



Original Research Paper

# Controller Design in Roll, Pitch, and Yaw Channels for Flying Robot Using Firefly and Grey Wolf Optimization Algorithms

SayedMostafa Mousavi and Alireza Toluei\*

Faculty of New Technologies and Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

## ARTICLE INFO

### Article History:

Received 17 June 2024

Revised 05 August 2024

Accepted 10 August 2024

Available Online 24 August 2024

### Keywords:

Flying robot

Roll channel

Pitch channel

Yaw channel

Firefly optimization algorithm

Gray wolf optimization algorithm

## ABSTRACT

This article presents a controller design method for three-channel flight control of a flying robot using firefly and gray wolf optimization algorithms, both capable of handling system model uncertainties. First, the firefly algorithm enhances controller performance by introducing random variations to optimize parameters and approach the global optimum. Then, the gray wolf algorithm is employed to further improve controller efficiency by mimicking the group hunting behavior of wolves to guide parameter tuning. The main innovation of this study is satisfying controller constraints through a limited search interval and generating a random neighborhood within the feasible region. Results show that using a dynamic adaptive factor to adjust the search speed during optimization, the firefly-based controller achieves a better balance between convergence rate and global search ability. This method significantly improves the stability and performance of flying robots and can be effectively applied to controller design in aerial robotic systems.

\* Corresponding Author's E-mail: [toloei@sbu.ac.ir](mailto:toloei@sbu.ac.ir)

## How to Cite this Article:

S. M. Mousavi and A. Toluei, "Controller design in roll, pitch, and yaw channels for flying robot using firefly and grey wolf optimization algorithms," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 17-30, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2025.9.2.2>.

## COPYRIGHTS


Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. 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 کنترل کننده در کانال های چرخ، فراز و سمت برای ربات پرنده با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی کرم شب تاب و گرگ خاکستری

سیدمصطفی موسوی<sup>۱</sup> و علیرضا طلوعی<sup>۲\*</sup> 

۱- دانشجوی دکتری هوافضا، دانشکده علوم و فناوری نوین و هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران  
۲- دانشیار، گروه هوافضا، دانشکده علوم و فناوری نوین و هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

### چکیده

این مقاله، روش طراحی کنترل کننده در سه کانال حرکتی ربات پرنده با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی کرم شب تاب و گرگ خاکستری، را مطرح می کند که توانایی مقابله با نامعینی های مدل سامانه را داراست. ابتدا الگوریتم کرم شب تاب به منظور بهبود عملکرد کنترل کننده مطرح شده است و با استفاده از تغییرات تصادفی جهت بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده، به یافتن حل بهینه مطلق نزدیک به جواب مطلوب، کمک می کند. سپس، الگوریتم گرگ خاکستری نیز به منظور بهبود عملکرد کنترلر مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم نیز با تکیه بر الهام از رفتار گروهی گرگ ها در جستجوی غذا، به بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده می پردازد. نوآوری این مقاله، ارضاء قیود کنترلر است که به علت محدود بودن بازه جستجو و ایجاد همسایگی تصادفی در ناحیه ای که قیود و محدودیت ها را ارضاء می کند، اعمال می شود. نتایج نشان می دهد که کنترلر طراحی شده با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب به جهت استفاده از یک عامل تطبیقی پویا برای متعادل کردن نرخ همگرایی و توانایی جستجوی بهینه مطلق با تنظیم سرعت جستجو در طول فرآیند عملکرد دقیق تری از خود نشان می دهد. این روش می تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد و پایداری ربات های پرنده ایجاد کند و در طراحی کنترل کننده در ربات های پرنده مورد استفاده قرار گیرد.

### اطلاعات مقاله

#### تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۸ خرداد ۱۴۰۳

بازنگری ۱۵ مرداد ۱۴۰۳

پذیرش ۲۰ مرداد ۱۴۰۳

اولین انتشار ۰۳ شهریور ۱۴۰۳

#### واژه های کلیدی:

ربات پرنده

کانال چرخ

کانال فراز

کانال سمت

الگوریتم های بهینه سازی کرم شب تاب

گرگ خاکستری

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [toloei@sbu.ac.ir](mailto:toloei@sbu.ac.ir)

#### How to Cite this Article:

S. M. Mousavi and A. Toluei, "Controller design in roll, pitch, and yaw channels for flying robot using firefly and grey wolf optimization algorithms," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 17-30, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2025.9.2.2>.

#### COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. 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

ربات‌های پرنده با توانایی حرکت در فضای سه بُعدی، به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم در بسیاری از کاربردها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ربات‌ها در بررسی مناطق دشوار، جمع‌آوری اطلاعات در محیط‌های خطرناک، کمک به عملیات نجات و بسیاری از حوزه‌های دیگر کاربرد دارند.

با این حال، کنترل دقیق و مقاوم در حرکت ربات‌های پرنده به دلیل پیچیدگی فضای حالت چالش برانگیز است. به‌همین دلیل، طراحی کنترلرهای مبتنی بر الگوریتم‌های قدرتمند و مقاوم مورد توجه قرار گرفته است [۱].

هدف اصلی این مقاله، طراحی و شبیه‌سازی کنترل کننده در کانال چرخ، فراز و سمت برای ربات پرنده با بهره‌گیری از الگوریتم‌های کرم شب‌تاب<sup>۱</sup> و گرگ خاکستری<sup>۲</sup> است. با کمک این دو الگوریتم، می‌توان به طراحی کنترلر دست یافت که قادر است به‌صورت همزمان به جستجوی بهینه و بهبود عملکرد در محیط متغیر پرداخته و مقاومت لازم را ارائه دهد.

بررسی مقالات نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های کرم شب‌تاب و گرگ خاکستری در طراحی کنترل کننده‌ها و بهینه‌سازی سامانه‌ها، نتایج قابل قبولی در بسیاری از حوزه‌ها به‌دست آورده است.

در سال ۲۰۱۳ شاکرمی و همکاران، یک کنترل فرکانس بار<sup>۳</sup> در سامانه‌های قدرت دو ناحیه‌ای با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب ارائه کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که کنترل کننده مبتنی بر کرم شب‌تاب پیشنهادی نسبت به سایر موارد در سامانه‌های قدرت دو ناحیه‌ای<sup>۴</sup> برتری دارد [۲].

ماجهی<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ طراحی و اجرای کنترل کننده‌های تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر و تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر مرتبه کسری به کمک الگوریتم کرم شب‌تاب، برای کنترل موقعیت یک توپ فرومغناطیسی معلق در یک سامانه شناور مغناطیسی زمان واقعی پرداخته‌اند [۳].

در سال ۲۰۱۹، یی لی<sup>۶</sup> و همکاران یک الگوریتم کرم شب‌تاب بهبود یافته را پیشنهاد داده‌اند که توانایی جستجوی مطلق را در مرحله اولیه الگوریتم دارد و سرعت همگرایی را در مرحله بعدی

بهبود می‌بخشد. این روش می‌تواند طرح استقرار چندکنترلر را با حداقل تأخیر و تعادل بار در شبکه اس دی ان<sup>۷</sup> تضمین کند [۴].

سامپانسری<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۰ نیز، الگوریتم شب‌تاب چندهدفه‌ای را برای کنترل کننده تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر شتاب دار، جهت تنظیم کننده ولتاژ خودکار به منظور به حداقل رساندن همزمان دو تابع برانندگی توسعه دادند [۵].

در سال ۲۰۱۶ شاکرمی و همکاران، روشی را برای طراحی پایدار ساز سامانه قدرت با منطقه وسیع بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری پیشنهاد کردند.

پایدار ساز برای میرا کردن نوسانات بین ناحیه‌ای، در یک سامانه قدرت چند ماشینی کوچک و بزرگ با در نظر گرفتن تأخیر ارتباطی که مربوط به سیگنال‌های بازخورد از راه دور است استفاده می‌شود. در این روش حداکثر حاشیه تأخیر که در آن سامانه قدرت حلقه بسته می‌تواند پایدار بماند نیز می‌تواند به طور بهینه شناسایی شود [۶].

در سال ۲۰۱۸ شیرالیان<sup>۹</sup> و همکاران کنترل کننده‌های قوی مبتنی بر کولونی زنبورهای مصنوعی و بهینه‌سازی گرگ خاکستری را در یک سامانه قدرت هیبریدی دیزل بادی ایزوله بررسی کردند [۷].

در سال ۲۰۲۰ کمیجانی<sup>۱۰</sup> و همکاران، یک کنترل کننده حالت لغزشی مشتق متناسب با مرتبه کسری هیبریدی قدرتمند برای بازوی ربات<sup>۲</sup> درجه آزادی بر اساس بهینه‌ساز گرگ خاکستری توسعه یافته ارائه کرده‌اند [۸].

در سال ۲۰۲۲ زامفیراچه<sup>۱۱</sup> و همکاران یک رویکرد کنترل مبتنی بر یادگیری تقویتی را ارائه کردند که از تکرار خط مشی و یک الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری بهینه‌ساز برای آموزش شبکه‌های عصبی استفاده کرده است [۹].

