

استفاده از الگوریتم ژنتیک در موشک‌های هدایت شونده

علیرضا رضائی^۱
arzaee@aut.ac.ir

چکیده

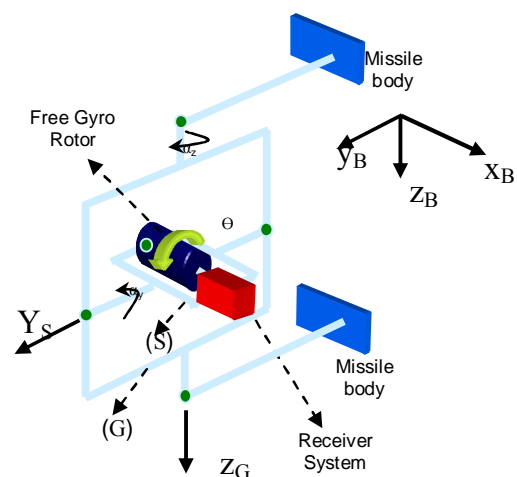
امروزه بسیاری از موشک‌های هدایت شونده که دارای گیرنده و ردیاب هدف می‌باشند برای هم راستا نگه‌داشتن زاویه خط دید و زاویه جهت‌گیری موشک از ژيروسکوپ استفاده می‌نمایند. حل معادلات دینامیکی ژيروسکوپ‌ها در حالت کامل و با در نظر گرفتن کلیه نویزهای ورودی از قبیل تکان‌های موشک، اغتشاشات مغناطیسی ناشی از اثر کویل‌های محرک ژيروسکوپ و ... کاری زمان‌بر و گاهی غیرممکن است. در اکثر موارد در محاسبات عملیاتی برای حل معادلات دینامیکی ژيروسکوپ و یافتن تکان‌های حرکتی و زاویه‌ای آن از مدل ساده شده استفاده می‌شود. برای آنکه مدل ساده شده معادلات دینامیکی با دقت خوبی معادل معادلات دینامیکی باشد می‌توان زوایای اولر را به گونه‌ای تعیین کرد که این خواسته برآورده شود. یافتن این زوایا و نرخ تغییرات مرتبه اول و دوم آنها در حالت عادی کاری است که نیازمند حل معادلات دیفرانسیل است. در این مقاله با استفاده از روش‌های الگوریتم ژنتیک و Particle Swarm Optimization این کار انجام شده است.

کلیدواژه:

موشک - ژيروسکوپ - الگوریتم ژنتیک - Particle Swarm

۱- مقدمه

کلمه ژيروسکوپ برای اولین بار در سال ۱۸۵۲ توسط فوکو به کار گرفته شد. در این سال فوکو از یک ژيروسکوپ ابتدایی برای اندازه‌گیری سرعت دوران زمین استفاده کرد. این دانشمند فرانسوی چندی قبل از آن توانسته بود با استفاده از یک آونگ بلند که امروزه به آونگ فوکو معروف است حرکت دورانی زمین را آشکار کند. توجیه پدیده با دانسته‌های امروزی ما ساده است: آونگ یا هر جسم صلبی که حرکت دورانی داشته باشد دارای تکانه زاویه‌ای است. اگر گشتاور وارد بر این جسم صفر باشد، بنابر قانون بقای تکانه زاویه‌ای، محور دوران آن در فضا ثابت مانده و یک محور مرجع لخت تشکیل می‌دهد که باعث آشکار شدن حرکت زاویه‌ای اشیای اطرافش می‌گردد. به این ترتیب می‌توان حرکت دورانی زمین را آشکار کرده و سرعت زاویه‌ای آن را اندازه گرفت. به همین دلیل فوکو این وسیله را ژيروسکوپ نامید که از دو کلمه یونانی Gyros (به معنای دوران) و Skopein (به معنای نمایاندن) ریشه گرفته است و می‌توان معادل فارسی دوران نما یا سویاب را به آن نسبت داد. در شکل (۱) نمایی از یک جستجوگر ژيروسکوپ آزاد دیده می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود با دوران طوغه‌های بیرونی و درونی سامانه بینایی آزاد نسبت به بدنه موشک دارد. این سامانه روی طوغه درونی نصب شده است و علاوه بر آن روتور ژيروسکوپ آزاد نیز روی این طوغه قرار دارد که با سرعت زاویه‌ای زیاد دوران می‌کند. جهت مدل‌سازی ژيروسکوپ آزاد و نحوه تعیین خطا، دستگاه‌های مختصات مختلفی به شکل زیر تعریف می‌شوند. مرکز تمام این دستگاه‌های مختصات را در محل تقاطع محور طوغه درونی و محور طوغه بیرونی در نظر می‌گیریم.



