



# تنظیم پارامترهای کنترل گر PID با الگوریتم‌های هوشمند تطبیقی و غیر تطبیقی؛ شبیه‌سازی و مقایسه در کوادروتور

مانا غنی فر<sup>۱</sup> ID، میلاد کامزن<sup>۲</sup> ID، مرتضی طایفی<sup>۳\*</sup> ID

۱-۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده هوافضا، تهران، ایران

\* نویسنده مخاطب: tayefi@kntu.ac.ir

اگرچه ساختار کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) به طور گسترده و موفق در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما تنظیم بهینه پارامترهای آن به ویژه در مواجهه با سیستم‌های پیچیده همواره چالش برانگیز بوده است. در این مقاله، استفاده از کنترل کننده PID جهت کنترل یک مدل از کوادروتور دارای دینامیک غیرخطی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در همین راستا و پس از ارائه مدل دینامیکی غیرخطی کوادروتور طراحی شده، چهار روش متمایز جهت تنظیم پارامترهای این کنترلر مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. این چهار تکنیک که در دو دسته‌ی برخط و خارج خط طبقه‌بندی می‌شوند، شامل تکنیک‌های برخط الگوریتم شبکه عصبی، استنتاج فازی و تکنیک‌های خارج خط الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و تجمع ذرات می‌گردند. در پایان اما با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نیز نتایج حاصل از مقایسه یک تابع هزینه پیش‌تعریف مربعی محاسبه شده در هر یک از حالات استفاده از این تکنیک‌های تنظیم پارامترها در حضور یک اغتشاش نسبتاً بزرگ با دامنه و فرکانس انتخاب شده که در کل زمان شبیه‌سازی، سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد، نشان داده می‌شود بطور کلی، رسته‌ی الگوریتم‌های برخط، به ویژه با وجود اغتشاش مذکور، از آن‌جا که ضرایب کنترلی سیستم حلقه- بسته را در هر گام زمانی از شبیه‌سازی عددی، به صورت لحظه‌ای برورسانی می‌کنند، عملکرد بهتری در کنترل دینامیک سیستم از خود نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی‌ها در محیط متلب-سیمولینک صورت پذیرفته و نمودارهای حاصل، قابل مشاهده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کنترلر PID- کوادروتور- الگوریتم ژنتیک- الگوریتم فازی- الگوریتم عصبی

## Adjust PID Controller Parameters with Adaptive and Non-Adaptive Intelligent Algorithms; Simulation and Comparison in Quadrotor

M. Ghanifar<sup>1</sup> ID, M. Kamzan<sup>2</sup> ID, M. Tayefi<sup>3\*</sup> ID

1,2. PhD Student, Faculty of Aerospace Engineering, Khajeh Nasir Toosi University, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Faculty of Aerospace Engineering, Khajeh Nasir Toosi University, Tehran, Iran

\*Corresponding Author: tayefi@kntu.ac.ir

Although the PID controller structure is widely and successfully used in industry, optimizing its parameters, especially in the face of complex systems, has always been challenging. In this paper, the use of a proportional-integral-derivative (PID) controller to control a model of a quadrotor with nonlinear dynamics is investigated. In this regard, after presenting the designed nonlinear dynamic quadrotor model, four distinct methods for adjusting the parameters of this controller are examined and compared. These four techniques, which are classified into two categories, online and offline, include online techniques of neural network and fuzzy inference, and offline techniques of genetic and particle swarm optimization algorithms. Finally according to the results of numerical simulations and the results of comparing a predefined squared cost function calculated in each case, in the presence of a relatively large disturbance with amplitude and frequency that is selected in the whole time simulation affects the system, shown in general, the order online algorithms, especially despite the mentioned disturbance, have better performance in controlling the dynamics of the system because they update the control coefficients of the closed-loop system momentarily in each step of numerical simulation. The simulation results are performed in MATLAB-Simulink environment and the results are visible.

**Keywords:** PID controller - Quadrotor - Genetic algorithm - Fuzzy algorithm - Neural algorithm



COPYRIGHTS

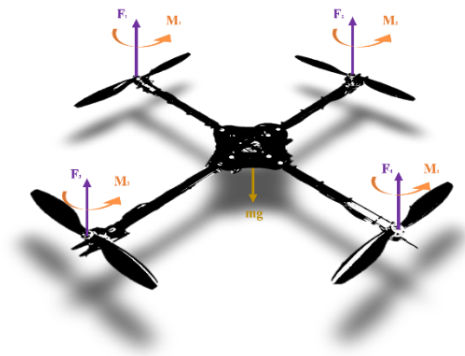
© 2023 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

How to Cite this in Article:

M. Ghanifar, M. Kamzan, M. Tayefi, "Adjust PID Controller Parameters with Adaptive and Non-Adaptive Intelligent Algorithms; Simulation and Comparison in Quadrotor," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 23-33, 2024 (in Persian).

## ۱ مقدمه

کوادروتورها یا کوادکوپترها (شکل ۱)، دسته‌ای از هوابرهای بال‌چرخان هستند که به سبب برخورداری از توان نشست و برخاست عمودی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. در حالت کلی، فرآیند پرواز و کنترل این رسته از هوابرها، به واسطه ایجاد تغییر در نرخ چرخش روتور دوار و به سبب آن، تغییر در میزان نیروی تولیدی این روتورها میسر می‌شود. فارق از نوع پیکربندی کوادروتور، به جهت حذف اثر گشتاور حاصل از گردش روتورهای دوار بر دینامیک سیستم، هر جفت روتور روبه‌رو بطور هم‌جهت و هر جفت روتور مجاور به‌صورت خلاف جهت یکدیگر دوران خواهند کرد؛ به بیان استاندارد، گردش دو روتور روبه‌رو بصورت ساعتگرد و دو روتور باقی‌مانده به‌طور پاد-ساعتگرد، در نظر گرفته خواهد شد [۱، ۲].



شکل ۱- شمای کلی یک کوادروتور [۳]

به‌طور عمده، کوادروتورها فاقد اجزای مکانیکی پیچیده (نظیر آنچه در بالگردها با چشم می‌خورد) می‌باشند؛ وجود روتورهای دوار دارای زاویه گام ثابت، عملکرد فاقد ارتعاش، ابعاد کوچک، هزینه نگهداری، ساخت و عملکردی پایین در کنار قابلیت مانورپذیری بالا، قابلیت اجرای مانور پروازی ایستا، ضمن ایجاد برتری‌های متعدد نسبت به سایر هوابرهای بال-ثابت و بال-چرخان، این وسیله را در دایره بزرگی از کاربردهای نظامی و غیرنظامی، کاربردی می‌سازد [۴-۶] از میان کاربردهای غیرنظامی کوادروتورها می‌توان به: نقشه برداری و عکس‌برداری هوایی، سم‌پاشی مزارع و مراتع، حفظ و بازرسی خطوط انتقال انرژی، اجرای عملیات جست‌وجو و امداد و نجات در مناطق دارای شرایط خاص، نظارت بر حمل‌ونقل شهری و مدیریت ترافیک، تفریح و بسیاری کاربردهای دیگر نظیر مطالعات هواشناسی و ... اشاره نمود.