با توجه به اهمیت و چالش‌های موجود در کنترل حرکت ربات‌های پرنده و استفاده از الگوریتم‌های کرم شب‌تاب و گرگ خاکستری در بهینه‌سازی، این مقاله به منظور ارتقای عملکرد و دقت حرکت ربات‌های پرنده، یک روش طراحی کنترلر مبتنی بر این الگوریتم‌ها ارائه می‌دهد که قادر است با استفاده از مفهوم تکامل و انتخاب به‌صورت همزمان به جستجوی بهینه در فضای چندبُعدی بپردازد.

7. Large-Scale SDN Networks  
8. Sumpunsri  
9. Mahyar Shiraliyan  
10. Hossein Komijani  
11. IA Zamfirache

1. Fire Fly Algorithm  
2. Grey Wolf Algorithm  
3. load Frequency Control  
4. Two-Area Power Systems  
5. Lalbahadur Majhi  
6. Yi Li

## ۲ روش‌های حل

الگوریتم‌های فراابتکاری یک مجموعه از روش‌ها و الگوریتم‌های پیشرفته در حوزه بهینه‌سازی و جستجوی مسائل پیچیده هستند.

این الگوریتم‌ها بر اساس الهام از فرآیندها و رفتارهای طبیعی و اجتماعی مانند جستجوی غذا در جوامع حیوانی، پدیدار شده‌اند. هدف اصلی الگوریتم‌های فراابتکاری، یافتن بهینه‌ترین راه حل‌ها در فضای جستجو و خروج از نقاط بهینه محلی می‌باشد.

### ۱.۲ معرفی الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب

الگوریتم فراابتکاری کرم شب‌تاب بر اساس مکانیزم‌های تعاملی کرم‌های شب‌تاب در جستجوی منابع نور الهام گرفته شده‌است. در این الگوریتم، کرم‌های شب‌تاب به صورت تصادفی در فضای جستجو قرار می‌گیرند و منابع نور را توزیع می‌کنند. هر کرم شب‌تاب قادر به تشخیص میزان نور در اطراف خود است و با توجه به میزان نور واکنش‌هایی انجام می‌دهد [۱۰،۱۱].

به طور کلی، الگوریتم کرم شب‌تاب شامل مراحل زیر است:

(۱) مقداردهی اولیه: مقداردهی اولیه به کرم‌های شب‌تاب و منابع نور صورت می‌گیرد.

(۲) حرکت کرم‌ها: کرم‌های شب‌تاب به صورت تصادفی در فضای جستجو حرکت کرده و نور در اطراف خود را اندازه‌گیری می‌کنند.

(۳) ارتباطات و تفاعل کرم‌ها: کرم‌ها با توجه به میزان نور در اطراف خود و بر اساس قوانین تعاملی، واکنش‌هایی انجام می‌دهند. این واکنش‌ها شامل جذب منابع نور و جلوگیری از رسیدن کرم‌های دیگر به منابع نور است.

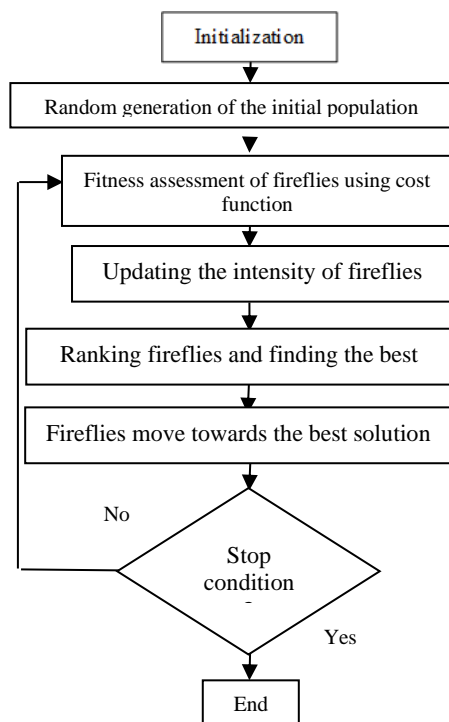
(۴) به‌روزرسانی شعاع نور: بر اساس واکنش‌ها و میزان نور در اطراف، شعاع نور هر کرم شب‌تاب به‌روزرسانی می‌شود.

(۵) به‌روزرسانی منابع نور: بر اساس شعاع نور کرم‌ها و توزیع آن‌ها در فضای جستجو، منابع نور به‌روزرسانی می‌شوند.

(۶) تا زمان اتمام شرایط خاتمه: مراحل ۲ تا ۵ تکرار می‌شوند تا به شرایط خاتمه مانند تعداد تکرارها یا دستیابی به یک حل بهینه برسد [۱۲].

### ۱.۱.۲ روندنمای الگوریتم کرم شب‌تاب

در شکل ۱ روندنمای الگوریتم کرم شب‌تاب را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۱- فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب [۵].

Fig. 1. Flowchart of the firefly optimization algorithm [5].

### ۲.۲ الگوریتم گرگ خاکستری

این الگوریتم در سال ۲۰۱۴ توسط سید علی میرجلیلی ارائه شده‌است. الگوریتم گرگ خاکستری یک الگوریتم متاهیورستیک است که از ساختار سلسله مراتبی<sup>۱</sup> و رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری در هنگام شکار کردن الهام گرفته است. در الگوریتم گرگ خاکستری، جمعیتی از گرگ‌ها به صورت تصادفی در فضای جستجو قرار می‌گیرند. هر گرگ مشخصه‌هایی مانند موقعیت، سرعت و شکار موفقیت‌آمیز خود را دارد. این مشخصه‌ها بر اساس قوانینی که بر اساس رفتار گروهی گرگ‌ها تعیین شده‌اند، تغییر می‌کنند. در هر مرحله از الگوریتم، گرگ‌ها به دو عملکرد اصلی تکیه می‌کنند: اکتشاف و بهره‌برداری، اکتشاف به معنای جستجو در مناطق جدید فضای جستجو و کشف نقاط بهتر است، در حالی که بهره‌برداری به معنای بهره‌برداری از نقاط قوی و بهترین‌هاست [۱۳].

در الگوریتم گرگ خاکستری، گروه گرگ‌ها با توجه به رفتارشان در شکار و اجتماع، به چهار نوع تقسیم می‌شوند. این انواع شامل موارد زیر هستند:

### ۲.۲.۲ عامل تطبیقی پویا

در واقع عامل تطبیقی پویا به منظور متعادل کردن نرخ همگرایی و توانایی جستجوی بهینه مطلق در طول فرآیند جستجو معرفی شده است. این عامل توانایی تطبیق سرعت جستجو را در محیط مسئله دارد و با تغییر سرعت جستجو و تطبیق آن با شرایط محیطی، به دنبال بهینه‌سازی بهتری می‌گردد. با این تطبیق پویا، الگوریتم قادر به بهبود نرخ همگرایی و جستجوی بهینه‌تر در فضای جستجوی خود خواهد بود. در الگوریتم کرم شبتاب، عامل تطبیقی پویا نقش مهمی در بهبود عملکرد الگوریتم ایفا می‌کند.

در واقع فاکتور تصادفی سازی  $\alpha$  به عنوان عامل پویا در طی فرآیند جستجو تعدیل می‌شود. در اینجا  $k$  بین ۰ و ۱ است و نرخ افزایشی نام دارد که می‌تواند سرعت کاهش  $\alpha$  را تعدیل کند، رابطه (۱) نمایانگر این عامل تطبیقی پویا است:

$$\alpha(t+1) = \alpha(t) \cdot \exp\left(-k \cdot \frac{t}{G_{max}}\right) \quad (1)$$

نرخ کاهشی  $k$  ممکن است روی کارایی پارامتر مدل تاثیر بگذارد. در رابطه (۱)،  $G_{max}$  حداکثر تعداد تکرار و  $t$  نشان دهنده شاخص تولید جمعیت می‌باشد [۱۴]؛ لذا عامل تطبیقی پویا در الگوریتم‌های تکاملی کرم شبتاب با افزایش خود در ابتدای جستجو می‌تواند موجب خروج از بهینه محلی، عملکرد بهتر و جستجوی تصادفی و گسترده‌تر در فضای جستجوی الگوریتم‌ها شده و با کاهش تدریجی به رسیدن به نقاط بهینه کمک کنند.

### ۳ مدل سازی دینامیک و استخراج توابع تبدیل

در این بخش سامانه کنترلی به صورت ریاضی و با استفاده از معادلات دیفرانسیل یا معادلات ریاضی دیگر توصیف شده است. سپس، در بخش عملگر و استخراج توابع تبدیل، معادلات دینامیک سامانه را با استفاده از تکنیک‌های مختلف حل کرده و توابع تبدیل و قوانین رفتار سامانه استخراج شده است.

این توابع تبدیل شامل توابع انتقال و توابع پاسخ سامانه به ورودی‌های مختلف است.

