازو با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه نصب شده‌اند. با توجه به وجود سه پیشران با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه برای کنترل دو

پیش‌بینی شده است؛ بنابراین، گشتاور کنترلی را می‌توان به فرم زیر نوشت:

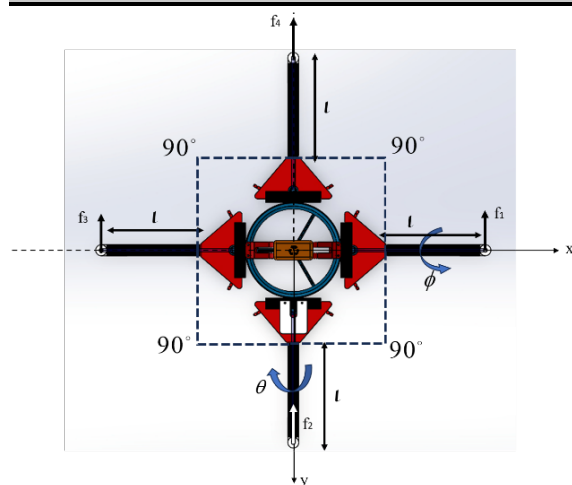
$$M = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_2 l - f_4 l \\ f_1 l - f_3 l \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \quad (3)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & l & 0 & -l \\ l & 0 & -l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$M = B_4 T F$
در معادله بالا l طول بازوهای مکانیکی است و همچنین $f_i (i = 1, 2, 3, 4)$ نیروی تولید شده توسط نازل‌ها است.

جدول (۲): پارامترهای فنی و جرمی پرنده با سه پیشران.

پارامتر	واحد	مقدار
وزن کل	(g)	۱۳۱۸
وزن سازه	(g)	۶۸۸
وزن باتری و سیستم الکتریکی	(g)	۲۵۰
وزن سیستم پیشران	(g)	۳۸۰
ممان اینرسی	(kgm ²)	$I = \begin{bmatrix} 0.0211 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0283 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0207 \end{bmatrix}$
طول بازوها	(cm)	۲۰
شعاع بازوها	(cm)	۲
قطر بخش مرکزی	(cm)	۱۵



شکل (۳): مشخصات دستگاه بدنی سیستم با چهار پیشران.

کمتر است. با توجه به اینکه در جدول ۲ به صورت حدودی وزن سازه و تجهیزات پرنده آورده شده است و در پرنده با چهار پیشران تجهیزات جانبی بیشتری دارد، بنابراین اختلاف وزن پرنده‌ها بسیار بیشتر از اختلاف فعلی خواهد بود.

۳- مدل سازی دینامیکی پلتفرم‌های پرنده

معادلات ساده شده از مدل دینامیکی برای وضعیت سیستم در دستگاه بدنی را می‌توان به فرم زیر نوشت [۱۲]:

$$M = J\dot{\omega} + \omega \times J\omega \quad (1)$$

که در این معادله:

$$M = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \text{ \& } J = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$$

در این معادلات، ω سرعت زاویه‌ای سیستم نسبت به چارچوب بدنی، J ماتریس اینرسی و M نشان‌دهنده گشتاور کنترلی برای کنترل وضعیت سیستم است. با ساده‌نویسی و در نظر گرفتن برخی از فرضیات می‌توان معادله (۱) را به فرم زیر نوشت [۱۳]:

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

در ادامه با توجه به مشخصات فیزیکی پرنده‌ها، معادلات دینامیکی هر یک از آن‌ها بسط داده می‌شود.

۳-۱- معادلات دینامیکی پرنده با چهار پیشران

در شکل ۳ دستگاه متصل شده بدنی برای سیستم با چهار پیشران آورده شده است.

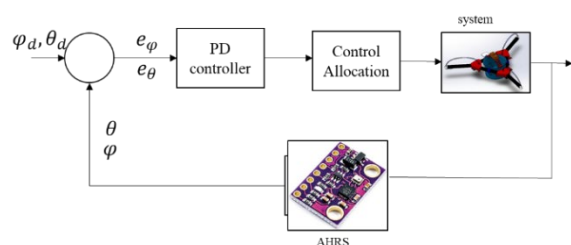
در اینجا فرض می‌شود که نازل‌ها و شیرهای الکتریکی بدون هیچ خطایی نصب شده‌اند. از طرفی فرض می‌شود که نازل ۱ و ۳ برای کنترل زاویه فراز که نازل ۱ برای ایجاد زاویه مثبت و نازل ۳ برای ایجاد زاویه منفی مؤثر است. همچنین نازل‌های ۲ و ۴ برای کنترل زاویه غلت در نظر گرفته شده است که نازل ۲ برای ایجاد زاویه مثبت و نازل ۴ برای ایجاد زاویه غلت منفی

$$G(s) = \frac{e^{-s\tau_d}}{1 + \tau s} \quad (۶)$$

۴- طراحی کنترل‌کننده

در این نوع از پلتفرم‌ها، طراحی کنترل‌کننده با دو چالش روبروست:

- برخلاف پرندهای مولتی روتور معمول که از موتور الکتریکی استفاده می‌کنند و با تنظیم دور موتورهای گشتاور حول هر محور قابل تنظیم است، گشتاور تولیدی در اینجا گسسته بوده و تنها یک مقدار مشخص دارد.
 - در پرندهای با موتور الکتریکی با تغییر جهت دور موتور می‌توان جهت گشتاور اعمالی را تغییر داد ولی در اینجا هر نازل فقط در یک راستا نیرو تولید می‌نماید.
- بلوک دیاگرام سیستم کنترل در شکل ۵ مشاهده می‌شود.