از سوی دیگر وجود مزایای مذکور، این وسیله پرنده را جهت بهره‌گیری در کاربردهای نظامی نظیر: کشف و انهدام تهدیدات بدون دخالت مستقیم عوامل انسانی، حفاظت از مرزها و دیگر موارد این چنینی به ابزاری ایده‌آل تبدیل می‌کند [۱-۱۰] از طرفی، با وجود تمامی این

مزایا و کاربردها، ضمن آن‌که در کلاس‌بندی‌ها این سیستم، عموماً در رسته سیستم‌های دارای تحریک ناقص، قرار می‌گیرد، وجود دینامیک غیرخطی پیچیده در کنار کوپلینگ‌های قدرتمند، امکان بروز ناپیچینی‌های متعدد طی مأموریت‌های مختلف پروازی، دینامیک رفتاری پیچیده روتورهای دوار، حساسیت بالا نسبت به اغتشاشات خارجی و البته ناپایداری ذاتی دینامیک حلقه باز این وسیله، فرآیند کنترل کامل این ابزار و بهره‌گیری مؤثر از آن را با چالش‌های متعددی مواجه می‌کند؛ به قسمی که تحقیق و ارائه راهکارهای مفید جهت پایش کامل دینامیک این هوابر، همچنان در میان مسائل مورد توجه در میان پژوهشگران قرار دارد.

این تلاش‌ها که در دامنه وسیعی از تکنیک‌های کنترلی نظیر: کنترل تناسبی-انترگالی-مشتقی، رگولاتورها و کنترل‌های مربعی خطی [۱۱] (LQR & LQG)، کنترل مدل-مرجع [۱۲] و مدل پیش‌بین [۱۳]، تکنیک‌های کنترل مقاوم [۱۴]، خطی‌سازی پس‌خوردی، تکنیک‌های مبتنی بر مود لغزشی [۱۵]، اقسام کنترل‌های هوشمند [۱۶] و... قرار دارند، در رسته‌های مختلفی از دانش مهندسی کنترل نظیر کنترل خطی، کنترل غیرخطی و کنترل هوشمند، طبقه‌بندی می‌شوند. اگرچه تکنیک‌های کنترلی پیشرفته‌تر همواره توان کنترلی بیشتری در پایش دینامیک سیستم از خود نشان می‌دهند، اما مسائل مرتبط با پایداری سیستم در شرایط مختلف، انعطاف‌پذیری سیستم، توان مواجه با اغتشاش‌ها و عدم قطعیت‌های ناشی از اعمال فرایض ساده‌ساز در مدل‌سازی و تخمین ضرایب و همچنین هزینه پیاده‌سازی که ارتباط تنگاتنگی با توان محاسباتی و سنسورهای اندازه‌گیری مورد نیاز در سیستم دارند، همواره سازندگان را به سمت استفاده از سیستم‌ها و منطق‌های کنترلی کم‌هزینه‌تر و قابل اطمینان‌تر نظیر PID سوق می‌دهد.

کنترلر PID به عنوان یکی از کاربردی‌ترین کنترل‌گرهای صنعتی، در طیف وسیعی از کاربرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. سهولت و هزینه اندک در پیاده‌سازی از علل ایجاد انگیزه در استفاده از این تکنیک کنترلی است. از سوی دیگر، طراحی ساده و مقاومت ذاتی در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها، تعداد کم پارامترهای تنظیم، این روش کنترل را به ابزاری قدرتمند در زمینه کنترل دینامیک سیستم‌ها بدل می‌کند. از سویی اما وجود کوپلینگ‌های قوی بین متغیرهای سیستم و همچنین حضور ترم‌های غیرخطی، تغییرات دینامیکی سیستم در طول زمان و بروز اغتشاشات عدم قطعیت‌های بزرگ در سیستم کنترل شده، از جمله مواردی است که عملکرد و استفاده از این روش کنترل را با محدودیت‌هایی مواجه می‌کند.

با گذشت زمان و پیدایش مفاهیم جدیدی چون کنترل بهینه، کنترل مقاوم و پس از آن کنترل فازی و هوشمند، مفاهیم و ابزار نوینی

$$\ddot{\psi} = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \dot{\phi} \dot{\theta} + \frac{U_4}{I_{zz}} \quad (6)$$

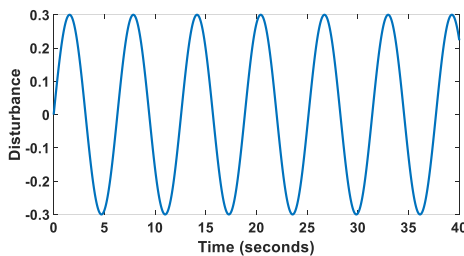
در حالت بررسی دو بعدی (سه درجه آزادی) در صفحه y-z روابط مورد استفاده به سه رابطه (۷) تا (۹) کاهش پیدا می‌کنند.

$$\dot{Y} = -\frac{U_1}{m} \sin \varphi \quad (7)$$

$$\dot{Z} = -g + \frac{U_1}{m} \cos \varphi \quad (8)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{U_2}{I_{xx}} \quad (9)$$

با هدف آزمایش توان کنترل PID طراحی شده با ضرایبی که به واسطه بهره‌گیری از تکنیک‌های مختلف تنظیم این ضرایب مورد استفاده قرار خواهند گرفت، در تمامی طول زمان شبیه‌سازی، یک اغتشاش سینوسی با دامنه و فرکانس از پیش تعریف شده و ثابت، به سیستم اعمال خواهد شد. گفتنی است، از آن‌جا که تکنیک کنترل PID به سبب بهره‌مندی از عامل انتگرال‌گیر، در برابر اغتشاشات وارده، به طور ذاتی مقاوم است، انتخاب این دامنه و فرکانس به نحوی صورت گرفته است که اثرات ناشی از اعمال این اغتشاش مذکور (بر هر دو کانال z و y) در خروجی هر کانال قابل مشاهده باشد. شمای کلی این اغتشاش، در شکل (۲) قابل رؤیت می‌باشد.



شکل ۲- اغتشاش وارد بر سیستم

### ۳ روش‌های تعیین ضرایب کنترلر

ساختار کلی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) در رابطه (۱۰) نمایش داده شده است.

$$U_{PID} = K_P e + K_I \int e + K_D \dot{e} \quad (10)$$

در این رابطه، U معرف تلاش کنترلی یا خروجی کنترلر PID، e معرف خطا و عبارات، و به ترتیب به عنوان ضرایب تناسبی، انتگرالی و مشتقی کنترلر، در نظر گرفته می‌شوند.

