

# طراحی کنترل کننده بهینه سامانه کنترل پرواز یک هواپیمای بدون

## سرنشین با استفاده از کنترل کننده فازی - الگوریتم ژنتیک

روح اله دوست حسینی<sup>۱</sup>

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دانشگاه یزد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۵/۱۳)

### چکیده

شناسایی و بررسی موقعیت‌های جغرافیایی و اقلیمی مختلف جهت تحقیقات علمی و مطالعات راهبردی جزء اهم مسایل شناسایی در کشورها می‌باشد. امروزه استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین به دلیل قابلیت‌های نفوذ، ایمنی و عملکرد بالایی که دارند؛ در بسیاری از کشورها کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. عملکرد درست و دقیق هواپیماهای بدون سرنشین باعث دریافت صحیح و به موقع داده‌ها و در نتیجه دستیابی به اطلاعات مورد نیاز می‌باشد. لذا، داشتن یک سامانه کنترلی مناسب و بی‌نقص برای کنترل هواپیماهای بدون سرنشین از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله با استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت تنظیم کنترل کننده فازی سعی شده است یک کنترل کننده هوشمند جهت کنترل مسیر هواپیماهای بدون سرنشین در شرایط مختلف مسیر ارائه گردد، به نحوی که سامانه حالت پرواز بهینه را داشته باشد. در این روش ابتدا با استفاده از تئوری الگوریتم ژنتیک پارامترهای توابع عضویت و قوانین فازی جهت کنترل پرواز هواپیما در طول مسیر طراحی شوند که در نتیجه باعث پایین آمدن حداکثر جهش و همچنین، خطای حالت ماندگار سامانه می‌شود. در ادامه، با ارائه یک مدل خطی از هواپیمای بدون سرنشین و شبیه‌سازی آن، عملکرد درست روش مذکور مورد بررسی قرار گرفته و با روش‌های رایج مقایسه و نتایج ارائه گردیده‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌کردن مسیر پرواز، دینامیک خطی پرواز، کنترل کننده فازی - الگوریتم ژنتیک، هواپیمای بدون سرنشین

## Optimal Control of an Unmanned Aerial Vehicle Using Fuzzy- Genetic Algorithm Controller

R. Dosthosseini

Department of Electrical and Computer Engineering

Yazd University

(Received:16/December/2014; Accepted:4/August/2014)

### ABSTRACT

Identification and analysis of geographic and climatic conditions for scientific researches and strategic studies is one of the main issues in countries. Nowadays, the use of Unmanned Aerial Vehicle because of its safety and high performance has been widely used in many countries. Exact action of this system leads to obtain accurate data and thereby achieve critical information. Therefore, an appropriate control system and perfect control of the drone is important. In this paper, an intelligent control using Fuzzy- Genetic Algorithm is presented on longitudinal flight dynamics of an Unmanned Aerial Vehicle. In this approach, all the membership functions and fuzzy rules are extracted from genetic algorithm method to minimize the over shoot and the steady-state error of the system. Finally, an example is illustrated to compare the proposed method with the classical PID controller.

**Keywords:** Optimized Flight Trajectory, Longitudinal Flight Dynamics, Fuzzy- Genetic Algorithm Controller, Unmanned Aerial Vehicle.

## فهرست علائم و اختصارات

C's	ضرایب مشتقی متناظر با پارامترهای سامانه (جدول ۲)
$e$	خطای سامانه، Deg
$g$	نیروی جاذبه زمین، $m/sec^2$
$I_{yy}$	اینرسی لحظه‌ای، $m^4$
$L_t/c$	طول chord هواپیما، m
$m$	جرم UAV، Kg
NB	Negative Big
NS	Negative Small
PB	Positive Big
PS	Positive Small
$q$	نسبت زاویه گام، Deg/sec
$S_{verticaltail}$	مساحت دم عمودی هواپیما، $m^2$
$S$	مساحت بال هواپیما، $m^2$
$T \cdot s$	زمان، sec
$U_0$	سرعت طولی هواپیما در حالت پایدار، m/sec
$u$	تغییرات سرعت در مسیر طولی پرواز، m/sec
$w$	انحراف سرعت در مسیر ارتفاع، m/sec
ZE	Zero

## علائم یونانی

$\alpha$	تغییرات زاویه حرکت در مسیر پرواز، Deg/sec
$\delta_e$	مقدار انحراف بالابرنده، Deg
$\rho$	چگالی هوا، $kg/m^3$
$\theta$	تغییرات زاویه گام نسبت به حالت پایدار، Deg/sec
$\Theta$	زاویه گام، Deg
$\omega \cdot s$	فرکانس‌های طبیعی نامیرا، rad/sec
$\zeta \cdot s$	ضرایب میرایی

## ۱- مقدمه

استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین<sup>۱</sup> (UAV) به دلیل داشتن قابلیت بالا و امنیت مناسب در بسیاری از تحقیقات و مطالعات جغرافیایی جهت شناسایی و دریافت اطلاعات مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. باتوجه به این که این سامانه‌ها دارای کنترل خودکار هستند، داشتن کنترل کننده مناسب جهت کنترل پرواز آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بدین منظور

سامانه‌های کنترلی گوناگونی جهت طراحی و تحلیل این هواپیماها مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند [۳-۱]. در مرجع [۱] از دینامیک غیرخطی توسط تکنیک کنترل مد لغزشی جهت کنترل یک نمونه UAV استفاده شده است. همچنین، از روش‌های کنترل فوق‌مردن<sup>۲</sup> نظیر کنترل مقاوم [۴]، فیلتر کالمن گسترش داده شده [۳] و کنترل بهینه [۵] جهت کنترل حرکت هواپیماهای بدون سرنشین مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند. اگرچه به کارگیری روش‌های مذکور باعث بالابردن دقت سامانه کنترلی در هواپیماهای بدون سرنشین شده؛ ولی با مشکلاتی نظیر محسوس بودن خطای تعقیب، دشواری و پیچیدگی سامانه کنترلی و در برخی موارد، بالابودن هزینه ساخت چنین کنترل کننده‌هایی باعث شده تا محققان به دنبال روش‌های جایگزین مناسب باشند.

