Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 13 - No. 4 – Winter 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Improving the energy consumption of a quadrotor for soft landings on a platform using the Gray Wolf Optimization Algorithm

Anna Farsimadan[1], *Ph.D. student*, Amir Hooshang Mazinan[* 2], *Associate Professor*, Mehdi Siahi[3], *Associate Professor*

[1] Control Department, South Tehran branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Anna.farsimadan@iau.ir

[2] Control Department, South Tehran branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Mazinan@azad.ac.ir

[3] Control Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Mehdi.siahi@srbiau.ac.ir

Abstract:
To enhance the precision of quadrotor landings on a fixed platform, the integration of control algorithms alongside the navigation system is essential. This paper presents the design of an optimal controller aimed at improving quadrotor performance during soft landings. A primary focus of the study is to minimize the energy consumption of the quadrotor's drive motors. Lower energy demands enable the use of smaller batteries, resulting in a lighter and more efficient aerial vehicle. To achieve this optimization, we employ a meta-heuristic algorithm known as the Gray Wolf Optimizer (GWO), which fine-tunes control coefficients to accelerate system response and reduce power usage. This research introduces a novel hybrid control approach—the Gray Wolf Sliding Mode Control (GWOSMC) algorithm. The key contribution of this paper lies in the strategic implementation of GWOSMC, which demonstrates approximately a 22-fold improvement in energy reduction compared to conventional Sliding Mode Control (SMC). To assess the effectiveness of these control schemes, we conduct simulations using MATLAB. The results clearly show that GWOSMC significantly outperforms traditional SMC methods in terms of energy efficiency.

Keywords: Quadrotor landing, sliding mode control, gray wolf algorithm, optimization, Lyapunov stability

Received: 18 Dec. 2024
Revised: 12 Feb. 2025
Accepted: 22 Feb. 2025

Citation: A. Farsimadan, A. H. Mazinan, M. Siahi "Improving the energy consumption of a quadrotor for soft landings on a platform using the Gray Wolf Optimization Algorithm", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 4, pp. 51-64, Ferbruary 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]

مقاله پژوهشی

بهبود انرژی مصرفی کوادروتور برای فرودهای نرم بر روی یک سکو با استفاده از الگوریتم بهینه ساز گرگ خاکستری

آنا فارسی مدان[۱]، دانشجوی دکتری کنترل، امیرهوشنگ مزینان*[۲]، دانشیار، مهدی سیاهی[۳]، دانشیار

۱- گروه مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Anna.farsimadan@iau.ir

۲- گروه مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. Mazinan@azad.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. Mehdi.siahi@srbiau.ac.ir

چکیده: برای افزایش دقت فرود یک کوادروتور روی یک سکو نیاز به کمک کنترل کننده ها در کنار سیستم ناوبری می باشد. این مقاله برای طراحی یک کنترل کننده بهینه برای بهبود عملکرد کوادروتور در هنگام فرود نرم بر روی یک سکوی ثابت نوشته شده است. هدف اصلی این مقاله کاهش مصرف انرژی در موتورهای محرک کوادروتور می باشد. این بهینه سازی امکان استفاده از باتری های کوچکتر را فراهم می کند و در نتیجه کوادروتور سبک تر می شود. برای دستیابی به این هدف، از یک الگوریتم فراابتکاری به نام بهینه ساز گرگ خاکستری استفاده می کنیم که ضرایب کنترل را برای افزایش سرعت پاسخ سیستم و کاهش مصرف انرژی تنظیم می کند. این مطالعه یک استراتژی کنترل ترکیبی معروف به الگوریتم مود لغزشی-گرگ خاکستری (**GWOSMC**) را معرفی می‌کند. نوآوری کلیدی این مقاله در انتخاب موثر الگوریتم **GWOSMC** نهفته است که باعث کاهش حدود ۲۲ برابری نسبت به استراتژی **SMC** می شود. برای ارزیابی طرح‌های کنترلی بکار گرفته شده، نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار **MATLAB** را مقایسه می‌کنیم. یافته‌های ما نشان می‌دهد که روش **GWOSMC** در زمینه مصرف انرژی بسیار بهتر از روش کنترل حالت لغزشی کلاسیک عمل می‌کند.

کلمات کلیدی: فرود کوادروتور،کنترل مد لغزشی، الگوریتم گرگ خاکستری، بهینه سازی، پایداری لیاپانوف

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۴

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر امیرهوشنگ مزینان

نشانی نویسنده مسئول: تهران، بلوار ابوذر، خیابان پیروزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه مهندسی برق

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]

Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13. - No. 4- Winter 2025

۱- مقدمه

کوادروتورها روبات‌های پرنده عمودی هستند که مجهز به چهار موتور ملخی هستند که به آنها اجازه می‌دهد بر اساس نیروی رانش تولید شده توسط موتورها کنترل شوند. پیکربندی متقاطع آن‌ها با تغییر سیگنال‌های کنترل اعمال‌شده به محرک‌های شان، مانورپذیری را ممکن می‌سازد. تغییر در سرعت روتورها منجر به طیف وسیعی از حرکات می شود. در [۱]، نویسندگان روشی را برای ردیابی موقعیت و وضعیت یک پهپاد کوادروتور پیشنهاد می کنند. این رویکرد یک طرح تطبیقی شبکه عصبی را با یک استراتژی کنترل حالت لغزشی ترکیب می کند. مدل دینامیکی کوادروتور در ابتدا به دو بخش تقسیم می‌شود: زیرسیستم‌های کاملاً فعال و کم تحرک. کنترل‌کننده‌های حالت لغزشی برای هر یک از این زیرسیستم‌ها طراحی شده‌اند و روش شبکه عصبی به طور تطبیقی ضرایب آن‌ها را در پارامترهای لغزشی تنظیم می‌کند. بهینه سازی کنترل قوی برای فرود کوادروتور چندین چالش از جمله غیر خطی بودن، اثرات جفت، اختلالات آیرودینامیکی و خطاهای مدل سازی را ارائه می دهد [۲]. نیازهای محاسباتی محاسبه مسیرهای بهینه زمان بر اساس دینامیک کامل کوادروتور نیز می تواند مانع از پاسخ سریع به شرایط متغیر شود. علاوه بر این، خطاهای مدل سازی و اختلالات خارجی ممکن است باعث انحراف از مسیرهای مورد نظر در طول ردیابی بلادرنگ شوند[۳]. برای رسیدگی به این چالش ها، اجرای یک استراتژی کنترل قوی که دستورات نیرو برای ردیابی حلقه موقعیت را با دستورات گشتاور برای ردیابی حلقه نگرش ترکیب می کند، ضروری است. این ادغام برای حفظ ثبات در هنگام فرودهای خودمختار روی یک هدف بسیار مهم است [۴]. علاوه بر این، تخمین عدم قطعیت موثر و توانایی لغو اختلالات از طریق حالت‌های لغزشی مرتبه بالا برای افزایش عملکرد کلی مهم هستند. برآوردگرهای حالت لغزشی برای بهبود رفتار پویا و عملکرد ردیابی در حضور تغییرات پارامترها و اغتشاشات خارجی بسیار مهم هستند [۵]. ادغام تشخیص هدف، تخمین حالت، برنامه ریزی مسیر و کنترل فرود در یک طرح سیستماتیک می تواند عملکرد فرود مستقل قوی را به ویژه در محیط های درهم و برهم با موانع ناشناخته افزایش دهد [۶]. بهینه سازی مصرف انرژی یکی از مهمترین چالش های امروزی است، زیرا باتری های مورد استفاده برای به حرکت درآوردن روتورهای سیستم کوادروتور دارای محدودیت ظرفیت و حجم هستند و به همین دلیل محققان مختلف به دنبال افزایش راندمان یعنی کاهش مصرف انرژی در یک زمان معین هستند. در [۷] از روش بهینه سازی گرگ خاکستری با گام تصادفی برای حل مسئله پخش بار بهینه توسط استخراج توابع چگالی احتمال برا ی عدم قطعیت توان بادی استفاده گردیده است. بررسی نتایج نشان گر این است که روش گرگ خاکستری عملکرد مناسب در حل مسئله پخش بار بهینه داشته و در تمامی موارد با کاهش تابع هدف، به سمت پا سخ بهینه همگر ا شده است. در [۸] با هدف تعیین توزیع توان اقتصادی غیر متمرکز در سیستم انتقال از الگوریتم های گرگ خاکستری و اسب وحشی استفاده شده است. در این مقاله از الگوریتم های گرگ خاکستری و اسب وحشی در نرم افزار MATLAB به صورت ترکیبی با کمک سیستم منطق فازی بمنظور دست یافتن به بهترین برنامه تولید نیروگاهها برای یک دوره ۲۴ ساعته در حضور خطوط انتقال استفاده شده است. در [۹] از الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری بهبودیافته برای جستجوی بهترین راه حل برای زمانبندی سیستم کاهش یافته برای روز بعد مورد استفاده شده است. در [۱۰] به منظور حل مسئله بهینه سازی، پس از مدل سازی ریزشبکه هیبرید، الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری جهت بهینه سازی پیشنهاد شده است. برخی دیگر از پژوهشگران از فناوری اینترنت اشیاء به منظور بهینه سازی مصرف انرژی استفاده نموده اند [۱۴-۱۱]. هدف اصلی این مقاله، طراحی یک کنترل‌کننده بهینه برای بهبود فرایند فرود نرم کوادروتور بر روی سکوی ثابت است، به‌گونه‌ای که دقت و پایداری عملکرد سیستم افزایش یابد و مصرف انرژی محرک‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا کند. این بهینه‌سازی، امکان استفاده از باتری‌های سبک‌تر را فراهم می‌آورد که منجر به کاهش وزن و ارتقاء بازده عملیاتی پرنده می‌شود. همچنین هدف دیگر مقاله، تسریع پاسخ سیستم کنترلی در مواجهه با تغییرات محیطی و اغتشاشات است تا قابلیت اعتماد در فرودهای خودکار بهبود یابد. نوآوری های مقاله به شرح زیر می باشد:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

- ارائه یک راهبرد ترکیبی کنترل مود لغزشی با الگوریتم گرگ خاکستری (GWOSMC) برای افزایش دقت و کاهش مصرف انرژی در فرود کوادروتور.
- تنظیم هوشمند ضرایب کنترلی به‌کمک الگوریتم فراابتکاری GWO برای ارتقاء پاسخ سیستم در شرایط واقعی پرواز.
- دستیابی به کاهش چشمگیر (حدود ۲۲ برابر) در مصرف انرژی نسبت به کنترل مود لغزشی کلاسیک از طریق اجرای کنترل‌کننده پیشنهادی.

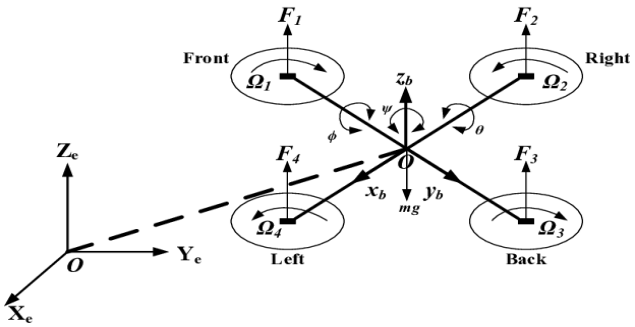
این مقاله در ۵ بخش سازماندهی شده است. بخش دوم مدلسازی کوادروتور را ارائه می دهد. بخش سوم الگوریتم کنترل کوادروتور را ارائه می دهد. بخش ۴ نتایج شبیه سازی و بخش پنجم نتیجه گیری را ارائه می دهد.

۲- مدل سازی

مدل انتخاب شده برای این مقاله یک ربات پرنده کوچک است که به عنوان وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAV) شناخته می شود و این مدل دینامیک به شرح زیر است [۱]:مدل (۱) از معادله ۶ درجه آزادی جسم صلب حاصل از معادلات نیوتن اویلر استخراج شده و بر اساس دستگاه های اینرسی زمین ثابت و جسم ثابت تنظیم شده است.

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{1}{m}(cos\phi sin\theta sin\psi + sin\phi sin\psi)u_1 - \frac{k_1\dot{x}}{m} \\ \ddot{y} = \frac{1}{m}(cos\phi sin\theta sin\psi - sin\phi cos\psi)u_1 - \frac{k_2\dot{y}}{m} \\ \ddot{z} = \frac{1}{m}(cos\phi cos\theta)u_1 - g - \frac{k_3\dot{z}}{m} \\ \ddot{\phi} = \dot{\psi}\dot{\theta}\frac{I_y - I_z}{I_x} + \frac{J_r}{I_x}\dot{\theta}\Omega_r + \frac{l}{I_x}u_2 - \frac{k_4 l}{I_x}\dot{\phi} \\ \ddot{\theta} = \dot{\psi}\dot{\phi}\frac{I_z - I_x}{I_y} - \frac{J_r}{I_y}\dot{\phi}\Omega_r + \frac{l}{I_y}u_3 - \frac{k_5 l}{I_y}\dot{\theta} \\ \ddot{\psi} = \dot{\phi}\dot{\theta}\frac{I_x - I_y}{I_z} + \frac{C}{I_z}u_4 - \frac{k_6}{I_z}\dot{\psi} \end{cases} \quad (۱)$$

شکل زیر این نوع مدل سازی را نشان می دهد:



شکل (۱): مدل کوادروتور بر اساس دستگاه های اینرسی ثابت زمین و بدنه ثابت [۱۵]

Figure (1): Quadrotor model based on fixed-body and fixed-ground inertial devices [15].