با استفاده از این توابع، عملکرد سامانه در پاسخ به ورودی‌های مختلف بررسی شده و به تحلیل و بهینه‌سازی کنترلر پرداخته شده است، تا عملکرد سامانه بهبود یابد و نیازهای کنترلی مورد نظر را برآورده کند. در شکل ۳ دستگاه مختصات بدنی بر روی پرنده مدنظر در این مقاله ملاحظه می‌شود.

**گرگ آلفا:** گرگ آلفا به عنوان رهبر گروه عمل می‌کند و معمولاً بهترین عملکرد را دارد. موقعیت آلفا به عنوان بهترین حل موجود در جمعیت در نظر گرفته می‌شود و بقیه گرگ‌ها بر اساس آن بهبود می‌یابند.

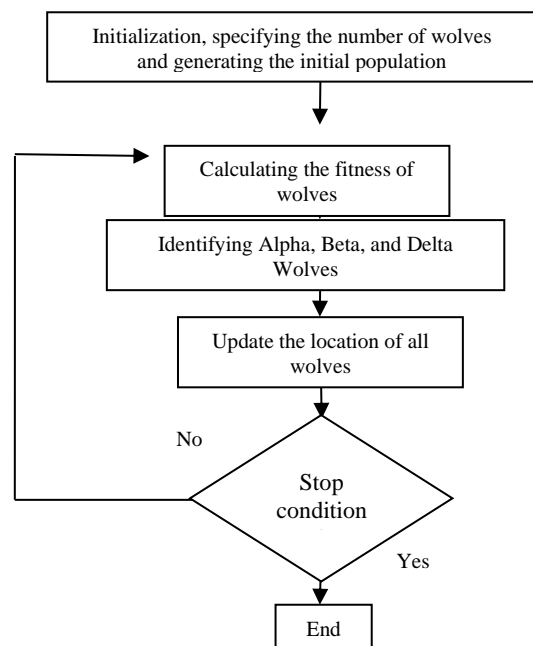
**گرگ بتا:** گرگ بتا مسئول کمک به گرگ آلفا در جستجوی بهترین حل است. معمولاً در نزدیکی گرگ آلفا قرار می‌گیرد و سعی می‌کند بهترین راهنمایی‌ها را در جهت بهبود عملکرد ارائه دهد.

**گرگ دلتا:** گرگ دلتا نقشی مشابه گرگ بتا دارد و به گرگ آلفا و بتا در جستجوی بهترین حل کمک می‌کند. در نزدیکی گرگ بتا قرار می‌گیرد و تلاش می‌کند با جمع‌آوری راهنمایی‌های مختلف بهبودی در عملکرد داشته باشد.

**گرگ اپسیلون:** گرگ اپسیلون به عنوان گرگی عادی در جمعیت حضور دارد و بر اساس رفتار سایر گرگ‌ها تغییر می‌کند. این گرگ‌ها به عنوان جستجوگران اصلی در جستجوی مناطق جدید و اکتشافی عمل می‌کنند [۱۳].

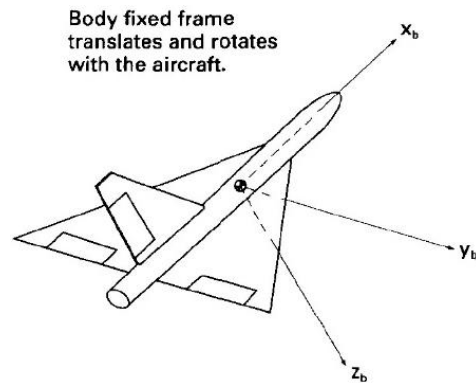
### ۱.۲.۲ روندنمای الگوریتم گرگ‌های خاکستری

در شکل ۲ روندنمای کلی الگوریتم گرگ‌های خاکستری مشاهده می‌شود.



شکل ۲- روندنمای الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری [۹].

Fig. 2. Flowchart of the gray wolf optimization algorithm [9].



شکل ۳- دستگاه مختصات بدنی [۱۴].

Fig. 3. Body coordinate system [14].

$V_T$ : سرعت جسم

به کمک رابطه ۳ و مطابق رابطه ۴ با محاسبات مربوط به تبدیل فضای حالت به تابع تبدیل، تابع تبدیل از زاویه انحراف سطوح کنترل ( $\delta a$ ) به سرعت زاویه‌ای چرخ ( $p$ ) حاصل می‌شود [۱۵، ۱۷].

$$I_x \dot{p} = QSD(C_{L_{\delta a}} \delta_a + C_{L_p} \frac{D}{2V_T} p)$$

$$\dot{\phi} = p \quad (4)$$

$$\frac{\phi}{\delta a} = \frac{\frac{L_{\delta a}}{I_x}}{s(s - \frac{L_p}{I_x})}$$

### ۳.۳ تابع تبدیل کانال فراز

معادلات دینامیکی کانال فراز نیز مطابق مرجع [۱۶، ۱۸] خطی سازی شده در فضای حالت در رابطه ۵ ارائه شده است:

$$\begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_\alpha & Z_q \\ M_\alpha & M_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_\delta \\ M_\delta \end{pmatrix} \delta_e$$

$$\begin{pmatrix} a_z \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_T Z_\alpha & V_T(Z_q - 1) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_T Z_\delta \\ 0 \end{pmatrix} \delta_e \quad (5)$$

متغیرهای به کاررفته در رابطه ۵ به شرح زیر است [۱۷، ۱۶، ۱۵]:

$Z_\alpha, Z_q, M_\alpha, M_q, M_{\delta e}, Z_{\delta e}$ : مشتقات آیرودینامیکی نرمالیزه کانال فراز

$\delta e$ : انحراف بالک

$S$ : سطح مقطع جسم

$D$ : قطر جسم

$\alpha$ : زاویه حمله

$q$ : سرعت زاویه‌ای کانال فراز

$V_T$ : سرعت جسم

به کمک رابطه ۵ و مطابق رابطه ۶ با محاسبات مربوط به تبدیل فضای حالت به تابع تبدیل، تابع تبدیل از زاویه انحراف سطوح کنترل ( $\delta e$ ) به سرعت زاویه‌ای فراز ( $q$ ) و زاویه حمله حاصل می‌شود.

$$\frac{\alpha}{\delta e} = \frac{n\alpha_1 s + n\alpha_0}{s^2 + dp_1 s + dp_0}$$

$$\frac{q}{\delta e} = \frac{nq_1 s + nq_0}{s^2 + dp_1 s + dp_0}$$

$$dp_0 = \frac{Z_\alpha}{m_u} M_q - \left(\frac{Z_\alpha}{m_u} + 1\right) M_\alpha$$

$$dp_1 = -\left(\frac{Z_\alpha}{m_u} + 1\right) M_q \quad (6)$$

### ۱.۳ مدل عملگر

یکی از اجزای مهم حلقه کنترل، عملگر می‌باشد که تأثیر مستقیم در پایداری حلقه بسته دارد، هر چند پاسخ عملگر غیرخطی است ولی می‌توان در سه کانال چرخ، فراز و سمت با تقریب حدودی رابطه ۲ خطی فرض کرد، این رابطه خروجی تست‌های تجربی انجام شده بر روی عملگر در آزمایشگاه است:

$$G_{act}(s) = \frac{45^2}{s^2 + 63s + 45^2} e^{(-0.015s)} \quad (2)$$

### ۲.۳ تابع تبدیل کانال چرخ

معادلات دینامیکی کانال چرخ مطابق مرجع [۱۶، ۱۵] خطی سازی شده و مطابق رابطه (۳) در فضای حالت ارائه شده است:

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & L_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi \\ p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ L_{\delta a} \end{pmatrix} \delta_a$$

$$\begin{pmatrix} \phi \\ p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi \\ p \end{pmatrix} \quad (3)$$

متغیرهای به کاررفته در روابط ۳ و ۴ و ۵ به شرح زیر است:

$C_{L_{\delta a}}$  و  $C_{L_p}$ : مشتقات آیرودینامیکی نرمالیزه کانال چرخ

$Q, S$ : مقدار نیروی آیرودینامیکی نرمال وارد بر سطح

$Q$ : فشار دینامیکی وارد بر جسم

$S$ : سطح مقطع جسم

$D$ : قطر جسم

$\alpha$ : زاویه حمله

$P$ : سرعت زاویه‌ای کانال چرخ

$\delta a$ : انحراف بالک

اورشوت)، مقادیر اولیه بهره‌ها محاسبه می‌گردد. ویژگی مهم این سامانه کنترل، آن است که ضمن سادگی (درجه پایین، سهولت اجرا و تست) دارای حدود پایداری و عملکرد مطلوب در مقابل نامعینی‌های مدل سامانه است. ویژگی مهم این سامانه کنترل، آن است که ضمن سادگی (درجه پایین، سهولت اجرا و تست) دارای حدود پایداری و عملکرد مطلوب در مقابل نامعینی‌های مدل سامانه است.

