

# احتساب الزامات سامانه انطباق عوارض زمینی در طراحی مسیر پروازی

## بهینه و مقید مبتنی بر TF/TA برای پهپادها

رضا زردشتی<sup>۱</sup> و امیرعلی نیکخواه<sup>۲</sup> محمدجواد یزدان پناه<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دانشکده هوافضا

دانشگاه تهران

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱/۲۶)

### چکیده

در این مقاله، به مسئله تاثیر الزامات سامانه انطباق عوارض زمینی در طراحی مسیر بهینه و مقید برای وسایل پرنده بدون سرنشین که ملزم به پرواز برفراز عوارض زمینیدر ارتفاع پایین هستند پرداخته شده است. با توجه به اینکه در بعضی پرنده‌ها از سامانه مزبور به‌عنوان سامانه کمک ناوبری استفاده می‌شود، این سیستم در مناطق ناهموار کارایی بیشتری دارد و با توجه به اینکه الگوریتم‌های طراحی مسیر بهینه عموماً سعی در عبور مسیر از مناطق هموار و کم‌ارتفاع دارند، با این تناقض، تامین الزامات این سیستم کار پیچیده‌ای است. در این مقاله سعی در ارائه مسیر بهینه و مقید با تضمین به‌کارگیری سامانه انطباق عوارض زمینی شده است. بدین‌منظور با توسعه الگوریتمی مبتنی بر شبکه جریان لایه‌ای روی داده‌های دیجیتالی عوارض زمینی و به‌کارگیری معادلات دینامیک سه‌بعدی پرنده در فضای گسسته همراه با اعمال قیود دینامیکو تابع هزینه، مدل کاملیاز پارامترهای تاثیرگذار سامانه مزبور در آن لحاظ شده است. الگوریتم حاصله با اعمال شرایط اولیه در کمترین زمان ممکن، مسیر بهینه و مقیدی تولید می‌کند که محدوده‌های مجاز پارامترهای تاثیرگذار سامانه مزبور در آن تامین شده است. نتایج عددی شبیه‌سازی، صحت این مسئله را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** طراحی مسیر بهینه و مقید، پهپاد، سامانه انطباق عوارض زمینی، شبکه جریان، دنبال‌روی عوارض/اجتناب از نواحی تهدید

## Considering Terrain Contour Matching System Requirements in the TF/TA Based Constraint Optimal Trajectory Design for UAVs

R. Zardashti and A.A. Nikkhah

M.J. Yazdanpanah

Aerospace Engineering Department

Control Engineering Department

K.N. Toosi University of Technology

Tehran University

(Received: 11/December/2013; Accepted: 15/April/2014)

### ABSTRACT

In this paper, the problem of the Terrain Contour Matching system requirement effect in the constraint optimal trajectory planning of the unmanned aerial vehicles that are require to fly at low altitude over the terrain has been discussed. According to using this system in some of vehicles as a navigation aiding system, it is more efficient in rough terrain and given that the optimal path planning methods have generally attempted to cross the paved areas, with this contradiction, providing the requirements of this system is a complex task. In this paper, it's tried to meet the system requirements in the constraint optimal trajectory design process. For this purpose, by developing an algorithm based on the layered network flow and applying dynamic equations of motion on digital terrain elevation data in the three-dimensional space with the discrete dynamical constraints and a cost function, a complete model of parameters affecting the system has been fulfilled. The resulting algorithm, by applying the initial conditions and in the least possible time, produces a constraint optimal trajectory in such a way that the requirements of the system are satisfied. Numerical results of simulation show validity of this issue.

**Keywords:** Trajectory Design, Unmanned Aerial Vehicle, Terrain Following/Threat Avoidance, Terrain Contour Matching, Network Flow

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): rezazardashti@dena.kntu.ac.ir

۲- دانشیار: nikkhah@kntu.ac.ir

۳- استاد: yazdan@ut.ac.ir

## ۱- مقدمه

و کاربردی نمی‌باشند و عموماً در شبکه‌های پراکنده<sup>۴</sup> با تعداد عناصر محدود مانند حمل و نقل، تخصیص، ترافیک و... مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فرمول‌بندی و حل چنین سیستمی به‌طور تحلیلی یا عددی با داشتن تعداد دلخواهی تهدید و محدودیت‌های چندگانه روی عواملی نظیر مصرف سوخت و زمان پرواز مشکل به‌نظر می‌رسد [۵]. در روش‌های مبتنی بر گراف نظیر روش‌های هندسی، ابتدا با در نظر گرفتن سینماتیک وسیله پرنده، گراف مشاهده‌پذیری ساخته شده و سپس الگوریتم دایجسترا برای جست‌وجوی کوتاه‌ترین مسیر از هر گره مورد استفاده قرار می‌گیرد. حاصل این الگوریتم‌ها عموماً مسیری در صفحه یعنی یک مسیر دوبعدی است [۶]. در [۷]، برای برنامه‌ریزی مسیر از این روش استفاده شده است.