مطابق شکل (۱)، در مدل فوق، بردار $[XYZ]^T$ نشان دهنده موقعیت مرکز جرم کوادروتور در دستگاه زمین ثابت است و عناصر این بردار عبارتند از:

X حرکت کوادروتور در جهت محور x است

Y حرکت کوادروتور در جهت محور y است

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13. - No. 4- Winter 2025

Z حرکت کوادروتور در جهت محور z است

بردار $[\phi\theta\psi]^T$ نشان دهنده چرخش زاویه ای کوادروتور در دستگاه ثابت بدنه است و عناصر آن به همراه محدوده عددی تغییرات آنها به شرح زیر است:

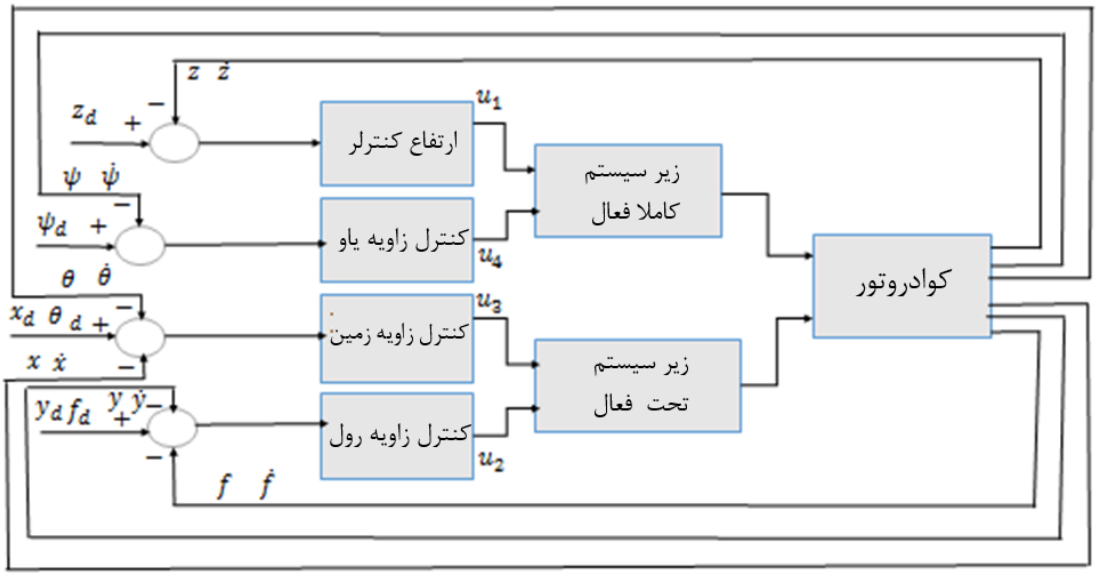
ϕ زاویه رول:$(-\pi/2 < \phi < \pi/2)$

θ زاویه گام:$\left(-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}\right)$

ψ زاویه انحراف: $(-\pi < \psi < \pi)$

۳-الگوریتم کنترل کوادروتور

شکل(۲) روند کنترل موقعیت و ارتفاع کوادروتور را نشان می دهد. همانطور که از نمودار مشخص است، سیستم کنترل کوادروتور به دو بخش زیرسیستم کامل و زیرسیستم کم کار شده تقسیم می شود. حال طبق این بلوک دیاگرام به چهار مرحله طراحی نیاز داریم.



شکل (۲): ساختار کنترل کلی سیستم کوادروتور [۱۶]

Figure (2): Overall control structure of the quadrotor system [16].

۳-۱-کنترل مد لغزشی

کنترل کننده مد لغزشی کلاسیک، معروف به (SMC)، به شرح زیر است [۱۸-۱۷]:

$$S_z = c_1\dot{e}_z + c_2 e_z \quad (۲)$$

به گونه ای که $e_z = z_d - z$ و $\dot{e}_z = \dot{z}_d - \dot{z}$ که z_d مسیر مورد نظر و $\dot{z}_d$ سرعت زاویه ای کوادروتور برای محور z بر اساس جدول ۱ است. به همین ترتیب، c_1 و c_2 پارامترهای مثبتی هستند که با آزمون و خطا تعیین می شوند. مشکلی که در زمینه کاربرد SMC وجود دارد، بروز پدیده چترینگ است. برای حذف یا کاهش این پدیده معمولاً توابع نرم مانند تابع اشباع یا تابع تانژانت هیپربولیک با تابع علامت جایگزین می شوند.در اینجا، ما مسیر فرود کوادروتور روی سکو را به عنوان یک چند جمله ای مرتبه سوم تعیین می کنیم که به صورت رابطه زیر توصیف می شود [۱۹]:

$$x_d(t) = x_0 + x_1.t + x_2.t^2 + x_3.t^3 \quad (۳)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

برای یافتن چهار ضریب مجهول در معادله ۴ به چهار معادله نیاز داریم. مطابق جدول ۱، این چهار معادله به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\left.\begin{array}{r} x_d(0) = 1 \Rightarrow x_0 = 1 \\ \dot{x}_d(0) = 1.2 \Rightarrow x_1 = 1.2 \\ x_d(10) = 10 \\ \dot{x}_d(10) = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \begin{cases} x_2 = 0.03 \\ x_3 = -0.006 \end{cases} \quad (۴)$$

بنابراین، مسیر فرود مرجع برای متغیر x به شرح زیر است:

$$x_d(t) = 1 + 1.2\,t - 0.03\,t^2 - 0.006\,t^3 \quad (۵)$$

به همین ترتیب، مسیرهای فرود برای متغیرهای y و z به شرح زیر است:

$$\begin{cases} y_d(t) = 1.5 + 0.2\,t + 0.05\,t^2 - 0.004\,t^3 \\ z_d(t) = 15 + t - 0.5\,t^2 + 0.03\,t^3 \end{cases} \quad (٦)$$

به طوری که زمان فرود نهایی; t = ۱۰ ثانیه است.

با توجه به شباهت روش انجام کار برای هر چهار مرحله طراحی ورودی، طراحی ورودی برای متغیر حالت z مطرح شده و از تکرار مطالب مشابه خودداری می شود.

