

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی هوافضا

پروژه درس روش های بهینه سازی
گرایش فضایی

عنوان

کنترل زاویه Roll ، MAV بال ثابت با کنترلر PID مبتنی بر بهینه سازی
PSO

نگارش

فاطمه مقدسیان

استاد درس

دکتر مددی

پاییز ۱۴۰۲

کنترل زاویه Roll ، MAV بال ثابت با کنترلر PID مبتنی بر بهینه سازی PSO

چکیده

وسایل نقلیه هوایی میکرو بال ثابت (MAVs) یک پلت فرم امیدوارکننده برای کاربردهای مختلف از جمله نظارت، شناسایی و نظارت بر محیط زیست است. کنترل دقیق MAVها برای دستیابی به پرواز پایدار و تحقق اهداف مأموریت ضروری است. این تحقیق بر روی کنترل زاویه چرخش MAVهای بال ثابت تمرکز دارد. کنترل کننده های PID به دلیل سادگی و اثربخشی به طور گسترده برای کنترل MAV استفاده می شوند. با این حال، تنظیم دستاوردهای PID برای دستیابی به عملکرد بهینه می تواند چالش برانگیز باشد، به ویژه برای سیستم های پیچیده با دینامیک غیرخطی و عدم قطعیت. برای پرداختن به این چالش، این مطالعه الگوریتم های بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) را برای بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده PID برای کنترل زاویه رول پیشنهاد می کند.

اثربخشی رویکرد پیشنهادی از طریق شبیه سازی در نرم افزار MATLAB مورد آزمایش واقع شده است. علاوه بر اثر بخشی PSO، با تابع هدف های مختلف آزمایش شده است که کمتر MAX over-shoot، کمترین settling time، کمترین مینیمم مربعات خطا و در انتها مقایسه مقادیر ضرایب کنترلی پرداخته است.

صفحه	فهرست
۴	۱ مقدمه.....
۴	۱.۱ دینامیک جانبی.....
۶	۲.۱ کنترلر PID.....
۸	۲ الگوریتم PSO.....
۸	۱.۲ بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO).....
۱۰	۳ شبیه سازی و محاسبات.....
۲۰	منابع و مراجع.....

۱ مقدمه

وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (پهپادها) در سال های اخیر شاهد پیشرفت های قابل توجهی بوده اند و به عنوان پلتفرم های همه کاره برای کاربردهای مختلف غیرنظامی و نظامی ظاهر شده اند. در میان انواع مختلف پهپادها، وسایل نقلیه هوایی میکرو بال ثابت (MAV) به دلیل عملکرد آیرودینامیکی کارآمد، استقامت پرواز طولانی و مناسب بودن برای مأموریت های دوربرد برجسته هستند. دستیابی به کنترل دقیق MAV های بال ثابت برای اطمینان از ویژگی های پرواز پایدار و انجام موثر اهداف مأموریت ضروری است.

در حوزه کنترل MAV بال ثابت، تثبیت زاویه رول نقشی اساسی در حفظ ثبات جانبی و مانورپذیری در طول پرواز ایفا می کند. روش های کنترل سنتی، مانند کنترل کننده های PID، به دلیل سادگی و کارآمدی، به طور گسترده برای کنترل زاویه رول استفاده می شوند. با این حال، تنظیم دستاوردهای PID برای بهینه سازی عملکرد، به ویژه در حضور دینامیک غیرخطی و عدم قطعیت های ذاتی در سیستم های MAV، یک چالش مهم باقی می ماند.

برای پرداختن به این چالش، این مطالعه یک رویکردی برای بهبود کنترل زاویه چرخش MAV های بال ثابت با الگوریتم های بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) با کنترل کننده PID معمولی پیشنهاد می کند. الگوریتم PSO برای جستجوی سودهای بهینه PID به صورت مکرر استفاده می شود، که منجر به بهبود نرخ همگرایی و استحکام فرآیند بهینه سازی می شود.

۱.۱ دینامیک جانبی

به منظور فرموله کردن معادلات مدل، وسیله نقلیه هوایی مینی بال ثابت (MAV) به عنوان یک بدنه صلب در نظر گرفته می شود که از هرگونه ساختار انعطاف پذیر غفلت می کند. علاوه بر این، برای سادگی، انحنای زمین نادیده گرفته می شود، با فرض یک صفحه مسطح به دلیل این فرض که MAV های بال ثابت فقط مسافت های کوتاه را پوشش می دهند. با این ملاحظات، مدل با اعمال قوانین حرکت نیوتن به دست می آید. دینامیک زاویه رول با معادلات زیر توصیف می شود:

$$\dot{\phi} = p \quad ۱$$

$$\dot{p} = L_p p + L_{\delta a} \delta a \quad ۲$$

در اینجا، p نشان دهنده نرخ چرخش است، و ϕ نشان دهنده زاویه چرخش است، همانطور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. مشتقات پایداری جانبی در رول، که با L_p و $L_{\delta a}$ نشان داده می‌شوند، با:

$$L_p = \frac{\rho s v \bar{c}^2}{4 I_{xx}} C_{lp} \quad ۳$$

$$L_{\delta a} = \frac{\rho s v^2 \bar{c}}{2 I_{xx}} C_{l\delta a} \quad ۴$$

در اینجا پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- V : سرعت MAV بال ثابت در [2] برابر با (۱۶ متر بر ثانیه)

- ρ : چگالی هوا (۱.۰۵ کیلوگرم بر متر مکعب)

- S : مساحت بال (۰.۰۹ متر مربع)

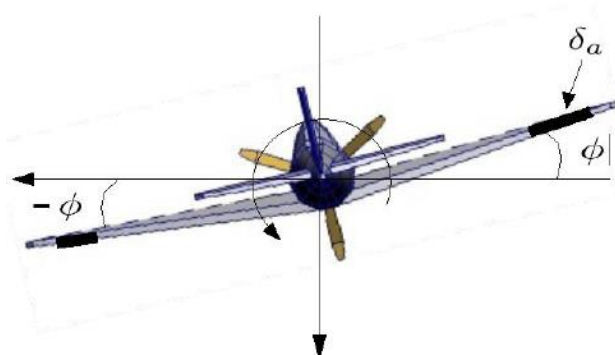
- b : طول بالها (۰.۹۱۴ متر)

- c : خط وتر وسط (۰.۱۰ متر)

- I_{xx} : ممان اینرسی زاویه رول (۰.۱۶ کیلوگرم*متر مربع)

- C_{lp} : ضریب بدون بعد برای زاویه رول، تعیین تجربی (۰.۱۵-)

$-C_{l\delta a}$: ضریب بدون بعد برای حرکت آیلرون، به صورت تجربی تعیین شده است (۰.۰۰۵) شکل ۱-۱ حرکت غلتشی خالص را نشان می دهد.

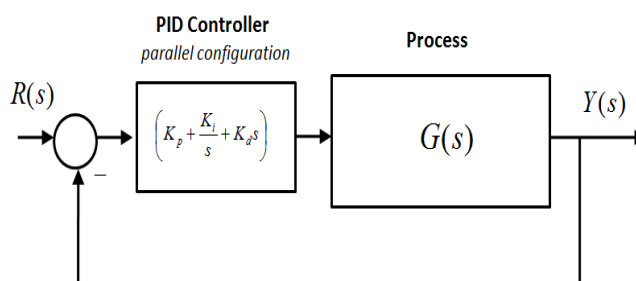


شکل ۱-۱ حرکت چرخشی خالص

این معادلات دینامیک اساسی حرکت جانبی MAV بال ثابت را به تصویر می کشد و پایه ای را برای تجزیه و تحلیل بیشتر و طراحی سیستم کنترل فراهم می کند.

۲.۱ کنترلر PID

کنترل کننده PID از سودهای متناسب، انتگرال و مشتق تشکیل شده است. سیستم کنترل بازخورد در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ سیستم کنترل بازخورد

همان طور که در شکل بالا نشان داده شده است. تابع تبدیل کنترلر PID به صورت زیر است:

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s$$

جایی که k_p ، k_i و k_d به ترتیب ضریب تناسب ، انتگرالی ، مشتق کنترل کننده PID هستند که قرار است در این پژوهش تنظیم شوند.

شاخص های عملکرد به عنوان معیارهای کمی برای ارزیابی عملکرد یک کنترل کننده PID طراحی شده تأکید می کند. با استفاده از این شاخص ها، طراحی یک «سیستم بهینه» امکان پذیر می شود که در آن مجموعه ای از پارامترهای PID را می توان برای برآورده کردن الزامات یا معیارهای مشخص به طور مؤثر تنظیم کرد. به طور معمول، برای یک سیستم کنترل شده با PID، از چهار شاخص رایج برای نشان دادن عملکرد آن استفاده می شود: انتگرال خطای مربعی (ISE)، انتگرال خطای مطلق (IAE)، انتگرال خطای مطلق وزن شده با زمان (ITAE)، و انتگرال زمان. خطای مربع (ITSE). این شاخص ها بینش های ارزشمندی را در مورد کارایی و استحکام سیستم کنترل PID در حوزه های مختلف عملکرد ارائه می دهند. این شاخص را به صورت زیر هستند.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad ۶$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad ۷$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad ۸$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad ۹$$

بنابراین برای بخش PSO تک هدفه ، معادلات ۶-۹ به عنوان تابع هدف مورد مطالعه قرار می گیرند. به عبارت دیگر، هدف در بهینه سازی مبتنی بر PSO ، جستجوی مجموعه ای از پارامترهای PID است که سیستم کنترل بازخورد حداقل شاخص عملکرد را داشته باشد.