استفاده از شبکه‌های عصبی<sup>۳</sup> از جمله روش‌های کنترل هوشمند می‌باشد که در صنعت کاربردهای فراوانی دارد. این روش با استفاده از تکنیک یادگیری به سامانه باعث شده تا سامانه با تکرار فرایند و یادگیری، بتواند خود را کنترل کند [۶-۷]. از مزایای این روش، قابلیت استفاده در سامانه‌هایی است که دینامیک مشخصی ندارند و شبکه عصبی با استفاده از اطلاعات موجود به آموزش سامانه می‌پردازد. باتوجه به این که در این روش نیز فقط به صورت پیش‌خورد<sup>۴</sup> سامانه، کنترل می‌شود و تاثیرات خروجی سامانه در کنترل نقش ندارد، خطای سامانه به ازای تغییرات ناگهانی زیاد می‌شود. جهت رفع این مشکل از کنترل کننده‌های شبکه عصبی دارای فیدبک<sup>۵</sup> استفاده می‌شود [۸-۹]. در مرجع [۱۰] از یک کنترل کننده شبکه عصبی<sup>۶</sup> و تلفیق آن با کنترل کننده‌های معمول به کار گرفته شده است. استفاده از منطق فازی نیز جهت کنترل مسیر UAV مورد استفاده قرار گرفته شده است [۵]. در این مرجع از کنترل کننده فازی به همراه کنترل وقفی مرجع جهت کنترل مسیر هواپیما به کار گرفته شده است.

در سال‌های اخیر استفاده از موجک‌ها<sup>۷</sup> به صورت ترکیبی با شبکه عصبی (WNNs) جهت تقریب بهتر رفتار سامانه‌های با دینامیک نامشخص مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۱-۱۲]. از ویژگی‌های این روش می‌توان به استفاده از موجک‌ها در ازای

2- Post Modern Control

3- Neural Networks (NN)

4- Feedforward

5- Recurrent Neural Networks (RNN)

6- Radial Basis Function (RBF)

7- Wavelets

1- Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

و در ادامه نیز نتایج شبیه سازی مسیر طولی پرواز هواپیمای بدون سرنشین بیان شده اند.

## ۲- مدل دینامیکی هواپیمای بدون سرنشین

برای این که بتوان یک کنترل کننده مناسب برای یک سامانه طراحی نمود، داشتن شناخت کافی از دینامیک سامانه مذکور بسیار حائز اهمیت می باشد. در این بخش معادلات دینامیکی حاکم بر سامانه ارائه شده اند. معادلات حرکت در سه جهت طول، ارتفاع و عرض به ترتیب عبارتند از [۱۸] (شکل ۱):

$$\left(\frac{mu}{Sq} s - C_{X_u}\right) u(s) - C_{X_\alpha} \alpha(s) - C_{X_w} (\cos \Theta) \theta(s) = 0 \quad (۱)$$

$$-C_{Z_u} u(s) \left[ \left(\frac{mu}{Sq} - \frac{c \cdot C_{Z\dot{\alpha}}}{2u}\right) s - C_{Z_\alpha} \right] \alpha(s) + \left[ \left(-\frac{mu}{Sq} - \frac{c \cdot C_{Z\dot{q}}}{2u}\right) s - C_w (\sin \Theta) \right] \theta(s) = 0 \quad (۲)$$

$$\left(-\frac{c \cdot C_{m\dot{\alpha}}}{2u} s - C_{M_u}\right) \alpha(s) + \left(\frac{I_y}{Sqc} s^2 - \frac{c \cdot C_{m\dot{q}}}{2u} s\right) \theta(s) = 0 \quad (۳)$$

که در آن،  $u$  تغییرات سرعت در مسیر طولی پرواز،  $\alpha$  تغییرات زاویه حرکت در مسیر پرواز،  $\Theta$  زاویه گام،  $\theta$  تغییرات زاویه گام نسبت به حالت پایدار و بنابراین  $u = u/U_0$  و  $\alpha = w/U_0$  که  $u$  انحراف سرعت در مسیر طولی،  $w$  انحراف سرعت در مسیر ارتفاع و  $U_0$  سرعت طولی هواپیما در حالت پایدار می باشد. همچنین، سایر ضرایب مورد نیاز در جداول ۱-۲ ارائه شده اند.

جدول (۱): ضرایب یک UAV نمونه.

مقدار	ضریب
5 [Kg]	$m$
12 [m/sec]	$U_0$
۹/۸۰۷ [m/sec <sup>2</sup> ]	$g$
۰/۴۲۰۵ [m <sup>2</sup> ]	$S$
۰/۱۳۲۳ [m <sup>2</sup> ]	$S_{verticaltail}$
۱/۲۲۶ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$
۰/۱۲۰۴ [m <sup>4</sup> ]	$I_{yy}$
۰/۲۳۵ [m]	$L_t/c$

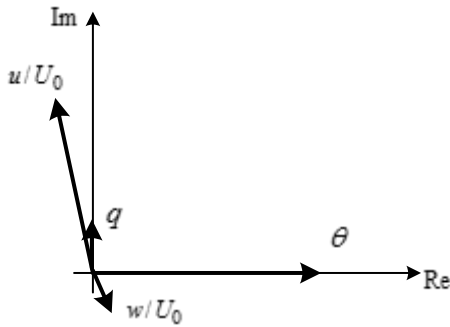
توابع رایجی که در شبکه های عصبی معمول استفاده می شود، (نظیر توابع سیگموئید<sup>۱</sup>) اشاره نمود که باعث افزایش دقت کنترل کننده شده است. همان گونه که در شبکه های عصبی معمول نیز بیان شد، استفاده از فیدبک باعث بهبود کنترل کننده می شود و لذا استفاده از کنترلرهای شبکه عصبی با موجه فیدبک دار نتایج بهتری در مقایسه با سامانه های بدون فیدبک دارد [۱۴-۱۳].