Table (1): Desired position and speed of the quadrotor

جدول (۱): موقعیت و سرعت مورد نظر کوادروتور

نام	مقدارها	واحد
موقعیت اولیه مطلوب	[1; 1.5; 15]	M
سرعت اولیه مطلوب	[1.2; 0.2; 1]	m/s
وضعیت فرود	[10; 4.5; 5]	M
سرعت نهایی مطلوب	[0; 0; 0]	m/s

۳-۲- طراحی ورودی کنترل برای زیرسیستم ارتفاع

مدل فضای حالت معادلات دینامیکی رابطه (۷) به شرح زیر است [۱]:

$$\begin{cases} \dot{x} = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m}(cos\phi sin\theta sin\psi + sin\phi sin\psi)u_1 - \frac{k_1\dot{x}}{m} \\ \dot{y} = y_2 \\ \dot{y}_2 = \frac{1}{m}(cos\phi sin\theta sin\psi - sin\phi cos\psi)u_1 - \frac{k_2\dot{y}}{m} \\ \dot{z} = z_2 \\ \dot{z}_2 = \frac{1}{m}(cos\phi cos\theta)u_1 - g - \frac{k_3\dot{z}}{m} \\ \dot{\phi} = \phi_2 \\ \dot{\phi}_2 = \psi\dot{\theta}\frac{I_y - I_z}{I_x} + \frac{J_r}{I_x}\dot{\theta}\Omega_r + \frac{l}{I_x}u_2 - \frac{k_4 l}{I_x}\phi \\ \dot{\theta} = \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 = \psi\phi\frac{I_z - I_x}{I_y} - \frac{J_r}{I_y}\phi\Omega_r + \frac{l}{I_y}u_3 - \frac{k_5 l}{I_y}\dot{\theta} \\ \dot{\psi} = \psi_2 \\ \dot{\psi}_2 = \phi\dot{\theta}\frac{I_x - I_y}{I_z} + \frac{C}{I_z}u_4 - \frac{k_6}{I_z}\psi \end{cases} \quad (۷)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13. - No. 4- Winter 2025

برای طراحی کنترل‌کننده‌ای که برای زیر سیستم ارتفاع بکار می رود سطح لغزش به صورت رابطه (۳) درنظر می گیریم[۱۷-۱۸]:

بر اساس تئوری مد لغزشی، ورودی کنترلی u به صورت زیر تعریف می شود:

$$u = u_{eq} + u_s \tag{۸}$$

طوریکه u_{eq} مؤلفه کنترل معادل بوده و باعث نگهداری حالتها روی سطح لغزش می شود و u_s مولفه کلید زنی[1]بوده و باعث هدایت حالتها به سمت سطح لغزش می گردد، که u_s در واقع وظیفه پایدار سازی سیستم را بر عهده دارد و به کمک معیار پایداری لیاپانوف تعیین می گردد.

رابطه کلی کنترل مقاوم مد لغزشی ترمینال جهت اعمال به محور z برای تعقیب مسیر مرجع مورد نظر بدست خواهد آمد:

$$u_z = \frac{m}{c_1} / (\cos\phi \cos\theta) \begin{Bmatrix} c_1 \ddot{z}_d - c_1 g - c_1 \frac{k_3 \dot{z}}{m} \\ + C_2 \dot{e}_z + k_z sign(S_z) \end{Bmatrix} \tag{۹}$$

۳-۳-طراحی ورودی کنترلی برای زیر سیستم یاو

به همین صورت برای بدست آوردن ورودی مربوط به متغیر حالت یاو عمل کرده و نتایج زیر بدست می آید:

$$S_\psi = c_3 \dot{e}_\psi + c_4 e_\psi \tag{۱۰}$$

طوری که $e_\psi = \psi_d - \psi$ و $\dot{e}_\psi = \dot{\psi}_d - \dot{\psi}$ می باشند و $\psi_d = \pi/12$ زاویه مطلوب و $\dot{\psi}_d = 0$ سرعت زاویه ای کوادروتور حول محور Z می باشند. ورودی کنترلی مربوطه مشابه بخش قبل به صورت زیر بدست می آید:

$$u_\psi = \frac{I_z}{C\, c_3} \begin{Bmatrix} c_3 \ddot{\psi}_d + c_4 \dot{e}_\psi - c_3 \dot{\phi}\dot{\theta} \frac{I_x - I_y}{I_z} \\ + c_3 \frac{k_6}{I_z} \dot{\psi} + k_\psi sign(S_\psi) \end{Bmatrix} \tag{۱۱}$$

۳-۴- طراحی ورودی کنترلی برای زیر سیستم زیر تحریک

۳-۴-۱- طراحی ورودی کنترلی برای زیر سیستم (x, θ)

در این قسمت سطح لغزش مناسب به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$S_\theta = c_5 \dot{e}_x + c_6 e_x + c_7 \dot{e}_\theta + c_8 e_\theta \tag{۱۲}$$

طوری که $e_\theta = \theta_d - \theta$ و $\dot{e}_\theta = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}$ می باشند و $\theta_d = 0$ زاویه مطلوب و $\dot{\theta}_d = 0$ سرعت زاویه ای کوادروتور حول محور X می باشند و $e_x = x_d - x$ و $\dot{e}_x = \dot{x}_d - \dot{x}$ می باشند و x_d مسیر مطلوب و $\dot{x}_d$ سرعت مطلوب کوادروتور برای محور X بر اساس جدول (۱) می باشند. ورودی کنترلی مربوطه مشابه بخش قبل به صورت زیر بدست می آید:

[1] Switching

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

$$u_\theta = \frac{I_y}{lc_7}\left\{\begin{array}{l} c_5\ddot{\theta}_d - \frac{c_5}{m}(\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi)u_z \\ - c_5\frac{k_1}{m}\dot{x} + c_6\dot{x} + c_7\dot{\theta}_d - c_7\dot{\psi}\dot{\phi}\frac{I_z - I_x}{I_y} \\ + c_7\frac{J_r}{I_y}\dot{\phi}\Omega_r + c_7\frac{k_5 l}{I_y}\dot{\theta} + k_\theta sign(S_\theta) \end{array}\right\} \quad (۱۳)$$

۳-۴-۲- طراحی ورودی کنترلی برای زیر سیستم (y,ϕ)

در این قسمت سطح لغزش مناسب به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$S_\phi = c_9\dot{e}_y + c_{10}e_y + c_{11}\dot{e}_\phi + c_{12}e_\phi \quad (۱۴)$$

طوری که $e_\phi = \phi_d - \phi$ و $e_\phi = \phi_d - \phi$ می باشند و $\phi_d = 0$ زاویه مطلوب و $\dot{\phi}_d = 0$ سرعت زاویه ای کوادروتور حول محور y می باشند. و $e_y = y_d - y$ و $\dot{e}_y = \dot{y}_d - \dot{y}$ می باشند و y_d مسیر مطلوب و $\dot{y}_d$ سرعت مطلوب کوادروتور برای محور y بر اساس جدول (۱) می باشند. ورودی کنترلی مربوطه مشابه بخش قبل به صورت زیر بدست می آید:

$$u_\phi = \frac{I_x}{lc_{11}}\left\{\begin{array}{l} c_9\ddot{y}_d - \frac{c_9}{m}(\cos\phi\sin\theta\sin\psi + \sin\phi\cos\psi)u_z + \\ - c_9\frac{k_2}{m}\dot{y} + c_{10}\dot{e}_y + c_{11}\dot{\theta}_d - c_{11}\dot{\psi}\dot{\theta}\frac{I_y - I_z}{I_x} \\ - c_{11}\frac{J_r}{I_x}\dot{\theta}\Omega_r + c_{11}\frac{k_4 l}{I_x}\dot{\phi} + c_{12}\dot{e}_\phi + k_\phi sign(S_\phi) \end{array}\right\} \quad (۱۵)$$

حال در بخش بعد برای بهینه سازی c_1 تا c_{12} ، k_z ، k_θ ، k_ψ و k_ϕ که جمعا ۱۶ ضریب هستند و قبلا به صورت آزمون و خطا انتخاب شده بودند، از الگوریتم گرگ خاکستری یا GWO که یک الگوریتم بهینه سازی می باشد و از رفتار نوعی گرگ، بنام گرگ خاکستری الهام گرفته شده است، استفاده خواهد شد. در واقع به بیان ساده ، با مطالعه و بررسی ویژگی ها و رفتارهایی که گرگ های خاکستری از خود نشان می دهند، و مدل کردن خصوصیات این گرگ ها، یک الگوریتم برای حل مسائل بهینه سازی استخراج می شود.