از الگوریتم‌های تکاملی و کاشف<sup>۵</sup> نیز برای طراحی مسیر استفاده شده است [۸-۹]. در [۱۰] از روش محاسبه تکاملی (الگوریتم ژنتیک) برای طراحی مسیر پرنده‌های بدون سرنشین به‌صورت برخط استفاده شده است. در این روش، کاندیدهای منحصر به فرد نسبت به فضای کاری مورد ارزیابی قرار می‌گیرند به‌طوری‌که به محاسبه فضای ساختار نیازی نباشد.

در [۱۱]، از یک الگوریتم بهینه‌سازی توده مورچه‌ای بهبود یافته برای انجام برنامه‌ریزی بهینه سراسری<sup>۶</sup> مسیر پهپاد در محیط‌های پیچیده استفاده شده است. این الگوریتم قابلیت پیاده‌سازی در زمان واقعی را دارد. در این مقاله فرض شده که ارتفاع و سرعت پروازی توسط خلبان خودکار ثابت نگه داشته شده و جهت سرعت باد مشخص است. تهدیدات به‌صورت سایت‌های راداری ساکن و پراکنده در نظر گرفته شده‌اند و تابع هزینه حداقل‌سازی آشکارشدگی پرنده برای سایت‌های راداری است. در این مقاله عوارض زمینی لحاظ نشده‌اند.

برای پیش‌بینی مسیر بهینه پروازی، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی ممکن است مناسب نباشد زیرا بهینه نیستند، یعنی اثباتی برای بهینه‌گی آنها موجود نیست و عموماً جواب نزدیک به بهینه تولید می‌کنند و اگر پارامترها و توابع این الگوریتم‌ها که باید توسط کاربر تعیین شوند تغییر کنند، مسیرهای متفاوتی از این الگوریتم‌ها حاصل می‌شود. حتی با همان پارامترها و توابع اگر جمعیت اولیه مورد استفاده در این الگوریتم‌ها تغییر کند، باز هم جواب‌های متفاوتی از آنها به‌دست

می‌آیند و یا زمان خیلی زیادی را برای حل مسئله اختصاص می‌دهند. طی سالیان اخیر، مسئله طراحی مسیر به‌لحاظ کاربردهای متعدد آن در سیستم‌های هوشمند نقل و انتقال، کاربردهای فضایی، سیستم‌های هدایت خودگردان<sup>۱</sup> برای پهپادها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ملزومات این مسئله باعث شده که در رده مسائل محاسباتی پیچیده و سخت (NP-Hard) قرار گیرد. این پیچیدگی به بعد فضای مسئله، معیارهای بهینگی، تقید، قوام و غیره بستگی دارد. با مطالعه روش‌های متعددی که در این حوزه ارائه شده، ملاحظه گردید که در بسیاری از آنها، ساده‌سازی‌های زیادی صورت گرفته تا از عهده این مساله برآیند و یا زمان خیلی زیادی را برای حل مسئله اختصاص می‌دهند.

در بسیاری از مراجع، از روش کنترل بهینه برای مدل‌سازی و حل مسئله استفاده شده است [۲-۱]. در [۳]، مسئله تعقیب طولی عوارض زمینی (TF<sup>۲</sup>) با استفاده از روش کنترل بهینه کلاسیک، مورد توجه قرار گرفته و در آن معادلات جرم نقطه‌ای طولی هواپیما مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

روش کنترل بهینه توسط منون در [۵-۴] بسط داده شده است. در این مرجع به موضوع چگونگی مسیرهای تولیدشده براساس حداقل‌سازی تابع هزینه با ترکیب خطی از زمان پرواز و تعقیب عوارض زمینی، پرداخته شده است.

