

# کاربرد روش بهینه‌سازی گروهی ذرات در برنامه‌ریزی حرکت مانورپایه پپاداها

سیدحسین پورتاکدوست<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی هوافضا، قطب علمی سامانه های هوافضایی  
دانشگاه صنعتی شریف  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۱۳)

جلال کریمی<sup>۱</sup>

مجتمع دانشگاهی هوافضا  
دانشگاه صنعتی مالک اشتر

## چکیده

ارتقای سطح خودگردانی وسایل پرنده بدون سرنشین مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین مسائل در بحث خودگردانی، مسئله برنامه‌ریزی حرکت است. در این مسئله که مورد توجه این مقاله قرار گرفته، برنامه‌ای برای حرکت وسیله پرنده از یک محل معین و رسیدن به نقطه مشخص تولید می‌شود. اگر بخواهیم مسیرهای تولید شده برای وسیله پرنده قابل انجام باشند، نیاز است که قابلیت‌های عملکردی و سیستمی وسیله را مورد توجه قرار دهیم. به همین خاطر، در تحقیق حاضر، با لحاظ نمودن مدل دینامیکی غیرخطی و قابلیت‌های عملکردی و دینامیکی وسیله، مسیرهایی عملی ایجاد می‌گردد. روش بهینه‌سازی گروه ذرات ارتقا داده شده تا از عهده حل مسئله برنامه‌ریزی حرکت برآید. ارزیابی الگوریتم حاضر از طریق شبیه‌سازی سناریوهای پروازی مختلف، قابلیت الگوریتم مذکور را در تولید مسیرهای بهینه درمیان عوارض زمینی و نواحی تهدید به وضوح نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** برنامه‌ریزی حرکت، بهینه‌سازی گروه ذرات، عوارض زمینی، ناحیه تهدید

## A Maneuver-Based Motion Planning Approach for UAVs by Particle Swarm Optimization Method

J. Karimi

Aerospace University Complex  
Malek-Ashtar University of Technology

S.H. Pourtakdoust

Aerospace Department, Center of Excellence  
for Aerospace Systems  
Sharif University of Technology

(Received: 19/June/2012; Accepted: 5/October/2013)

## ABSTRACT

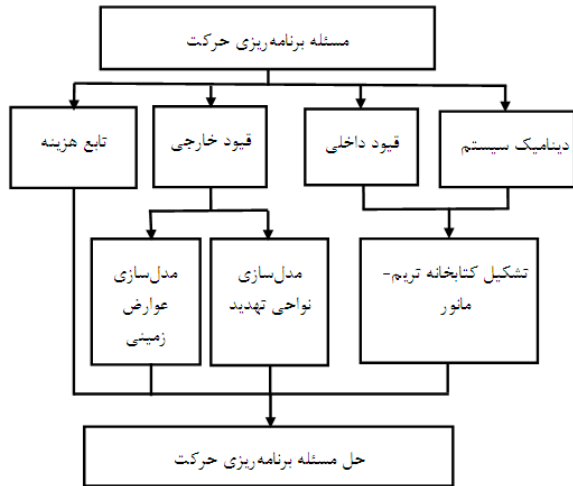
Improvements in the level of autonomy of unmanned air vehicles (UAVs) are highly desirable and under pursuit by many researchers. The motion planning problem is one of the vital issues for autonomous vehicles. In motion planning, a trajectory is provided for the vehicle from a known location to a predefined target point. In order to provide feasible trajectories, one needs to consider the vehicle performance and dynamic constraints. In this regard, in the current research, by utilizing the nonlinear dynamic model and performance and dynamic capabilities of the vehicle, feasible trajectories are generated. Particle swarm optimization method is enhanced to handle the motion planning problem. Evaluation of the proposed algorithm, via simulating various scenarios, reveals its capability in generating optimal trajectories through terrain and threat obstacles.

**Keywords:** Motion Planning, Particle Swarm Optimization, Terrain Obstacles, Threat Zone

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): karimi\_j@alum.sharif.edu

۲- استاد: pourtak@sharif.edu

## ۱- مقدمه



شکل (۱): شکل شماتیک مسئله برنامه‌ریزی حرکت.