با هدف تعیین مناسب ضرایب کنترلی در این مقاله، از دو الگوریتم هوشمند برخط عصبی و استنتاج فازی و همچنین از الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی برون خط ژنتیک و الگوریتم تجمع ذرات استفاده

به دامنه مهندسی کنترل اضافه شده است. بر همین اساس، تلاش‌هایی جهت بهبود عملکرد این تکنیک کنترلی، صورت پذیرفت. از جمله این تلاش‌ها می‌توان به تغییر ساختار و انتخاب بهینه ضرایب کنترلی این روش کنترل کلاسیک بر اساس شاخص‌های مختلف عملکردی اشاره نمود.

در این مقاله، پس از ارائه مدل دینامیک یک کوادروتور، چهار روش متمایز جهت تنظیم ضرایب کنترلی این تکنیک (که ارتباط تنگاتنگی با عملکرد سیستم دارند) به منظور کنترل حرکت این مدل از کوادروتور دارای دینامیک غیرخطی در حالت حرکت در صفحه و در حالت وجود اغتشاش مفروض، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. این چهار روش با عناوین تکنیک‌های استنتاج فازی [۱۷] الگوریتم عصبی [۱۸] الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک [۱۹] و الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات [۲۰] شناخته می‌شوند. در همین راستا، در بخش دوم ابتدا مدل دینامیکی وسیله معرفی و پس از آن در بخش سوم روش‌های تعیین ضرایب کنترلی مورد بحث، تعیین می‌شود. در بخش چهارم، رفتار سیستم در حضور کنترلر شبیه‌سازی و مقایسه و در بخش پنجم و پایانی، نتیجه‌گیری کلی بر پایه بخش‌های قبلی، ارائه خواهد شد.

### ۲ مدل‌سازی

به منظور مدل‌سازی دینامیکی سیستم کوادروتور مورد بحث، از مدل معرفی شده در [۲۱] استفاده شده است. مزیت مهم این مدل‌سازی نسبت به سایر مدل‌های معرفی شده (که غالباً در قالب ۱۲ معادله وضعیت غیرخطی ارائه شده‌اند) این است که ضمن کاهش تعداد معادلات غیرخطی از ۱۲ معادله مرتبه ۱ به ۶ معادله مرتبه ۲ و به تبع آن، کاهش تعداد کنترلرهای مورد نیاز در معماری سیستم حلقه بسته، توان ما را در طراحی و تنظیم هرچه مناسب‌تر این کنترلرها بالا می‌برد. این معادلات در روابط شماره (۱) تا (۶) قابل مشاهده‌اند:

$$\ddot{X} = (\cos \varphi \cos \psi \sin \theta + \sin \varphi \sin \psi) \frac{U_1}{m} \quad (1)$$

$$\ddot{Y} = (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta - \cos \psi \sin \varphi) \frac{U_1}{m} \quad (2)$$

$$\ddot{Z} = -g + (\cos \theta \cos \varphi) \frac{U_1}{m} \quad (3)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \dot{\theta} \dot{\psi} + \frac{U_2}{I_{xx}} \quad (4)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{U_3}{I_{yy}} \quad (5)$$

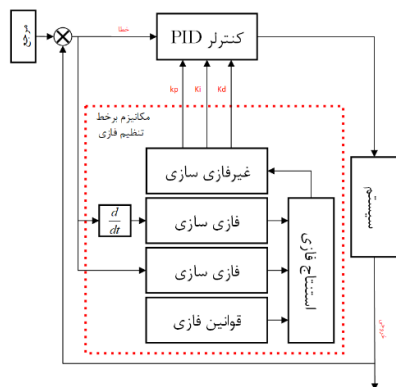
## ۴ الگوریتم‌های ژنتیک و تجمع ذرات

در این مقاله، نخست ضرایب کنترلی سیستم حلقه بسته کوادروتور معرفی شده، توسط دو الگوریتم هوشمند بهینه‌سازی موسوم به الگوریتم ژنتیک و دیگری الگوریتم تجمع ذرات، محاسبه می‌شود. اگرچه مبنای عملکردی هر دو تکنیک شباهت‌های فراوانی به هم دارند اما در عمل دو الگوریتم مستقل از یکدیگر محسوب می‌شوند.

هر دو الگوریتم بر پایه یک جمعیت اولیه، جست‌وجویی را آغاز و در کنار آن بر پایه منطق حاکم (که غالباً از پدیده‌های طبیعی الهام گرفته شده است) نسل بعدی جمعیت خود را تولید می‌کنند. هرچند نکته‌ای مهم در خصوص بهینه‌سازی توسط این الگوریتم‌ها، ایجاد یک مصالحه میان جست‌وجو و تولید نسل‌های بعدی پاسخ است، در نهایت این الگوریتم‌ها بر مبنای جست‌وجو و عملکرد توابع تولید نسل‌های تازه، مقدار شاخص بهینه‌سازی پیش‌تعریف (تابع هزینه) را کمینه می‌سازند.

## ۵ الگوریتم فازی

در روشی دیگر در این مقاله، به منظور تعیین مناسب ضرایب کنترلی از منطق استنتاج فازی ممدانی استفاده شده است. به این منظور، هریک از ضرایب کنترلرهای PID بر پایه قوانین فازی مشخص و پس از آن جهت کنترل سیستم حلقه بسته کوادروتور مورد استفاده واقع خواهند شد. قوانین فازی با بهره‌گیری از مقدار و مشتق خطا در هر لحظه، در بازه‌ی مشخص شده برای هر کدام، ضریب مناسب را انتخاب، و به صورت برخط، این ضرایب را به روزرسانی می‌کنند. این روش با استفاده از مقدار خطا در هر لحظه تلاش می‌کوشد پاسخ لحظه‌ای موجود را به پاسخ مطلوب نزدیک سازد. در این تکنیک، تابع بهینه‌سازی خاصی طی بهره‌گیری از این روش مورد استفاده واقع نشده و صرفاً مقدار تابع هزینه، در انتها و مطابق روابط از پیش تعیین شده مشترک میان کلیه الگوریتم‌ها، محاسبه می‌شود. شکل (۳) شمایی کیفی دیگرام بلوکی ساختار استفاده شده در این حالت را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- بلوک-دیگرام کنترلر برخط تنظیم فازی

خواهد شد؛ همچنین به جهت ایجاد قابلیت مقایسه میان عملکردهای سیستم حلقه بسته با ضرایب به دست آمده به واسطه استفاده از تکنیک‌های مختلف تعیین این ضرایب، نخست یک مبنای مقایسه‌ی کاربردی معرفی خواهد شد. این مبنا که در حقیقت تابع هزینه نام خواهد داشت، از دو جهت حائز اهمیت خواهد بود: نخست آن که فرآیند بهینه‌سازی الگوریتم‌های خارج خط بطور کامل، وابسته به آن خواهند بود و دیگر آن که مطابق آنچه عنوان شد، توان ما را در مقایسه مؤثر نتیجه حاصل از اعمال کنترلرهای تنظیم شده با تکنیک‌های مختلف را بالا می‌برد.