با توجه به اینکه معادلات الحاقی این مسئله کاملاً غیرخطی هستند، محاسبه آنها در سیستم‌های پیچیده بسیار مشکل است. از یک طرف، علاوه‌بر مشکل هم‌گرایی الگوریتم‌های تکرارشونده در این روش‌ها و وابستگی زیاد آنها به حدس اولیه بعضی از پارامترهای بهینه‌سازی، تحلیل عددی روش‌های فوق عموماً زمان‌بر می‌باشد. از طرف دیگر هیچ تعبیر فیزیکی از این پارامترها وجود ندارد که براساس آن بتوان یک حدس اولیه خوب به‌دست آورد [۱]. معایب روش فوق باعث شده که روش‌های دیگری نیز برای طراحی مسیر بهینه مورد توجه قرار گیرند که از بین آنها می‌توان به الگوریتم‌های ریاضی طراحی مسیر اشاره کرد. الگوریتم‌های ریاضی طراحی مسیر، یا مبتنی بر گراف هستند یا مبتنی بر شبکه‌بندی<sup>۲</sup>، که هر یک محاسن و معایب مختص به خود را دارا می‌باشند. روش‌های مزبور، ابزار استاندارد برای مسئله کوتاه‌ترین مسیر در اختیار دارند. اما روش‌های ارائه‌شده در مقالات، در بردارنده جنبه‌های دینامیکی

4 - Sparse

5 - Heuristic

6 - Global Optimization

1- Autonomous

2-Terrain Following

3- Grid

جهت ارضاشدن الزامات موردنظر در طول مسیر فراهم سازد. این راهبرد باعث می‌شود که سامانه مزبور نیز در سیستم کمک ناوبری پرنده قابل استفاده باشد. با این وسیله، یک مسیر تصحیح‌شده در اختیار پرنده قرار گرفته و پرنده نیز با به‌کارگیری سامانه ناوبری اصلاح‌شده، مبادرت به کاهش خطای ناوبری اینرسی می‌نماید.

لذا در ادامه مقاله، ابتدا مسئله طراحی مسیر به‌کمک یک شبکه جریان لایه‌ای فرمول‌بندی می‌شود. سپس الگوریتم پیشنهادی طراحی مسیر به‌طور مختصر توضیح داده می‌شود. در ادامه نحوه افزودن قیود مختلف به الگوریتم بیان می‌شوند. سپس الزامات و پارامترهای تاثیرگذار سامانه انطباق شرح داده شده و نحوه ورود آنها به الگوریتم ارائه می‌شود. در خاتمه نتایج شبیه‌سازی جهت تایید کارایی الگوریتم نمایش داده می‌شوند.

## ۲- الگوریتم طراحی مسیر مبتنی بر شبکه جریان

این الگوریتم از یک شبکه رقومی از سلول‌های مستطیل شکل با اندازه مساوی به‌عنوان ورودی الگوریتم استفاده می‌کند که اندازه آن برابر با یک شبکه  $m \times n$  است. سپس براساس گرید DEM<sup>۱</sup>، یک ساختار شبکه جریان ساخته می‌شود. هر نقطه از گرید به‌عنوان یک گره از شبکه درنظر گرفته می‌شود. چون گرید DEM منظم است، می‌توان گره‌ها را به‌صورت یک شبکه لایه‌ای دسته‌بندی کرد، پس  $n$  لایه و هر لایه شامل  $m$  گره خواهد بود. هر گره شبکه به‌صورت  $(x, y, z)$  موقعیت جغرافیایی آن نقطه محسوب می‌شود. تمام نقاطی که دارای طول برابر هستند یک لایه از شبکه نامیده می‌شوند.

گره‌های واقع در لایه  $j$  توسط کمان‌هایی به تمام گره‌های واقع در لایه  $j-1$  متصل می‌شوند. اگر گره  $(X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j})$  در لایه  $j$  و گره  $(X_{i,j-1}, Y_{i,j-1}, Z_{i,j-1})$  در لایه  $j-1$  باشد، تابع هزینه  $C_{i,j,k,j-1}$  برای کمان متصل‌کننده این دو گره تعریف شده که درواقع، هزینه انتقال یک واحد جریان از گره  $(i, j-1)$  به گره  $(i, j)$  می‌باشد.

بردار  $C$  را به‌عنوان متریک هزینه تعریف‌شده برای کمان‌ها درنظر گرفته و کمان‌هایی که دو لایه متوالی یک شبکه را بهم وصل می‌کنند را یک سطح می‌نامیم. هرگاه  $V$ ، مجموعه همه گره‌های شبکه با اندازه  $m \times n$  و  $A$  مجموعه همه کمان‌های شبکه با اندازه  $V \times V$  باشند، یک شبکه جریان با گراف جهت‌دار  $G(V, A, X)$  خواهیم داشت به‌طوری که  $X$  بردار جریان روی

می‌آید. در حالت ایده‌آل که همه پارامترها، وزن‌های توابع و جمعیت اولیه به بهترین شکل توسط کاربر تعریف شوند، جواب حاصل از این الگوریتم‌ها بیشترین تطبیق را با جواب بهینه خواهد داشت یا احتمالاً جواب بهینه حاصل می‌شود. در این صورت نیز، رسیدن به جواب بهینه، متضمن اجرای زمانبر و طولانی فرآیند جست‌وجو است.