از کنترل کننده های پسگام<sup>۲</sup> در هواپیماهای بدون سرنشین کوچک جهت کنترل مسیر استفاده شده است [۱۵]. همچنین اپینوزا<sup>۳</sup> و همکارانش با تلفیق کنترل کننده پسگام و مد لغزشی تلاش کردند تا نتایج کنترل کننده پسگام را بهبود ببخشند [۱۶]. از ویژگی های استفاده از این روش، قابلیت آن در حل سامانه ها با ساختار غیر خطی می باشد. از آنجاکه استفاده از روش های خطی سازی [۱۷] باعث بروز خطا در سامانه می شود، استفاده از این روش نتایج قابل قبولی دارد. از طرفی پیچیدگی استفاده از این روش منجر به عدم به کارگیری آن شده است.

رفتار کنترل کننده فازی به قوانین کنترل و توابع عضویت آن بستگی دارد. در نتیجه تنظیم این پارامترها برای این که فرآیند به درستی کنترل شود بسیار حائز اهمیت می باشد. در این مقاله یک روش برای تنظیم قوانین فازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه شده است تا سامانه نزدیک ترین پاسخ ممکن را نسبت به حالت مطلوب داشته باشد. در این روش، توابع عضویت قوانین فازی مشخص شده به نحوی تنظیم می شوند تا تابع خطای معرفی شده توسط یک مجموعه از اطلاعات ورودی و خروجی به کمترین مقدار خود برسد.

در این مقاله یک کنترل کننده فازی- الگوریتم ژنتیک جهت کنترل مسیر یک هواپیمای بدون سرنشین در یک مسیر طولی طراحی شده است. ساختار این کنترل کننده به نحوی است که قوانین و توابع عضویت کنترل کننده فازی توسط الگوریتم ژنتیک جهت کاهش خطای سامانه تنظیم می شوند. در بخش بعد یک مدل دینامیکی از مسیر خطی یک UAV ارائه شده است. در بخش ۳ به معرفی کنترل فازی و نحوه تنظیم آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته و در بخش ۴ نیز با استفاده از کنترل کننده فازی- الگوریتم ژنتیک و توابع عضویت و قوانین سامانه فازی کنترل کننده جهت کم کردن خطای سامانه تنظیم

1- Sigmoid  
2- Backstepping  
3- Espinoza

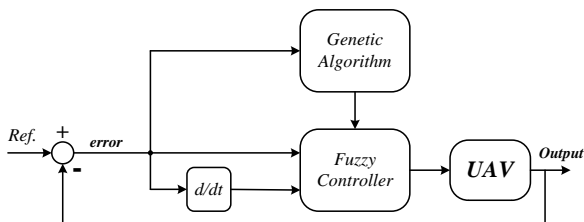


شکل (۲): دیاگرام فازوری حالت طولی در حالت پرواز کوتاه.

### ۳- کنترل کننده فازی

استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی ابتدا توسط پروفیسورزاده بیان شد [۱۹]. استفاده از مجموعه‌های فازی در کنترل هوشمند، باعث شد تا بدون نیاز به داشتن مدل ریاضی و محاسبات لازم جهت مدل‌سازی و شناسایی سامانه‌ها در روش‌های متعارف طراحی کنترل‌کننده‌ها، با به‌کارگیری تجربیات و نحوه تفکر افراد خبره در زمینه‌های مهندسی، طراحی کنترل‌کننده‌های هوشمند انجام شود. اصول کار تئوری منطق فازی تخصیص یک عدد در فضای آن به متغیرهای سامانه می‌باشد، به نحوی که بیانگر میزان تعلق متغیر به هر نقطه از فضا است. خود متغیرها نیز متغیرهای کلامی هستند، بدین معنی که می‌توانند واژه‌هایی از زبان طبیعی را به‌عنوان مقدار خود بگیرند. این واژه‌ها به‌وسیله مجموعه‌های فازی در محدوده‌ای که متغیرها تعریف شده‌اند، مشخص می‌شوند. کنترل‌کننده‌های فازی در یک فرایند حلقه‌بسته، با استفاده از مقادیر متغیرهای حالت سامانه و یا خطای حاصل از اختلاف خروجی سامانه با ورودی مرجع، سیگنال کنترل را به‌منظور هدایت سامانه به سمت حالت مطلوب، تولید می‌کنند.

ساختار کلی کنترل‌کننده فازی-الگوریتم ژنتیک در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل (۳): ساختار کنترل‌کننده فازی-الگوریتم ژنتیک.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، مقدار خروجی با مقدار مرجع مقایسه می‌شود و خطا،  $e$ ، و تغییرات خطا،  $de$ ،

از آنجا که در این روش تغییرات زاویه گام  $\theta$  نسبت به  $\delta_e$  موردنظر می‌باشد، لذا تابع تبدیل  $\theta/\delta_e$  از مرجع [۱۸] استفاده شده که عبارت است از (شکل ۲):

$$\frac{\theta(s)}{\delta_e(s)} = \frac{1.423s^2 + 0.134s + 1.839}{0.02424s^4 + 0.06838s^3 + 0.1s^2 + 0.0859s + 0.0836} \quad (4)$$

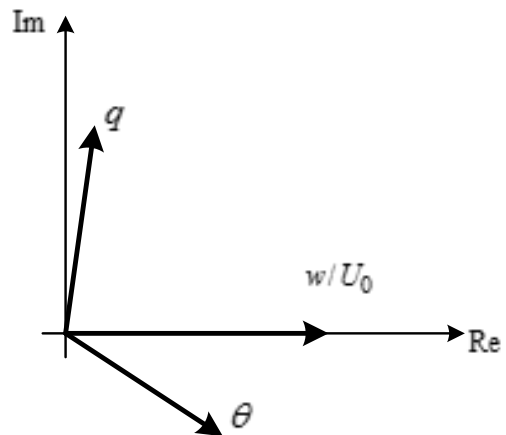
همچنین، ضرایب سامانه در حالت پرواز خطی در جدول ۳ نشان داده شده است [۱۸].