۲ الگوریتم PSO

بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) الگوریتم بهینه سازی فراابتکاری است که از پدیده های طبیعی الهام گرفته شده است. در این فصل توضیحاتی درباره این الگوریتم آورده شده است.

۱.۲ بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) شکلی از محاسبات تکاملی است که از رفتار دسته جمعی در طبیعت، مانند پرورش ماهی و گله پرندگان الهام گرفته شده است. الگوریتم PSO ابتدا در سال ۱۹۹۵ معرفی شد و متعاقباً در سال ۱۹۹۸ اصلاح شد، الگوریتم PSO برای بهبود عملکرد خود دستخوش تغییراتی شد. یکی از این اصلاحات مفهوم وزن اینرسی را معرفی کرد که به صورت خطی در طول تکرارها برای بهبود همگرایی کاهش می یابد.

در PSO، افرادی که به عنوان ذرات شناخته می شوند، راه حل های بالقوه ای را برای یک مشکل معین نشان می دهند. این ذرات «پرواز» خود را بر اساس تجربیات خود و همراهانشان تنظیم می کنند که نماد آن بهترین موقعیت قبلی (pbest) و بهترین ذره در بین همه (gbest) است. هر ذره به عنوان یک نقطه در یک فضای چند بعدی در نظر گرفته می شود، جایی که موقعیت و سرعت آن به طور مکرر به روز می شود.

معادلات بهروزرسانی برای سرعت و موقعیت ذرات توسط ثابت های (c1 و c2)، توابع تصادفی (rand()) و تعداد تکرار فعلی (n) کنترل می شوند. این معادلات اکتشاف راه حل های جدید (جستجوی جهانی) و بهره برداری از راه حل های شناخته شده (جستجوی محلی) را که با تجربیات قبلی ذره و دانش جمعی گروه هدایت می شود، متعادل می کند.

$$v_{id}^{n+1} = \omega v_{id}^n + c_1 \cdot rand().(p_{id}^n - x_{id}^n) + c_2 \cdot rand().(p_{gd}^n - x_{id}^n)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1}$$

))

برای اندازه گیری عملکرد هر ذره، از یک تابع تناسب از پیش تعریف شده (شاخص عملکرد) مرتبط با مشکل حل شده استفاده می شود. معرفی وزن اینرسی (w) در معادلات به تعادل بین قابلیت های اکتشاف و بهره برداری الگوریتم کمک می کند.

به طور کلی، PSO یک رویکرد کارآمد و مؤثر برای حل مسائل بهینه سازی با اعمال نفوذ رفتار جمعی ذرات در یک گروه ارائه می دهد. با به روز رسانی مکرر موقعیت ها و سرعت های ذرات، با هدایت تجربیات گذشته و دانش جهانی، PSO می تواند به راه حل های با کیفیت بالا در حوزه های مختلف مشکل همگرا شود.

۳ شبیه سازی و محاسبات

در این بخش در ابتدا با استفاده از معادلات ۹-۶ را به عنوان تابع هدف برای الگوریتم انبوه ذرات استفاده می کنیم که مطابق جدول ۳-۲ و جدول ۳-۳ نتایج شبیه سازی با این چهار معادله آمده است.

جدول ۳-۱ مقادیری اولیه مشخصه های الگوریتم

مقدار	مشخصه	الگوریتم انبوه ذرات (PSO)
۱۰۰	بیشینه تکرار حلقه اصلی	
۳۰۰	جمعیت	
۲	ضریب بهروزرسانی موقعیت محلی	
۲	ضریب بهروزرسانی موقعیت جهانی	
۰.۹۹	حداکثر وزن اینرسی	
۰.۴	حداقل وزن اینرسی	
۳	تعداد متغیر ها	
۱۰	کران بالایی متغیر ها	
۰	کران پایینی متغیر ها	