- ۱- دینامیک سیستم: در کار حاضر دینامیک در کامل‌ترین شکل آن یعنی مدل شش درجه آزادی غیرخطی آن مورد استفاده قرار گرفته است،
- ۲- قیود داخلی: این قیود محدودیت‌های عملکردی و سیستمی وسیله مورد مطالعه را در برمی‌گیرد که در فرایند حل مسئله برنامه‌ریزی حرکت لحاظ خواهد شد،
- ۳- قیود خارجی: قیود خارجی عبارت است از عوارض زمینی و نواحی تهدید. در کار حاضر برای مدل‌سازی عوارض زمینی از یک تابع ریاضی استفاده شده که شمای سه بعدی آن در شکل ۲ آمده است. برخورد به عوارض زمینی مجاز نبوده و به شکست مأموریت منجر می‌شود. به همین دلیل، تابع جریمه عبور از عوارض در این مسئله مطابق معادله زیر تعریف شده است:

$$J_{\text{terrain}} = \begin{cases} \sqrt{2\pi\sigma_1} \exp\left(-\frac{(h - \text{elev} - m_1)^2}{2\sigma_1^2}\right), & \text{if } h \leq \text{elev} + \text{clrncc} \\ 0, & \text{if } h > \text{elev} + \text{clrncc} \end{cases} \quad (1)$$

تابع فوق معکوس یک تابع توزیع نرمال با میانگین  $m_1$  و انحراف استاندارد  $\sigma_1$  است. ارتفاع  $\text{clrncc}$  حداقل ارتفاع پرواز ایمن از روی عوارض است که توسط کاربر تعیین می‌شود،  $h$  ارتفاع پروازی وسیله و  $\text{elev}$  ارتفاع عوارض است. معادله فوق بیان می‌دارد که هرچه وسیله بیشتر به ناحیه خطرناک وارد شود، جریمه به صورت نمایی افزایش می‌یابد. ناحیه خطرناک به ناحیه‌ای اطلاق می‌شود که ارتفاع پرنده از مجموع ارتفاع عوارض و ارتفاع  $\text{clrncc}$  کمتر است. مقادیر انتخاب شده برای

مسئله طراحی مسیر وسایل بدون سرنشین در چند دهه اخیر مورد توجه حوزه‌های علمی مختلف قرار گرفته و از روش‌های متنوعی برای حل آن استفاده شده است. اهم این روش‌ها را می‌توان در غالب دسته‌بندی زیر مطرح نمود: روش‌های کنترل بهینه کلاسیک مبتنی بر حساب تغییرات [۱]، روش‌های مبتنی بر جستجوی گراف [۲]، روش‌های بهینه‌سازی کاشف [۳] و [۴] و برنامه‌ریزی حرکت مانور پایه.

در بحث برنامه‌ریزی حرکت مانور پایه، ایده  $MA^1$  اولین بار توسط فرازولی<sup>۲</sup> مطرح شد [۵]. این ایده بر مبنای کوانتیزه کردن دینامیک سیستم توسعه داده شده و در واقع یک رشته ورودی معلوم و مسیر متناظر با این ورودی‌هاست که وسیله را از یک وضعیت تریم به وضعیت تریم دیگری منتقل می‌کند. یک مسیر تریم به صورت ساده یک رژیم پروازی حالت یکنواخت<sup>۳</sup> است که پرنده می‌تواند برای هر بازه زمانی در آن باقی بماند. مانورها حرکتی هستند که وظیفه پرش از یک وضعیت تریم به وضعیت تریم دیگر را برعهده دارند. از بررسی کارهای انجام شده، دیده می‌شود که بجز در روش مانور پایه، در سایر روش‌ها قابلیت لحاظ دینامیک کامل وسیله وجود ندارد و صرفاً می‌توان به یک‌سری قیود عملکردی نظیر محدوده سرعت، شعاع، نرخ چرخش و شتاب‌های عمودی اکتفا نمود. روش مانور پایه علاوه بر لحاظ مدل دینامیکی کامل وسیله قادر است که کلیه قیود حاکم بر آن را اعم از قیود دینامیکی، قابلیت‌های مانوری و عملکردی در نظر بگیرد و مسیری تولید کند که توسط سیستم کنترل وسیله قابل پیاده‌سازی و تعقیب یا اصطلاحاً عملی باشد.

ایده  $MA$  با توجه به توانمندی‌هایش در لحاظ نمودن قابلیت‌های عملکردی و دینامیکی وسیله پرنده، مبنای کار حاضر قرار گرفته است. در این راستا، با استفاده از کتابخانه‌ای از مسیرهای تریم و مانور پهناد موردنظر، مسئله برنامه‌ریزی حرکت به یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی (متشکل از متغیرهای طراحی گسسته و پیوسته) تبدیل شده و برای حل آن روش بهینه‌سازی گروه ذرات<sup>۴</sup> ارتقا داده شده است.