جدول (۲): ورودی‌ها و مبدل‌های پایدار یک UAV.

مقدار اضریب	مقدار اضریب
$C_{xu} = -0.0264$	$C_{Za} = -0.0347$
$C_{xa} = 1.2821$	$C_{Za} = -0.1381$
$C_D = 0.0132$	$C_{Zq} = -3.30$
$C_L = 1.3210$	$C_{Ma} = -0.0347$
$C_W = -1.3210$	$C_{Ma} = -0.0312$
$L_{t/c} = 1$	$C_{Mq} = -3.3$
$C_{Zu} = -2.6424$	$C_{X\delta_e} = 0$
$C_{Z\delta_e} = -0.71$	$C_{M\delta_e} = -0.71$

جدول (۳): مقادیر ضرایب UAV در مسیر پرواز طولی.

حالت پرواز کوتاه	حالت پرواز طولانی
$\zeta_{sm} = 0.517$	$\zeta_{pm} = 0.0147$
$\omega_{sm} = 2.1152 \text{ rad/sec}$	$\omega_{pm} = 1.1152 \text{ rad/sec}$
$T_{sm} = 0.9127 \text{ sec}$	$T_{pm} = 61.1027 \text{ sec}$



شکل (۱): دیاگرام فازوری حالت طولی در حالت پرواز طولانی.

روند کار الگوریتم ژنتیک بدین صورت است که، برای پیدا کردن جواب بهینه برای یک مساله، ابتدا الگوریتم ژنتیک با مجموعه‌ای از جواب‌های فرض شده شروع می‌کند و به‌طور پیاپی این مجموعه را طوری تغییر می‌دهد که خطای سامانه کاهش داده شود. انتظار داریم که تعداد تولیدمثل‌های یک والد، با برزندگی آن رابطه مستقیم داشته باشد. بنابراین این فرآیند، کروموزوم‌های بهتر با برزندگی بالا را انتخاب می‌کند و کروموزوم‌های بدتر را حذف می‌کند، این نکته قابل ذکر است که عملکرد الگوریتم ژنتیک تا حد زیادی به ملاک ارزیابی برزندگی بستگی دارد. عملگرهای ژنتیکی با استفاده از کروموزوم‌های انتخاب شده والد، کروموزوم‌های جدید فرزند را تولید می‌کنند. در هر نسل تکرار تابع هدف، میزان مناسب بودن هریک از جواب‌ها را تعیین می‌کند. سپس براساس این مقادیر، بعضی از آنها را برای تولید مثل انتخاب می‌کند که کروموزوم‌های والد نامیده می‌شوند. نوشتن یک تابع هدف مناسب، مهم‌ترین و معمولاً مشکل‌ترین بخش یک الگوریتم ژنتیک است. یک تابع هدف مناسب که به‌نحو هوشمندانه‌ای طراحی شده باشد، همگرایی به‌سمت پاسخ بهینه را تضمین می‌کند و نیز سرعت همگرایی را افزایش می‌دهد.

در کاربردهای کنترلی، تابع هدف معمولاً به‌صورت تابعی از خطای پاسخ خروجی در دنبال کردن ورودی موردنظر است. کوچک شدن این تابع باید نشان‌دهنده برزندگی بهتر جواب باشد. در این مقاله از معیار IAE به‌عنوان تابع هدف الگوریتم ژنتیک استفاده شده است که در آن:

$$I_{IAE} = \int_0^T |e(t)| dt \quad (5)$$

طراحی خودکار سیستم‌های براساس حل یک مسئله جست‌وجو و بهینه‌سازی که هدف آن طراحی پایگاه اطلاعات است، در نظر گرفت. سیستم‌های فازی که به‌منظور یادگیری و بهینه‌سازی پایگاه اطلاعات از الگوریتم ژنتیکی استفاده می‌کنند، سیستم‌های فازی-ژنتیک می‌نامند (شکل ۱). این روش براساس تنظیم پایگاه داده‌ها، یادگیری و تنظیم قوانین فازی و یادگیری پایگاه اطلاعات سعی بر بهبود توابع عضویت و قوانین فازی می‌شود.

جهت تنظیم قوانین فازی، ابتدا باید یک مجموعه از قوانین فازی تهیه شوند و در ادامه با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقادیر بهینه پارامترهای پایگاه داده‌ها که شامل توابع عضویت و توابع مقیاس‌گذاری هستند را یافت.

بخش کنترل کننده فازی وارد شده، از طرفی خطای سامانه به ورودی بلوک الگوریتم ژنتیک وارد می‌شود تا با توجه به کم کردن خطای سامانه، توابع عضویت و قوانین کنترل کننده فازی تنظیم شوند.

همان‌طور که در بخش قبل نیز اشاره شد، عملکرد درست و دقیق کنترل کننده‌های هواپیماهای بدون سرنشین می‌تواند در حرکت و پرواز تاثیر به‌سزایی بگذارد.

#### ۴- الگوریتم کنترل کننده فازی - ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، یکی از متداول‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی، بر پایه جست‌وجو بر مبنای ساختار طبیعی و ژنتیک موجودات زنده می‌باشد. استفاده از الگوریتم ژنتیک برای اولین بار توسط هولاند<sup>۱</sup> و همکارانش در دانشگاه میشیگان در سال ۱۹۶۲ مطرح شد [۲۰] و در سال‌های بعد توسط گلدبرگ<sup>۲</sup> در دانشگاه ایلی‌نویز گسترش یافت [۲۱]. اساس کار این روش به‌گونه‌ایست که سعی می‌کند فرآیند تکامل تدریجی طبیعت را شبیه‌سازی کند. علی‌رغم این که به‌دلیل انتخاب نقطه شروع الگوریتم به‌صورت اتفاقی انتخاب می‌کند، ساختار این روش تصادفی به‌نظر می‌رسد، اما ساختار به‌دست آمده، قانونمند و هوشمندانه بوده و به‌عنوان یک روش جست‌وجو و بهینه‌سازی در بسیاری از علوم و مسایل کاربرد گسترده‌ای یافته است. اساس کار در این الگوریتم بر پایه بررسی برزندگی شرایط قبلی و سعی در بهینه‌سازی شرایط بعدی استوار است.