جدول ۳-۲ : عملکرد پاسخ پله برای کنترل کننده های PID

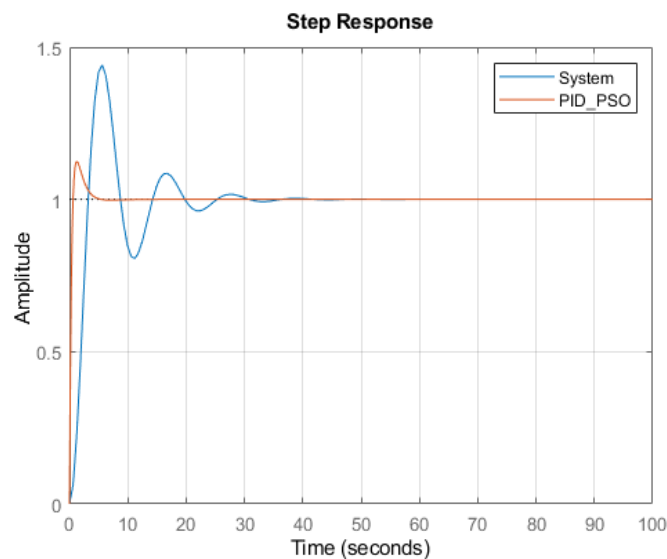
تابع هدف	Maximum Over-Shoot	Settling Time	SSE
ISE	11.39%	3.83	3.286
IAE	12.47%	3.58	4.6968
ITAE	1.01%	4.55	4.7454
ITSE	0.13%	1.11	5.9169

جدول ۳-۳: ضرایب کنترلی PID

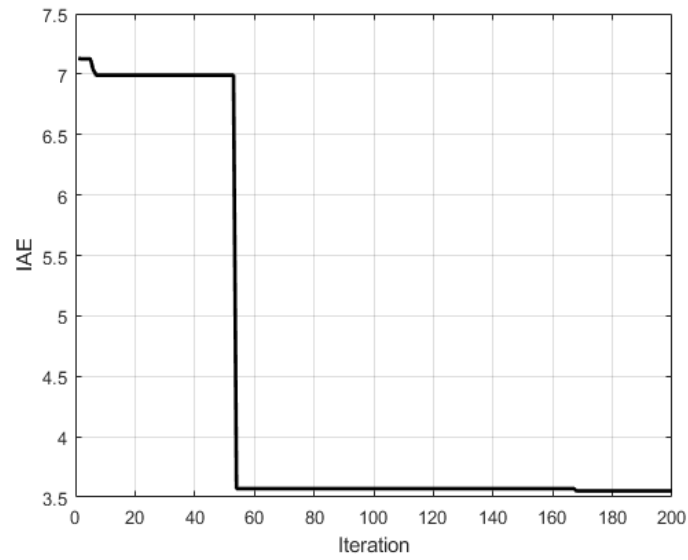
تابع هدف	k_p	k_i	k_d
ISE	9.2431	2.2814	10
IAE	9.9624	2.6946	10
ITAE	0.6601	0	1.9076
ITSE	3.0497	0	10

با توجه به جدول ۳-۲ از نظر مربعات خطا، مدل ISE بهترین حالت بوده در صورتی که زمان همگرایی و همین طور Maximum Over-shoot برای زمانی که تابع هدف ITSE بوده بهتر است. و همین طور کمترین مقدار ضرایب کنترلی برای مدل ITAE است.

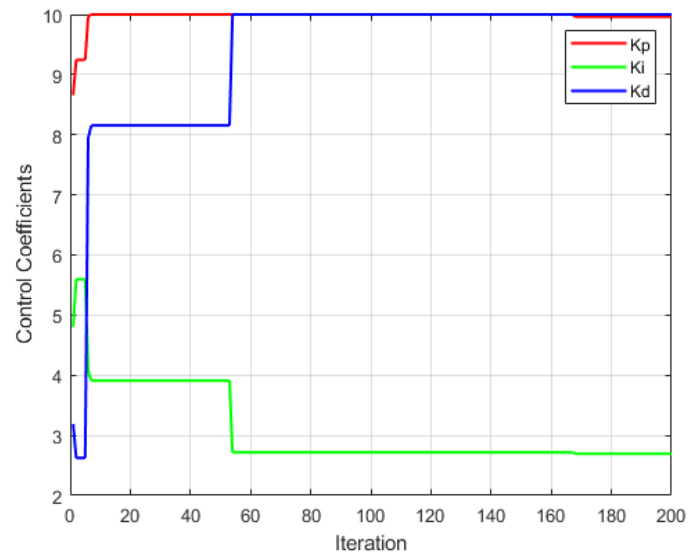
شکل های زیر شاخص عملکرد بهینه سازی PSO در هر مدل و همین طور پاسخ پله سیستم و عملکرد کنترلر PID مبتنی بر PSO را نشان می ده.