شکل (۵): بلوک دیاگرام طراحی کنترل‌کننده.

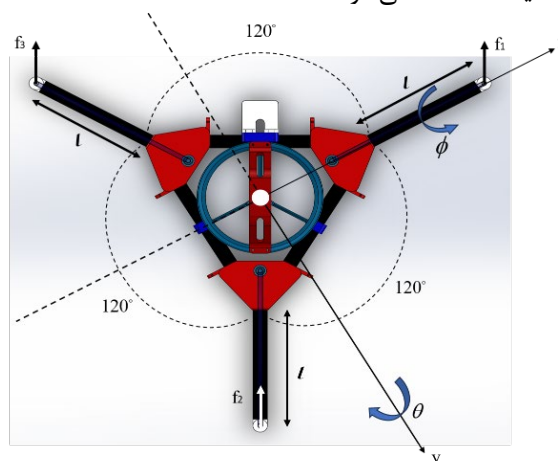
با توجه به شرایط بیان‌شده در ادامه فرآیند طراحی کنترل‌کننده توضیح داده خواهد شد.

۴-۱- تخصیص کنترل

در این بخش، طراحی تخصیص کنترلی پیشنهادی برای اجرا ارائه شده است. وظیفه اصلی روش تخصیص رانشگرهای کنترلی، انتخاب رانشگرهای خاص و محاسبه فواصل روشن بودن آن‌ها برای دستیابی به نیرو و گشتاور کنترلی موردنظر است. مسئله تخصیص کنترلی عبارت است از حل مجموعه‌ای از معادلات که تعداد مجهولات آن‌ها بیشتر از تعداد معادلات است. از آنجایی که چنین سیستمی پاسخ‌های بی‌شماری دارد، مشکل تخصیص کنترلی، یافتن حداقل یک پاسخ است که محدودیت ورودی کنترل و معیار بهینه‌سازی را برآورده کند. با توجه به اینکه سطر سوم ماتریس (۳) و (۶) صفر است، معادله را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

۳-۱- معادلات دینامیکی پرند با سه پیشران

در شکل ۴ چگونگی پیکربندی و نوع قرارگیری نازل‌ها و همچنین دستگاه بدنی برای سیستم با سه پیشران، به صورت شماتیک مشاهده می‌شود.



شکل (۴): شماتیک دستگاه بدنی متصل به سیستم.

همان‌طور که در شکل فوق مشخص است، نیروهای f_1 و f_2 و f_3 برای ایجاد گشتاور حول محور x و نیروهای f_1 ، f_2 و f_3 برای ایجاد گشتاور حول محور y مؤثر هستند. از طرفی با توجه به نوع قرارگیری و اتصال رانشگرها که به صورت کاملاً عمود بر بازوها نصب شده‌اند، این نیروها برای کنترل زاویه سمت کاربرد ندارند. بنابراین، می‌توان معادلات گشتاور را برای سیستم با پیکربندی شکل ۴ به صورت زیر نوشت:

$$M = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_3 l \cos 30^\circ - f_2 l \cos 30^\circ \\ f_1 l - f_3 l \sin 30^\circ - f_2 l \sin 30^\circ \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

با بازنویسی معادلات بالا می‌توان نوشت:

$$M = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & l \cos 30^\circ & -l \cos 30^\circ \\ l & -l \sin 30^\circ & -l \sin 30^\circ \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

$$\Rightarrow M = B_{3T} F$$

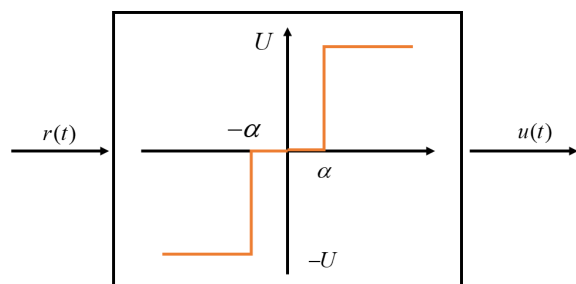
همان‌طور که معادله (۴) نشان می‌دهد، طراحی کنترل برای این سیستم بسیار دشوارتر است؛ زیرا نوع نصب بازوها و نیروها و گشتاورهای تولیدشده باعث کوپلینگ بسیار زیاد در معادلات غلت و فراز می‌شود.

از طرف دیگر در این معادلات، برای شیر برقی مدل دینامیکی درجه اول با یک تأخیر در نظر گرفته می‌شود [۱۴].

نوع جهش و روش انتخاب وابسته است که نیازمند تجربه کاربر بوده و ممکن است حل مسئله را با مشکل مواجه سازد.

۴-۳- کنترل بنگ-بنگ

یکی از روش‌های ساده در طراحی کنترل‌کننده برای رانشگرها، کنترلر بنگ-بنگ است [۱۸]. در کنترل بنگ-بنگ، یک سیگنال پیوسته به سیگنال روشن-خاموش تبدیل می‌شود. این روش به این صورت عمل می‌کند که اگر کنترل‌کننده دارای مقدار غیر صفر باشد، کنترل‌کننده روشن و اگر مقدار آن صفر باشد، کنترل‌کننده خاموش می‌شود. سه نوع اصلی از این روش کنترلی وجود دارد: کنترل‌کننده بنگ-بنگ ساده، کنترل‌کننده بنگ-بنگ با منطقه مرده و کنترل‌کننده بنگ-بنگ با زمان بهینه‌شده. معمولاً برای جلوگیری از فعالیت غیرضروری کنترل‌کننده به دلیل وجود عواملی مانند اغتشاش و نویز و همچنین فعالیت کمتر رانشگرها، منطقه مرده به کنترل‌کننده بنگ-بنگ اضافه می‌شود [۱۹]. شماتیک این روش کنترل در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل (۶): نمودار کنترل بنگ-بنگ با ناحیه مرده.