۳-۵-الگوریتم گرگ خاکستری GWO

الگوریتم گرگ خاکستری GWO یک الگوریتم متاهیورستیک است که از ساختار سلسله مراتبی[3] و رفتار اجتماعی گرگ های خاکستری در هنگام شکار کردن الهام گرفته است. گرگ های خاکستری به عنوان شکارچیان راس[4] در نظر گرفته می شوند، که در بالای هرم زنجیره غذایی هستند. گرگهای خاکستری ترجیح می دهند در یک گروه (دسته) زندگی کنند، هر گروه به طور متوسط ۵-۱۲ عضو دارد. همه اعضای این گروه دارای سلسله مراتب تسلط اجتماعی بسیار دقیق هستند و وظایف خاصی

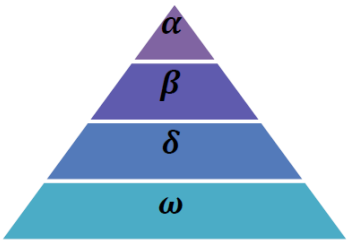
[2] Grey wolf optimization

[3] Hieratical

[4] Apex

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13. - No. 4- Winter 2025

دارند. در هر گله از گرگ ها برای شکار کردن ۴ درجه وجود دارد که مانند شکل زیر به صورت یک ساختار هرمی مدل می شود.



شکل(۳): سلسله مراتب اجتماعی گرگ های خاکستری[۲۰-۲۱]

۳-۵-۱-تشریح بهینه ساز گرگ خاکستریGWO

در بهینه ساز گرگ خاکستریGWO ، مناسب ترین راه حل را به عنوان آلفا در نظر می گیریم ، و راه حل های دوم و سوم مناسب به ترتیب بتا و دلتا نامگذاری می شوند. بقیه راه حل ها امگا در نظر گرفته می شوند. در الگوریتم GWO ، شکار توسط Alpha، Beta وDelta هدایت می شود. راه حل Omega از این سه گرگ پیروی می کند. وقتی شکار توسط گرگ ها احاطه شده و از حرکت بایستد حمله به رهبری گرگ Alpha شروع می شود. مدل کردن این فرآیند با استفاده از کاهش بردار a انجام می شود. از آنجا که A برداری تصادفی در بازه $[-2a,2a]$ است، با کاهش a ، بردار ضرایب A هم کاهش می یابد. اگر $|A| \pi 1$باشد، گرگ Alpha به شکار (و بقیه گرگ ها) نزدیک می شود و اگر $|A| \phi 1$ گرگ از شکار (و بقیه گرگ ها) دور خواهد شد. الگوریتم گرگ خاکستری الزام دارد که تمام گرگ ها موقعت خود را برحسب موقعیت گرگ های Alpha ، Beta و Delta آپدیت کنند.در طول شکار، گرگ های خاکستری طعمه را محاصره می کنند. مدل ریاضی رفتار محاصره در معادلات زیر ارائه شده است. که در روابط زیر t تکرار فعلی، $\vec{A}$ و $\vec{C}$ بردارهای ضریب هستند، $\vec{X}_p(t)$ بردار موقعیت طعمه است و $\vec{X}(t)$ بردار موقعیت گرگ خاکستری را نشان می دهد[۲۱].

$$\vec{D} = \left|\vec{C}.\vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)\right| \quad (۱۶)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A}.\vec{D} \quad (۱۷)$$

بردارهای $\vec{A}$ و $\vec{C}$ به شرح زیر محاسبه می شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a}.\vec{r}_1 - \vec{a} \quad (۱۸)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (۱۹)$$

در روابط بالا متغیر a به طور خطی در طول تکرارها از ۲ به ۰ کاهش می یابد و r_1 ، r_2 بردارهای تصادفی در بازه $[0,1]$ هستند. عملیات شکار معمولاً توسط آلفا هدایت می شود. گرگ های بتا و دلتا ممکن است گه گاه در شکار شرکت کنند. در مدل ریاضی رفتار شکار گرگهای خاکستری، ما فرض کردیم که آلفا، بتا و دلتا دانش بهتری در مورد موقعیت بالقوه طعمه دارند. سه راه حل اول بهترین ذخیره می شوند و عامل دیگر موظف است موقعیت های خود را مطابق با موقعیت بهترین عوامل جستجو مطابق با معادلات زیر به روز کند[۲۱]:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

$$\begin{cases} \vec{D}_{\alpha} = \left|\vec{C}_1.\vec{X}_{\alpha}(t) - \vec{X}(t)\right| \\ \vec{D}_{\beta} = \left|\vec{C}_2.\vec{X}_{\beta}(t) - \vec{X}(t)\right| \\ \vec{D}_{\delta} = \left|\vec{C}_3.\vec{X}_{\delta}(t) - \vec{X}(t)\right| \end{cases} \quad (۲۰)$$

$$\begin{cases} \vec{X}_1 = \vec{X}_{\alpha}(t) - \vec{A}_1.\vec{D}_{\alpha} \\ \vec{X}_2 = \vec{X}_{\beta}(t) - \vec{A}_2.\vec{D}_{\beta} \\ \vec{X}_3 = \vec{X}_{\delta}(t) - \vec{A}_3.\vec{D}_{\delta} \end{cases} \quad (۲۱)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (۲۲)$$

در ادامه با تعریف تابع هزینه به صورت زیر[۲۷و۲۸]:

$$C.F. = \sqrt{\int_0^{\infty}|e_x(t)|^2} + \sqrt{\int_0^{\infty}|e_y(t)|^2} + \sqrt{\int_0^{\infty}|e_z(t)|^2} \quad (۲۳)$$