الگوریتم ژنتیک در مقایسه با سایر روش‌های جست‌وجو، مزایای قابل توجهی دارد. از جمله این که این الگوریتم به‌جای تکیه‌داشتن بر روی یک جواب و بهینه‌سازی آن در تکرارهای بعدی، بر روی دسته‌ای از جواب‌ها به‌طور همزمان کار می‌کند و به تدریج به سمت نقطه بهینه همگرا می‌شود. بنابراین، احتمال این که در جواب حاصل به‌صورت اتفاقی در مینیمم‌های موضعی قرار بگیرد، بسیار کم است. همچنین، نحوه داده‌پردازی الگوریتم ژنتیک به‌نحوی است که تنها به اطلاعات ورودی - خروجی فرایند نیاز دارد و بنابراین هیچ‌گونه قیدی از جمله خطی بودن، پیوستگی و یا مشتق پذیر بودن بر تابع هدف تحمیل نمی‌کند در نتیجه گستردگی کاربرد این روش در گروه وسیعی از مسائل قابل استفاده است.

1- J. Holland

2- D.E. Goldberg

الگوریتم ژنتیک تعیین گردند. از آنجا که، باتوجه به تغییرات سامانه می‌توان محدوده تغییرات متغیرهای سامانه را تعیین نمود، برای بازه تغییرات پارامترها، بازه  $[3, -3]$  را فرض می‌کنیم. مجموعه تعریف متغیرهای  $A_i$ ،  $B_i$  و  $C_i$  نیز عبارت است از  $\{NB, NS, ZE, PS, PB\}$ .

همچنین، قوانین فازی مورد استفاده بر پایه تاثیر تغییرات ضرایب کنترل کننده بر خطا و تغییرات آن می‌باشد. به‌ازای هر یک از ضرایب کنترل کننده سامانه، ۲۵ قانون مطابق جدول ۴ تعریف می‌شود.

جدول (۴): قوانین کنترل فازی.

$e \setminus de$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	$x_1$	$x_6$	$x_{11}$	$y_{10}$	$y_5$
NS	$x_2$	$x_7$	$x_{12}$	$y_9$	$y_4$
ZE	$x_3$	$x_8$	0	$y_8$	$y_3$
PS	$x_4$	$x_9$	$y_{12}$	$y_7$	$y_2$
PB	$x_5$	$x_{10}$	$y_{11}$	$y_6$	$y_1$

معمولا در سامانه‌هایی که از کنترل کننده‌های فازی به تنهایی استفاده می‌کنند، محاسبه ضرایب قوانین فازی به صورت تجربی، سعی و خطا و باتوجه به ساختار سامانه به‌دست می‌آیند. جهت بهینه‌نمودن پاسخ سامانه بایستی ضرایب قوانین فازی را به‌نحوی محاسبه نمود تا خطای سامانه کمینه گردد. برای این منظور از روش‌های بهینه‌سازی نظیر الگوریتم ژنتیک می‌توان استفاده نمود. در جدول قوانین فازی به‌طور تجربی می‌توان فرض نمود که مقادیر  $x_i = y_i$ ،  $i = 1, \dots, 12$  هستند. همچنین، مقادیر زبانی  $\{NB, NS, ZE, PS, PB\}$  نیز مطابق جدول ۵ تعریف می‌شوند.

جدول (۵): مقادیر زبانی قوانین کنترل فازی.

مقدار زبانی	NB	NS	ZE	PS	PB
متغیر $x_i = y_i$	۱	۲	۳	۴	۵

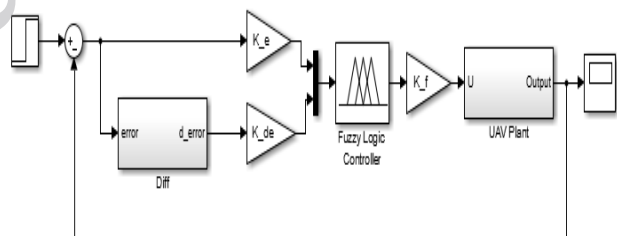
باتوجه به تشابهی که متغیرهای  $A_i$ ،  $B_i$  و  $C_i$  دارند، مقادیر توابع عضویت آنها همانند شکل ۵ به‌دست می‌آیند.

همچنین، جهت یافتن قوانین فازی، ابتدا فرض می‌شود که توابع عضویت معین و مشخص هستند و هدف رسیدن به قوانین فازی می‌باشد. برای رسیدن به قوانین فازی می‌توان از سه روش میشیگان<sup>۱</sup>، پیتز<sup>۲</sup> و روش یادگیری قوانین با تکرار استفاده نمود. در روش میشیگان، جهت نمایش هر قانون فازی از یک کروموزوم استفاده می‌شود [۲۲]. ولی در روش پیتزبرگ، تمامی قوانین فازی با یک کروموزوم نشان داده می‌شوند و ژن‌های کروموزوم معرف قوانین فازی هستند [۲۳]. روش سوم، ترکیب دو روش قبل است. در این روش برای هر قانون فازی یک کروموزوم معین می‌شود و هر قانون فازی با روش تکرار و انجام الگوریتم ژنتیک وارد پایگاه قوانین فازی می‌شود [۲۴].

جهت یادگیری ژنتیکی پایگاه اطلاعات نیز، فرض می‌شود که هیچ کنترل کننده از پیش تعریف شده‌ای موجود نیست و هدف دستیابی به کل پایگاه اطلاعات هستیم. در نتیجه برای توابع عضویت و قوانین فازی کروموزوم‌هایی مشخص می‌شوند.

#### ۵- طراحی کنترل کننده فازی - الگوریتم ژنتیک

دیگرام بلوکی کنترل کننده فازی - الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب را به‌صورت شکل ۴ طراحی می‌کنیم.