شکل (۱): نمای شماتیک دستگاه مختصات یک جستجوگر ژيروسکوپ آزاد

ژيروسکوپ آزاد مورد استفاده در جستجوگرهای موشک‌های هدایت شونده از نظر ساختمانی با ژيروسکوپ نشان داده شده در شکل (۱) متفاوت است. معمولاً در جستجوگرها روتور ژيروسکوپ خارج از طوغه‌ها قرار می‌گیرد و به همین دلیل به آن ژيروسکوپ معکوس گفته می‌شود. ولی این تفاوت از لحاظ عملکردی و مدلسازی تأثیری نداشته و معادلاتی که به دست می‌آوریم در هر دو نمونه قابل استفاده می‌باشد.

۲- دستگاه‌های مختصات ژيروسکوپ

الف- دستگاه مختصات اینرسی $ox_1y_1z_1$ دستگاهی است که نسبت به ستارگان دور دست ثابت می‌باشد. به عبارت دقیق‌تر دستگاهی است که هیچ گونه حرکت زاویه‌ای ندارد و قانون دوم نیوتن در آن صادق است. محوره‌های این دستگاه مختصات را طوری در نظر می‌گیریم که در لحظه پرتاب موشک بر دستگاه مختصات بدنی منطبق باشد.

ب- دستگاه مختصات بدنی $ox_By_Bz_B$ محور XB دستگاه مختصات بدنی را در راستای محور طولی موشک و محور ZB را در راستای لولای طوغه بیرونی در نظر می‌گیریم، محور YB به شکلی تعیین می‌شود که دستگاه راستگرد باشد.

ج- دستگاه مختصات طوغه بیرونی $ox_Gy_Gz_G$ این دستگاه مختصات را چسبیده به طوغه بیرونی طوری در نظر می‌گیریم که با دوران به اندازه زاویه a_z حول محور ZB از دستگاه بدنی به این دستگاه مختصات برسیم.

د- دستگاه مختصات طوغه درونی $ox_gy_gz_g$ این دستگاه مختصات را چسبیده به طوغه درونی طوری در نظر می‌گیریم که با دوران به اندازه زاویه a_y حول محور Yg از دستگاه طوغه بیرونی به این دستگاه مختصات برسیم.

ه- دستگاه مختصات روتور $ox_Ry_Rz_R$ این دستگاه مختصات را چسبیده به روتور جستجوگر طوری در نظر می‌گیریم که با دوران به اندازه زاویه ϕ_R حول محور Xg از دستگاه طوغه درونی به این دستگاه مختصات برسیم.

و- دستگاه مختصات خط دید $ox_Ly_Lz_L$ محور x_L این دستگاه مختصات در راستای خط دید هدف قرار دارد. θ_L, ψ_L زوایای اوپلر مربوط به بیان دستگاه خط دید هستند. بدین صورت که برای رسیدن به دستگاه مختصات خط دید، ابتدا با دوران حول محور z_L به اندازه ψ_L به دستگاه مختصات $(ox_1y_1z_1)$ می‌رسیم. سپس با دوران حول y_L به اندازه θ_L به دستگاه خط دید می‌رسیم.

ز- دستگاه مختصات ردیاب $ox_Dy_Dz_D$ محور x_D این دستگاه مختصات در راستای محور ردیابی سامانه بینایی (محور x_S) قرار دارد. θ_D, ψ_D زوایای اوپلر مربوط به دستگاه ردیاب هستند. بدین

$${}^D\bar{\omega}_{D/I} = {}^D\bar{\omega}_{D/2} + {}^D C_D \cdot {}^D\bar{\omega}_{2/I} = \begin{bmatrix} 0 \\ \theta_D^* \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C\theta_D & 0 & -S\theta_D \\ 0 & 1 & 0 \\ S\theta_D & 0 & C\theta_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \psi_D^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