## ۲- مسئله برنامه‌ریزی حرکت

مسئله برنامه‌ریزی حرکت، شکل ۱، دارای چهار بخش می‌باشد:

<sup>1</sup>- Maneuver Automaton

<sup>2</sup>- Frazzoli

<sup>3</sup>- Steady State

<sup>4</sup>- Particle Swarm Optimization

**جدول (۱):** مقادیر پارامترهای مدل عوارض و نواحی تهدید.

مقدار	پارامتر
۲۵۰۰ (m)	$R_e$
۵۰۰ (m)	$clrc$
$Clrc/\lambda$	$\sigma_1$
۵۰۰	$m_1$
1e۱۰	Pt

### ۳- حل مسئله برنامه‌ریزی حرکت

ابتدا، کتابخانه تریم- مانور شامل ۴۵ مسیر تریم و ۳۹۸ مسیر مانور، با لحاظ قابلیت‌های تریم‌پذیری و مانورپذیری پهپاد مورد مطالعه تشکیل می‌شود. به‌منظور شکل‌دهی این کتابخانه از مدل شش درجه آزادی غیرخطی وسیله پرنده استفاده شده و قیود عملکردی و دینامیکی پرنده لحاظ شده است. مسیرهای تریم با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی مقید [۶] به‌دست آمده‌اند و برای تشکیل مسیرهای مانور از یک سیستم کنترل غیرخطی گام به عقب استفاده شده است [۹]. در ادامه، ابتدا ذکر نکات زیر مهم به نظر می‌رسد:

۱- در استراتژی MA، وسیله پرنده مأموریت خود را از یک نقطه مبدأ با یک وضعیت پرواز تریم شده آغاز می‌کند. در طول پرواز، می‌تواند وضعیت‌های تریم دیگری را از درون کتابخانه تریم- مانور انتخاب کند و از مسیرهای مانور کتابخانه که بازه زمانی آنها از قبل تعیین شده استفاده می‌کند. بنابراین، برنامه‌ریزی حرکت عبارت است از انتخاب یک رشته از وضعیت‌های تریم و بازه زمانی مربوط به هر کدام از آنها. توضیح این‌که هر کدام از وضعیت‌های تریم با یک اندیس که عددی طبیعی بین ۱ تا ۴۵ است مشخص می‌شوند. وقتی که یک وضعیت تریم به‌عنوان قطعه مسیر بعدی برای حرکت پهپاد انتخاب می‌شود، مسیر مانور انتقالی مربوطه نیز به‌صورت خودکار برای انجام این کار انتخاب و به مسیر اضافه می‌شود،

۲- مسئله ما یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی است، زیرا متغیرهای طراحی شامل متغیرهای گسسته (شماره اندیس وضعیت تریم) و متغیرهای پیوسته (زمان پرواز در وضعیت تریم) می‌باشد و

۳- از بین الگوریتم‌های بهینه‌سازی کاشف موجود، روش بهینه‌سازی گروه ذرات برای این کار انتخاب شده است. زیرا قادر است که به‌راحتی در فضاهای جستجوی پیوسته کار کند و می‌توان آن را برای کار در فضاهای جستجوی گسسته ارتقا بخشید.

تابع فوق در جدول ۱ آمده است. نواحی تهدید به‌صورت معین فرض می‌شوند و تابع جریمه ورود به نواحی تهدید به‌صورت زیر فرموله شده است:

$$J_{\text{threat}} = \begin{cases} pt & \text{If } PX < R_e \\ 0 & \text{If } PX \geq R_e \end{cases} \quad (2)$$

که در آن:

$$PX = \sqrt{(x_{\text{threat}} - x)^2 + (y_{\text{threat}} - y)^2} \quad (3)$$

و  $x_{\text{threat}}, y_{\text{threat}}$  موقعیت نقطه تهدید است. مقادیر پارامترهای معادله (۲) در جدول ۱ آمده است و

۴- تابع هزینه: به‌عنوان تابع هزینه، دو تابع ترکیبی متفاوت تعریف شده است. تابع هزینه اول با هدف رسیدن به نقطه هدف در حداقل زمان به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

$$J_1 = k_1 \sqrt{(x_F - x_T)^2 + (y_F - y_T)^2} + \sum_{i=1}^n (t_{T_i} + t_{M_{i,i+1}} + t_{T_{i+1}}) \quad (4)$$

که در آن،  $[x_F, y_F]^T$  و  $[x_T, y_T]^T$ ، به‌ترتیب، موقعیت نهایی مسیر حاصله و نقطه هدف است.  $k_1$  یک پارامتر وزن‌دهی است که برابر با ۱۰۰ قرار داده شده است. پارامترهای  $t_{T_i}$  و  $t_{M_{i,i+1}}$  بازه‌های زمانی مسیرهای تریم  $i$ -ام و مانور از وضعیت تریم  $i$ - $TS$  به وضعیت تریم  $i+1$ - $TS$  هستند.  $n$  تعداد وضعیت‌های تریم استفاده شده الگوریتم برنامه‌ریزی حرکت از شروع تا نقطه هدف می‌باشد.