به منظور تولید تابع هزینه پیش‌تعریف (که به طور مستقیم در فرآیند بهینه‌سازی و تعیین ضرایب کنترلی موردنظر توسط الگوریتم‌های برخط و به صورت غیرمستقیم پس از تعیین ضرایب توسط الگوریتم‌های برخط مورد استفاده قرار می‌گیرد) از ساختار مربعی شامل سه بخش خطای خروجی در طول زمان، خطای خروجی در پایان و تلاش کنترلی، استفاده شده است. دلیل عمده معرفی تابع هزینه در چارچوب مذکور، آن جاست است که نخست این ساختار از در کاربردی، مؤثر و پیاده‌سازی آن آسان است؛ دیگر آن که استفاده از این تابع هزینه، امکان اعمال اثر رفتار مطلوب موردنظر را میسر و تسهیل می‌کند؛ همچنین ما را از استفاده از چند تابع هزینه متمایز بازی هر کانال شبیه‌سازی بی‌نیاز می‌سازد؛ به بیان دیگر استفاده از این قالب تابع هزینه (یا شاخص بهینه‌سازی) به واسطه پایه ریاضیاتی و خواص ریاضیات حاکم بر جبر ماتریس‌ها، مسئله بهینه‌سازی موجود را از حالت بهینه‌سازی چند هدفه به بهینه‌سازی تک هدفه، تقلیل می‌دهد. از این تابع هزینه مربعی در غالب رابطه (۱۱) معرفی شده است.

$$J = x^T(t_f)Ex(t_f) + \int_{t_0}^{t_f} (x^T Qx + u^T Ru) dt \quad (1)$$

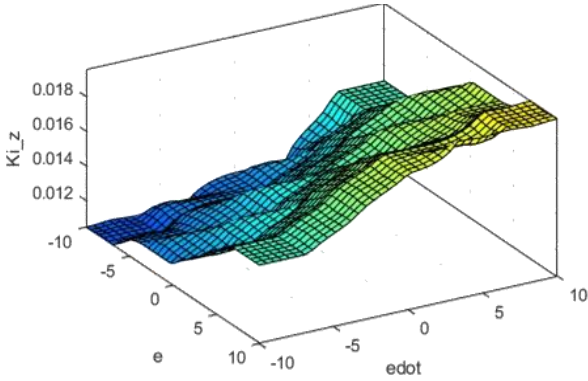
در این رابطه،  $x$  معرف بردار وضعیت،  $u$  نماینده تلاش کنترلی و

عبارت  $E$ ،  $Q$  و  $R$  ماتریس‌های وزن‌دهی می‌باشند.

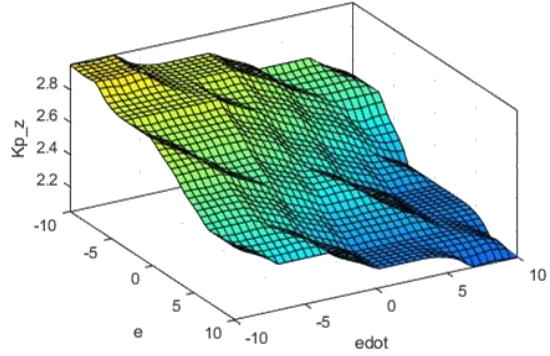
در نهایت اما به جهت کاهش پیچیدگی و حجم محاسبات نهایی و نیز کاهش زمان بهینه‌سازی و همچنین افزایش سهولت کار الگوریتم‌های برخط، کران بالا و پایین باند ضرایب کنترلی، به واسطه شناخت مناسب از سیستم و فرآیند آزمون و خطا، به گونه‌ای مشخص شده که کلیه الگوریتم‌های مورد استفاده در کوتاه‌ترین زمان ممکن و با کمترین حجم از ملاحظات حداقلی موردنیاز، به پاسخ نهایی خود همگرا شوند.

سطوح، مشابه همین نمودارها و عمده تفاوت موجود، در بازه‌های ترسیمی می‌باشد.

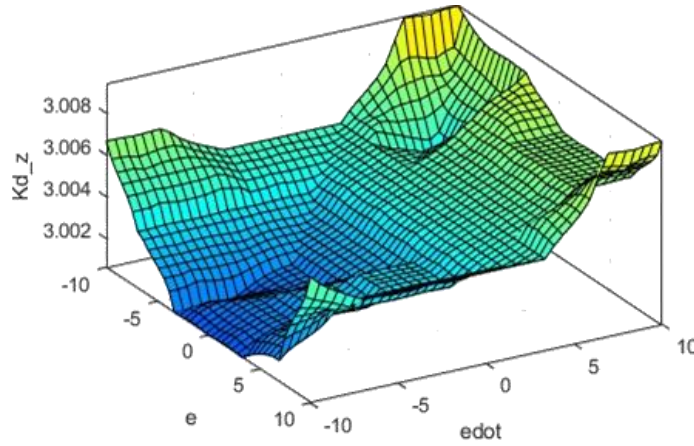
به منظور کاهش حجم مطلب، از میان نمودارهای سطوح فازی، تنها شکل (۴) که بیانگر سطوح فازی سیستم برای کانال z بوده، نمایش داده می‌شوند؛ هرچند برای کانال y و زاویه  $\varphi$  نیز شمای کلی این



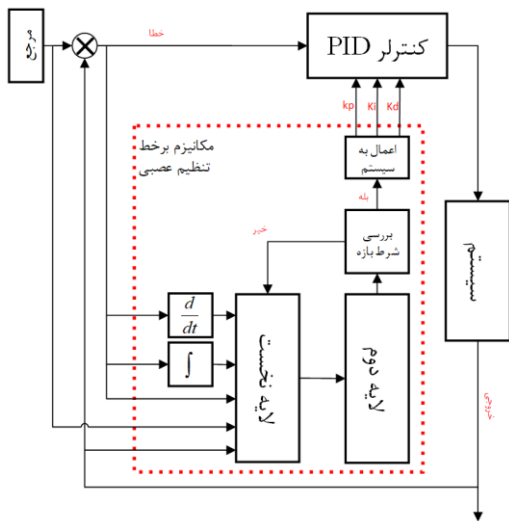
شکل ۴-ب- سطح قوانین فازی  $K_{I_z}$



شکل ۴-الف- سطح قوانین فازی  $K_{P_z}$



شکل ۴-ج- سطح قوانین فازی  $K_{D_z}$



شکل ۵- بلوک-دیگرام کنترلر برخط تنظیم عصبی

## ۶ الگوریتم عصبی

در راستای تأمین هدف موجود در این مقاله، یک شبکه عصبی دینامیکی دولایه در نظر گرفته می‌شود. ورودی‌های این شبکه شامل خطا، مقدار مطلوب و مقدار واقعی و نیز خروجی این شبکه، ضرایب کنترلی ( $\text{tansig}$ )، و شروط در نظر گرفته شده برای تعیین محدوده ضرایب در الگوریتم مورد استفاده، مشخص فرض شده است. این روش با بهره‌گیری از مقدار خطا در هر لحظه تلاش می‌کوشد خروجی واقعی حاصل از اعمال مقدار مرجع، به سیستم حلقه بسته را به پاسخ مطلوب نزدیک سازد. دیگرام بلوکی این ساختار، در شکل (۵) قابل رؤیت می‌باشد.