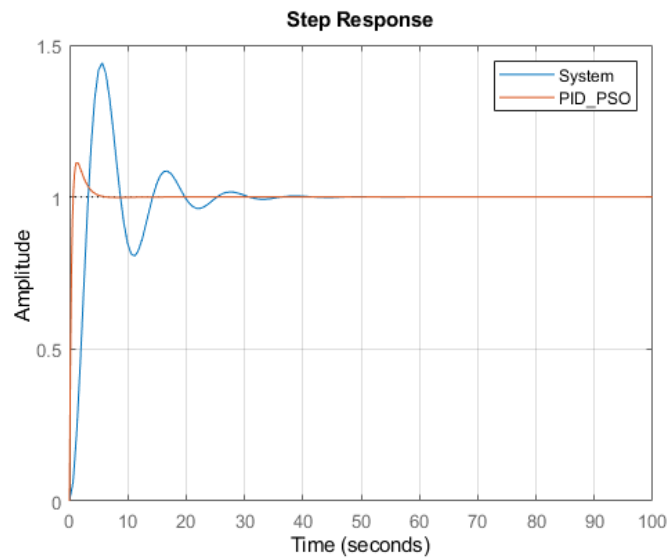
شکل ۳-۱: پاسخ سیستم و عملکرد کنترلر PID-PSO با ورودی پله (IAE)



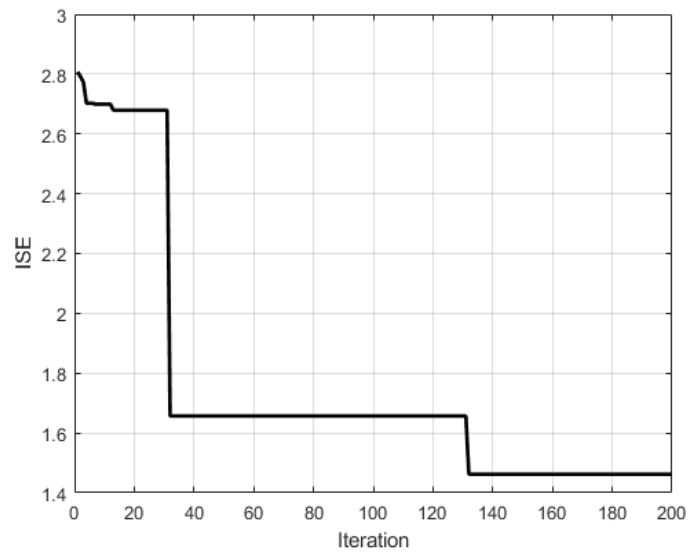
شکل ۲-۳: شاخص عملکرد PSO (IAE)



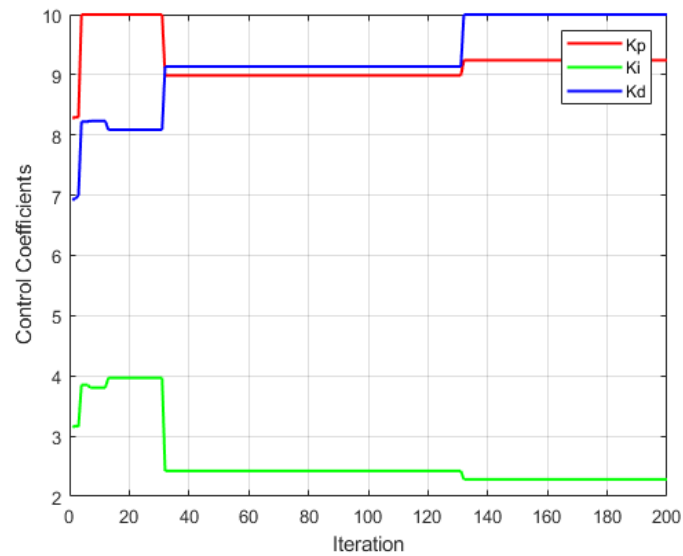
شکل ۳-۳: ضرایب کنترلر PID-PSO (IAE)



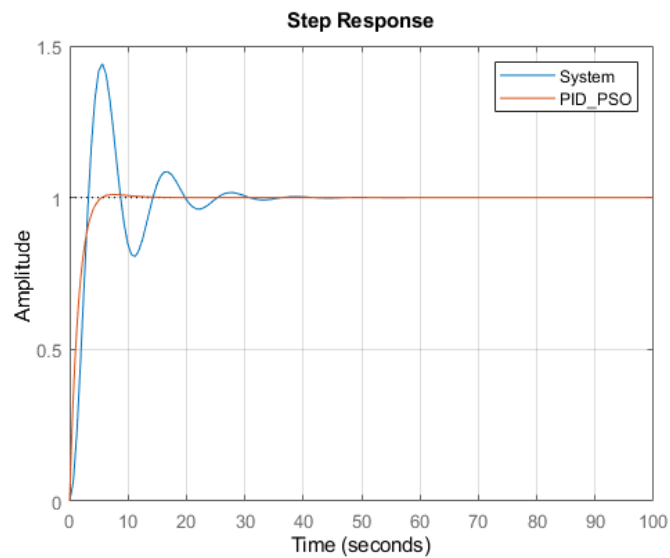
شکل ۳-۴ : پاسخ سیستم و عملکرد کنترلر PID-PSO با ورودی پله (ISE)