رابطه ریاضی کنترل‌کننده بنگ-بنگ با ناحیه مرده به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۰]:

$$u(t) = \begin{cases} U \text{sign}(r(t)) & |r(t)| \geq \alpha \\ 0 & |r(t)| < \alpha \end{cases} \quad (11)$$

فعالیت رانشگر، دقت سیستم، ردیابی و حساسیت نویز به طور مستقیم به مقدار منطقه مرده بستگی دارد. به طوری که ناحیه مرده بزرگ منجر به کاهش دقت سیستم و افزایش خطای مداوم می‌شود و سیستم را به سمت ناپایداری سوق می‌دهد؛ اما از طرفی افزایش ناحیه مرده، مقاومت سیستم در برابر نویز را افزایش داده، فعالیت رانشگر را کاهش داده و در نتیجه در مصرف سوخت صرفه‌جویی می‌شود [۲۱].

$$M_{4T} = \begin{bmatrix} 0 & l & 0 & -l \\ l & 0 & -l & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \Rightarrow M \\ = B_{4T}F \quad (7)$$

$$M_{3T} = \begin{bmatrix} 0 & l \cos 30^\circ & -l \cos 30^\circ \\ l & -l \sin 30^\circ & -l \sin 30^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \\ \Rightarrow M = B_{3T}F$$

بنابراین، B یک ماتریس غیر مربعی است. برای یافتن بردار عملگر ورودی موردنظر F ، شبه معکوس مور-پنروز، همان‌طور که در [۱۵] بیان شده است، قابل استفاده است. بردار F را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$F = B^{\#}M \quad (8)$$

که در این معادله، $B^{\#}$ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$B^{\#} = B^T(BB^T)^{-1} \quad (9)$$

شبه معکوس ماتریس B و راه حل به دست آمده به صورت محلی عناصر F را به حداقل می‌رساند [۱۶].

۴-۲- کنترل‌کننده PD

روش‌های مختلفی برای کنترل انواع پرنده‌ها ارائه شده است. ولی یکی از بهینه‌ترین و مناسب‌ترین روش‌های کنترلی، کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی است که در اینجا از آن استفاده شده است [۱۷].

$$u_{\theta} = K_{p\theta}e_{\theta} + K_{d\theta}\dot{e}_{\theta} \quad (10)$$

$$u_{\theta} = K_{p\theta}e_{\theta} + K_{d\theta}\dot{e}_{\theta}$$

در این مقاله، برای ایجاد شرایط یکسان برای مقایسه دو سیستم، ضرایب کنترلی با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استخراج می‌شود. الگوریتم ژنتیک یک روش نرم‌افزاری است که از فرآیند تکامل ژنتیکی به عنوان یک الگوی حل مسئله استفاده می‌کند. مسئله بهینه‌سازی شامل متغیرها، قیود و تابع معیار است که فرآیند انتخاب متغیرهای بهینه از طریق ارزیابی تابع معیار به کمک الگوهای انتخاب تصادفی پیش می‌رود.

اما از آنجایی که منطق حاکم بر الگوریتم ژنتیک، استفاده از الگوهای تصادفی است، در هر بار اجرا، محاسبه نقطه بهینه به صورت دقیق امکان‌پذیر نیست. همچنین استفاده از این روش به تنظیماتی از جمله تعداد جمعیت، نوع ترکیب ژنتیکی،

شرط لازم این است که ضرایب چندجمله‌ای مشخصه مثبت باشد. این بدان معناست که تمام ریشه‌های معادله مشخصه باید دارای بخش‌های واقعی منفی باشند؛ بنابراین:

$$I_{xx}, K_{d\theta}, K_{p\theta} > 0 \quad (۱۶)$$

$$I_{yy}, K_{d\theta}, K_{p\theta} > 0$$

شرط کافی این است که تمام عناصر ستون اول آرایه جدول ۳ (جدول روٹ-هورویترز) علامت یکسانی داشته باشند. به این معنی که تمام عناصر ستون اول آرایه جدول باید مثبت یا منفی باشند.

جدول (۳): عناصر جدول روٹ-هورویترز.

s^2	$I_{xx}(I_{yy})$	$K_{p\theta}(K_{p\theta})$
s	$K_{d\theta}(K_{d\theta})$	0
s^0	$\frac{K_{p\theta}}{I_{xx}} \left(\frac{K_{p\theta}}{I_{yy}} \right)$	

در نتیجه اگر سطر سوم این جدول بزرگ‌تر از صفر باشد سیستم حتماً پایدار خواهد بود که در اینجا نیز از همان شرط اول این نتیجه حاصل می‌شود. به عبارتی اگر هر دو ضریب کنترل‌کننده بزرگ‌تر از صفر باشد، سیستم پایدار می‌شود ولی برای رسیدن به کارایی مناسب باید ضرایب تنظیم شوند.

۵- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی و ارزیابی سیستم‌های طراحی و پیشنهاد شده، در این بخش در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار MATLAB کنترل‌کننده‌های طراحی شده با سیستم شبیه‌سازی شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در ادامه، نتایج حاصل و همچنین سایر معیارها با یکدیگر مقایسه شده و نتیجه استخراج خواهد شد. در اینجا برای بررسی کارایی دقیق کنترل‌کننده طراحی شده برای پرند، در شبیه‌سازی برای مسئله رگولاسیون (تنظیم حول صفر) و سپس مسئله ردیابی ارائه می‌شود. در ابتدا ضرایب کنترل‌کننده برای هر دو پرند که با الگوریتم ژنتیک استخراج شده است. پارامترهای اولیه الگوریتم ژنتیک در جدول ۴ آورده شده است.