پهپادها معمولاً در ارتفاعات پایین و درون دره‌ها پرواز می‌کنند تا قابلیت بقاپذیری خود را افزایش داده و توسط تهدیدهایی مثل سایت‌های راداری شناسایی نشوند. بنابراین، تابع هزینه دوم به‌صورت حداقل فاصله تا نقطه هدف و پرواز در ارتفاعات پایین تعریف می‌شود:

$$J_1 = k_1 \sqrt{(x_F - x_T)^2 + (y_F - y_T)^2} + k_2 \sum_{i=1}^m h_i \quad (5)$$

پارامتر  $m$  تعداد نقاطی را نشان می‌دهد که در آن، ارتفاع مسیر از حیث برخورد یا عدم برخورد به عوارض زمینی، بررسی می‌شود.  $k_2$  یک ثابت وزنی است که برابر با ۰/۰۱ قرار داده می‌شود. با افزودن توابع هزینه مربوط به قید عوارض، معادله (۱) و نواحی تهدید، معادله (۲)، تابع هزینه کلی به‌صورت زیر در خواهد آمد:

$$J = \min(J_1 + J_{\text{Terrain}} + J_{\text{Threat}}) \quad (6)$$

$$\omega = \text{rand}(0, 1) \quad (10)$$

که در آن،  $\text{rand}(0, 1)$  یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه  $[0, 1]$  است. از آنجایی که نیمی از اعضای بردار طراحی گسسته هستند، بهینه‌سازی گروه ذرات ارتقا داده شده تا این متغیرها را نیز به دست گیرد. برای این منظور، از یک استراتژی ساده استفاده شده که پس از به‌روزرسانی بردار موقعیت ذرات، المان‌های بردار موقعیت به نزدیک‌ترین متغیر گسسته گرد می‌شوند [۸]. بردار طراحی ( $\mathbf{W}$ )، دارای طول  $L$  است که  $L/2$  آنها مربوط به مجموعه وضعیت‌های تریم و  $L/2$  بعدی بازه زمانی وضعیت‌های تریم می‌باشند:

$$\mathbf{W} = [T_1, T_2, \dots, T_{L/2}, t_1, t_2, \dots, t_{L/2}]^T$$

در شروع الگوریتم، یک وضعیت تریم اولیه با بازه زمانی معین، به‌عنوان شرایط اولیه پرواز، توسط کاربر انتخاب می‌شود. بردار طراحی این شرایط اولیه را شامل نمی‌شود و تنها از این اطلاعات برای پیشبرد روش بهینه‌سازی استفاده می‌کند. به‌عبارت دیگر، یک وضعیت تریم امکان‌پذیر، با توجه به شرایط اولیه، به‌صورت تصادفی از میان وضعیت‌های تریم عملی کتابخانه انتخاب می‌شود و به‌عنوان اولین مؤلفه بردار طراحی  $T_1$  محسوب می‌گردد. این انتخاب بر مبنای سیاست سویچ بین وضعیت‌های تریم، صورت می‌گیرد. مؤلفه دیگر نیز به همین ترتیب انتخاب می‌شود. مؤلفه‌های پیوسته بردار طراحی،  $t_1, t_2, \dots, t_{L/2}$ ، اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه  $[0, 10]$ ، ثانیه تعیین می‌شوند. تعداد کل ذرات گروه،  $N_p$ ، نیز توسط کاربر انتخاب می‌شود و بردار سرعت اولیه ذرات اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه  $[-V_{\max}, V_{\max}]$  هستند.

الگوریتم پس از یک تعداد تکرار از پیش تعیین شده متوقف می‌گردد. در اینجا بیشترین تعداد تکرارها برابر با ۱۰۰۰۰ قرار داده شده است. مقادیر تنظیم شده سایر پارامترهای الگوریتم در جدول ۲ آمده است.