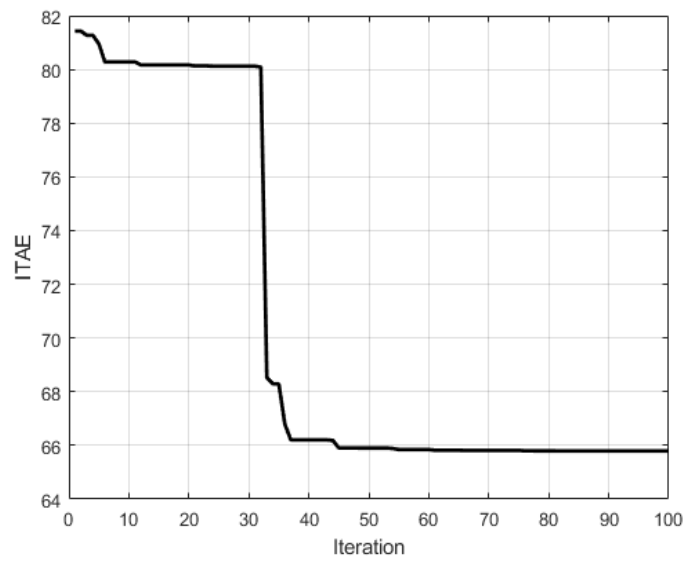
شکل ۳-۵ : شاخص عملکرد PSO (ISE)



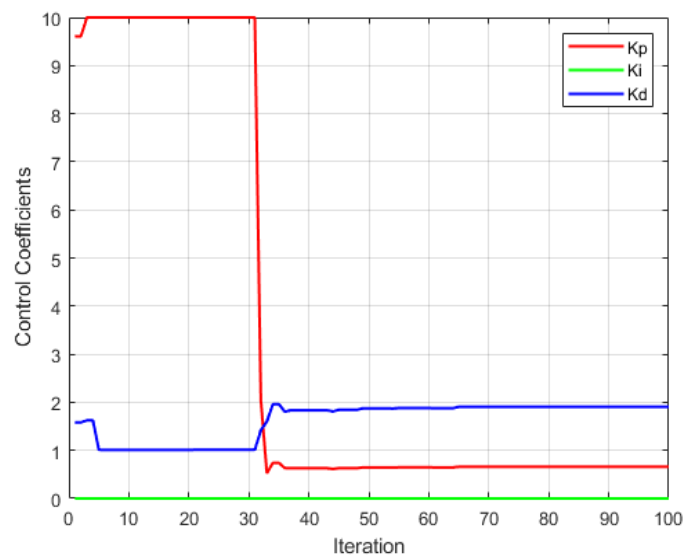
شکل ۳-۶: ضرایب کنترلر PID-PSO (ISE)



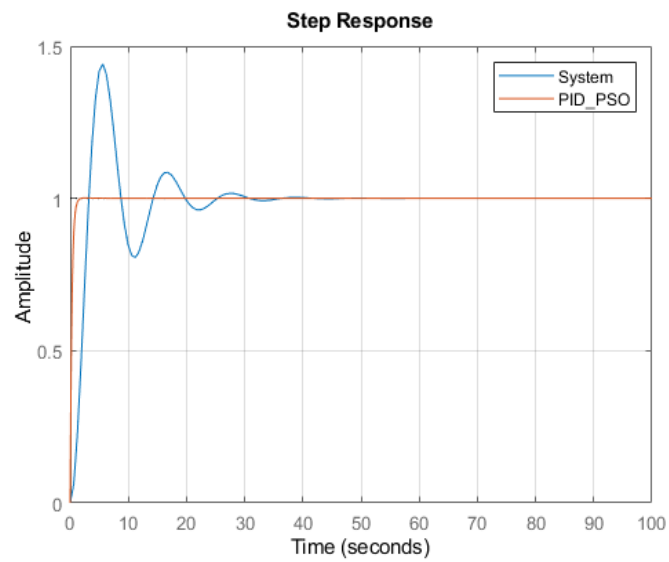
شکل ۳-۷: پاسخ سیستم و عملکرد کنترلر PID-PSO با ورودی پله (ITAE)