جدول (۴): پارامترهای تنظیمی الگوریتم ژنتیک.

تعداد جمعیت	تعداد نسل	احتمال جهش	نوع ترکیب ژنتیکی	روش انتخاب برگزیده
۵۰	۵۰	٪۴۰	دونقطه‌ای	Roulette

در این مقاله از تکنیک مدولاسیون پالس برای زمان فعال‌سازی رانشگرها استفاده شده است. با این روش، میانگین کل گشتاور اعمال شده توسط رانشگرها نزدیک به حداکثر گشتاور کنترلی محاسبه شده در کنترل بنگ-بنگ است. در مدولاسیون عرض پالس، زمان فعالیت رانشگر با خطا افزایش یا کاهش می‌یابد. هر چه خطا بیشتر باشد، رانشگر هدف مدت بیشتری روشن است. در اینجا اگر زمان روشن شدن محاسبه شده کمتر از زمان نمونه‌برداری یا تأخیر پیش‌راندها باشد، زمان فعالیت رانشگر صفر در نظر گرفته می‌شود. اگر زمان محاسبه شده بیشتر از زمان چرخه باشد، رانشگر برای کل زمان چرخه روشن است.

۴-۴- اثبات پایداری

در این زیر بخش پایداری حلقه بسته سیستم با خطی‌سازی آن حول نقطه تعادل و همچنین با توجه به کنترل‌کننده طراحی شده اثبات می‌شود.

با توجه به اینکه در این سیستم ممان‌های ضریبی مقادیر نزدیک به صفر دارند و با توجه به رابطه (۱)، می‌توان برای کانال‌های غلت و فراز نوشت:

$$\begin{aligned} M_{\theta} &= I_{xx}\ddot{\theta} \\ M_{\theta} &= I_{yy}\ddot{\theta} \end{aligned} \quad (۱۲)$$

در نتیجه تابع تبدیل برای دو کانال غلت و فراز عبارت است از:

$$\begin{aligned} G_{\theta}(s) &= \frac{1}{I_{xx}s^2} \\ G_{\theta}(s) &= \frac{1}{I_{yy}s^2} \end{aligned} \quad (۱۳)$$

از طرفی با فرض طراحی کنترل‌کننده PD، تابع تبدیل کنترل‌کننده عبارت است از:

$$C_{PD} = K_p + K_d s \quad (۱۴)$$

بنابراین، تابع تبدیل حلقه بسته برای دو کانال مذکور را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} T_{\theta}(s) &= \frac{K_{p\theta} + K_{d\theta}s}{I_{xx}s^2 + K_{d\theta}s + K_{p\theta}} \\ T_{\theta}(s) &= \frac{K_{p\theta} + K_{d\theta}s}{I_{yy}s^2 + K_{d\theta}s + K_{p\theta}} \end{aligned} \quad (۱۵)$$

با توجه به تابع تبدیل خطی به دست آمده، معیار پایداری روٹ-هورویترز را می‌توان استفاده نمود. معیار پایداری روٹ-هورویترز داشتن یک شرط لازم و یک شرط کافی برای پایداری است.

جدول (۶): شبه کد فرآیند استخراج ضرایب کنترل کننده با الگوریتم ژنتیک.

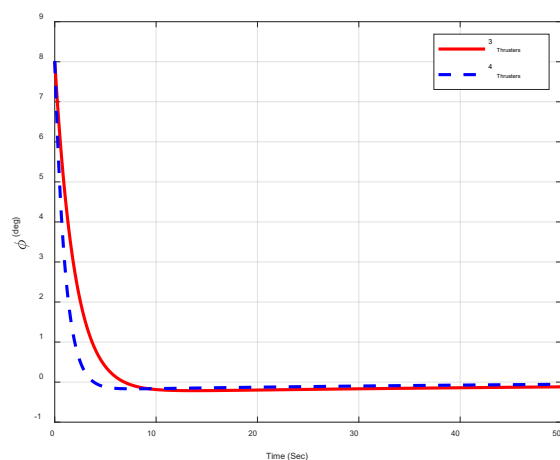
Evaluate Population	۱
For $N = 3$ to all numbers of k_p , k_d , and k_i .	۲
$k_{p\theta} = 0.003972$ $k_{p\theta} = 0.006972$	
$k_{d\theta} = 0.00185$ $k_{d\theta} = 0.00385$	
evaluate $k_{p\theta}$ and $k_{d\theta}$ ($k_{p\theta}$ and $k_{d\theta}$) by Eq. 17 (Fitness Function).	۳
repeat GA:	۴
for each k_p , k_d , and k_i	۵
F_{obj} = evaluate k_p and k_d ($k_{p\theta}$ and $k_{d\theta}$) by Eq. 17.	۶
next i .	۷
select n parents (Crossover).	۸
create m parents and k offspring (Mutation).	۹
evaluate offsprings by Eq. 17.	۱۰
replacement	۱۱
until GA stopping criteria is fulfilled.	۱۲
end $N = 50$.	۱۳
End.	۱۴

۵-۱- شبیه‌سازی مسئله رگولاسیون

در این زیر بخش برای شبیه‌سازی دو پرنده مقادیر اولیه در نظر گرفته شده عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} \theta_0 &= 8 \text{ (deg)} \\ \dot{\theta}_0 &= -11 \text{ (deg)} \end{aligned} \quad (18)$$

و هدف کنترلی رسیدن وضعیت پرنده به نقطه صفر درجه است. در شکل‌های ۸ و ۹ نمودارهای مربوط به زاویه غلت و فراز دو پرنده طراحی شده با کنترل کننده PD و ضرایب کنترلی جدول بالا آورده شده است.