**جدول (۲):** پارامترهای الگوریتم برنامه‌ریزی حرکت ارائه شده.

پارامتر	مقدار
$C_1$	۲
$C_2$	۲
$V_{\max}$	۸
$N_p$	۵۰
$L$	۱۰۰

#### ۴- استفاده از روش بهینه‌سازی گروه ذرات در مسئله برنامه‌ریزی حرکت

در روش بهینه‌سازی گروه ذرات استاندارد [۷]، ذرات در یک فضای جستجوی چندبعدی پرواز کرده و موقعیت هر ذره براساس تجربه شخصی خود و همسایه‌هایش تنظیم می‌شود. اگر  $\mathbf{X}_i(t)$  و  $\mathbf{v}_i(t)$  موقعیت و سرعت ذره  $i$  در زمان  $t$  باشد، موقعیت در زمان  $t+1$  به‌صورت زیر به‌روز می‌شود:

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{v}_i(t) \quad (7)$$

که در آن،  $\mathbf{x}_i(0) \approx \text{rand}(\mathbf{x}_{\min}, \mathbf{x}_{\max})$ . این بردار سرعت است که پروسه بهینه‌سازی را استخراج می‌کند و دربردارنده سه مؤلفه اینرسی، مؤلفه شناختی و مؤلفه اجتماعی است:

$$\mathbf{v}_i(t+1) = \omega \mathbf{v}_i(t) + c_1 r_1 (\mathbf{y}_i(t) - \mathbf{x}_i(t)) + c_2 r_2 (\hat{\mathbf{y}}_i(t) - \mathbf{x}_i(t)) \quad (8)$$

که در آن، پارامترهای  $C_1, C_2$  مقادیر ثابت،  $r_1, r_2$  اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در محدوده  $[0, 1]$ ،  $\omega$  وزن اینرسی،  $\mathbf{y}_i(t)$  بهترین موقعیت شخصی ذره  $i$  و  $\hat{\mathbf{y}}_i(t)$  بهترین موقعیت یافته شده توسط همسایگی‌هاست.

روش بهینه‌سازی گروه ذرات، مبنای کار حاضر قرار گرفته و اصلاحاتی بر روی آن اعمال شده تا علاوه بر بهبود عملکرد آن، برای مسئله برنامه‌ریزی حرکت نیز مناسب باشد. این اصلاحات در ادامه آمده است:

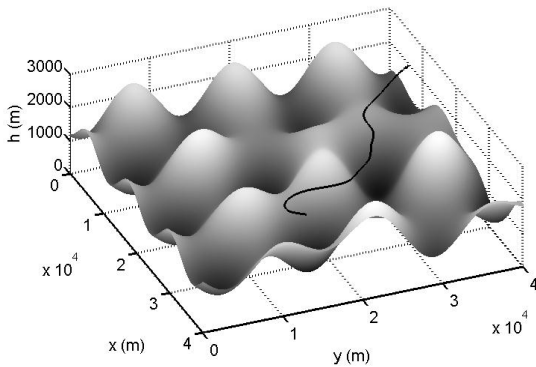
به‌عنوان ساختار شبکه اجتماعی الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، از ساختار رینگ تک-اتصال [۶] به‌دلیل توانمندی‌اش در ممانعت از جاذبه‌های نارس بین همسایه‌ها و حفظ قابلیت جستجوی الگوریتم استفاده شده است.

بردار سرعت ذرات اشباع شده به‌صورت زیر تصادفی شده است:

$$\mathbf{v}_i(t+1) = \begin{cases} \mathbf{v}_i(t+1), & \text{if } |\mathbf{v}_i(t+1)| \leq V_{\max} \\ \text{rand}(-V_{\max}, V_{\max}), & \text{if } |\mathbf{v}_i(t+1)| > V_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

که،  $V_{\max}$  حداکثر سرعت در هر بعد فضای جستجو است. به‌این ترتیب، اگر هر مؤلفه بردار سرعت از این مقدار بزرگ‌تر شود، به یک مقدار تصادفی درون محدوده مجاز تغییر داده می‌شود. این استراتژی جهت بردار سرعت را تغییر داده و به ارتقای قابلیت جستجوی الگوریتم می‌انجامد.

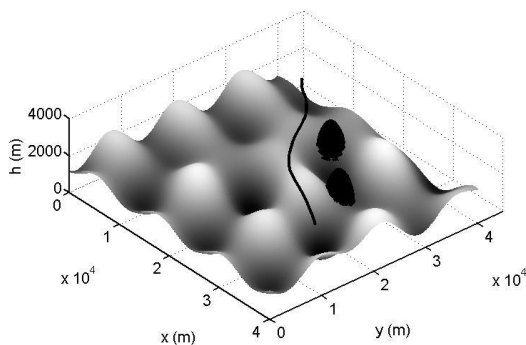
برای ارتقا بیشتر قابلیت جستجو و اکتشاف الگوریتم، ترم وزن اینرسی به‌صورت تصادفی با توزیع یکنواخت انتخاب شده است:



شکل (۳): مسیر سه‌بعدی سناریوی حداقل ارتفاع بدون نواحی تهدید.