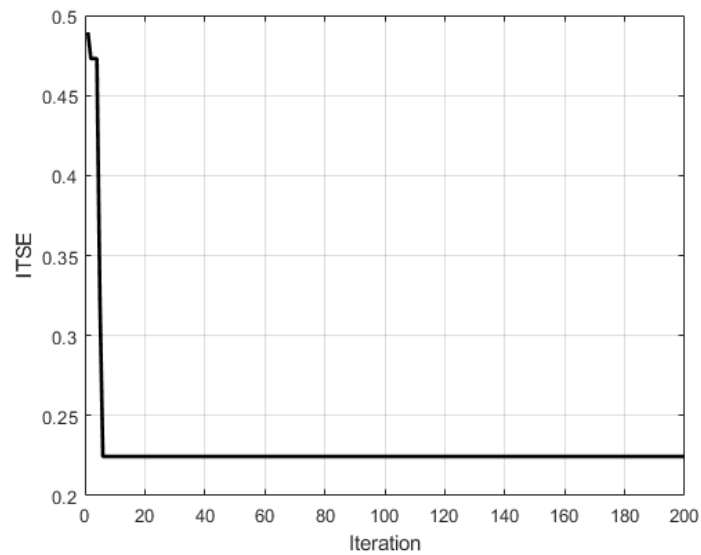
شکل ۸-۳: شاخص عملکرد PSO (ITAE)



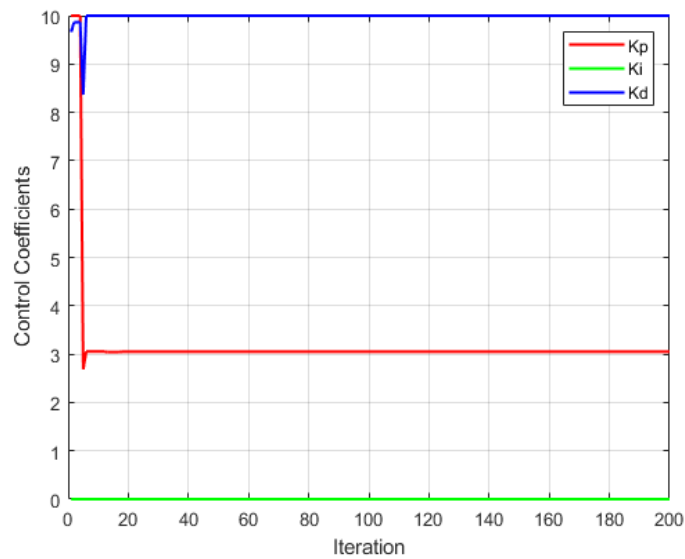
شکل ۹-۳: ضرایب کنترلر PID-PSO (ITAE)



شکل ۳-۱۰: پاسخ سیستم و عملکرد کنترلر PID-PSO با ورودی پله (ITSE)



شکل ۳-۱۱: شاخص عملکرد PSO (ITSE)



شکل ۱۲-۳: ضرایب کنترلر PID-PSO (ITSE)

در این بخش از PSO چند هدفه استفاده می کنیم که مربعات خطا ، مدت زمان همگرایی و همین طور MAXIMUM Over-Shoot استفاده شده است که توابع هدف ، به صورت زیر است :