بنابراین سرعت زاویه‌ای دستگاه ردیاب نسبت به اینرسی به شکل زیر حاصل می‌شود:

$${}^D\bar{\omega}_{D/I} = \begin{bmatrix} -S\theta_D \cdot \psi_D^* \\ \theta_D^* \\ C\theta_D \cdot \psi_D^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

حال می‌توان سرعت زاویه‌ای روتور را نسبت به اینرسی به کمک رابطه زیر به دست آورد:

$$\bar{\omega}_{R/I} = \bar{\omega}_{R/D} + \bar{\omega}_{D/I} \quad (5)$$

بنابراین سرعت زاویه‌ای روتور نسبت به اینرسی به شکل زیر حاصل می‌شود:

$${}^D\bar{\omega}_{R/I} = \begin{bmatrix} -S\theta_D \cdot \psi_D^* + \omega_s \\ \theta_D^* \\ C\theta_D \cdot \psi_D^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

می‌دانیم که حاصلضرب لنگر لختی در سرعت زاویه‌ای یک جسم، برابر اندازه حرکت زاویه‌ای می‌شود، لذا برای روتور داریم:

$$\bar{H}_R = I_R \bar{\omega}_{R/I} \quad (7)$$

با توجه به تقارن روتور حول محور عرضی آن و تعریف دستگاه مختصات ردیاب، این دستگاه مختصات، دستگاه اصلی (Principal Coordinate System) روتور، که در آن ماتریس لختی دورانی، قطری است، خواهیم داشت:

$${}^D I_R = \begin{bmatrix} I_R & 0 & 0 \\ 0 & I_r & 0 \\ 0 & 0 & I_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

برای اندازه حرکت زاویه‌ای روتور نیز داریم:

$${}^D \bar{H} = {}^D I_R \cdot {}^D \bar{\omega}_{R/I} = \begin{bmatrix} I_R (-S\theta_D \cdot \psi_D^* + \omega_s) \\ I_r \theta_D^* \\ I_r C\theta_D \cdot \psi_D^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

اگر مولفه‌های بردار گشتاور وارده بر روتور در دستگاه ردیاب را به صورت زیر نمایش دهیم.

$${}^D \bar{T} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

با توجه به قانون دوم نیوتن داریم که مشتق اندازه حرکت زاویه‌ای برابر گشتاور وارده است:

$$\bar{T} = P_{/I} (\bar{H}_R) \quad (11)$$

برای محاسبه مشتق از قضیه کوریولیس استفاده می‌کنیم. بنابراین

صورت که برای رسیدن به دستگاه مختصات ردیاب، ابتدا با دوران حول محور z_I با اندازه ψ_D به دستگاه مختصات $(ox_2 y_D z_I)$ می‌رسیم. سپس با دوران حول y_D به اندازه θ_D به دستگاه مختصات ردیاب می‌رسیم.

ح- دستگاه مختصات چسبیده به زمین NED مبدأ این دستگاه مختصات را بر خلاف سایر دستگاه‌ها یک نقطه ثابت بر روی زمین (مثلاً نقطه پرتاب موشک) در نظر می‌گیریم. این دستگاه دارای سه محور N ، E و D است. محور N ، به سمت شمال جغرافیایی و محور E ، به سمت شرق است بطوری که N و E در صفحه افق محلی قرار گیرند. محور D عمود بر بیضوی مبنای قرار دارد بطوری که دستگاه متعامد راستگرد باشد.

با توجه به تعریف دستگاه‌های مختصات بدنی، طوغه بیرونی، طوغه درونی و روتور، واضح است که a_z ، a_y و ϕ_R زوایای اویلر مربوط به دوران از دستگاه بدنی به دستگاه مختصات روتور می‌باشند.

۳- مدلسازی ژيروسکوپ آزاد

برای مدلسازی کامل جستجوگر ژيروسکوپ آزاد، لازم است معادلات دینامیکی ژيروسکوپ استخراج شود. در مدل ساده می‌توان سرعت دوران روتور را ثابت در نظر گرفته و معادلات دینامیکی را به شکل فضایی استخراج نمود. در مدل کامل، تغییرات سرعت روتور را نیز در نظر می‌گیریم.