### ۵-۳- مسیر حداقل زمان با وجود نواحی تهدید

تابع هزینه در این حالت حداقل زمان (معادله (۴)) است. مسیر حاصله از الگوریتم برنامه‌ریزی حرکت در شکل ۴ نشان داده شده است. در این حالت، مسیر از خط راست منحرف شده تا بتواند تهدیدات را دور زده و از آنها اجتناب نماید. این سناریوی ۴۹۰/۳۱ ثانیه به طول می‌انجامد و دارای خطای فاصله‌ی کمتر از ۳۱ متر از نقطه هدف می‌باشد که نشان‌دهنده دقت مناسب الگوریتم در رسیدن به نقطه هدف است.



شکل (۴): مسیر سه‌بعدی سناریوی حداقل زمان با وجود نواحی تهدید.

### ۵-۴- مسیر حداقل ارتفاع با وجود نواحی تهدید

تابع هزینه در این حالت حداقل ارتفاع (معادله (۵)) می‌باشد. همان‌طور که شکل ۵ نشان داده شده، مسیر سه‌بعدی منتج از نواحی کم ارتفاع عبور می‌کند. کل زمان پرواز ۴۹۳/۹۶ ثانیه و خطای فاصله کمتر از ۶۲ متر است که این هم نشان از قابلیت الگوریتم در تقرب مناسب به سمت نقطه هدف دارد.

### ۵- سناریوهای شبیه‌سازی شده

قابلیت روش ارائه شده برای تولید مسیرهای بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. فرض شده که نقاط شروع و هدف عبارتند از:

$$[x_0, y_0, h_0] = [5000, 40000, elev(x_0, y_0) + clrnc]$$

$$[x_F, y_F, h_F] = [35000, 15000, elev(x_F, y_F) + clrnc]$$

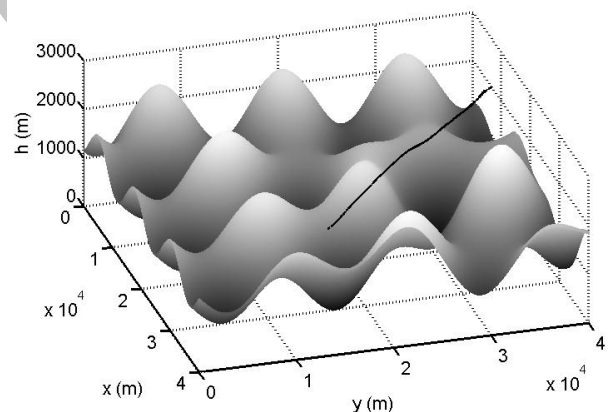
دو ناحیه تهدید با مختصات زیر نیز در نظر گرفته می‌شود:

$$[x_{Threat,1}, y_{Threat,1}] = [18000, 33000]$$

$$[x_{Threat,2}, y_{Threat,2}] = [28000, 25000]$$

### ۵-۱- مسیر حداقل زمان بدون نواحی تهدید

در این سناریو، نواحی تهدید در نظر گرفته نمی‌شود و تابع هزینه حداقل زمان معادله (۴) استفاده می‌شود. در شکل ۲ مسیر سه‌بعدی حرکت ترسیم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، تصویر مسیر منتج در صفحه x-y تقریباً یک خط راست است. در این سناریو زمان کل پرواز ۳۵۰/۷۹ ثانیه و خطای فاصله از نقطه هدف ۱۹۵ متر می‌باشد که نشان‌دهنده دقت بالای الگوریتم در رسیدن به نقطه هدف در حداقل زمان است.



شکل (۲): مسیر سه‌بعدی سناریوی حداقل زمان بدون نواحی تهدید.

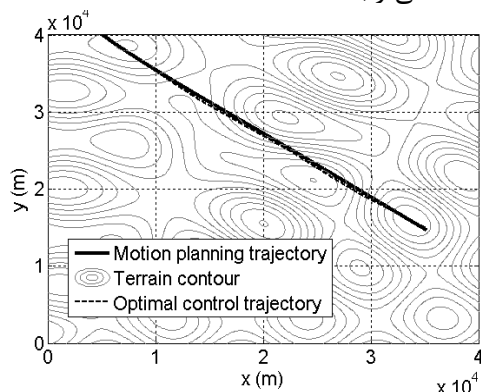
### ۵-۲- مسیر حداقل ارتفاع بدون نواحی تهدید