شکل (۴): مدل سیمولینک کنترل کننده فازی.

مقدار اولیه بلوک‌های ضرب کننده را به‌صورت زیر فرض می‌کنیم:

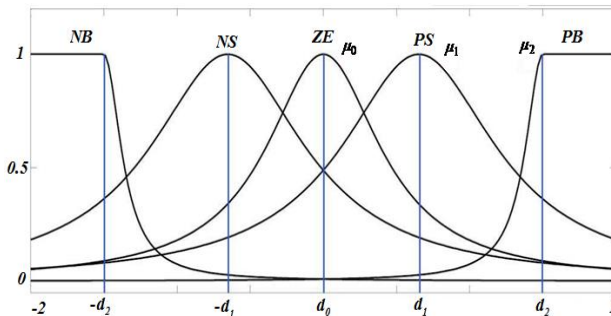
$$\begin{aligned} K_e &= 1 \\ K_{de} &= 1 \\ K_f &= 10 \end{aligned} \quad (۶)$$

یک نمونه از این قوانین فازی عبارت است از:

$$\text{If } e \text{ is } A_i \text{ and } de \text{ is } B_i \text{ then } u \text{ is } C_i \quad (۷)$$

که در آن، پارامترهای  $A_i$ ،  $B_i$  و  $C_i$  مقادیر زبانی متغیرهای  $e$ ،  $de$  و  $u$  به‌ازای دستور  $i$  ام می‌باشند که باید توسط

حاصل با نتایج سامانه به‌ازای کنترل کننده رایج PID مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همان گونه که بیان شد، کنترل مسیر طولی در هواپیماهای بدون سرنشین به دلیل اهمیتی که در شناسایی دارند، یکی از مهمترین بخش‌های این سامانه‌ها می‌باشد. ساختار این کنترل کننده براساس مدل ریاضی سامانه می‌باشد. از آنجاکه معمولا مدل دقیقی از سامانه به دلیل وجود نامعینی، غیرخطی بودن، تاخیر، اغتشاش و نظیر آن موجود نبوده و کنترل مناسب صورت نمی‌گیرد که در برخی موارد موجب بروز خطا و حتی خارج شدن هواپیما از مسیر خود در اثر کنترل نادرست مسیر پرواز می‌گردد، داشتن یک کنترل کننده هوشمند به نحوی که با تغییرات خطا بتواند خود را منطبق کند، حائز اهمیت است. در روش ارائه شده با توجه به میزان خطای سامانه، مقادیر توابع عضویت و قوانین فازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تنظیم می‌شوند تا سامانه دارای کمترین مقدار خطا باشد. سامانه مفروض با استفاده از نرم افزار MATLAB به‌ازای دو کنترل کننده مذکور شبیه‌سازی شده است. منحنی‌های خروجی سامانه به‌ازای کنترل کننده فازی- الگوریتم ژنتیک ارائه شده به همراه کنترل کننده PID رایج در شکل ۷ نشان داده شده‌اند و شکل ۸ نیز منحنی خطاهای حاصل از دو کنترل کننده فوق را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور، مشاهده می‌شود که میزان بالازدگی در روش فازی- الگوریتم ژنتیک نسبت به کنترل کننده PID معمول کاهش یافته که از بروز خطاهای احتمالی در اثر تغییرات مسیر پرواز کاسته می‌شود. از طرفی سرعت سامانه در کنترل کننده مفروض کم‌تر از حالت معمول می‌باشد. در مرجع [۱۸] با استفاده از یک روش کمینه کردن خطا، مقادیر پارامترهای کنترل کننده PID را محاسبه نموده است (جدول ۶). همچنین، مقادیر مناسب جریمه در طراحی توابع عضویت و قوانین فازی کنترل کننده محاسبه شده پارامترهای قوانین فازی و توابع عضویت نیز مطابق جداول ۸-۷ به دست آمده‌اند. همچنین، مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی شده در هر دو روش در جدول ۹ با هم مقایسه شده‌اند. همان گونه که مشاهده می‌شود مقدار زمان صعود در روش کنترل کننده PID نسبت به روش ارائه شده اندکی بهتر بوده و در سایر پارامترها، روش پیشنهادی مناسب‌تر می‌باشد. از آنجاکه سامانه پرواز UAV نسبتا لخت است این تغییر در زمان صعود نیز قابل چشم‌پوشی است.



شکل (۵): منحنی توابع عضویت.

با فرض  $d_0 = 0$  توابع عضویت مقادیر زبانی را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\mu_i(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - d_i}{s_i}\right)^2}, \quad i = 0, 1 \tag{۸}$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \left(\frac{x - d_2}{s_2}\right)^2}, & \text{for } x \leq d_2 \\ 1, & \text{for } x \geq d_2 \end{cases} \tag{۹}$$

#### ۵-۱- ساختار کروموزوم در الگوریتم ژنتیک

براساس آنچه که بیان شد، جهت تکمیل کنترل کننده فازی موجود در شکل ۴، پارامترهای نامعین  $d_i$  و  $s_i$  ( $i = 0, 1, 2$ ) مربوط به توابع عضویت  $e$ ،  $de$  و  $u$  و همچنین، مقادیر  $x_i$  ( $i = 0, \dots, 12$ ) را با روش الگوریتم ژنتیک محاسبه کنیم. در نتیجه یک دنباله از مجموع ژن‌های زیر را برای کروموزوم‌های سامانه تعریف می‌کنیم:

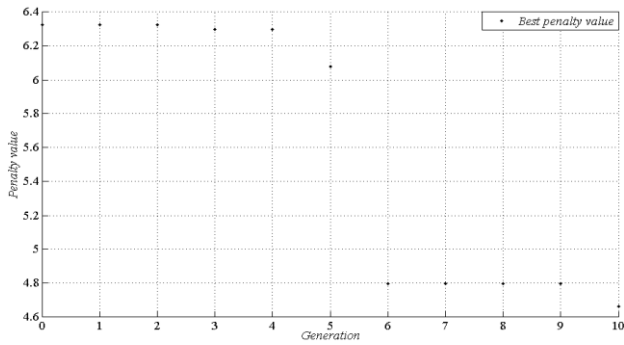
$x_1$	$x_2$	...	$x_{12}$	$s_0^e$	$s_1^e$	$s_2^e$	$d_1^e$	$d_2^e$	$s_0^{de}$	...	$d_2^{de}$	$s_0^u$	...	$d_2^u$
-------	-------	-----	----------	---------	---------	---------	---------	---------	------------	-----	------------	---------	-----	---------

شکل (۶): ساختار یک ژن در کروموزوم.