این سامانه با توجه به متغیر بودن دینامیک ربات پرنده دارای ضرایب متغیر بوده و دارای قابلیت اطمینان بالا می‌باشد. همچنین برای جبران تأخیر ناشی از عمرگر و ارتباطات دیجیتال بین بخش‌های مختلف پرنده، یک جبران کننده پیش‌فاز در حلقه داخلی سامانه کنترلی استفاده شده است، همچنین برای پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها بر روی کنترل کننده کلاسیک مقاله، ابتدا یک تابع هدف تعریف می‌شود که نشان‌دهنده کیفیت عملکرد سیستم کنترل شده است. این تابع هدف می‌تواند ترکیبی از خطای حالت پایدار، زمان نشست، بیشینه اورشوت و سایر معیارهای عملکرد باشد. سپس، الگوریتم بهینه‌سازی با استفاده از تابع هدف، فضای بهره‌های کنترل کننده را جستجو کرده و بهترین مقادیر برای این پارامترها را پیدا می‌کند [۱۹، ۲۰].

لذا ابتدا سامانه کنترل برای کانال های چرخ، فراز و سمت برای سامانه خطی شده در بحرانی‌ترین نقطه کاری از لحاظ پایداری طوری طراحی می‌شود که سامانه حلقه بسته پایداری مناسبی داشته و پاسخ پله‌ی آن دارای سرعت مناسب و فراجهد کمتر از ده درصد بوده و خطای ردیابی کانال‌ها با گذشت زمان به سمت صفر برود. درحقیقت بحرانی‌ترین نقطه کاری بر اساس تغییر در مرکز جرم پرنده تعیین شده است، بطوریکه در مرکز جرم جدید با کاهش حاشیه پایداری، کنترل کننده اولیه پرنده قادر به پایداری پرنده نیست، البته با تغییر سرعت و ارتفاع نیز، تغییرات زیادی در صفر و قطب‌های پرنده ایجاد نمی‌گردد.

درواقع قیود طراحی برای طراحی کنترل در این سه کانال عبارتند از:

(۱) حاشیه فاز در کل مسیر پرواز بیش از ۳۰ درجه باشد.

(۲) حاشیه بهره بیش از (۶dB) باشد.

(۳) حداکثر فراجهد کمتر از ۱۰ درصد باشد.

(۴) زمان صعود کمتر از ۱ ثانیه باشد.

(۵) زمان نشست کمتر از ۴ ثانیه باشد.

(۶) خطای حالت ماندگار نیز کمتر از ۱ درصد باشد.

در این مرحله با تعیین قیود، باید تابع برازش که توسط الگوریتم‌های فرایتنکاری کمینه خواهد شد، مشخص شود. لذا در رابطه ۹ تابع برازش برای این مسئله تعیین شده است. گفتنی است که وزن هر متغیر، مطابق با اثر آن

### ۳.۴ تابع تبدیل کانال سمت

پس از خطی‌سازی معادلات دینامیکی کانال سمت مطابق مرجع [۱۹، ۱۶]

معادلات دینامیکی کانال سمت در فضای حالت به شرح زیر است:

متغیرهای به کاررفته در رابطه ۷ به شرح زیر است:

$N_{\delta r}, y_{\delta r}, N_{\beta}, N_r, y_r, y_{\beta}$ : مشتقات آیرودینامیکی نرمالیزه کانال سمت

$\delta r$ : انحراف بالک

$S$ : سطح مقطع جسم

$D$ : قطر جسم

$\beta$ : زاویه حمله جانبی

$\pi$ : سرعت زاویه‌ای کانال سمت

$V_T$ : سرعت جسم

به کمک رابطه ۷ و مطابق رابطه ۸ با محاسبات مربوط به تبدیل فضای حالت به تابع تبدیل، تابع تبدیل از زاویه انحراف سطوح کنترل ( $\delta r$ ) به سرعت زاویه‌ای سمت ( $r$ ) و زاویه حمله جانبی حاصل می‌شود [۱۹، ۱۵].

$$\frac{\beta}{\delta r} = \frac{n\beta_1 s + n\beta_0}{s^2 + dy_1 s + dy_0}$$

$$\frac{r}{\delta r} = \frac{nr_1 s + nr_0}{s^2 + dy_1 s + dy_0}$$

$$n\beta_0 = \left( \frac{y_r}{m_u} - 1 \right) N_{\delta r} - \frac{y_{\delta r}}{m_u} N_r$$

$$n\beta_1 = \frac{y_{\delta r}}{m_u}$$

$$nr_0 = \frac{1}{m_u} (y_{\delta r} N_{\beta} + y_{\beta} N_{\delta r})$$

$$nr_1 = N_{\delta r}$$

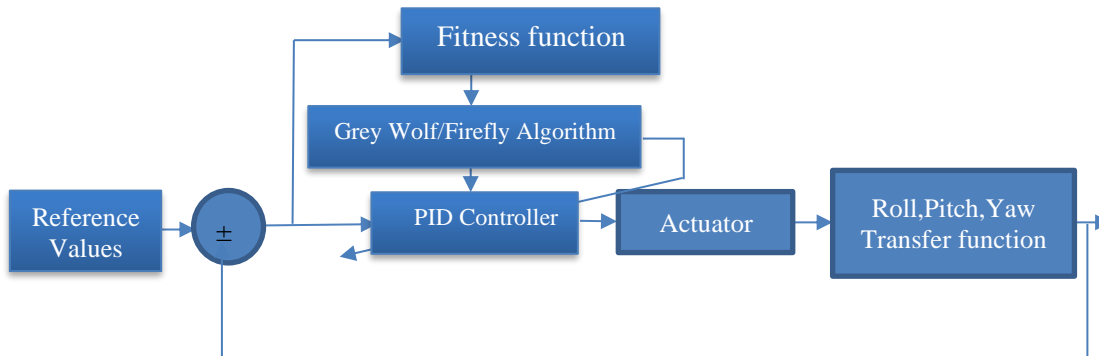
$$dy_0 = \frac{y_{\beta}}{m_u} N_r - \left( \frac{y_r}{m_u} - 1 \right) N_{\beta}$$

$$dy_1 = - \left( \frac{y_{\beta}}{m_u} + N_r \right)$$

### ۴ طراحی کنترل کننده برای ربات پرنده

در سامانه کنترل ربات پرنده فوق از ترکیب کنترل کننده تناسبی-انتگرال-گیر مشتق‌گیر<sup>۱</sup> در حلقه‌های کنترلی استفاده شده [۲۰] و بطور مشخص برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده از روش زیگلر-نیکولز استفاده شده است، در این روش، برای تعیین مقادیر اولیه پارامترهای کنترل کننده کلاسیک مقاله، از روش زیگلر-نیکولز استفاده شده است. در این روش، سیستم در حالت حلقه باز قرار گرفته و با اعمال یک ورودی پله‌ای، پاسخ سیستم مشاهده می‌شود. سپس با استفاده از پارامترهای این پاسخ (مانند زمان افزایش، زمان نشست و بیشینه

تعیین شده است. در شکل ۴ نیز فرم کلی حلقه کنترلی کانال چرخ، فراز و سمت به همراه مدل عملگر ارائه شده است.



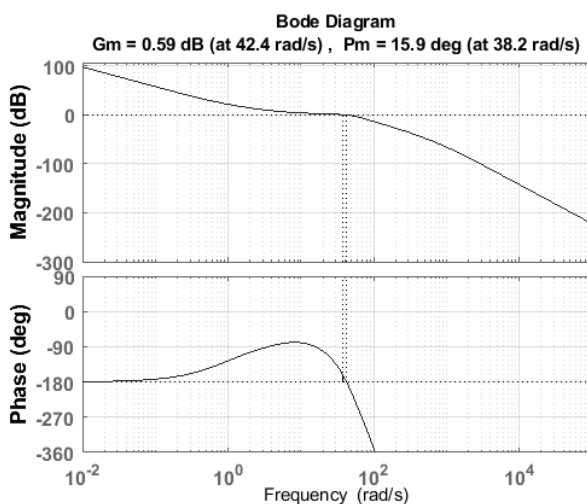
شکل ۴- فرم کلی حلقه کنترلی کانال‌های چرخ، فراز و سمت، در کنار الگوریتم‌های بهینه‌سازی.

Fig. 4. General form of the control loop of the roll, pitch and yaw channels, along with the optimization algorithms.

تابع تبدیل تاخیر و عملگر، مسئله طراحی کنترلر برای تابع تبدیل حلقه باز است [۲۱، ۱۹].

$$G_{OpenLoop}(s) = G_{delay}(s)G_{act}(s)G_{Phi2delta}(s) = e^{(-0.015s)} \frac{45^2}{s^2 + 63s + 75^2} e^{(-0.015s)} \frac{\varphi(s)}{\delta_a(s)} \quad (10)$$

$$= \frac{45^2}{s^2 + 63s + 75^2} e^{(-0.030s)} \frac{p}{\delta_a} \frac{1}{s}$$



شکل ۵ - دیاگرام بود حلقه باز و بدون حضور کنترلر کننده در کانال چرخ.