طی این روش، تابع بهینه سازی خاصی در نظر گرفته نشده و صرفاً مقدار تابع هزینه، در انتها مطابق روابط از پیش تعیین شده محاسبه می‌شود. خاصیت مهم این شبکه آن است که می‌تواند در هر گام زمانی از فرآیند شبیه‌سازی، محاسبات لازم جهت تعیین مقادیر پارامترهای کنترلی را به صورت برخط انجام دهد.

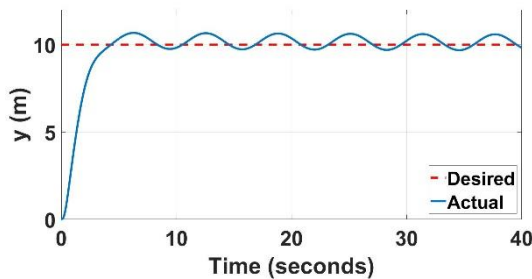
طی این روش، تابع بهینه سازی خاصی در نظر گرفته نشده و صرفاً مقدار تابع هزینه، در انتها مطابق روابط از پیش تعیین شده محاسبه می‌شود. خاصیت مهم این شبکه آن است که می‌تواند در هر گام زمانی از فرآیند شبیه‌سازی، محاسبات لازم جهت تعیین مقادیر پارامترهای کنترلی را به صورت برخط انجام دهد.

## ۸ الگوریتم ژنتیک و تجمع ذرات

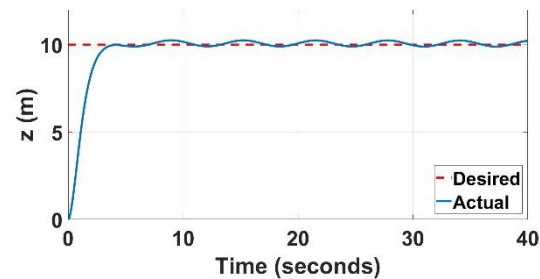
در گام نخست نمودارهای زمانی ناشی از اعمال کنترلی تنظیم شده توسط الگوریتم ژنتیک و تجمع ذرات، به سیستم، نمایش داده خواهد شد؛ پس از آن جدول پارامترهای تنظیم ناشی از بهینه‌سازی توسط این الگوریتم‌ها در قالب دو جدول (۱) و (۲) ارائه می‌شود. گفتنی است به دلیل تشابه حداکثری نتایج حاصل از استفاده از این دو الگوریتم در تنظیم ضرایب، تنها به نمایش نمودارهای حاصل از اعمال الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک (شکل ۶) بسنده نموده و نتایج ناشی از استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات، در قالب جدول ضرایب حاصله و پس از آن در جدول مقایسه مقادیر تابع هزینه نمایش داده می‌شود.

## ۷ شبیه‌سازی سیستم در حضور کنترلی

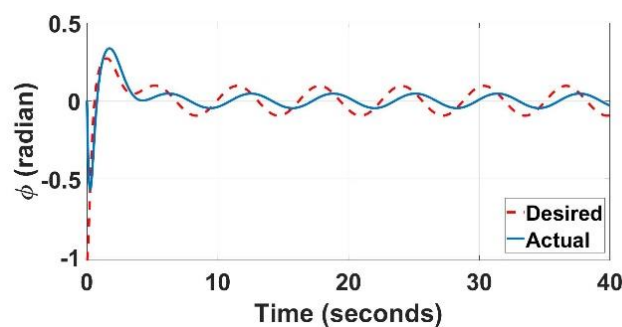
در ادامه، نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی عددی اعمال کنترلهای تنظیم شده توسط الگوریتم‌های مورد بحث، به یک کوادروتور مفروض با جرم ۰.۵۲ کیلوگرم و ممان اینرسی ۰.۰۰۶۲۲۸ کیلوگرم بر متر مربع، طی ۴۰ ثانیه شبیه‌سازی نمایش داده شده و نتایج حاصل مورد بحث قرار می‌گیرد. نکته مهم آن که نقطه مرجع ورودی به هر دو کانال  $z$  و  $y$  از نوع نقطه تنظیم دارای مقدار ۱۰ می‌باشد که با توجه به معماری کنترلی سیستم، موجب پیدایش یک مسیر مرجع،



شکل ۶-ب- نمودار  $y$  بر حسب زمان - الگوریتم ژنتیک



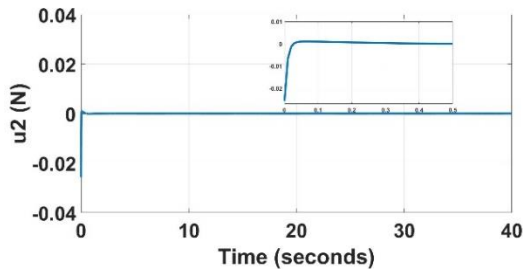
شکل ۶-الف- نمودار  $z$  بر حسب زمان - الگوریتم ژنتیک



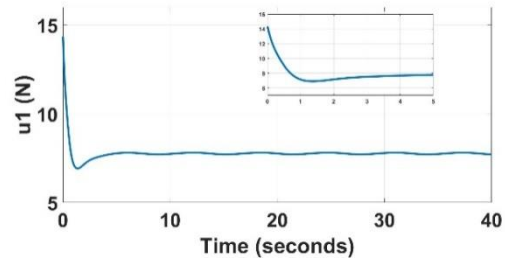
شکل ۶-ج- نمودار  $\phi$  بر حسب زمان - الگوریتم ژنتیک

با بررسی نمودارهای تلاش کنترلی  $u_1$  و  $u_2$  که در شکل (۷) نمایش داده شده، در کنار نمودار زمانی زاویه  $\phi$  می‌توان دریافت فرآیند کنترل سیستم موردنظر، به نحو مناسبی صورت پذیرفته است.

از آن‌جا که یکی از قیود مهم در تنظیم کنترلهای (که در بخش مرتبط در تابع هزینه نیز اعمال شده است) منطقی بودن کیفیت تلاش‌های کنترلی ناشی از افزودن فرآیند کنترل در سیستم می‌باشد، بررسی این ورودی‌ها از نظر دامنه و زمان اثر، حائز اهمیت خواهد بود.