مشابه حالت قبل، در این سناریو ناحیه تهدیدی در نظر گرفته نشده است. تابع هزینه حداقل ارتفاع، معادله (۵)، می‌باشد. مسیر حاصله از برنامه‌ریزی حرکت در شکل ۳ ترسیم شده است. در این حالت، که پرواز در ارتفاع پایین مطلوب می‌باشد، پهپاد نواحی کم ارتفاع را برای پرواز انتخاب نموده و ماموریت خود را از میان آنها انجام می‌دهد. این سناریو ۵۷۸/۳۵ ثانیه به طول می‌انجامد و با خطای ۲۱ متر به نقطه هدف می‌رسد که عملکرد قابل قبولی است.

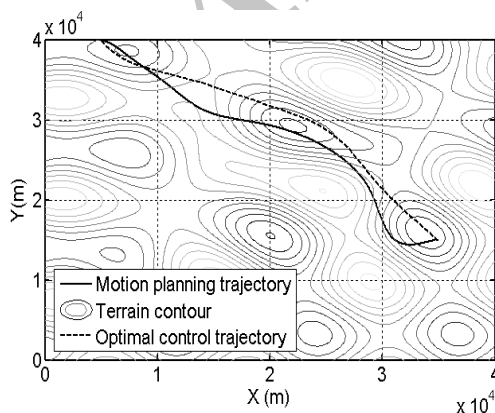
در این استراتژی پرنده ملزم به تعقیب کانتور عوارض در فضای سه بعدی است و تابع هزینه ترکیبی زیر استفاده می شود:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} (1 - k + k (\text{elev}(x, y) + \text{clrcn})) dt \quad (11)$$

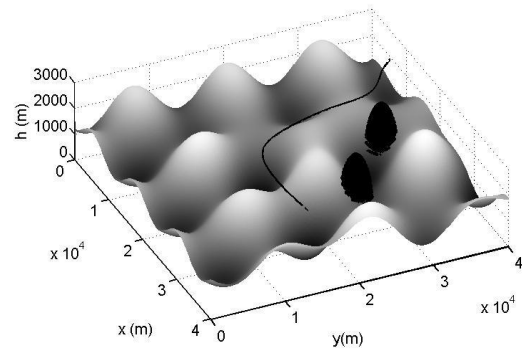
که در آن،  $k$  یک پارامتر تنظیم کننده در بازه  $[0, 1]$  است. مقدار  $k=0$  معیار بهینه گی حداقل زمان و  $k=1$  نشانگر تابع هزینه حداقل ارتفاع می باشد. در این جا، مسیرهای حاصل از روش کنترل بهینه با معیارهای حداقل زمان و حداقل ارتفاع به دست آمده و در شکل ۶ و ۷ با مسیرهای روش برنامه ریزی حرکت مقایسه شده اند. همان طور که شکل ۶ نشان می دهد مسیر حداقل زمان دو روش تطابق بسیار خوبی دارند. در حالت حداقل ارتفاع، نیز دو روش کانتورهای مشابهی از عوارض را تعقیب می نمایند. البته واضح است که چون روش برنامه ریزی حرکت، دینامیک کامل پرنده را لحاظ می کند مسیرهای آن در مقایسه با روش کنترل بهینه، که در آن به معادلات سینماتیک اکتفا شده، عملی تر باشد.



شکل (۶): سناریوی حداقل زمان: مسیر دوبعدی برنامه ریزی حرکت در مقایسه با مسیر روش کنترل بهینه.



شکل (۷): سناریوی حداقل زمان: مسیر برنامه ریزی حرکت در مقایسه با مسیر روش کنترل بهینه.



شکل (۸): مسیر سه بعدی سناریوی حداقل ارتفاع با وجود نواحی تهدید.

نتایج حاصله از سناریوهای ۱ تا ۴ در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول (۳): نتایج حاصله از سناریوهای ۱ تا ۴.

سناریو	زمان کل (ثانیه)	خطای فاصله
۱	۳۵۰/۷۹	۱۹۵
۲	۵۷۸/۳۵	۲۱
۳	۴۹۰/۲۱	۳۱
۴	۴۹۳/۹۶	۶۲

## ۶- نتیجه گیری

در کار حاضر با استفاده از ایده MA، دینامیک شش درجه آزادی غیرخطی پرنده به علاوه قیود دینامیکی و عملکردی مربوطه، از طریق کتابخانه تریم-مانور، در مسئله برنامه ریزی حرکت اعمال می شود. استفاده از کتابخانه تریم-مانور که مسیرهای پایه از رفتار پروازی پهباد مورد مطالعه را تشکیل می کند، مسئله پیچیده برنامه ریزی حرکت را به یک مسئله بهینه سازی ترکیبی تبدیل می کند. به منظور حل مسئله منتج، الگوریتم بهینه سازی گروه ذرات ارتقا داده شده و مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی کارایی الگوریتم با توابع هزینه مختلف و سناریوهای مأموریتی با وجود نواحی تهدید قابلیت الگوریتم مذکور را در تولید بهینه مسیرهای پروازی نشان می دهد.