Fig. 5. Open loop bode diagram without the presence of a controller in the roll channel.

$$+ \frac{7/5}{GM} (1 - e^{-1/5})(Mp + Ess) + e^{-1/5} (ts - tr) = Fit \quad (9)$$

$$\frac{5/6}{PM}$$

در رابطه ۹،  $Mp$  یا فرجهش، نشان‌دهنده میزان بیش‌تر شدن خروجی نسبت به مقدار مطلوب است و باعث افزایش پدیده نوسانی در سیستم می‌شود، همچنین  $Ess$  یا خطای حالت ماندگار، نشان‌دهنده مقدار خطا در حالت پایداری سیستم است و باعث افزایش خطا در حالت تعادل می‌شود و جمع وزن‌دار  $(Mp + Ess)$  دقت سیستم در دستیابی به مقدار مطلوب را افزایش می‌دهد.

همچنین در بخش بعدی رابطه،  $tr$  یا زمان صعود، نشان‌دهنده زمانی است که سیگنال ورودی به سیستم به مقدار مطلوب نزدیک می‌شود و  $ts$  یا زمان نشست نیز نشان‌دهنده زمانی است که سیگنال خروجی به مقدار مطلوب نزدیک می‌شود و جمع وزن‌دار  $(ts - tr)$   $\exp(-1.5)$  زمان لازم برای دستیابی به مقدار مطلوب را کاهش می‌دهد. عبارت  $GM$  یا حاشیه بهره نیز نشان‌دهنده توانایی سیستم در مقابل تغییرات پارامترهای غیرخطی و عدم قطعیت است و نهایتاً  $PM$  یا حاشیه فاز، نشان‌دهنده مقدار حاشیه فاز است که تضمین‌کننده پایداری سامانه است.

#### ۱.۴ طراحی کنترل‌کننده کانال چرخ

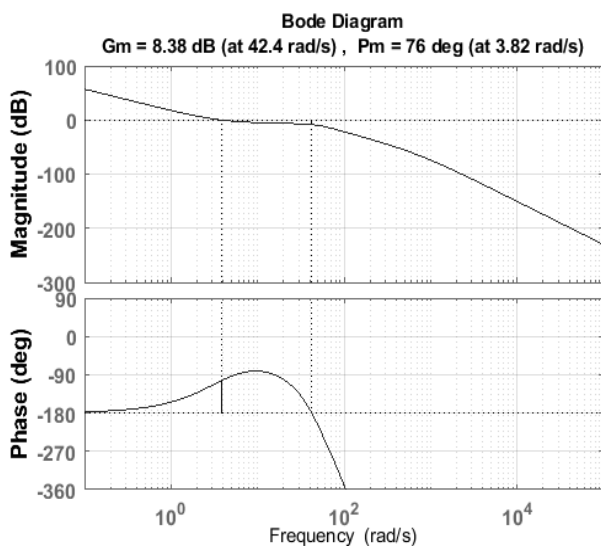
در این بخش نتایج طراحی سامانه کنترل کانال چرخ به کمک الگوریتم کرم شب‌تاب و گرگ خاکستری در یک نقطه‌ی پروازی شرح داده می‌شود بطوری‌که این نقطه‌ی کاری بحرانی‌ترین نقطه‌ی کاری از لحاظ پایداری حلقه باز است. مطابق رابطه ۱۰ با توجه به تابع تبدیل  $\frac{p}{\delta_a}$  و

نتیجه طراحی در رابطه (۱۱) به عنوان جبران ساز نشان داده شده است.

$$G_C(s) = 0.8964 + \frac{10.311s}{s + 0.01} + \frac{0.01705}{s} \quad (11)$$

نمودار بد حلقه باز این سامانه با حضور کنترل کننده الگوریتم کرم شبتاب در شکل ۷ نمایش داده شده است.

در شکل ۷ مشاهده می شود که کانال چرخ دارای پهنای باند بالایی است پاسخ کانال چرخ بسیار سریع است. علت سریع بودن کانال چرخ آن است که تا حد امکان تأثیرات متقابل سه کانال پروازی کاهش یابد، همچنین نتیجه این طراحی کنترل کننده افزایش حد فاز به ۷۶ درجه و حد بهره به ۸/۳ دسیبل است که نشان دهنده مقاومت مناسب در برابر تغییر پارامترها، در کنار پایداری است.



شکل ۷- دیاگرام بود حلقه باز و با حضور کنترل کننده در کانال چرخ.

Fig. 7. Open loop bode diagram with the presence of a controller in the roll channel.

#### ۲.۴ طراحی کنترل کننده کانال فراز

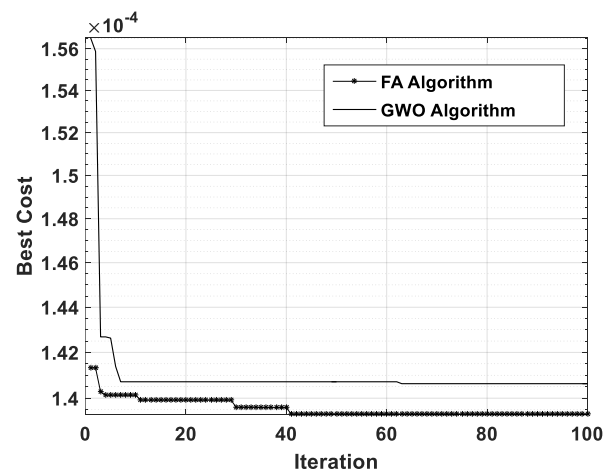
در نگاه اول کنترل کانال پیچ به نسبت ساده تر به نظر می رسد چون توابع تبدیل این کانال به نسبت ساده تر است، اما نکته مهم در کنترل این کانال تغییرات زیاد این کانال در طول پرواز است که با تغییر مرکز جرم، سرعت و ارتفاع در این کانال روی می دهد. با توجه به تابع تبدیل  $\frac{q}{\delta_e}$  و تابع تبدیل تأخیر و عملگر، مسئله طراحی کنترلر برای تابع تبدیل حلقه باز در ناپایدارترین نقطه کاری مطابق رابطه ۱۲ است [۱۹، ۲۱].

نمودار بد حلقه باز این سامانه با حضور کنترل کننده اولیه در شکل ۵ نمایش داده شده است:

همان طور که در بخش طراحی کنترل کننده برای ربات پرنده شرح داده شد برای طراحی کنترل کننده اولیه از روش زیگلر- نیکولز بهره برده شده است و با توجه به نمودار بد مشاهده می شود که سامانه حلقه بسته پایدار است و دارای حاشیه فاز ۱۵/۹ درجه و حاشیه بهره ۰/۵۹ دسیبل و مشخصات عملکردی خوبی ندارد و با اندکی نامعینی در مدل یا افزایش بهره حلقه، فاز سامانه خیلی افت می کند. لذا از آنجایی که کنترل کننده تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر در کاربردهای هوافضایی خود، کنترل کننده ای پایدار و دقیق محسوب می شود و بصورت فیدبک و حلقه بسته به تعقیب فرمان ورودی می پردازد و همراه با مقاوم سازی سامانه، افزایش فاز آنرا به همراه دارد.

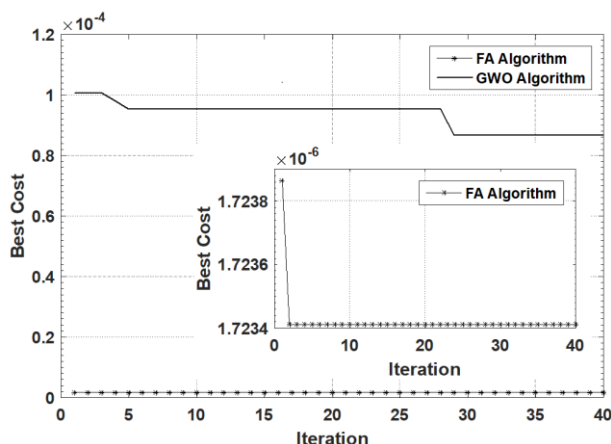
در این پرنده نیز برای پایداری سازی کانال از طراحی کنترلر تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر به کمک دو الگوریتم فراابتکاری کرم شبتاب و گرگ خاکستری استفاده شده است و با توجه به شکل ۶ الگوریتم کرم شبتاب انتخاب گردیده که دارای دقت بالاتری در طراحی بهره های بهینه کنترل کننده می باشد.

در واقع به کمک الگوریتم فوق و اعمال قیود بیان شده، بهره های بهینه کنترل کننده به عنوان متغیرهای الگوریتم بهینه ساز انتخاب می گردد. مهم ترین دلیل استفاده از این الگوریتم، قابلیت تنظیم روشنایی کرم شبتاب، ضریب جذب نور و نرخ جهش در آن است که سبب افزایش سرعت و دقت حل می شود.



شکل ۶- مقایسه نتیجه همگرایی دو الگوریتم کرم شبتاب و گرگ خاکستری در کانال چرخ.

Fig. 6. Comparison of the convergence results of the two firefly and gray wolf algorithms in the Roll channel.