$$J_1(P) = OS, OS = \max(e(t)) \quad ۱۲$$

$$J_2(P) = \int_0^t e^2(t) dt \quad ۱۳$$

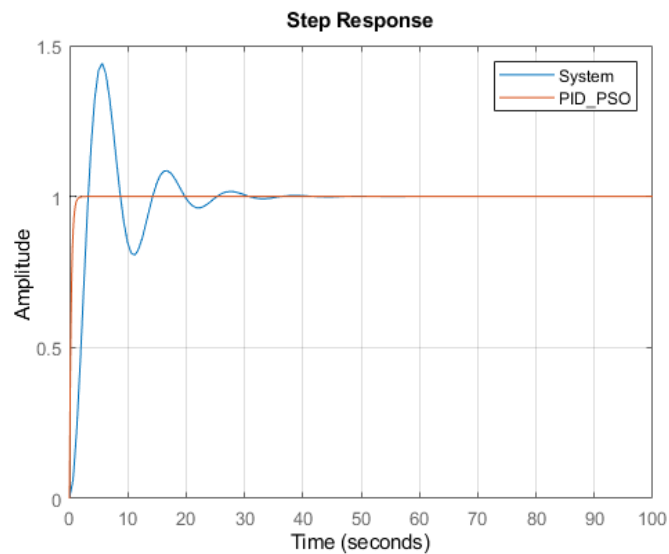
$$J_3(P) = t_s \quad ۱۴$$

$$J(P) = \omega_1 J_1(P) + \omega_2 J_2(P) + \omega_3 J_3(P) \quad ۱۵$$

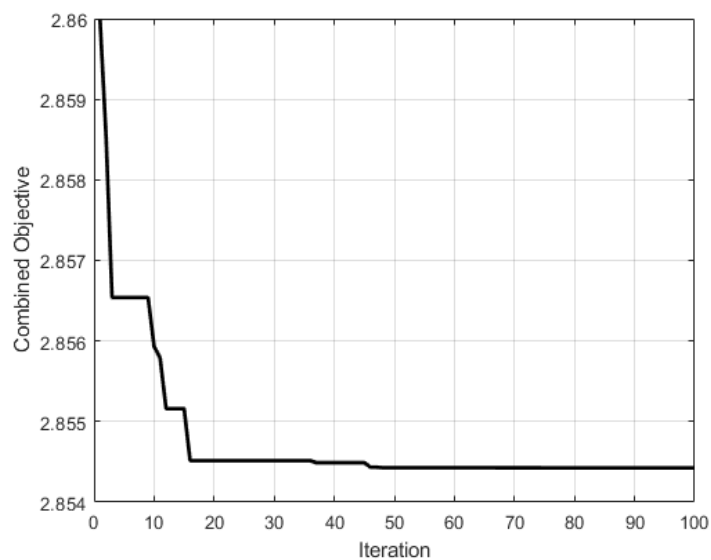
در معادله ۱۵ وزن تابع های هدف همگی ، ۱ است . نتایج این شبیه سازی به صورت زیر است:

جدول ۳-۴ نتایج کنترلر PID مبتنی بر PSO چند هدفه

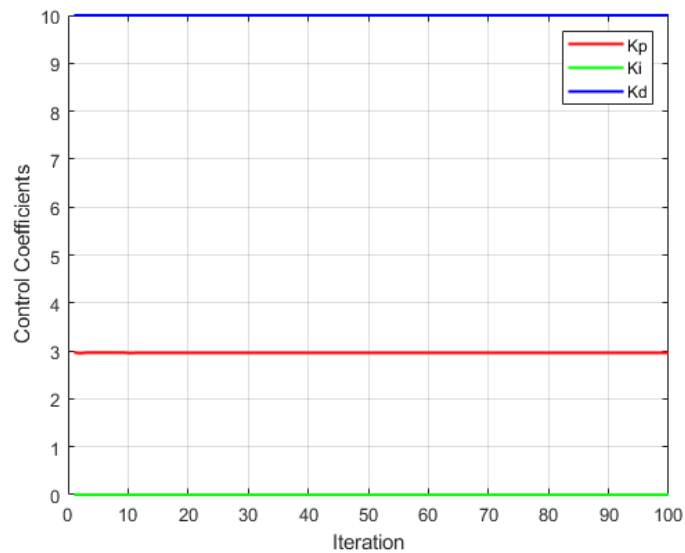
Maximum over-shoot	Settling Time	SSE	k_p	k_i	k_d
0.00%	1.13	1.721	2.9604	0	10



شکل ۳-۱۳ پاسخ سیستم و عملکرد کنترلر PID-MPSO با ورودی پله



شکل ۳-۱۴ شاخص عملکرد MPSO



شکل ۱۵-۳ ضرایب کنترلر PID-MPSO

با توجه به نمودارها و جداول می توان نتیجه گرفت که در PSO چند هدفه پارامترهای کنترل کننده PID بهبود بخشیده است و همین طور نسبت به تک هدفه ITAE عملکرد بهتری برای بهینه کردن توابع هدف داشته است و کنترل کننده بهتری برای زاویه رول MAV می تواند باشد.

منابع و مراجع

- Solihin, M.I., Tack, L.F. and Kean, M.L., 2011, January. Tuning of PID controller using particle swarm optimization (PSO). In Proceeding of the international conference on advanced science, engineering and information technology (Vol. 1, No. 11, pp. 458-461). [۱]
- Espinoza-Fraire, T., Sáenz, J.A., Sáenz, C. and Martinez, F.C., 2023. MRAC with SMC Applied to Lateral Control of a Fixed-Wing MAV. International Journal of Robotics and Automation Technology, 10, pp.124-130. [۲]
- Tran, V.P., Santoso, F. and Garratt, M.A., 2021. Adaptive trajectory tracking for quadrotor systems in unknown wind environments using particle swarm optimization-based strictly negative imaginary controllers. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 57(3), pp.1742-1752. [۳]
- Tripathi, P.K., Bandyopadhyay, S. and Pal, S.K., 2007, September. Adaptive mufti-objective particle swarm optimization algorithm. In 2007 IEEE congress on evolutionary computation (pp. 2281-2288). IEEE. [۴]
- <https://matlab.mathworks.com/> [۵]