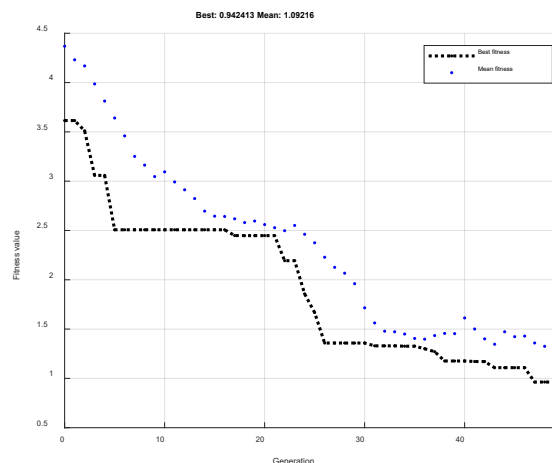


شکل (۸): نمودار زاویه غلت برای دو پرنده.

در این مقاله، تابع معیار بهینه‌سازی عبارت است از:

$$F_{obj} = \int_0^{20} T_s (|\theta_d - \theta_{sim}| + |\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_{sim}|) dt \quad (17)$$

با استفاده از این تابع معیار، همگرایی الگوریتم ژنتیک در شکل ۷ مشاهده می‌شود.



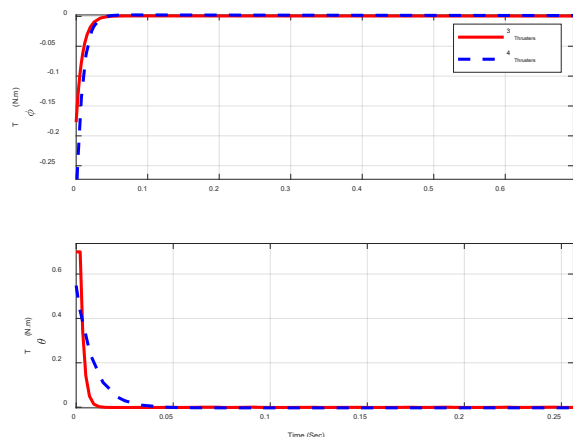
شکل (۷): نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک.

نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک برای تنظیم ضرایب کنترلی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول (۵): ضرایب کنترلی PD برای دو پلتفرم پرنده.

نام پرنده	$K_{p\theta}$	$K_{d\theta}$	$K_{p\theta}$	$K_{d\theta}$
چهار پيشران	۰/۰۳۶	۰/۰۹۱	۰/۰۱۹۳	۰/۰۵۷۸
سه پيشران	۰/۰۲۱	۰/۰۱۳	۰/۰۱۴۱	۰/۰۸۳

با توجه به ورودی و تابع معیار بهینه‌سازی رابطه (۱۷)، فرآیند استخراج ضرایب کنترل کننده به صورت یک شبه کد با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در جدول ۶ ارائه شده است. قابل ذکر است که در اینجا مراحل بیان شده و شبیه‌سازی الگوریتم ژنتیک با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. همچنین فرآیند تا زمانی تکرار می‌شود که خروجی، معیارهای توقف را برآورده کند. در این مسئله بهینه‌سازی جمعیت اولیه ۵۰ نفر ایجاد شده است. برای تعداد پارامترهای خروجی با تعداد کم، تعداد جمعیت کم کافی است. برای بهبود دقت، می‌توان تعداد بیشتری از جمعیت را انتخاب کرد اما زمان شبیه‌سازی را افزایش می‌یابد. در ادامه با توجه به ضرایب به دست آمده، شبیه‌سازی مسئله رگولاسیون و ردیابی برای هر دو پرنده انجام شده که در ادامه مشاهده می‌شود.



شکل (۱۱): گشتاورهای کنترلی حول محورهای x و y .

با توجه به اینکه گشتاورهای تولیدی از یک زمانی به بعد یکسان هستند، برای مشاهده تفاوت در گشتاورهای کنترلی، تنها نقاط اولیه آورده شده است. آنچه در شکل ۱۱ نشان می‌دهد برای کنترل زاویه غلت گشتاور تولیدی در پرنده با چهار پیشران بیشتر بوده ولی برای کنترل زاویه فراز این مقدار کمتر است.

۵-۲- شبیه‌سازی مسئله ردیابی

برای بررسی دقیق کارایی کنترل‌کننده طراحی‌شده، در این زیر بخش، مسئله ردیابی برای دو پرنده شبیه‌سازی‌شده و تحلیلی از نتایج ارائه می‌گردد. در اینجا شبیه‌سازی مسئله ردیابی با شرایط زیر انجام می‌گردد:

$$\begin{aligned} \phi_d(t) &= 7 \sin(2\pi \times 0.03t) \\ \theta_d(t) &= 7 \cos(2\pi \times 0.03t) \end{aligned} \quad (19)$$

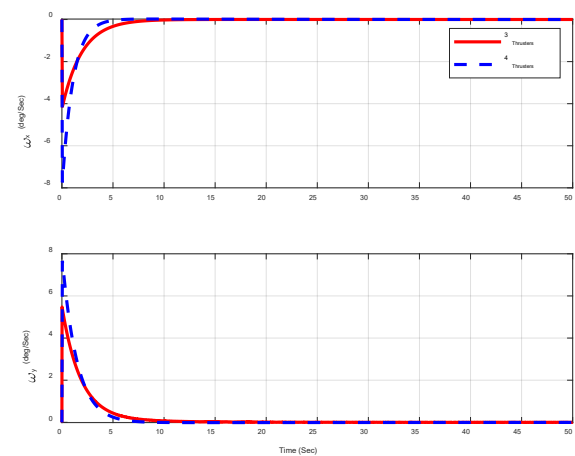
با توجه به این ورودی، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمودارهای زوایای غلت و فراز حلقه بسته با کنترل‌کننده PD برای دو پرنده مشاهده می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مسئله ردیابی با دقت مناسبی صورت گرفته است. ولی خطای ردیابی پرنده با سه رانشگر بیشتر از پرنده با چهار رانشگر است. همچنین در نمودار شکل ۱۴ می‌توان سرعت زاویه‌ای پرنده‌ها در حالت حلقه بسته را مشاهده نمود.