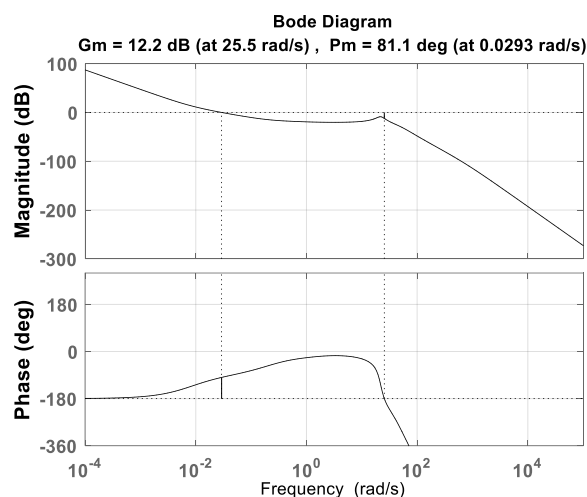


شکل ۹- مقایسه نتیجه همگرایی دو الگوریتم کرم شبتاب و گرگ خاکستری در کانال فراز.

Fig. 9. Comparison of the convergence results of the two algorithms Firefly and Gray Wolf in the pitch channel.

در واقع رابطه ۱۳ کنترل کننده تناسبی، انتگرال گیر، مشتق گیر همراه با حضور فیلتر در مشتق گیر است، که بهره‌های آن توسط الگوریتم کرم شبتاب محاسبه شده است. فیلتر در مشتق گیر معمولاً برای کاهش نویزهای سیگنال و جلوگیری از پاسخ‌های نامطلوب به تغییرات سریع استفاده می‌شود.

در این مرحله نمودار بد حلقه باز این سامانه با حضور کنترل کننده الگوریتم کرم شبتاب در شکل ۱۰ نمایش داده شده است:



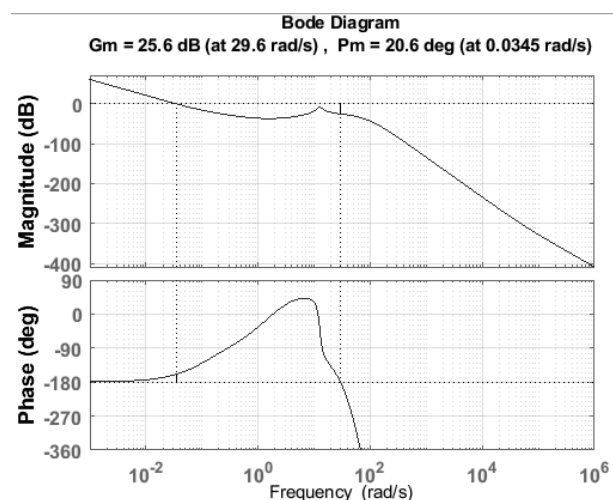
شکل ۱۰- دیاگرام بود حلقه باز و با حضور کنترل کننده در کانال فراز.

Fig. 10. Open loop bode diagram with controller in the pitch channel.

شکل ۱۰ نیز بیانگر آن است که سامانه کنترلی طراحی شده از حد پایداری خوبی برخوردار است. این طراحی طوری است که در بقیه نقاط

$$G_{OpenLoop}(s) = G_{delay}(s)G_{act}(s)G_{Theta2dele}(s) = e^{(-0.015s)} \frac{45^2}{s^2 + 63s + 45^2} e^{(-0.015s)} \frac{\theta(s)}{\delta_e(s)} = \frac{45^2}{s^2 + 63s + 45^2} e^{(-0.030s)} \frac{q}{\delta_e} \frac{1}{s} \quad (12)$$

نمودار بد حلقه باز این سامانه با حضور کنترل کننده اولیه در شکل ۸ نمایش داده شده است:



شکل ۸- دیاگرام بود حلقه باز و بدون حضور کنترل کننده در کانال فراز.

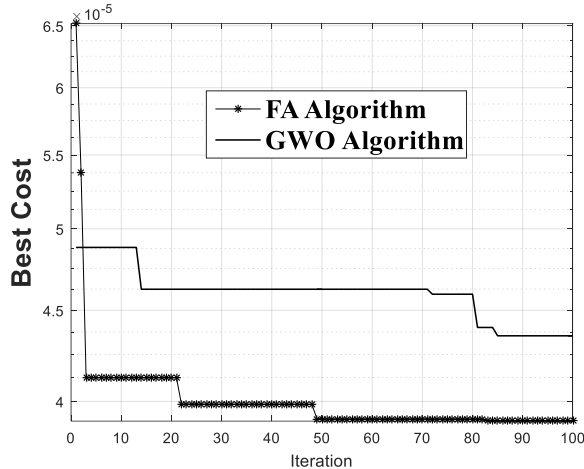
Fig. 8. Open loop bode diagram without the presence of a controller in the pitch channel.

باتوجه به شکل ۸، مشاهده می‌شود با استفاده از روش زیگلرنیکولز برای طراحی کنترل کننده اولیه، سامانه حلقه بسته پایدار است و دارای حاشیه فاز ۲۸/۴ درجه و حاشیه بهره ۲/۹ دسیبل و در نقاط کار مختلف کانال فراز پایدار خواهد بود. لذا نیاز به استفاده از کنترل کننده‌ای است که همراه با مقاوم‌سازی سامانه، افزایش فاز را به همراه داشته باشد، از این رو در این بخش نیز برای پایداری سازی کانال از طراحی کنترل کننده تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری کرم شبتاب و گرگ خاکستری استفاده شده است. باتوجه به شکل ۹، علت اختلاف بین الگوریتم کرم شبتاب و گرگ خاکستری دقت بسیار بالاتر الگوریتم کرم شبتاب برای طراحی بهره‌های بهینه کنترل کننده انتخاب شده در کانال فراز است و همگرایی هر دو الگوریتم را نشان داده است. همچنین رابطه ۱۳ به عنوان جبران ساز کانال فراز نشان داده شده است.

$$G_C(s) = 1.1 + \frac{10s}{s + 0.5} + \frac{0.016}{s} \quad (13)$$

در نقاط کار مختلف و در مواجهه با عدم قطعیت‌ها ناپایدار خواهد بود، لذا برای افزایش فاز و پایداری کانال سمت پرنده از طراحی کنترل کننده تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری کرم شب تاب و گرگ خاکستری استفاده شده است. با توجه به شکل ۱۲، در این کانال نیز الگوریتم کرم شب تاب به دلیل دقت بالا جهت طراحی بهره‌های بهینه کنترل کننده انتخاب شده است. همچنین رابطه ۱۵ به عنوان جبران ساز کانال فراز استفاده شده است.

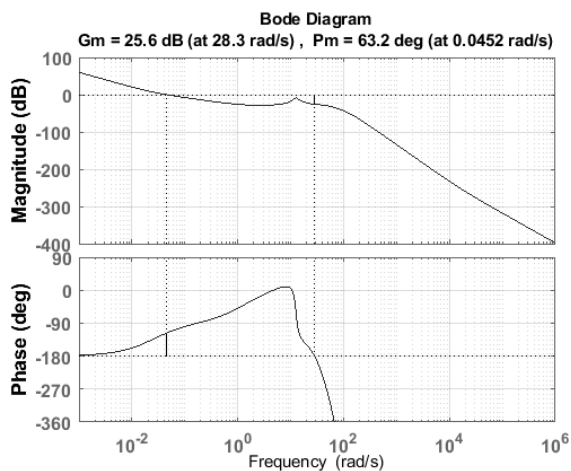
$$G_C(s) = 1.75 + \frac{5.5s}{s + 0.08} + \frac{0.15}{s} \quad (15)$$



شکل ۱۲- مقایسه نتیجه همگرایی دو الگوریتم کرم شب تاب و گرگ خاکستری در کانال سمت.

Fig. 12. Comparison of the convergence results of the two firefly and gray wolf algorithms in the yaw channel.

در شکل ۱۳ نمودار بد حلقه باز این سامانه با حضور کنترل کننده طراحی شده توسط الگوریتم کرم شب تاب نمایش داده شده است:



شکل ۱۳- دیاگرام بود حلقه باز و با حضور کنترل کننده در کانال سمت.

Fig. 13. Open loop bode diagram with controller in the yaw channel.

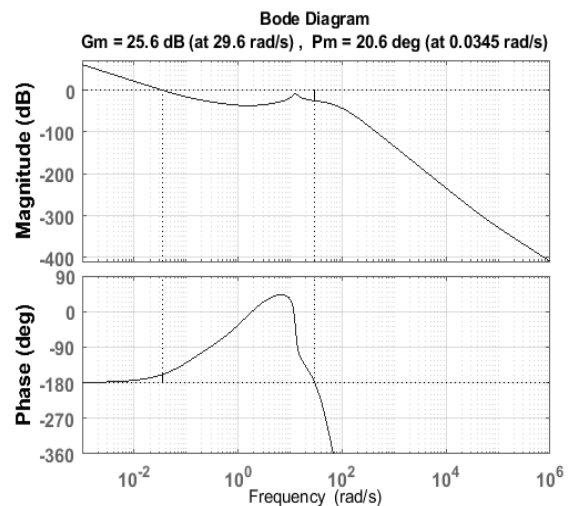
کار پرواز هم شرایط حد فاز ۱/ ۸۱ درجه و حد بهره ۱۲/۲ دسیبل را برآورده می کند.