بنابراین طول هر ژن ۲۶ است. لازم به ذکر است که مجموعه تعریف  $x_i$  ها اعداد صحیح متعلق به مجموعه  $\{1, 2, 3, 4, 5\}$  بوده و پارامترهای  $d_i$  ها و  $s_i$  ها اعداد حقیقی هستند. تابع هدف الگوریتم ژنتیک را نیز رابطه (۵) فرض می‌کنیم.

#### ۶- نتایج شبیه‌سازی مسیر طولی UAV

در این بخش نتایج شبیه‌سازی مسیر پرواز طولی هواپیما با استفاده از روش فازی- الگوریتم ژنتیک ارائه شده‌اند و نتایج



شکل (۸): مقادیر مناسب جریمه در محاسبه توابع عضویت و قوانین فازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک.

جدول (۸): مقادیر توابع عضویت محاسبه شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$s_0^e$	۰/۹۰۲۴	$s_2^{de}$	۰/۷۰۳۳
$s_1^e$	۰/۲۸۴۳	$d_1^{de}$	۰/۹۲۸۳
$s_2^e$	۰/۴۱۹۱	$d_2^{de}$	۱/۷۱۵۵
$d_1^e$	۰/۴۳۶۳	$s_0^u$	۰/۵۱۰۹
$d_2^e$	۱/۴۲۹۰	$s_1^u$	۰/۸۰۷۱
$s_0^{de}$	۰/۴۶۸۶	$s_2^u$	۰/۸۳۹۲
$s_1^{de}$	۰/۴۸۵۷	$d^u$	۰/۲۰۲۷

جدول (۹): مقادیر پارامترهای سامانه در دو روش شبیه سازی شده.

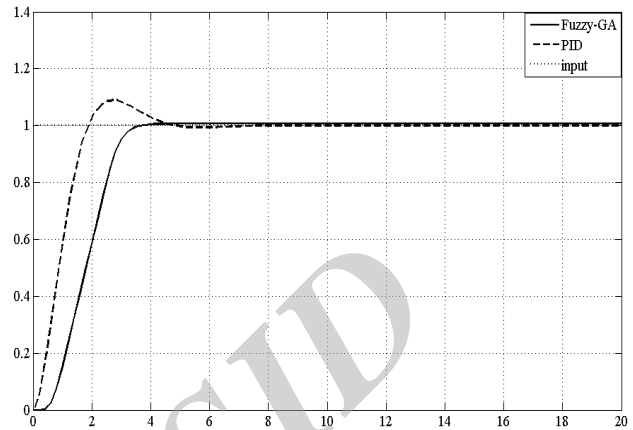
Fuzzy-GA	PID	جهش
۰٪	۰/۸۹٪	زمان صعود
sec ۳/۲۷	sec ۱/۹۸	زمان نشست
sec ۷/۳۶	sec ۳/۴۲	خطای ماندگار
۰/۱۶۳	۰/۰۵۷	

### ۷- نتیجه گیری

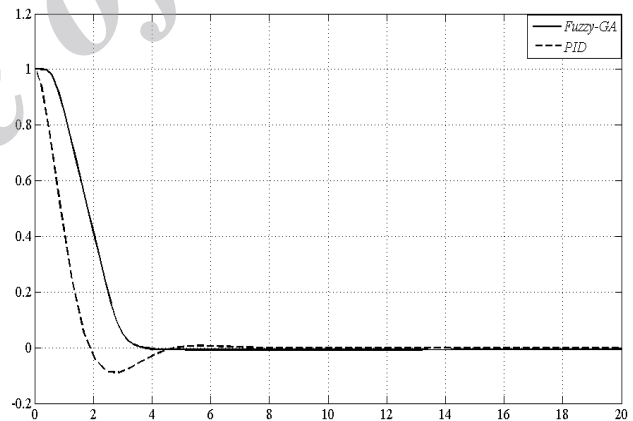
در این مقاله، یک روش کنترلی براساس کنترل کننده فازی- الگوریتم ژنتیک جهت کنترل پرواز مسیر طولی هواپیمای بدون سرنشین ارائه گردید. از ویژگی های این روش، استفاده از قوانین هوشمند فازی در کنترل هواپیما می باشد. در کنترل کننده های PID معمول میزان این ضرایب ثابت می باشد و در زمان کار سامانه تغییر نمی کنند. در روش ارائه شده جهت بهیمنگی پاسخ سامانه، توابع عضویت و قوانین فازی باتوجه به

جدول (۶): مقادیر کنترل کننده PID [۱۸].

$K_D$	$K_I$	$K_p$	مقدار
۰/۷۲۸۱۵۷	۱/۹۴۵۴۹	۱/۱۵۵۴۱۵	



شکل (۷): نتایج شبیه سازی کنترل پرواز UAV با استفاده از کنترل کننده های PID و فازی- الگوریتم ژنتیک.



شکل (۶): خطای حاصل از کنترل پرواز UAV با استفاده از کنترل کننده های PID و فازی- الگوریتم ژنتیک.

جدول (۷): قوانین فازی محاسبه شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک.