در ادامه در شکل ۱۵ نمودار گشتاور موردنیاز برای کنترل پرنده‌ها با توجه به کنترل‌کننده طراحی‌شده آورده شده است.

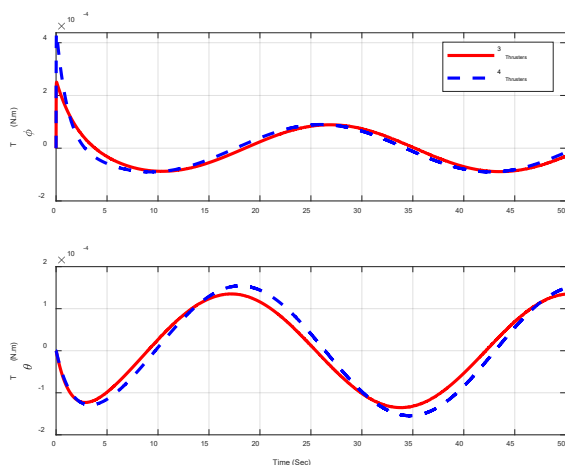
شکل (۹): نمودار زاویه فراز برای دو پرنده.

همان‌طور که نمودارهای شکل‌های فوق نشان می‌دهد، هر دو سیستم به مقادیر نهایی و مطلوب صفر رسیده‌اند ولی در پرنده با چهار پیشران سرعت کمی افزایش یافته است و سریع‌تر به مقدار مطلوب رسیده است. در ادامه در شکل ۱۰ نمودار سرعت هر یک از پرنده‌های پیشنهادی مشاهده می‌شود.



شکل (۱۰): نمودار سرعت زاویه‌ای حول محورهای x و y .

مطابق با شکل فوق می‌توان بیان کرد که حداکثر سرعت زاویه‌ای در سیستم چهار پیشران کمی بهتر است و علت آن به قابلیت تولید نیروی بیشتر با توجه به تعداد نازل‌های بیشتر در سیستم با چهار پیشران است. به همین دلیل با توجه به سرعت زاویه‌ای بالا در شکل‌های ۸ و ۹، سرعت رسیدن به مقدار مطلوب در این سیستم بیشتر است. همچنین در شکل ۱۱ نمودار گشتاور کنترلی تولیدشده برای زمان‌های اولیه مشاهده می‌شود.



شکل (۱۵): نمودار گشتاور کنترلی برای دو پرنده.

همان‌طور که در شکل بالا مشخص است، گشتاور کنترلی در پرنده با چهار پیشران با اختلاف خیلی اندکی بیشتر است. در ادامه برای بررسی کارایی سیستم حلقه بسته دو معیار خطا و مصرف انرژی برای مسئله رگولاسیون و ردیابی در دو پرنده محاسبه و تحلیل خواهد شد. یکی از معیارهای مهم در طراحی سیستم‌های هوافضایی، معیار خطاست، در اینجا معیار قدر مطلق زمانی خطای جمع‌شونده در نظر گرفته شده است [۲۲].

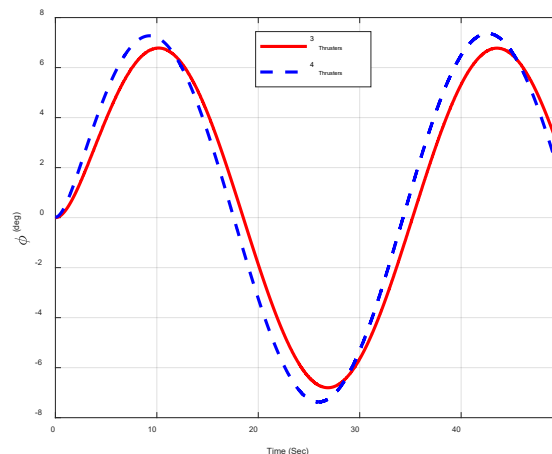
$$ITAE = \int T_s |e| \quad (20)$$

با استفاده از رابطه بیان شده، با این معیار خطای اندازه‌گیری شده برای هر دو پلتفرم پرنده در زوایای غلت و فراز در جدول ۷ آورده شده است.