فرض می‌کنیم که روتور با سرعت ω_s حول محور خود دوران می‌کند، بنابراین:

$${}^D \bar{\omega}_{R/D} = \begin{bmatrix} \omega_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

برای به دست آوردن سرعت زاویه‌ای دستگاه ردیاب نسبت به اینرسی از رابطه زیر استفاده می‌کنیم.

$$\bar{\omega}_{D/I} = \bar{\omega}_{D/2} + \bar{\omega}_{2/I} \quad (2)$$

با توجه به تعریف دستگاه مختصات ردیاب و دستگاه مختصات میانی (۲) داریم:

۱- اگر سطح متوسط آبهای آزاد را به کل زمین تعمیم دهیم با تقریب خوبی یک بیضوی دوار خواهیم داشت (گرچه بدلیل ناهمگن بودن مدار زمین این سطح، اختلاف کمی با یک بیضی دارد) که به این بیضی، بیضی مبنای گویند.

داریم:

$${}^D\bar{T} = {}^D(P_{D/I}\bar{H}_R) + {}^D\bar{\omega}_{D/I} \times {}^D\bar{H}_R \quad (12)$$

با جایگذاری مقادیر بردارهای اندازه حرکت زاویه‌ای روتور و سرعت زاویه‌ای دستگاه ردیاب نسبت به اینرسی، در رابطه فوق و انجام عمل مشتق‌گیری معادلات دینامیکی ژيروسکوپ آزاد در حالت کلی، به شکل زیر بدست می‌آید:

$$T_x = -I_R C \theta_D \dot{\psi}_D \dot{\theta}_D - I_R S \theta_D \ddot{\psi}_D + I_R \omega_s^2 \quad (13)$$

$$T_y = I_r \ddot{\theta}_D + I_r \omega_s C \theta_D \dot{\psi}_D - (I_r - I_r) S \theta_D C \theta_D (\dot{\psi}_D)^2 \quad (14)$$

$$T_z = I_r C \theta_D \ddot{\psi}_D - I_r \omega_s \dot{\theta}_D + (I_r - 2I_r) S \theta_D \dot{\psi}_D \dot{\theta}_D \quad (15)$$

$$x_1 = \psi_D, \quad x_2 = \dot{\psi}_D, \quad x_3 = \theta_D \\ x_4 = \dot{\theta}_D, \quad x_5 = \omega_s \quad (16)$$

با انتخاب متغیرهای رابطه (16) معادلات دینامیکی ژيروسکوپ آزاد به فرم معادلات حالت غیرخطی، به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (17)$$

$$\dot{x}_2 = f(T_z, x_2, x_3, x_4, x_5) \quad (18)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (19)$$

$$\dot{x}_4 = \left(\frac{T_y - I_r x_2 x_5 \cos x_3}{(I_r - I_r) x_2^2 \sin x_3} \right) / I_r \quad (20)$$

$$\dot{x}_5 = \left(\frac{T_x + I_r x_2 x_4 \cos x_3}{I_r \sin x_3 f(M_z, x_2, x_3, x_4, x_5)} \right) / I_r \quad (21)$$

که در آن:

$$f(\bullet) = \frac{T_z + I_r x_4 x_5 - (I_r - 2I_r) x_2 x_4 \sin x_3}{I_r \cos x_3} \quad (22)$$

۴- تحلیل معادلات ژيروسکوپ آزاد

معادلات دینامیکی ژيروسکوپ آزاد که در قسمت قبل بدست آمدند، در حالت کلی برای هر جسم دوار که حول محور دورانش متقارن باشد، صادق است. حل تحلیلی این معادلات در حالت کلی بسیار پیچیده است، به منظور تحلیل معادلات و درک شهودی آن ابتدا معادلات را به شکل زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$T_x = I_R \frac{d}{dt} (\omega_s - S \theta_D \dot{\psi}_D) \quad (23)$$

$$T_y = I_r (\ddot{\theta}_D + (\dot{\psi}_D)^2 S \theta_D C \theta_D) + I_R \dot{\psi}_D C \theta_D (\omega_s - S \theta_D \dot{\psi}_D) \quad (24)$$

$$T_z = I_r (C \theta_D \ddot{\psi}_D + 2S \theta_D \dot{\psi}_D \dot{\theta}_D) - I_R \dot{\theta}_D (\omega_s - S \theta_D \dot{\psi}_D) \quad (25)$$