$e \setminus de$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	3	2	1	2	2
NS	1	4	2	3	4
ZE	4	1	0	1	4
PS	4	3	2	4	1
PB	2	2	1	2	3



- Collision Avoidance System Design”, *Neural Computing and Applications*, Vol. 21, No. 8, pp. 2163-2169, 2012.
10. Wang, Sh., Li, B. and Geng, Q. “Research of RBF Neural Network PID Control Algorithm for Longitudinal Channel Control of Small UAV,” 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), pp. 1824- 827, 2013.
  11. Yousef, H.A., Elkhatib, M.E. and Sebakhy, O.A. “Wavelet Networkbased Motion Control of DC Motors”, *Expert System Application*, Vol. 37, No. 2, pp. 1522–1527, 2010.
  12. Lin, C.M., Lin, M.H. and Yeh, R.G. “Synchronization of Unified Chaotic System Via Adaptive Wavelet Cerebellar Model Articulation Controller”, *Neural Computing and Applications*, Vol. 23, No. 3-4, pp. 965-973, 2012.
  13. Lin, C.J. and Chin, C.C. “Prediction and Identification using Wavelet-Based Recurrent Fuzzy Neural Networks”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, Vol. 34, No. 5, pp. 2144–2154, 2004.
  14. Yoo, S.J., Park, J.B. and Choi, Y.H. “Adaptive Dynamic Surface Control of Flexible-Joint Robots using Self-Recurrent Wavelet Neural Networks”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, Vol. 36, No. 6, pp. 1342–1355, 2006.
  15. Sartori, D., Quagliotti, F., Rutherford, M.J. and Valavanis, P.K. “Implementation and Testing of a Backstepping Controller Autopilot for Fixed-wing UAVs,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 76, No. 3-4, pp. 505-525, 2014.
  16. Espinoza, T., Dzul, A.E., Lozano, R. and Parada, P. “Backstepping - Sliding Mode Controllers Applied to a Fixed-Wing UAV”, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 73, No. 1-4, pp. 67-79, 2014.
  17. Zhou, W., Yin, K., Wang, R. and Wang, Y.E. “Design of Attitude Control System for UAV Based on Feedback Linearization and Adaptive Control”, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2014, 2014.
  18. Turkoglu, K., Ozdemir, U., Nikbay, M. and Jafarov, E.M. “PID Parameter Optimization of an UAV Longitudinal Flight Control System,” *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, Vol. 2, No. 9, pp. 35-40, 2008.
  19. Zadeh, L.A. “Fuzzy Sets”, *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353, 1965.
  20. Holland, J.H. “Outline for a Logical Theory of Adaptive Systems”, *Journal of the ACM*, Vol. 9, No. 3, pp. 297-314, 1962.
  21. Goldberg, D.E. “Computer-Aided Pipeline Operation using Genetic Algorithms and Rule Learning, Doctoral Dissertation”, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 1983.

خطای حاصل از خروجی سامانه نسبت به ورودی آن با به کارگیری الگوریتم ژنتیک محاسبه و استفاده می‌شوند. باتوجه به اختلال‌هایی که در حین کار در این نوع سامانه‌ها به وجود می‌آید، داشتن یک کنترل کننده هوشمند به نحوی که ضرایب کنترل کننده را بتواند در هر لحظه تنظیم نماید باعث کاهش خطاهای احتمالی در سامانه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نیز برتری این روش را نسبت به روش‌های کنترلی معمول نشان می‌دهد.

#### ۸- مراجع

1. Tang, J.S. “Non-Linear Control using Discrete-Time Dynamic Inversion under Input Saturation: Theory and Experiment on the Stanford Dragonfly UAVs”, PhD Thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, 2004.
2. Kellogg, J., Kahn, A., Barrows, G., Bovais, C., Cylinder, D., Foch, R., Gardner, J., Hartley, R., Behrooz, K.P., Pipitone, F., Ramamurti, R., Srull, D. and Vaiana, P. “Navigation and Flight Control Systems for Micro Air Vehicles”, 18th Bristol International UAV Systems Conference, pp 1–21, 2003.
3. Kingston, D., Beard, R., McClain, T., Larsen, M. and Ren, W. “Autonomous Vehicle Technologies for Small Fixed-Wing UAVs”, 2nd Unmanned Unlimited Systems, Technologies, and Operations-Aerospace, Land, and Sea Conference, pp. 1-10, 2003.
4. Ali, U., Shah, M.Z., Samar, R. and Bhatti, A.I. “Robust Level Flight Control Design for Scaled Yak-54 Unmanned Aerial Vehicle using Single Sliding Surface”, 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), pp. 1209–1214, 2012.
5. Lin, C.M., Tai, C.F. and Chung, C.C. “Intelligent Control System Design for UAV using a Recurrent Wavelet Neural Network” *Neural Computing and Applications*, Vol. 24, No. 2, pp 487-496, 2014.
6. Lin, C.M., Ting, A.B., Li, M.C., Chen, T.Y. “Neural-Networkbased Robust Adaptive Control for a Class of Non-Linear Systems”, *Neural Comput Application*, Vol. 20, No. 4, pp. 557–563, 2011.
7. Kurnaz, S., Cetin, O. and Kaynak, O. “Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Based Autonomous Flight Control of Unmanned Air Vehicles”, *Expert System Application*, Vol. 37, No. 2, pp.1229–1234, 2010.
8. Peng, Y.F. and Lin, C.M. “Intelligent Motion Control of Linear Ultrasonic Motor with  $H_{\infty}$  Tracking Performance,” *IET Proceeding Control Theory Application*, Vol. 1, No. 1, pp. 9–17, 2007.
9. Mon, Y.J. and Lin, C.M. “Supervisory Recurrent Fuzzy Neural Network Control for Vehicle

- Algorithm”, *Journal of Systems Engineering*”, Vol. 1, pp. 114-118, 1991.
24. Gonzalez, A. and Perez, R. “A Genetic Learning System Based on an Iterative Approach”, *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 2, pp. 176-191, 1999.
22. Bonarini, A. “Evolutionary Learning of Fuzzy Rules: Competition and Cooperation, *Fuzzy Modelling, International Series in Intelligent Technologies*”, Vol. 7, pp. 265-283, 1996.
23. Pham, D.T. and Karaboga, D. “Optimum Design of Fuzzy Logic Controllers Using Genetic

Archive of SID