طوری که مثلا $e_x(t) = x_d(t) - x(t)$ خطای ردیابی موقعیت در راستای محور x می باشد. در فرآیند بهینه‌سازی، ضرایب کنترلی مربوط به کنترل‌کننده مود لغزشی به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در الگوریتم GWO تعریف شده‌اند. الگوریتم گرگ خاکستری با تقلید از رفتار سلسله‌مراتبی گرگ‌ها در شکار، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های اولیه (موقعیت گرگ‌ها) را به‌صورت تصادفی تولید کرده و در هر تکرار با بروزرسانی موقعیت گرگ‌ها (ضرایب کنترلی)، تلاش می‌کند مقدار تابع F را حداقل کند. گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا نقش راهبر را در تعیین جهت جستجو ایفا می‌کنند و مکانیسم تعقیب شکار به‌منظور همگرایی به نقطه‌ی بهینه اعمال می‌شود. پارامترهای الگوریتم مانند اندازه جمعیت گرگ‌ها، تعداد تکرارها، نرخ همگرایی و تابع بروزرسانی موقعیت به‌طور کامل در بخش مربوطه مقاله توضیح داده شده‌اند و شبه‌کد پیاده‌سازی الگوریتم نیز برای شفاف‌سازی بیشتر درج گردیده است. در نهایت، با اجرای الگوریتم، ترکیب بهینه‌ای از ضرایب کنترلی حاصل گردید که منجر به کاهش قابل توجه مقدار تابع F و در نتیجه کاهش مصرف انرژی در فرایند فرود کوادروتور شد.حال با مینیمم کردن این معیار توسط الگوریتم گرگ خاکستری، مقادیر بهینه ۱۶ پارامتر کنترلی را بدست می آوریم.

۴- شبیه سازی نرم افزاری

جهت شبیه سازی فرود کوادروتور با اعمال کنترل کننده مود لغزشی بهینه، پارامترهای سیستم به صورت جدول (۲) در نظر گرفته می شوند: حال بردار حالت های اولیه سیستم کوادروتور را بصورت رابطه (۲۴) در نظر می گیریم:

$$[x_0 \quad y_0 \quad z_0 \quad \phi_0 \quad \theta_0 \quad \psi_0]^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (۲۴)$$

Table (2): Parameters considered for quadrotor simulation [22-23].

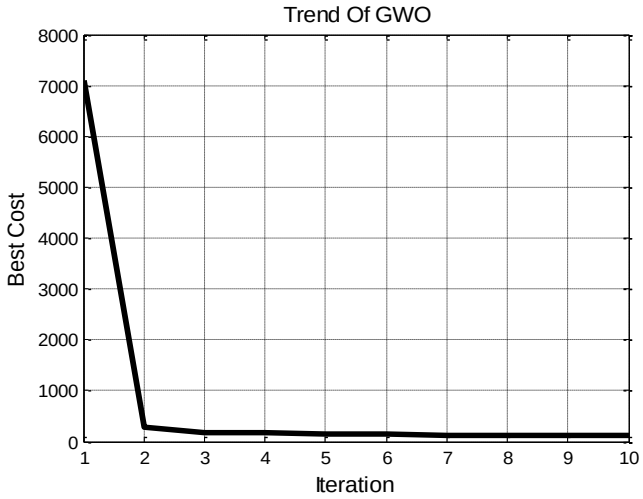
جدول (۲): پارامترهای در نظر گرفته شده جهت شبیه سازی کوادروتور [۲۳-۲۲]

پارامترهای کوادروتور	مقادیر	واحدها
m	1.1	kg
$I_x = I_y$	1.22	$N.s^2/rad$
I_z	2.2	$N.s^2/rad$
$k_1 = k_2 = k_3$	0.1	$N.s/m$
$k_4 = k_5 = k_6$	0.12	$N.s/m$
l	0.21	m

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13. - No. 4- Winter 2025

J_r	0.2	$N.s^2/rad$
b	5	$N.s^2$
k	2	$N.m.s^2$
c	1	
g	9.81	N/s^2

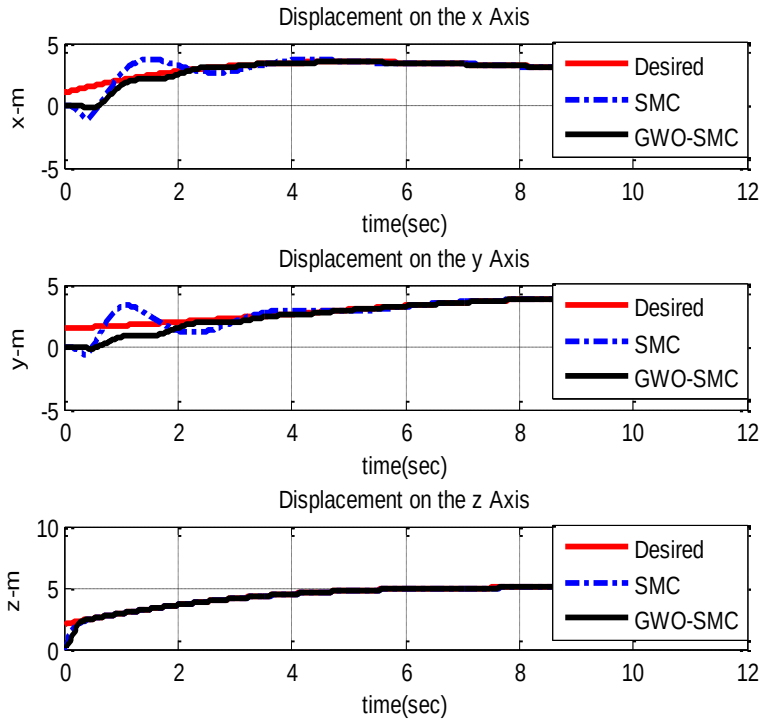
سپس کنترل مد مغزشی بهینه را با تابع اشباع(تانژانت هیپربولیک) که از نوسانات کمتری برخوردار است، به سیستم اعمال کرده و نتایج حاصل از شبیه سازی را در شکل های زیر بررسی می کنیم:



شکل (۴): نرخ همگرایی تابع هدف (تابع هزینه) برای الگوریتم GWO-SMC

Figure (4): Convergence rate of the objective function (cost function) for the GWO-SMC algorithm

همان طور که در شکل (۴) ملاحظه می شود در ۱۰ تکرار تابع هزینه به مقدار خطای ۱۲۰/۵۵۴۴ همگرا شده است:

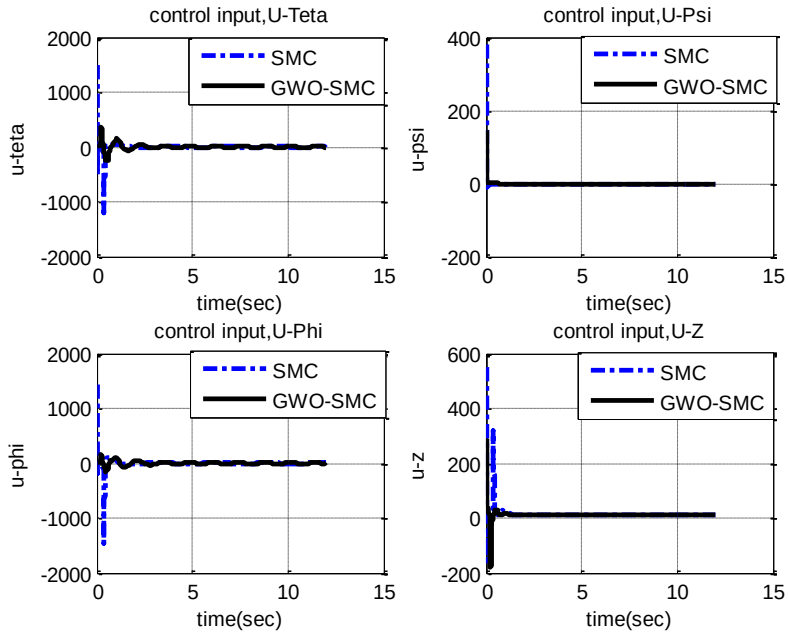


شکل (۵):جابجایی کوادروتور در اثر اعمال کنترل مود لغزشی بهینه

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

Figure (5): Quadrotor displacement due to optimal sliding mode control.