حال با ساده سازی معادلات به تحلیل رفتار ژيروسکوپ آزاد می‌پردازیم. به این منظور فرض می‌کنیم که روتور با سرعت ثابت ω_s دوران می‌کند و مولفه M_x گشتاور اعمالی به ژيروسکوپ صفر است، بنابراین داریم:

$$I_R \frac{d}{dt} (\omega_s - S \theta_D \dot{\psi}_D) = 0 \quad (26)$$

$$\Rightarrow I_R (\omega_s - S \theta_D \dot{\psi}_D) = Cte = H_S$$

در صورتی که سرعت دوران روتور، ω_s ، به اندازه کافی بزرگتر از $\dot{\psi}_D, \dot{\theta}_D, \theta_D$ باشد اولاً داریم:

$$H_S \cong H = I_R \omega_s$$

و ثانیاً در معادلات دینامیکی دوم و سوم ژيروسکوپ آزاد می‌توان از ترمهای اول در مقابل H صرف‌نظر کرد و معادلات ساده شده را به شکل زیر نوشت:

$$T_x = 0 \quad (27)$$

$$T_y = H C \theta_D \dot{\psi}_D \quad (28)$$

$$T_z = -H \dot{\theta}_D \quad (29)$$

که در آن $H = I_R \omega_s$ ، تکانه زاویه‌ای روتور است.

تصادفی برای حفظ گوناگونی در ذرات هستند که برای ابعاد ذره λ_m ، توزیع یکنواختی در بازه $[0,1]$ دارند. c_1 و c_2 ثابتهای مثبتی هستند که به ترتیب، ضریب عنصر خود شناختی^۷ و ضریب عنصر جمعی^۸ نام دارند و در مجموع آنها را ضرایب اطمینان شناختی^۹ می نامند.

Pi بهترین مکان موضعی است که ذره λ_m تا به حال به آن رسیده و P_g، بطور کلی بهترین مکانی است که ذره ای از بین همه ذرات به آن رسیده است. تابع $Rand()$ ، می تواند عددی تصادفی 0 و 1 تولید کند.

۶- پیاده سازی

برای پیاده سازی در روش Particle Swarm از برنامه نویسی به روش M-File استفاده شده است و برای پیاده سازی به روش الگوریتم ژنتیک از Genetic Algorithm Tool در نرم افزار MATLAB استفاده شده است. در این جعبه ابزار می توان با تعریف یک تابع هزینه و تعداد متغیرهای آن تابع و نیز با تنظیم تعداد جمعیت هر نسل و تعداد کل نسلها و نیز تعیین درصد جهش و ترکیب در هر نسل به نسل بعد، جواب کمینه را برای تابع هزینه یافت. برای نوشتن تابع هزینه که صورت ریاضی آن ذکر خواهد شد، نیاز به داشتن معادلات ژيروسکوپ می باشد که در قبل آمده است.

اکنون برای یافتن مقادیر بهینه زوایای اوایلر و نرخ تغییر آنها از الگوریتم ژنتیک استفاده می نماییم. به این طریق که برای تعیین مقادیر مناسب تابع هزینه ای تعریف می نماییم. با تعریف این تابع هزینه، الگوریتم ژنتیک و Particle Swarm مقادیر زوایای اوایلر و نرخ تغییرات آنها را به گونه ای خواهند یافت که این تابع هزینه کمینه گردد.

برای سادگی، پارامترهای ثابت از مقادیر نوعی زیر استفاده می کنیم.

$$I_R = 30 \times 10^{-6} \text{ Kg.m}^2 \quad (34)$$

$$I_r = 15 \times 10^{-6} \text{ Kg.m}^2 \quad (35)$$

$$\omega_s = 2\pi \times 100 \text{ Rad/Sec} \quad (36)$$

$$\psi_D(0) = 10^\circ \quad (37)$$

$$\theta_D(0) = 10^\circ \quad (38)$$

تابع هزینه را نیز به صورت زیر تعریف می نماییم :

$$F(\dot{\theta}, \ddot{\theta}, \dot{\psi}, \ddot{\psi}) = \sqrt{(T_y(\text{Complete}) - T_y(\text{Simple}))^2 + (T_z(\text{Complete}) - T_z(\text{Simple}))^2} \quad (38)$$