شکل ۷-ب- نمودار  $u_2$  بر حسب زمان - الگوریتم ژنتیک



شکل ۷-الف- نمودار  $u_1$  بر حسب زمان - الگوریتم ژنتیک

جدول ۱- ضرایب حاصل از الگوریتم ژنتیک

Kd	Ki	Kp	
۳,۰۰۴۵	۰,۰۱۵۵	۲,۴۳۵۱	x
۱,۸۰۱۰	۰,۰۱۵۶	۱,۰۰۳۳	y
۱۲۸,۱۱۵۶	۰,۰۴۹۸	۶۴۹,۶۸۶۸	phi

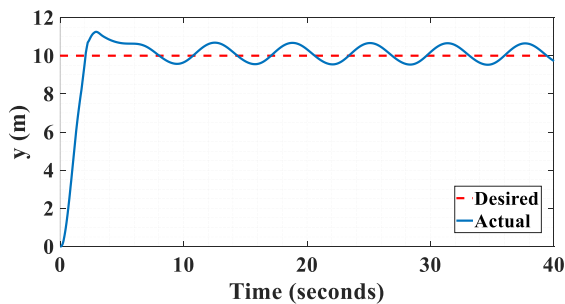
جدول ۲- ضرایب حاصل از الگوریتم تجمع ذرات

Kd	Ki	Kp	
۳,۰۰۰۰	۰,۰۱۱۶	۲,۴۳۱۰	x
۱,۷۹۶۵	۰,۰۱۰۰	۱,۰۰۰۰	y
۱۲۹,۶۷۴۳	۰,۰۴۰۰	۶۶۰,۰۰۰	phi

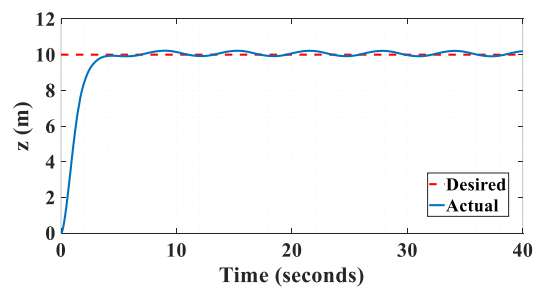
نمودارها که در قالب شکل (۸) برای خروجی‌های سیستم ترسیم شده است، نشانگر نیل مناسب به هدف، از منظر رسیدن به نقطه مورد نظر و مسیر مطلوب، می‌باشد.

## ۹ الگوریتم فازی

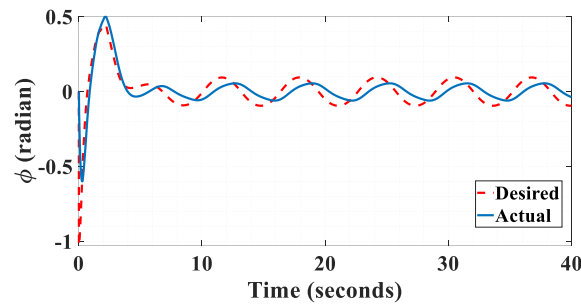
در این بخش نیز نمودارهای حاصل از اعمال کنترلر تنظیم شونده با ضرایب متغیر با زمان الگوریتم برخط فازی، نمایش داده می‌شود؛ این



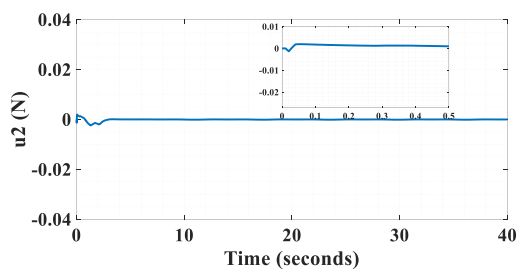
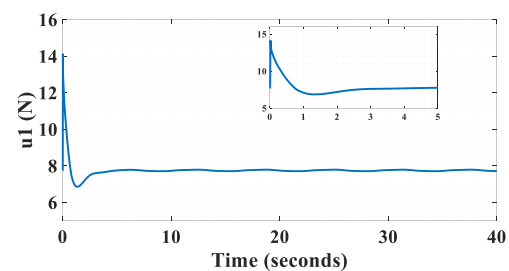
شکل ۸-ب- نمودار y بر حسب زمان - الگوریتم فازی



شکل ۸-الف- نمودار z بر حسب زمان - الگوریتم فازی

شکل ۸-ج- نمودار  $\phi$  بر حسب زمان - الگوریتم فازی

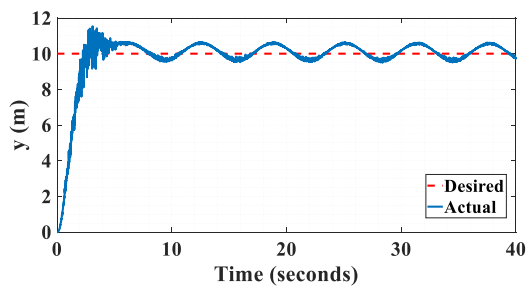
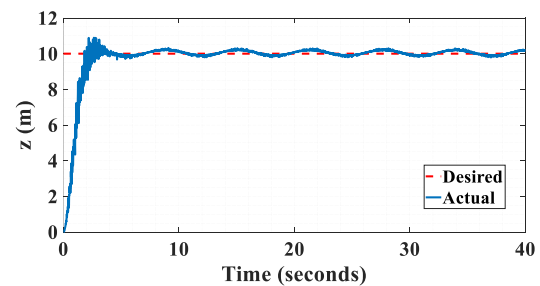
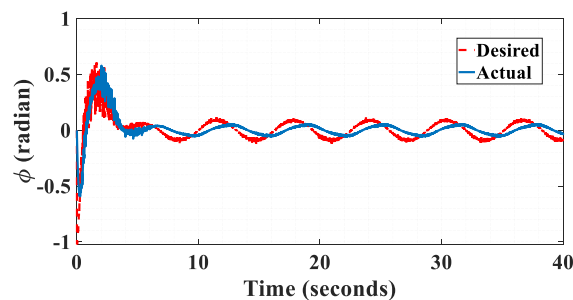
در ادامه، شکل (۹) جهت نمایش تلاش‌های کنترلی صورت پذیرفته در فرآیند شبیه‌سازی پرواز کوادروتور، ترسیم گردیده است.

شکل ۹-ب- نمودار  $u_2$  بر حسب زمان - الگوریتم فازیشکل ۹-الف- نمودار  $u_1$  بر حسب زمان - الگوریتم فازی

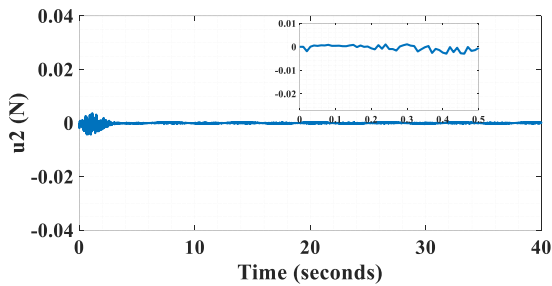
از اعمال این منطق تنظیم ضرایب به سیستم حلقه-بسته، نمایش داده می‌شود. در همین راستا، شکل (۱۰) نمودار خروجی‌های مسئله در طی فرآیند شبیه‌سازی را نمایش می‌دهند.