## ۷- اعتبارسنجی الگوریتم برنامه ریزی حرکت

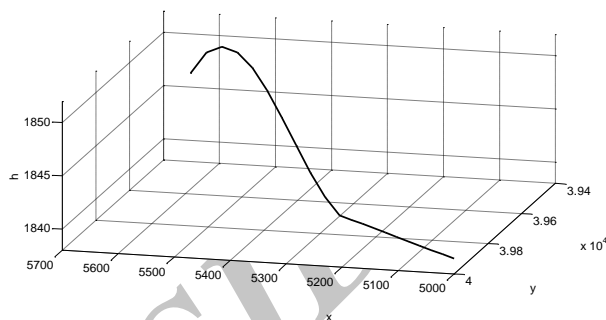
به منظور اعتبارسنجی الگوریتم برنامه ریزی حرکت و ارزیابی میزان بهینه گی مسیرهای حاصله، در این بخش مقایسه ای صورت گرفته و یک فرمولاسیون کنترل بهینه [۱] پیاده سازی شده است که در آن از معادلات سینماتیک استفاده می شود و فرض بر این است که سرعت ثابت است ( $V = 100 \text{ m/sec}$ ).

Congress on Evolutionary Computation, Hawaii (HI), USA, pp. 1576-1581, 2002.

9. Karimi J., "Optimal Maneuver-Based Motion Planning over Terrain and Threats Using Heuristic Optimization Approaches", PhD. Thesis, Sharif University of Technology, 2012, (In Persian).

#### ۸- نحوه تشکیل مسیر در روش برنامه‌ریزی حرکت

همانطور که گفته شد، مسیر بهینه از اتصال مجموعه‌ای از مسیرهای تریم و مانور ایجاد می‌شود. در شکل ۸ دو مسیر تریم و مانور نوعی متصل به هم نشان داده شده است. زمان پرواز در مسیر تریم ۴/۷۵ ثانیه و زمان پرواز مسیر مانور ۶ ثانیه می‌باشد. در شکل، مسیر مستقیم‌الخط مسیر تریم و مسیر منحنی یک مسیر مانوری است.



شکل (۸): نمایش دو مسیر تریم و مانور نوعی.

#### ۹- مراجع

1. Babaie, A.R. and Karimi, J., "Designing Optimal Trajectory in presence of Terrain and Threat for Unmanned Aerial Vehicles", Aerospace Mechanics Journal, Vol. 7, No. 1, pp. 69-57, 2011, (In Persian).
2. Royset, J.O., Carlyle, W.M. and Wood, R.K., "Routing Military Aircraft with a Constrained Shortest-Path Algorithm", Military Operations Research, Vol. 14, No. 3, pp. 31-52, 2009.
3. GuanJun, M., Haibin, D. and Senqi, L., "Improved Ant Colony Algorithm for Global Trajectory Planning of UAV under Complex Environment", International Journal of Computer Science & Application, Vol. 4, No. 3, pp. 57-68, 2007.
4. Naderi, D. and Azizi, M.R., "Path Planning Optimization of a Spherical Mobile Robot, via Genetic Algorithm", Aerospace Mechanics Journal, Vol. 7, No. 1, pp. 1-13, 2011, (In Persian).
5. Frazzoli, E., Dahleh, M.A. and Feron, E., "Maneuver-Based Motion Planning for Nonlinear Systems with Symmetries", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21, No. 6, pp. 1077-1091, 2005.
6. Karimi, J., Pourtakdoust, S.H. and Nobahari, H., "Trim and Maneuverability Analysis of a UAV Using a New Constrained PSO Approach", Journal of Aerospace Science and Technology (JAST), Iranian aerospace society, Vol. 8, No. 1, pp. 1-12, 2011.
7. Kennedy, J. and Eberhart, R.C., "Particle swarm optimization", In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia: IEEE Piscataway, pp. 1942-1948, 1995.
8. Laskari, E.C., Parapoulos, K.E. and Vrahatis, M.N., "Particle Swarm Optimization for Integer Programming", In proceedings of the IEEE 2002