همان طور که از شکل (۵) ملاحظه می شود مسیر مرجع در هر دو حالت ردیابی شده است، ولی در حالت بهینه نوسانات کمتر می باشد.



شکل (۶): سیگنال های کنترلی برای جابجایی و دوران کوادروتور حول محورها

Figure (6): Control signals for moving and rotating the quadrotor around the axes

همان طور که از شکل (۶) ملاحظه می شود ورودی های کنترلی در هر دو حالت عاری از چترینگ مانند قبل هستند، و در حالت بهینه دامنه نوسانات اولیه کمتر می باشد، که مزیت بزرگی است چراکه نیاز به نیروی کمتری برای کنترل داریم. برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌های مورد بحث در این مقاله، از معیارهای خطای زیر استفاده می‌کنیم: میانگین مربعات ریشه (RMS)خطاهای موقعیت و سرعت خطی، و همچنین انرژی مصرف‌شده توسط سیستم کنترل.

$$\begin{cases} E_{RMS_x} = \sqrt{\frac{1}{T}|e_x|^2 dt} \Rightarrow E_{RMS_{xyz}} = \frac{1}{3}\sum(E_{RMS_x} + E_{RMS_y} + E_{RMS_z}) \\ E_{RMS_{v_x}} = \sqrt{\frac{1}{T}|e_{v_x}|^2 dt} \Rightarrow E_{RMS_{v_{xyz}}} = \frac{1}{3}\sum(E_{RMS_{v_x}} + E_{RMS_{v_y}} + E_{RMS_{v_z}}) \\ C.E. = \int_0^T (|u_z|^2 + |u_{Phi}|^2 + |u_{Teta}|^2 + |u_{Psi}|^2)dt \end{cases}$$

$$, e_{v_x} = \dot{x}_d(t) - \dot{x}(t) \text{ and } T = T_s.t_f e_x = x_d(t) - x(t) \quad (۲۵)$$

ما اکنون جدول عملکرد سیستم را از نظر خطاهای ردیابی برای موقعیت و سرعت خطی کوادروتور و همچنین انرژی کنترل مصرف شده به صورت کمی بررسی می کنیم.

Table (3): RMS values of position and velocity and energy consumption of the control system for GWO SMC and SMC controllers

جدول (۳): مقادیر RMS موقعیت و سرعت و انرژی مصرفی سیستم کنترل برای کنترلرهای GWO SMC وSMC

مقادیر RMS خطاهای موقعیت و سرعت و انرژی مصرفی	خطای موقعیت (متر)	خطای سرعت (متر بر ثانیه)	انرژی مصرفی (MJ)
SMC	1.2369	3.5394	677.640

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]

GWOSMC	0.9405	2.1311	10.139

طبق جدول (۳)، مقادیر خطای موقعیت RMS برای روش های GWOSMC تقریباً برابر است، در حالی که خطا در روش SMC به طور قابل توجهی بالاتر است. از نظر خطای RMS برای سرعت خطی، روش GWOSMC در مقایسه با هر SMC مقدار خطای قابل توجهی کمتری دارد. با این حال، تمرکز اصلی مقایسه، انرژی مصرف شده برای آمادگی فرود در ۱۰ ثانیه پایانی پرواز کوادروتور است که در طی آن کنترل‌کننده‌ها به GPS کمک می‌کنند تا دقت فرود را افزایش دهد. همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است، انرژی کنترلی مصرف شده توسط روش پیشنهادی تقریباً یک هفتادم روش SMC است. این تفاوت به ویژه قابل توجه است و بر مزایای کنترل بهینه نسبت به کنترل کلاسیک در طول این پرواز تأکید می کند. از نظر کمی هدف اصلی نویسندگان از انجام این تحقیق را نشان می دهد. توضیح بیشتر این است که به نظر می رسد روش های بهینه در اینجا در کاهش انرژی مصرفی موثرتر هستند.

۵- نتیجه گیری

با توجه به اشکال ترسیم شده حاصل از تحقیقات نویسندگان در نرم افزار متلب، مشخص می شود که تثبیت مجانبی متغیرهای حالت کوادروتور; به طور خاص، حرکت آن در امتداد محورهای مختصات x ، y و z و همچنین چرخش آن حول این محورها در کمتر از ۴ ثانیه قابل دستیابی است. برخلاف کنترل حالت لغزشی(SMC) ، کنترل حالت لغزشی مبتنی بر بهینه سازی گرگ خاکستری (GWOSMC) تنها نوسانات جزئی را نشان می دهد، که مزیت قابل توجه استفاده از رویکرد کنترل حالت لغزشی بهینه است. یکی از مزایای استفاده از کنترل‌کننده‌های غیرخطی مانندSMC ، توانایی آن‌ها برای عملکرد مؤثر بر روی سیستم‌های غیرخطی بدون نیاز به خطی‌سازی یا تقریب آنها است و در نتیجه تمام اطلاعات مربوطه را حفظ می‌کنند. در این کنترلرها، تئوری پایداری لیاپانوف پایداری سیستم حلقه بسته را در یک بازه زمانی کوتاه تضمین می کند. استفاده از استراتژی‌های بهینه، مانند الگوریتمGWO ، دو نتیجه قابل‌توجه دارد: کاهش نوسانات و کاهش قابل توجه مصرف انرژی برای کنترل. این کاهش انرژی طراحی باتری‌های کوچک‌تر و کوادروتورهای سبک‌تر را تسهیل می‌کند و در نهایت عملکرد و قدرت مانور آنها را افزایش می‌دهد. این پیشرفت ها به وضوح در این مقاله نشان داده شده است (شکل (۶) و جدول(۳) را ببینید) و یکی از دستاوردهای کلیدی و کمک های منحصر به فرد نویسندگان را با توجه به مفاهیم عملی آنها نشان می دهد. در نهایت، نتایج به صورت کمی نشان می‌دهد که رویکرد GWOSMC منجر به خطاهای کمتری در مقایسه با SMC می‌شود، در حالی که همه استراتژی‌ها استحکام زیادی در برابر اختلالات خارجی نشان می‌دهند. وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAV) برای ناوبری به GPS وابسته هستند. با این حال، این فناوری در حال حاضر فاقد دقت ردیابی بالا در هنگام فرود است. برای رسیدن به فرود دقیق، پهپادها به ابزارهای اضافی مانند کنترلرهای قوی و پرسرعت نیاز دارند. علاوه بر این، موتورهای DC برای نیرو به باتری ها متکی هستند. بنابراین، کاهش وزن موتورها می‌تواند منجر به سیستم‌های کوادروتور سبک‌تر شود که در نتیجه مصرف انرژی کمتر و نیاز به ظرفیت باتری کاهش می‌یابد. در این زمینه، استراتژی کنترل حالت لغزشی بهینه (GWOSMC)مزایای قابل توجهی را نسبت به کنترل حالت لغزشی (SMC) از نظر مصرف انرژی کنترل نشان می‌دهد که به خوبی با اهداف نویسندگان همسو می‌شود. باتوجه به فناوری نوین اینترنت اشیاء، می توان در تحقیقات آینده از این فناوری برای کنترل فرود نرم کوادروتور استفاده نمود.