## ۱۰ الگوریتم عصبی

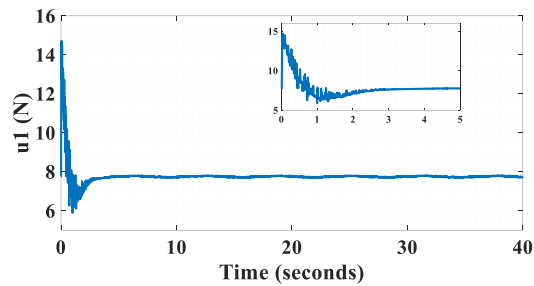
با عنایت به توضیحات ارائه شده در خصوص تنظیم برخط عصبی ضرایب کنترل گر PID در بخش قبل، در این بخش، نمودارهای حاصل

شکل ۱۰-ب- نمودار  $y$  بر حسب زمان - الگوریتم فازیشکل ۱۰-الف- نمودار  $z$  بر حسب زمان - الگوریتم عصبیشکل ۱۰-ج- نمودار  $\phi$  بر حسب زمان - الگوریتم عصبی

مشابه روند طی شده در بخش‌های پیشین، شکل (۱۱) نمودار تلاش‌های کنترلی اعمال شده در طول شبیه‌سازی پرواز را نمایش می‌دهد.

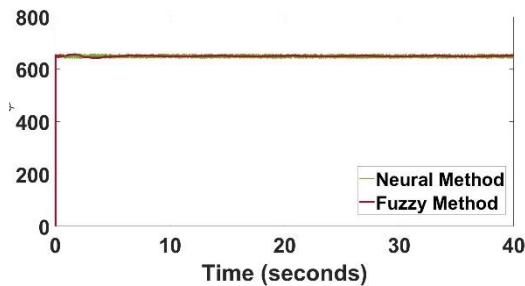


شکل ۱۱-ب- نمودار  $u_2$  بر حسب زمان - الگوریتم عصبی

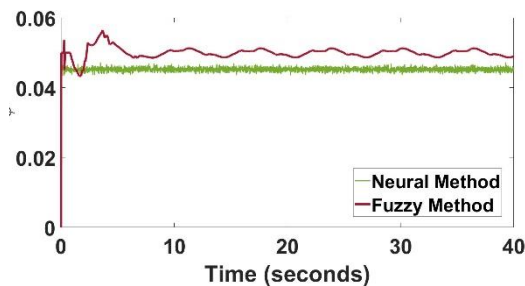


شکل ۱۱-الف- نمودار  $u_1$  بر حسب زمان - الگوریتم عصبی

برخورداری از توان بروزرسانی برخط ضرایب، در نهایت پاسخ مناسب‌تری نسبت به کنترلر تنظیم شده توسط الگوریتم خارج خط از خود نشان خواهد داد اما در میان همین دو تکنیک نیز تابع هزینه ناشی از اعمال کنترلر تنظیم شده توسط الگوریتم عصبی، در پایان مقدار کمتری خواهد داشت. از سوی دیگر اما اعمال این الگوریتم تنظیم به سیستم، به سبب وجود نرخ بالای بروزرسانی، موجب پیدایش نوسانات لحظه‌ای در فرآیند شبیه‌سازی خواهد شد. در پایان اما نمودار زمانی تغییرات ضرایب کنترلی برای کانال  $\phi$  به نمایندگی از دیگر ضرایب کنترلی در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.



شکل ۱۲-الف- نمودار  $Kp\phi$  بر حسب زمان - الگوریتم عصبی و فازی



شکل ۱۲-ب- نمودار  $Ki\phi$  بر حسب زمان - الگوریتم عصبی و فازی

## ۱۱ مقایسه نتایج شبیه‌سازی

در پایان اما مطابق آنچه انتظار می‌رفت، تکنیک‌های تنظیم برخط ضرایب کنترلر PID به سبب آنکه در کل زمان شبیه‌سازی به صورت لحظه‌ای ضرایب مورد بحث را با توجه به وضعیت سیستم، مقادیر خطا (شامل مقادیر خالص، مشتق و انتگرال هر خطا)، اغتشاش وارده و ورودی مرجع (نقطه تنظیم یا مسیر مرجع) بروزرسانی می‌کنند، عملکرد غالباً بهتری از خود نشان می‌دهند. این بهبود رفتاری نسبت به تکنیک‌های تنظیم خارج خط، در نمودارهای ارائه شده در بخش قبل و البته در جدول (۳) که مقدار خالص تابع هزینه را نمایش می‌دهد، قابل مشاهده می‌باشد.

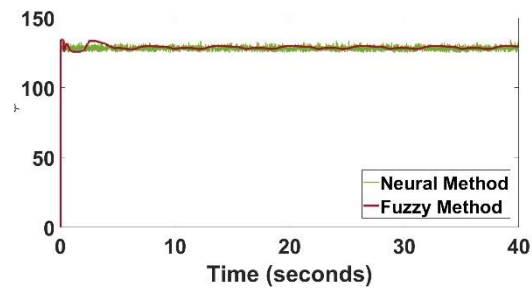
جدول ۳- مقدار تابع هزینه با هر تکنیک تنظیم ضرایب

روش تعیین ضرایب	مقدار عددی تابع هزینه (J)
بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک	$1,2978 \times 10^{13}$
بهینه‌سازی با الگوریتم تجمع ذرات	$1,2971 \times 10^{13}$
الگوریتم پیشنهادی فازی	$1,2649 \times 10^{13}$
الگوریتم پیشنهادی عصبی	$1,2564 \times 10^{13}$

در خصوص مقایسه دو تکنیک تنظیم برخط فازی و عصبی ذکر نکاتی حائز اهمیت است؛ نکته اول آنکه مطابق آنچه پیش‌تر نیز مطرح شد، کنترلر بهره‌مند از هر یک از این دو تکنیک، به سبب