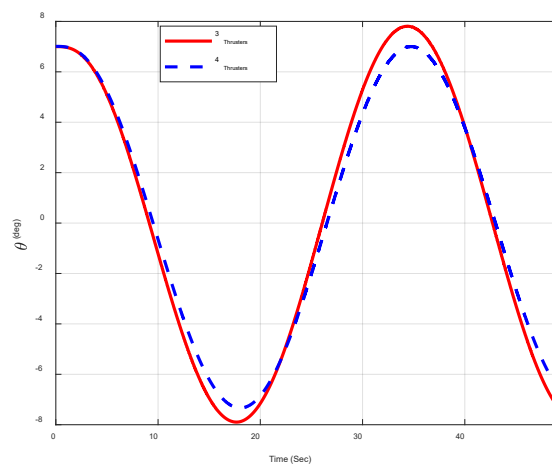
جدول (۷): معیار خطا برای زاویه غلت برای مسئله رگولاسیون و ردیابی

	$ITAE_{\theta}$		$ITAE_{\phi}$	
پلتفرم پرنده	رگولاسیون	ردیابی	رگولاسیون	ردیابی
چهار پیشران	۰/۴۹۳	۰/۲۹۱	۰/۷۸۳	۰/۴۷۴۱
سه پیشران	۰/۵۳۴	۰/۳۳۱	۰/۹۰۷	۰/۵۲۳۷

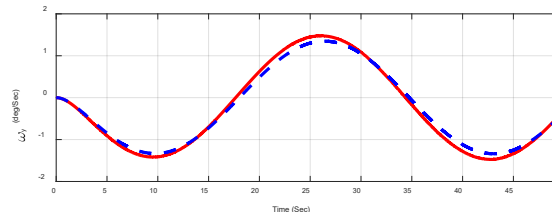
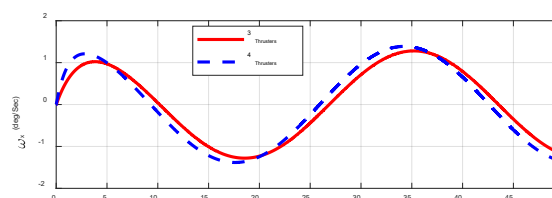
در انتها می‌توان بیان نمود که معیار خطای کنترل در زاویه غلت برای سیستم با چهار پیشران ۸ درصد بهتر از سیستم با سه پیشران است و برای زاویه فراز ۱۳ درصد است. در



شکل (۱۲): نمودار زاویه غلت برای دو پرنده در مسئله ردیابی.



شکل (۱۳): نمودار زاویه فراز برای دو پرنده در مسئله ردیابی.



شکل (۱۴): نمودار سرعت زاویه‌ای برای دو پرنده.

در نهایت با توجه به معیارهایی همچون وزن، هزینه، دقت و مصرف انرژی مقایسه بین آن‌ها صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که معیار دقت و مصرف انرژی در پرنده با چهار پیشران به ترتیب ۱۰ و ۴ درصد بهتر است ولی وزن و هزینه پرنده با چهار پیشران ۱۰ و ۹ درصد ضعیف‌تر از پرنده با سه پیشران گاز سرد است. به‌عنوان کارهای آینده، می‌توان به ارتقای سیستم کنترل وضعیت در سیستم سه پیشران که دقت را بتوان با الگوریتم‌های نرم‌افزاری بهتر نمود، اشاره کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود بعد از ساخت، بستر تست نرم‌افزار در حلقه و سخت‌افزار در حلقه فراهم گردد.

۶- مراجع

[1] Du C, Zhu ZH, Kang J. Attitude control and stability analysis of electric sail. in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2022; 58(6): 5560-5570.

DOI

<https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3175166>.

[2] Gavrilina E, Veltishev V, Kropotov A. Attitude control system of a highly maneuverable hybrid ROV for ship-hull inspection. OCEANS 2021: San Diego – Porto, San Diego, CA, USA. 2021; 1-6. DOI <https://doi.org/10.23919/OCEANS44145.2021.9705753>.

[3] Naronglerdrit P, Parnichkun M. Attitude control of a satellite based on sliding mode control. 22nd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Jeju, Korea, Republic of. 2022; 666-671.

DOI

<https://doi.org/10.23919/ICCAS55662.2022.10003674>.

[4] Mirshams M, Taei H, Ghobadi M, Haghi H. Spacecraft attitude dynamics simulator actuated by cold gas propulsion system. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2015; 229(8):1510-1530. DOI <https://doi.org/10.1177/0954410014555167>.

[5] Martínez JM, Lafleur T. On the selection of propellants for cold/warm gas propulsion systems. Acta Astronautica. 2023; 212: 54-69. DOI <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.07.031>.

[6] Fatehi M, Nosratollahi M, Adami A, Arghand MR. Multidisciplinary design of space blowdown cold gas propulsion system without pressure regulator by genetic algorithms. Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi. 2015; 36(3): 2363-2370.

سیستم‌های هوافضایی، با توجه به تأمین انرژی توسط باتری مصرف انرژی نیز از معیارهای اساسی بشمار می‌رود که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۳].

$$W = \sum f \Delta x \quad (21)$$

محاسبه میزان مصرف انرژی در جدول ۸ آورده شده است. معیار مصرف انرژی حول محور x و y در سیستم با چهار پیشران حدود ۴ درصد بهتر است. در نتیجه می‌توان نتایج تحلیل با توجه به معیارهای بیان شده را در جدول ۹ مشاهده نمود. در جدول ۹ معیار بررسی سیستم با چهار پیشران بوده و نتایج با آن مقایسه شده است. این جدول نشان می‌دهد که بنا به راهبرد طراحی، اگر طراح دنبال کاهش دقت و مصرف انرژی بهتر است باید از سیستم با چهار پیشران گاز سرد استفاده کند و اگر وزن و هزینه دارای اهمیت است باید از پیشران با سه پیشران استفاده نماید. هر چند نتایج نشان می‌دهد که اختلاف آن‌ها بسیار نزدیک به یکدیگر است.

جدول (۸): معیار مصرف انرژی برای زاویه غلت و فراز.