References
مراجع

[1] H. Razmi, S. Afshinfar, "Neural network-based adaptive sliding mode control design for position and attitude control of a quadrotor UAV,"Aerospace Science and Technology, vol. 18, pp. 12-27, 2019. https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.04.055.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

[2] M. Jacewicz, M. Zugaj, R. Glebocki, P. Bibik, "Quadrotor model for energy consumption analysis," Energies vol. 15, 2022. https://doi.org/10.3390/en15197136.

[3] B. Mubdir, E. Prempain, "Energy-Efficient Trajectory Optimization with Nonlinear Model Predictive Control for a Quadrotor UAV," European Control Conference (ECC) June 25-28. Stockholm, Sweden. 2024. Doi:10.23919/ECC64448.2024.10591228

[4] M.; Chodnicki, B.; Siemiatkowska, W.; Stecz, S. Stepien, "Energy efficient uav flight control method in an environment with obstacles and gusts of wind," Energies, vol.15, no. 3730, 2022. https://doi.org/10.3390/en15103730.

[5] D. Bianchi, A. Borri, F. Cappuzzo, S. D. Gennaro, "Quadrotor Trajectory Control Based on Energy-Optimal Reference Generator,"Drones, vol.8, no. 29, 2024.

[6] M.; Jacewicz, M.; Żugaj, R.; Głębocki, P. Bibik, "Quadrotor Model for Energy Consumption Analysis,"Journal of Physics: Energies, vol. 15, no. 7136, 2022. https://doi.org/10.3390/en15197136.

[7] A. Chaharlang, A. Darvish Falehi, and H. Toopchizadeh, " Optimal load dispatch based on the gray wolf optimization algorithm using probability density function extraction considering wind power uncertainty,"Journal of Novel Researches on Small Power Systems, vol. 10, no. 4, winter 2022.

[8] M. Dehvan, B. Mozafari, S. Soleymani Moorchehkhorti, H. mohammadnejad Shoorkaea and M. Vatani, " Determining the distribution of decentralized economic power in the transmission system using gray wolf and wild horse algorithms ,"Journal of Novel Researches on Small Power Systems, vol. 12, no. 3, Autumn 2023. http://jeps.dezful.iau.ir/article-1-493-en.html.

[9] M. J. Nafehfeshan, B. B. Firoozi, and M. Nafar, " Applying the modified gray wolf algorithm for optimal scheduling of energy hub center considering metro and new energy sources ,"Journal of Novel Researches on Small Power Systems, vol. 13, no. 1, spring 2024.

[10] M. Nafar, T. Niknam, and S. Shojaeeian, "Secure energy management in hybrid microgrids using blockchain technology,"Journal of Novel Researches on Small Power Systems, vol. 12, no. 4, winter 2024.

[11] Bolurian, A.H., Akbari, H., Mousavi, S. Day-ahead optimal scheduling of microgrid with considering demand side management under uncertainty, Electric Power Systems Research, vol. 209, 2022, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107965.

[12] Bolurian, A., Akbari, H., Daemi, T., Mirjalily, S. and Mousavi, S. Energy Management in a Smart Grid Including Demand Response Programs Considering Internet of Things. Renewable Energy Research and Applications, 3(1), 131-141. 2022. https://doi.org/10.22044/rera.2021.11408.1092.

[13] Bolurian, A., Akbari, H., Daemi, T., Mirjalily, S. and Mousavi, S. Energy management in microgrids considering the demand response in the presence of distributed generation resources on the IoT platform. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, vol. 17, no.1, 2022. https://doi.org/10.1080/15567249.2022.2038729.

[14] Bolurian, A.H., Akbari, H., Mousavi, S., Aslinezhad, M. Bi-level energy management model for the smart grid considering customer behavior in the wireless sensor network platform, Sustainable Cities and Society, vol. 88, 2023, https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104281.

[15] R. Li, H. Zhu, H. Nemati, X. Yue, P. Narayan, "Trajectory tracking of a quadrotor using extend state observer-based U-model enhanced double sliding mode control,"Journal of the Franklin Institute, vol.360, pp. 3520–3544, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2022.11.036.

[16] J.; Lin, Y.; Wang, Z.; Miao, H.; Wang, R. Fierro, " Robust image-based landing control of a quadrotor on an unpredictable moving vehicle using circle features," IEEE Trans. Autom. Sci. Eng, vol. 20, pp. 1429–1440, 2023.

[17] K.R. Jensen-Nau, T. Hermans, K.K. Leang, "Near-optimal area-coverage path planning of energy-constrained aerial robots with application in autonomous environmental monitoring, "IEEE Trans. Autom. Sci. Eng, vol. 18, pp. 1453–1468, 2021. Doi: 10.1109/TASE.2020.3016276.

[18] F. Morbidi, R. Cano, D. Lara, "Minimum-energy path generation for a quadrotor UAV," In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, Sweden, pp. 1492–1498, 16–21 May 2016. Doi: 10.1109/ICRA.2016.7487285

[19] F. Yacef, N. Rizoug, O. Bouhali, M. Hamerlain, "Optimization of Energy Consumption for Quadrotor UAV,"International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (IMAV), 2017.

[20] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, A. Levis, "Grey wolf optimizer, Advances in Engineering Software,"Advances in Engineering Software, vol. 69, pp. 46–61, 2014. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

[21] H. Faris, I. Aljarah, M. A. Al-Betar, S. Mirjalili, "Grey wolf optimizer: a review of recent variants and applications,"Neural Computing and Applications. 2017. https://doi.org/10.1007/s00521-017-3272-5.

[22] C. W. Chan, T. Y. Kam, "A procedure for power consumption estimation of multi-rotor unmanned aerial vehicle,"Journal of Physics: Conference Series, 2020.

[23] R. Benotsmane, J. Vásárhelyi, "Towards optimization of energy consumption of tello quad-Rotor with mpc model implementation," Energies, 2022. https://doi.org/10.3390/en15239207.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-11]