### ۳.۴ طراحی کنترل کننده کانال سمت

برای طراحی کنترل کننده کانال سمت ابتدا باید نگاه دقیق تری نسبت به نقش این کانال در تغییر مسیر داشته باشیم. در این بخش نتایج طراحی سامانه کنترل کانال سمت به کمک دو الگوریتم کرم شب تاب و گرگ خاکستری در یک نقطه‌ی پروازی شرح داده می شود بطوری که این نقطه کاری بحرانی ترین نقطه کاری از لحاظ پایداری حلقه باز است و بقیه نقاط کار نیز شبیه به همین نقطه کار هستند. با توجه به مشخص شدن تابع تبدیل  $\frac{r}{\delta_r}$  کانال، تابع تبدیل عملگر و میزان تأخیر حلقه، می توان گفت که مطابق رابطه ۱۴ مسأله طراحی کنترل به طراحی کنترل کننده برای تابع تبدیل حلقه باز ساده شده است:

$$G_{OpenLoop}(s) = G_{delay}(s)G_{act}(s)G_{psizdelr}(s) = e^{(-0.015s)} \frac{45^2}{s^2 + 63s + 45^2} e^{(-0.015s)} \frac{\psi(s)}{\delta_r(s)} = \frac{45^2}{s^2 + 63s + 45^2} e^{(-0.030s)} * \frac{r}{\delta_r} * \frac{1}{s} \quad (14)$$

نمودار بد حلقه باز این سامانه با حضور کنترل کننده اولیه در شکل ۱۱ نمایش داده شده است:



شکل ۱۱- دیاگرام بود بدون حضور کنترل کننده و حلقه باز در کانال سمت.

Fig. 11. Bode diagram without controller and open loop in the yaw channel.

در شکل ۱۱، نیز مشاهده می شود در طراحی کنترل کننده اولیه با استفاده از روش زیگلر نیکولز، سامانه حلقه بسته پایدار است و حاشیه فاز ۲۰/۶ درجه و حاشیه بهره ۲۵/۶ دسیبل دارد. اما بخاطر حاشیه فاز کم

خطی سازی شده، سپس توابع تبدیل این مدل خطی شده، بدست آمده و این توابع تبدیل به عنوان پایه طراحی کنترل کننده کلاسیک به کار رفته است. در ادامه در بخش ۴ پس از استخراج توابع تبدیل، به طراحی کنترل کننده تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر پرداخته شده و برای تعیین بهینه بهره های این کنترل کننده، از الگوریتم های فراابتکاری گرگ خاکستری و کرم شب تاب استفاده شده است. در این مرحله شبیه سازی انجام پذیرفته و نتایج شبیه سازی سامانه به کمک کنترل کننده تناسبی، انتگرال گیر، مشتق گیر در دو حالت کنترل کننده (طراحی به کمک کرم شب تاب و کنترل کننده پایه) مورد مقایسه قرار گرفته است.

نتایج شبیه سازی برای کلیه ورودی و خروجی ها به صورت نمودارهای پاسخ-زمان نشان داده شده است.

بدین ترتیب در هر نمودار، زوایای اوپلری، سرعت های زاویه ای و تاریخچه عملکرد ورودی ها بر حسب زمان رسم شده است.

در شکل ۱۴ و ۱۵ مقایسه زوایای اوپلری و سرعت های زاویه ای در سه کانال پروازی در حضور کنترل کننده پایه و کنترل کننده کرم شب تاب انجام شده و نتایج حاکی از کاهش نوسان و افزایش سرعت پاسخ در کنترل کننده کرم شب تاب است. در شکل ۱۶ مقایسه ورودی های کنترلی در سه کانال پروازی در حضور کنترل کننده پایه و کنترل کننده کرم شب تاب انجام شده و نتایج حاکی از کاهش نوسان و تلاش کنترلی است. همچنین در ادامه کار، در مراحل بعدی نتایج آن بر روی سامانه غیرخطی نیز اعمال خواهد شد و نتایج شبیه سازی سامانه غیرخطی به کمک کنترل کننده تناسبی، انتگرال گیر، مشتق گیر در دو حالت کنترل کننده (طراحی به کمک کرم شب تاب و کنترل کننده پایه) مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

شکل ۱۳ نشان می دهد سامانه علاوه بر مقاوم شدن از حد پایداری خوبی برخوردار است. این طراحی طوری است که در بقیه ی نقاط پرواز هم شرایط حد فاز  $63/2$  درجه و حد بهره  $25/6$  دسیبل را برآورده می کند. در واقع بررسی ها در تمامی کانال های پروازی نشان می دهد که الگوریتم کرم شب تاب علاوه بر دقت بالا، به صورت موازی و همزمان چندین راه حل را ارزیابی کرده و به سرعت به جواب بهینه نزدیک می شود، اما حساسیت زیادی نسبت به تنظیم پارامترهای الگوریتم مثل اندازه جمعیت و پارامترهای مربوط به تابع هدف بوده و نیازمند دانش فنی و تخصص در زمینه الگوریتم های بهینه سازی است. به عنوان نمونه جدول ۱ مقایسه راه حل های بهینه ارائه شده توسط دو الگوریتم در کانال فراز را ارائه می دهد. ملاحظه می شود که الگوریتم کرم شب تاب دارای بهترین حل با مقدار تابع هدف  $6 \times 10^{-6}$  است.

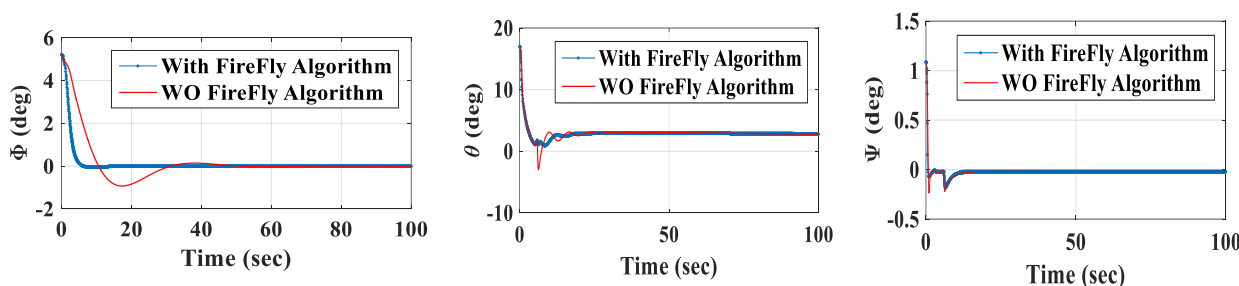
جدول ۱- مقایسه روش طراحی کنترل کننده در کانال فراز.

**Table 1.** Comparison of controller design methods in the pitch channel.

Algorithm	GM	PM	J
FA	12.2	81.1	6 E-1.72
GWO	2.9	28.4	5 E-8.67

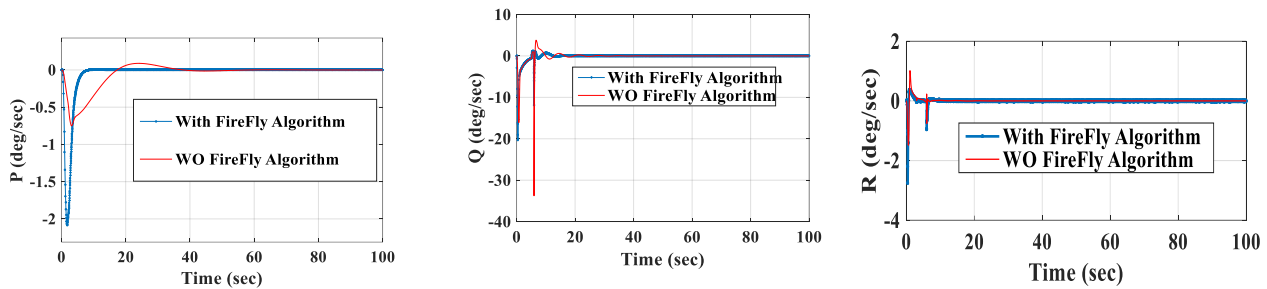
## ۵ نتایج حاصل از شبیه سازی

برای تحلیل و طراحی کنترل کننده، مطابق بخش های (۳-۳)، (۲-۳) و (۴-۳) ابتدا سامانه غیرخطی این مقاله در نقطه کار پایدار سامانه



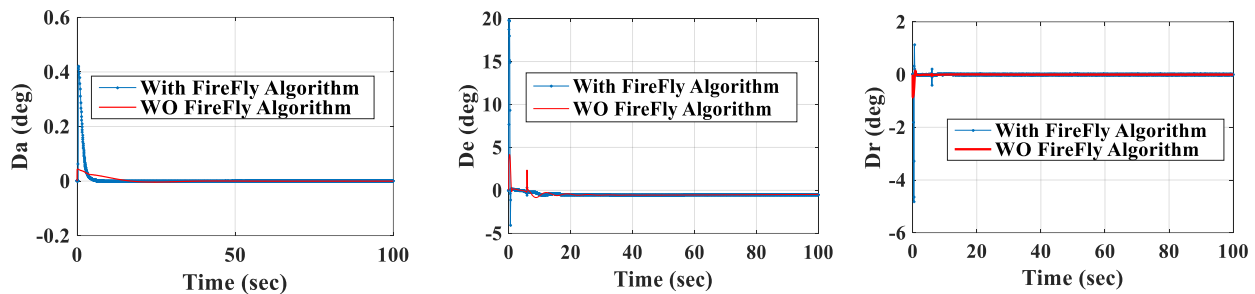
شکل ۱۴- مقایسه زوایای اوپلری در سه کانال پروازی در حالت طراحی کنترل کننده با و بدون الگوریتم کرم شب تاب.