## ۱۳ مراجع

- [1] S. Gupte, P. I. T. Mohandas, and J. M. Conrad, "A survey of quadrotor unmanned aerial vehicles," *2012 Proceedings of IEEE Southeastcon*, pp. 1-6, 2012, <https://doi.org/10.1109/SECon.2012.6196930>
- [2] S. N. Ghazbi, Y. Aghli, M. Alimohammadi, and A. A. Akbari, "Quadrotors unmanned aerial vehicles: A review," *International journal on smart sensing and Intelligent Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 309-333, 2016, <https://doi.org/10.21307/ijssis-2017-872>
- [3] M. Ghanifar, M. Kamzan, and M. Tayefi, "Coefficient Tuning of Quadrotor Feedback-linearization Controller by Different Intelligent Methods," in *20th International Conference of Iranian Aerospace*, 2022.
- [4] L. Li, L. Sun, and J. Jin, "Survey of advances in control algorithms of quadrotor unmanned aerial vehicle," in *2015 IEEE 16th international conference on communication technology (ICCT)*, 2015, pp. 107-111: IEEE, <https://doi.org/10.1109/ICCT.2015.7399803>
- [5] J. Kim, S. A. Gadsden, and S. A. Wilkerson, "A comprehensive survey of control strategies for autonomous quadrotors," *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 43, no. 1, pp. 3-16, 2019, <https://doi.org/10.1109/CJECE.2019.2920938>
- [6] H. Kazemi and S. Elahian, "Challenges and Opportunities of Drone Development in Iran," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 64-45, 2020.
- [7] N. S. Özbek, M. Önkol, and M. Ö. Efe, "Feedback control strategies for quadrotor-type aerial robots: a survey," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 38, no. 5, pp. 529-554, 2016, <https://doi.org/10.1177/0142331215608427>
- [8] A. Zulu and S. John, "A Review of Control Algorithms for Autonomous Quadrotors," *Library (Lond)*, pp. 547-556, 2009, <https://doi.org/10.4236/ojapps.2014.414053>
- [9] Y. Li and S. Song, "A survey of control algorithms for quadrotor unmanned helicopter," in *2012 IEEE fifth international conference on advanced computational intelligence (ICACI)*, 2012, pp. 365-369: IEEE, <https://doi.org/10.1109/ICACI.2012.6463187>
- [10] H. Mo and G. Farid, "Nonlinear and adaptive intelligent control techniques for quadrotor uav—a survey," *Asian Journal of Control*, vol. 21, no. 2, pp. 989-1008, 2019, doi: 10.1002/asjc.1758.
- [11] R. Fessi and S. Bouallègue, "LQG controller design for a quadrotor UAV based on particle swarm optimisation," *International Journal of Automation and Control*, vol. 13, no. 5, pp. 569-594, 2019.



شکل ۱۲-ج- نمودار  $Kd\phi$  بر حسب زمان - الگوریتم عصبی و فازی

همانطور که مشاهده می‌شود، فارق از نوع الگوریتم برخط، کلیه این ضرایب در لحظه نخست از شبیه‌سازی، به سبب وجود مقدار بالای خطا در این لحظه، مقادیر بزرگی به نسبت لحظات بعدی شبیه‌سازی اختیار خواهند نمود. اگرچه با توجه به حضور دائمی اغتشاش مفروض، این ضرایب نیز (حتی به مقدار کم) بطور مداوم با گذشت زمان، تغییر خواهد کرد که این تغییر همواره متناسب با اثر اغتشاش مذکور خواهد بود.

## ۱۲ نتیجه‌گیری

در این مقاله، استفاده از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) جهت کنترل یک مدل از کوادروتور دارای دینامیک غیرخطی، با چهار روش متمایز جهت تنظیم پارامترهای این کنترلر مورد بررسی قرار گرفت. این چهار تکنیک در دو رسته‌ی برخط، شامل الگوریتم شبکه عصبی و استنتاج فازی و نیز خارج خط الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و تجمع ذرات طبقه‌بندی می‌شوند. در پایان اما با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و نیز نتایج حاصل از مقایسه یک تابع هزینه پیش‌تعریف مربعی محاسبه شده در هریک از حالات استفاده از این تکنیک‌های تنظیم پارامترها در حضور یک اغتشاش نسبتاً بزرگ با دامنه و فرکانس انتخاب شده که در کل زمان شبیه‌سازی، سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد، نشان داده شد بطور کلی، رسته‌ی الگوریتم‌های برخط، به ویژه با وجود اغتشاش مذکور، از آن‌جا که ضرایب کنترلی سیستم حلقه-بسته را در هر گام زمانی از شبیه‌سازی عددی، به صورت لحظه‌ای بروزسانی می‌کنند، عملکرد بهتری در کنترل دینامیک سیستم از خود نشان می‌دهد. در میان دو الگوریتم برخط مورد بررسی نیز، اگرچه تکنیک عصبی در تعیین ضرایب کنترلر، به سبب نرخ بالای بروز رسانی، موجب بروز نوسانات عددی متعدد در نمودارهای حاصله است، اما مقدار تابع هزینه در صورت استفاده از این تکنیک، تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد که این موضوع خود نمایانگر عملکرد مناسب‌تر این روش در مقایسه با روش‌های خارج خط و نیز در مقایسه با تعیین فازی ضرایب می‌باشد.

- [17] M. Zareb, R. Ayad, and W. Nouibat, "Fuzzy-PID hybrid control system to navigate an autonomous mini-Quadrotor," in *3rd international conference on systems and control*, 2013, pp. 906-913: IEEE, <https://doi.org/10.1109/ICoSC.2013.6750965>
- [18] J. Gómez-Avila, C. López-Franco, A. Y. Alanis, and N. Arana-Daniel, "Control of Quadrotor using a Neural Network based PID," in *2018 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI)*, 2019, pp. 1-6: IEEE, <https://doi.org/10.1109/LA-CCI.2018.8625222>
- [19] A. Alkamachi and E. Erçelebi, "Modelling and genetic algorithm based-PID control of H-shaped racing quadcopter," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 42, pp. 2777-2786, 2017, <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2433-2>
- [20] A. Noordin, M. M. Basri, Z. Mohamed, and A. Z. Abidin, "Modelling and PSO fine-tuned PID control of quadrotor UAV," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 1367-1373, 2017, <https://doi.org/10.18517/ijaseit.7.4.3141>
- [21] S. Bouabdallah, "Design and control of quadrotors with application to autonomous flying," Epl2007.
- [12] B. Whitehead and S. Bieniawski, "Model reference adaptive control of a quadrotor UAV," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2010, <https://doi.org/10.2514/6.2010-8148>
- [13] G. V. Raffo, M. G. Ortega, and F. R. Rubio, "MPC with nonlinear  $H_{\infty}$  control for path tracking of a quad-rotor helicopter," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 8564-8569, 2008.
- [14] C. Nicol, C. Macnab, and A. Ramirez-Serrano, "Robust adaptive control of a quadrotor helicopter," *Mechatronics*, vol. 21, no. 6, pp. 927-938, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2011.02.007>
- [15] M. K. Shaik and J. F. Whidborne, "Robust sliding mode control of a quadrotor," in *2016 UKACC 11th International Conference on Control (CONTROL)*, 2016, pp. 1-6: IEEE.
- [16] M. Santos, V. Lopez, and F. Morata, "Intelligent fuzzy controller of a quadrotor," in *2010 IEEE international conference on intelligent systems and knowledge engineering*, 2010, pp. 141-146: IEEE, <https://doi.org/10.1109/ISKE.2010.5680812>