۵- الگوریتم ژنتیک و Particle Swarm

الگوریتم های ژنتیک گونه ای از الگوریتم های بهینه سازی تصادفی هستند که اساساً از مکانیزم های الگوریتم انتخاب طبیعی و ژنتیک تکاملی انتزاع شده اند. این روشها به طور همزمان بسیاری از نقاط در فضای پارامتر که به آن فضا، فضای جستجو^۲ نیز گفته می شود را برآورد^۳ (ارزیابی) می کنند و بنابر همین دلیل دارای احتمال کمتری برای همگرایی به سوی اپتیمم های محلی می باشند.

ایده Particle Swarm نیز برای اولین بار توسط کندی و ابرهارت^۴ در سال ۱۹۹۵ مطرح شد، یک الگوریتم محاسبه ای تکاملی الهام گرفته از طبیعت و براساس تکرار می باشد. در واقع الگوریتم PSO از تعداد مشخصی از ذرات تشکیل می شود که به طور تصادفی، مقدار اولیه می گیرند. برای هر ذره دو مقدار وضعیت و سرعت تعریف می شود که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت مدل می شوند. این ذرات به صورت تکرار شونده ای در فضای n-بعدی مسئله حرکت می کنند تا با محاسبه مقدار بهینگی^۵ به عنوان یک ملاک سنجش، گزینه های ممکن جدید را جستجو کنند. بُعد فضای مسئله، برابر تعداد پارامترهای موجود در تابع مورد نظر برای بهینه سازی می باشد. یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت هر ذره در گذشته و یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت پیش آمده در میان همه ذرات اختصاص یافته است. با تجربه حاصل از این حافظه ها، ذرات تصمیم می گیرند که در نوبت بعدی چگونه حرکت کنند. در هر بار تکرار، همه ذرات در فضای n - بعدی مسئله حرکت می کنند تا بالاخره نقطه بهینه عمومی پیدا شود. سرعت و موقعیت هر ذره با روابط زیر تنظیم می شوند:

$$V_i^{t+1} = wV_i^t + C_1 \times Rand() \times (P_i^t - X_i^t) + C_2 \times Rand() \times (P_g^t - X_i^t) \quad (30)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (31)$$

اندیس i، ذره λ_m از دسته ذرات و اندیس t، تعداد تکرار الگوریتم تا این لحظه را مشخص می کنند. V_i بردار سرعت و X_i بردار مکان λ_m در فضای n-بعدی مسئله می باشند:

$$V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in}) \quad (32)$$

$$X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}) \quad (33)$$

در رابطه (۱)، w عامل یا وزن لختی^۶ نام دارد. r1 و r2 عددهای

2- Search Space
3- Evaluate
4- Kennedy and Eberhart
5- Fitness
6- Inertia Factor/Weight

7- Self Recognition Component
8- Social Component
9- Cognitive Confidence Coefficients