**Fig. 14.** Comparison of eulerian angles in three flight channels in two controller design modes with and without the firefly algorithm.



شکل ۱۵- مقایسه سرعت های زاویه ای در سه کانال پروازی در ۲ حالت طراحی کنترل کننده با و بدون الگوریتم کرم شب تاب.

Fig. 15. Comparison of angular velocities in three flight channels in two controller design modes with and without the firefly algorithm.



شکل ۱۶- مقایسه ورودی های کنترلی در سه کانال پروازی در ۲ حالت طراحی کنترل کننده با و بدون الگوریتم کرم شب تاب.

Fig. 16. Comparison of control inputs in three flight channels in two controller design modes with and without the firefly algorithm.

وضعیت های متغیر را دارد و می تواند در کنترل ربات پرنده و سایر سامانه های پیچیده مورد استفاده قرار بگیرد.

نتایج حاصل از شبیه سازی ها در اشکال ۵ تا ۱۳ نشان می دهد که این روش طراحی منجر به بهبود عملکرد ربات پرنده و افزایش قابلیت مقاومت ۷۹ درصد بهبود حاشیه فاز در کانال چرخ، ۷۸ درصد بهبود حاشیه فاز در کانال فراز، ۶۷ درصد بهبود حاشیه فاز در کانال سمت) در مقابل نامعینی های مدل سامانه می شود و واضح است که طراحی صورت گرفته توسط الگوریتم کرم شب تاب، ضمن داشتن مقاومت مناسب در برابر تغییر پارامترها، از حد پایداری خوبی در تمامی نقاط کار پروازی برخوردار است.

## تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## مراجع

[1] I. Fister, I. Fister Jr., X. S. Yang, and J. Brest, "A comprehensive review of firefly algorithms," *Swarm*

## ۶ نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی و طراحی یک کنترل کننده برای ربات پرنده در کانال های چرخ، فراز و سمت پرداخته شده است. برای این منظور، دو الگوریتم بهینه سازی، الگوریتم کرم شب تاب و الگوریتم گرگ خاکستری، مورد استفاده قرار گرفتند.

نتایج شبیه سازی ها مطابق اشکال ۶، ۹ و ۱۲ نشان می دهد که الگوریتم کرم شب تاب برای طراحی کنترلر این ربات انتخاب بهتری است. درحقیقت کاهش بیشتر مقدار تابع هزینه نشان دهنده عملکرد و دقت بیشتر الگوریتم کرم شب تاب در مقابل الگوریتم گرگ خاکستری است. الگوریتم کرم شب تاب با الهام از رفتار کرم های شب تاب در جستجوی مکان های بهینه، قابلیت جستجوی سریع و بهینه را داراست و از نوآوری های آن، ارضاء قیود کنترل کننده است که در ابتدا به علت محدود بودن بازه جستجو و ایجاد همسایگی تصادفی در ناحیه ای که قیود و محدودیت ها را ارضاء می کند، انجام می شود. استفاده از الگوریتم کرم شب تاب منجر به افزایش حاشیه بهره و حاشیه فاز در سامانه شد که نشان از مقاومت و پایداری بیشتر ربات پرنده در برابر نامعینی های مدل دارد. در واقع این الگوریتم قابلیت انطباق و تنظیم بهتر با محیط و

- 2009, pp. 169-178, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1003.1466>.
- [11] M. Ghasemi, S. k. Mohammadi, M. Zare, S. Mirjalili, M. Gil, and R. Hemmati, "A new firefly algorithm with improved global exploration and convergence with application to engineering optimization," *Decision Analytics Journal*, vol. 5, 2022, Art. no. 100125, <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100125>.
- [12] M. Zare *et al.*, "A global best-guided firefly algorithm for engineering problems," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 20, no. 5, pp. 2359-2388, 2023, <https://doi.org/10.1007/s42235-023-00386-2>.
- [13] M. J. Mahmoodabadi, "An optimal robust fuzzy adaptive integral sliding mode controller based upon a multi-objective grey wolf optimization algorithm for a nonlinear uncertain chaotic system," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 167, 2023, Art. no. 113092, <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.113092>.
- [14] Z. Ghaffari Moghadam, M. Hashemitabar, and E. Moradi, "Management of water demand by use a new dynamic firefly algorithm: case study, River Hirmand," *Water Resources Engineering*, vol. 13, no. 46, pp. 85-98, 2020, (in Persian).
- [15] R. C. Nelson, *Flight Stability and Automatic Control*, Vol. 2. New York: WCB/McGraw Hill, 1998.
- [16] J. Roskam, *Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls*, DAR corporation, 1998.
- [17] M. Zarchi and E. Aghamirbaha, "Mathematical model and vibration analysis of aircraft with active landing gear system using linear quadratic regulator technique," *International Journal of Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 137-144, 2016, <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.02b.01>.
- [18] A. Toloeia, M. Zarchi, and B. Attaranb, "Numerical survey of vibrational model for third aircraft based on HR suspension system actuator using two bee algorithm objective functions," *International Journal of Engineering*, vol. 30, no. 6, pp. 887-894, 2017.
- [19] D. McLean, "Automatic flight control systems," *Measurement and Control*, vol. 36, no. 6, pp. 172-175, 2003.
- [20] A. Toloeia, M. Zarchi, and B. Attaranb, "Vibration control of aircraft semi-active suspension system using PID-beestechnique," *International Journal of Computer Applications*, vol. 99, no. 10, 2014, <https://doi.org/10.5120/17408-7980>.
- [21] M. Ghanifar, M. Kamzan, and M. Tayefi, "Intelligent tuning PID Controller, Simulation and Comparison for a quadrotor," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 7, no.4, pp. 23-33, 2023, (in Persian), <https://doi.org/10.30699/jtae.2023.7.4.3>.
- and *Evolutionary Computation*, vol. 13, pp. 34-46, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2013.06.001>.
- [2] M. R. Shakarami, I. Faraji, I. Asghari, and M. Akbari, "Optimal PID tuning for load frequency control using lévy-flight firefly algorithm," in *3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*, 2013, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/EPECS.2013.6713008>.
- [3] L. Majhi, P. Roy, and B. K. Roy, "Design of PID and FOPID controllers tuned by firefly algorithm for magnetic levitation system," in *4th International Conference on Soft Computing for Problem Solving: SocProS 2014*, Vol. 1, 2015, pp. 417-430, Springer India, [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2217-0\\_35](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2217-0_35).
- [4] Y. Li, W. Sun, and S. Guan, "A firefly inspired controller placement algorithm in software defined network," in *2nd International Conference on Computer and Communication Engineering Technology (CCET)*, pp. 254-258, 2019, <https://doi.org/10.1109/CCET48361.2019.8989320>.
- [5] S. Sumpunsri, C. Thammarat, and D. Puangdownreong, "Multiobjective lévy-flight firefly algorithm for multiobjective optimization," in *Intelligent Computing and Optimization*, Springer, Cham, 2021, pp. 145-153, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68154-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68154-8_15).
- [6] M. R. Shakarami and I. Faraji Davoudkhani, "Wide-area power system stabilizer design based on grey wolf optimization algorithm considering the time delay," *Electric Power Systems Research*, vol. 133, pp. 149-159, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.12.019>.
- [7] M. Shiraliyan, S. Pawan, and C. Sharma, "Automatic reactive power control of isolated wind-diesel hybrid power system using artificial bee colony and gray wolf optimization," *International Journal of Green Energy*, vol. 15, no. 14-15, pp. 889-904, 2018, <https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1529584>.
- [8] H. Komijani, M. Masoumnezhad, M. M. Zanjireh, and M. Mir, "Robust hybrid fractional order proportional derivative sliding mode controller for robot manipulator based on extended grey wolf optimizer," *Robotica*, vol. 38, no. 4, pp. 605-616, 2019, <https://doi.org/10.1017/S0263574719000882>.
- [9] I. A. Zamfirache, R. E. Precup, R. C. Roman, and E. M. Petriu, "Policy iteration reinforcement learning-based control using a grey wolf optimizer algorithm," *Information Sciences*, vol. 585, pp. 162-175, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.11.051>.
- [10] X. S. Yang, "Firefly algorithms for multimodal optimization," in *International symposium on stochastic algorithms*, Berlin, Heidelberg: Springer,