پلتفرم پرنده	w_θ		w_ϕ	
	رگولاسیون ردیابی	رگولاسیون	رگولاسیون ردیابی	رگولاسیون
چهار پیشران	8.66×10^{-4}	7.89×10^{-4}	6.65×10^{-4}	3.19×10^{-4}
سه پیشران	15.019×10^{-4}	0.0014	7.95×10^{-4}	5.948×10^{-4}

جدول (۹): مقایسه معیارهای ارزیابی دو پرنده پیشنهادی.

معیار	وزن	هزینه	معیار دقت	مصرف انرژی
اختلاف	۱۰٪	-۹٪	٪ ۱۰/۵	۴٪

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله دو پیکربندی برای پلتفرم پرنده شبیه‌ساز سامانه فضایی با پیشران گاز سرد برای تست‌های آزمایشگاهی ارائه و طراحی شد. پلتفرم پرنده با پیکربندی اول دارای سه پیشران گاز سرد و پرنده با پیکربندی دوم دارای چهار پیشران گاز سرد است. سپس معادلات دینامیکی هر یک از آن‌ها مستقلاً استخراج شد و برای آن کنترل‌کننده طراحی گردید. نتایج حاصل از معیار دقت و مصرف انرژی هر یک استخراج گردید.

- inverse source problem. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI), Denver, CO, USA. 2022; 1942-1943. DOI <https://doi.org/10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886331>.
- [17] Lv Z, Ning D, Liu P, Liao P. PD control with gravity compensation for 3-RPS parallel manipulator. IEEE 12th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS), Xiangtan, China. 2023; 1744-1749. DOI <https://doi.org/10.1109/DDCLS58216.2023.1016707>.
- [18] Chen X, Wang L, Liu Y, Wu Q. Bang-bang funnel control of three-phase full-bridge inverter under dual-buck scheme. in IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2023; 70(6): 5399-5409. DOI <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3198247>.
- [19] Hayakawa S, Nakagawa T, Oya H, Hoshi Y. Synthesis of adaptive gain robust controllers for Polytopic uncertain systems with multiple unknown dead-zone inputs. IECON 2022– 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Brussels, Belgium. 2022; 1-6. DOI <https://doi.org/10.1109/IECON49645.2022.9969011>.
- [20] Shabara MA, Abdelkhalik O. Bang-bang control of spherical variable-shape buoy wave energy converters. 2022 American Control Conference (ACC), Atlanta, GA, USA. 2022; 3094-3099. DOI <https://doi.org/10.23919/ACC53348.2022.9867800>.
- [21] Furumoto T, Fujiwara M, Makino Y, Shinoda H. Bang-bang control with constant thrust of a spherical blimp propelled by ultrasound beam. International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Philadelphia, USA. 2022; 4051-4057. DOI <https://doi.org/10.1109/ICRA46639.2022.9812012>.
- [22] Mushar K, Hote YV, Pillai GN. New mixed model order reduction approach for linear system. IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), India. 2022; 343-348. DOI <https://doi.org/10.1109/SPICES52834.2022.9774083>.
- [23] Vijayan P. Energy consumption prediction in low energy buildings using machine learning and artificial intelligence for energy efficiency. 8th International Youth Conference on Energy (IYCE), Hungary. 2022; 1-6. DOI <https://doi.org/10.1109/IYCE54153.2022.9857548>.
- [7] Wang Y, Long J, Wang T, Wang X, Liu X, Wang B. Identification modeling of micro thrust cold gas propulsion system. 41st Chinese Control Conference (CCC), Hefei, China. 2022; 1480-1485. DOI <https://doi.org/10.23919/CCC55666.2022.9902465>.
- [8] Zhang X, Ling KV, Lu Z, Zhang X, Liao W, Lim WS. Piece-wise affine MPC-based attitude control for a CubeSat during orbital manoeuvre. Aerospace Science and Technology. 2021; 118. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106997>.
- [9] Lavezzi G, Stang NJ, Ciarcià M. START: A satellite Three axis rotation testbed. Micromachines (Basel). 2022; 13(2): 1-15. DOI <https://doi.org/10.3390/mi13020165>.
- [10] Gillham M, Howells G. Attitude control of small probes for de-orbit, descent and surface impact on airless bodies using a single PWM thruster. 6th International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT), Madrid, Spain. 2017; 50-55. DOI <https://doi.org/10.1109/SMC-IT.2017.16>.
- [11] Barari A, Dion R, Jeffrey I, Ferguson P. Testing satellite control systems with drones. in IEEE Potentials. 2022; 41(1): 6-13. DOI <https://doi.org/10.1109/MPOT.2021.3115728>.
- [12] Zhu C, Song Y. Backstepping Sliding mode control for quadrotor UAV based on adaptive observer. IEEE 13th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC), China. 2023; 207-212. DOI <https://doi.org/10.1109/ICEIEC58029.2023.1020062>.
- [13] Adıgüzel F. A Lyapunov-based nonlinear discrete-time controller design for attitude tracking control of quadrotor unmanned aerial vehicles. 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST), Istanbul, Türkiye. 2023; 1-5. DOI <https://doi.org/10.1109/RAST57548.2023.10197929>.
- [14] Moghadaszadeh Bazaz S, Bohlouri V, Jalali Naini SH. Attitude control of rigid satellite with pulse-width modulation using observer-based modified PID controller. Modares Mechanical Engineering. 2016; 16(8): 139-148. DOI <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1395.16.8.4.1>.
- [15] Finnset R, Rao S, Antonsen J. Real time hardware-in-loop simulation of ESMO satellite attitude control system. Modeling, Identification and Control. 2006; 27(2). DOI <https://doi.org/10.4173/mic.2006.2.4>.
- [16] Citraro E, Dély A, Merlini A, Andriulli FP. On a constrained pseudoinverse for the electromagnetic