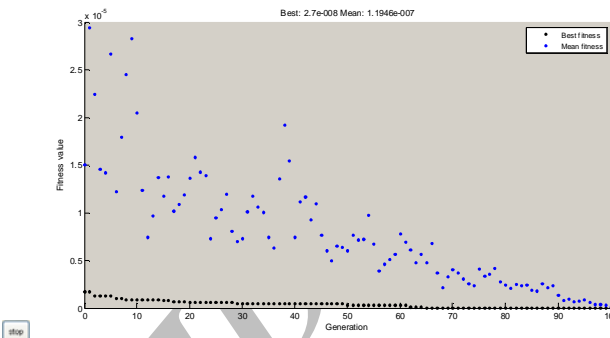
۷- نتیجه گیری

در این مقاله معادلات دینامیکی ژيروسکوپ به صورت کامل بدست آمده است. همچنین برای کاربردهای عملیاتی، مدل ساده سازی شده از مدل کامل بدست آمده است. هدف مقاله (که بهینه نمودن مدل ساده سازی شده به گونه‌ای که در عمل با تقریب خوبی معادل مدل کامل عمل نماید می‌باشد)، با تعریف یک تابع بهینه‌سازی برآورده شده است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک و پیاده‌سازی تابع هزینه در آن، مقادیر زوایای اویلر و نرخ تغییرات مناسب آن جهت عملکرد مناسب ژيروسکوپ بدست می‌آید. از جمله پژوهش‌های بعدی که در این مقاله مجال پیاده‌سازی آن ممکن نشد انجام همین بهینه‌سازی و تعیین زوایا با استفاده از روش Particle Swarm است. روش این مقاله کاربرد زیادی برای تحلیل رفتار موشک‌های هدایت شونده و هدایت و کنترل آنها دارد و این روش بدون هرگونه محاسبات تحلیلی زمان‌بر، اندازه بهینه زوایای اویلر را در اختیار می‌نهد تا بر اساس آنها محرک‌های ژيروسکوپ حرکات لازم را برای هم راستا نگه داشتن راستای خط دید با راستای گیرنده را اعمال کند.

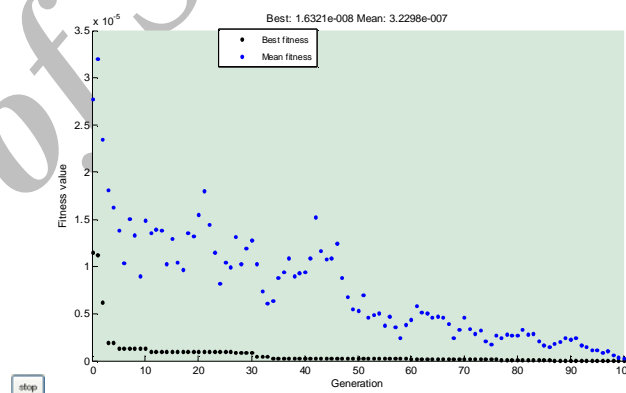
۸- مراجع

- [۱] حاجی‌علی م.ت، عاروان م.ر. و ساداتی س.ح.، مدل‌سازی ژایروپتیک در موشک‌های آشیانه یاب غیرفعال، مجموعه مقالات اولین کنفرانس علمی کاربردی سازمان صنایع هوا فضا، جلد سوم، مجموعه مقالات الکتروپتیک، صفحات ۲۶ تا ۳۶، تهران، ایران، ۱۳۷۹.
- [۲] محرم‌پور ع. و عاروان م.ر.، پیاده سازی عملی هدایت متناسب در حالت سه بعدی، مجموعه مقالات اولین کنفرانس علمی کاربردی سازمان صنایع هوا فضا، جلد دوم، مجموعه مقالات هدایت کنترل و دینامیک پرواز، صفحات ۲۵۸ تا ۲۶۹، تهران، ایران، ۱۳۷۹.
- [3] Ajith Abraham, He Guo, and Hongbo Liu, "SwarmIntelligence: Foundations, Perspectives and Applications", a Swarm chapter on the Internet, 2004.
- [4] C. K. Mohan and B. Al-kazemi, "Discrete Particle swarm optimization" Proc. Workshop on Particle Swarm Optimization, Indianapolis, IN: Purdue School of Engineering and Technology, IUPUI, 2001.

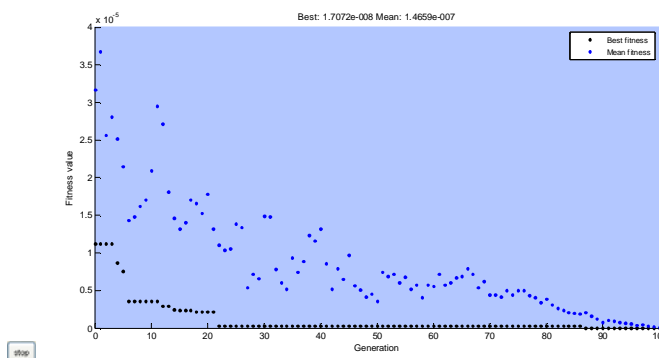
سپس این تابع در MATLAB به صورت M-File نوشته شده است و در جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک شبیه‌سازی گشته است. در شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است.



شکل (۲): نتایج شبیه‌سازی برای $\theta_D = 2$ Degree



شکل (۳): نتایج شبیه‌سازی برای $\theta_D = 10$ Degree



شکل (۴): نتایج شبیه‌سازی برای $\theta_D = 25$ Degree