از طرف دیگر، بسیاری از پرنده‌هایی که در ارتفاع پایین و بر فراز عوارض زمینی پرواز می‌کنند نیاز به سامانه کمک ناوبری مانند سامانه انطباق نقشه عوارض زمینی دارند و این سامانه مبتنی بر انطباق متناوب داده‌های حاصل از ناحیه اسکن شده توسط حسگر ارتفاع‌سنج رادیویی با داده‌های نقشه عددی ناحیه موردنظر موجود در حافظه پرنده می‌باشد و بدین طریق موقعیت پرنده را تصحیح و داده‌های سامانه ناوبری اینرسی را به‌روزرسانی می‌کند. باتوجه به اینکه انطباق داده‌ها در نواحی که از ناهمواری بیشتری برخوردار باشد بهتر انجام می‌گیرد، طراحی مسیری که حداکثر استفاده را از میزان ناهمواری‌های زمینی ببرد موفق‌تر خواهد بود و لذا یکی از مهمترین قیود سامانه‌ای برای داشتن مسیر واقعی در این‌گونه پرنده‌ها، لحاظ نمودن محدوده عددی مورد نیاز ناهمواری و پارامترهای مرتبط با آن در مسئله طراحی مسیر می‌باشد که این مسئله در کارهای انجام‌شده، دیده نشده است.

در این مقاله با استفاده از ساختار شبکه جریان لایه‌ای که روی داده‌های دیجیتالی عوارض ساخته می‌شود، الگوریتمی ارائه می‌شود که امکان افزودن قیود خاص به آن نیز وجود دارد. از مزایای این الگوریتم که نتایج عددی کاملاً مؤید آنهاست، می‌توان به چهاربعدهی بودن مسیر حاصل در مقایسه با روش‌های هندسی، سرعت بالای آن در مقایسه با الگوریتم‌های موجود، عدم نیاز به نرم‌افزار پایه خاص و تعیین جواب دقیق در مقایسه با الگوریتم‌های کاشف نظیر ژنتیک اشاره کرد.

البته با توجه به اینکه مبانی الگوریتم فوق در پژوهش دیگری به‌صورت مبسوط پرداخته شده [۱۲]، در این مقاله بعد از اشاراتی به روش فوق و بیان مدل مسئله بهینه‌سازی، به بحث مسئله اصلی که تاثیر و احتساب الزامات پارامترهای تاثیرگذار سامانه انطباق عوارض زمینی در طراحی مسیر است پرداخته می‌شود. برای حل این مسئله، راه‌حل‌های متعددی وجود دارد. ولی در این تحقیق، روش ابتکاری پیشنهاد می‌شود که می‌تواند در فرآیند پیاده‌سازی الگوریتم طراحی مسیر در فضای گسسته به‌کار گرفته شود به‌گونه‌ای که مسیر نهایی، شرایط کافی را

$V_n$  باشد و برای هر  $l$  و  $t$  که  $1 \leq l \leq t \leq n$

$P_{l,t} = \langle V_l, V_{l+1}, \dots, V_t \rangle$  زیرمسیری از گره  $V_l$  به گره  $V_t$  باشد.

آن گاه  $P_{l,t}$  مسیر بهینه از گره  $V_l$  به گره  $V_t$  خواهد بود.

با استفاده از لم فوق الذکر، شرایط بهینگی برای مسئله موردنظر به صورت زیر تبیین می شود: در هر تکرار الگوریتم، به گره های هر لایه از شبکه یک عدد نسبت داده می شود که به آن برچسب هزینه<sup>۳</sup> گفته می شود. با تشریح شرایط بهینگی، مسئله یافتن مسیر بهینه و مقید به زیرمسئله هایی مطابق لایه های شبکه تقسیم شده و الگوریتم موردنظر جهت حل زیرمسئله ها و سپس ترکیب آنها، در دو فاز اصلی ارائه می گردد. در فاز اول با بهره گیری از دیدگاه حریمانه، برچسب های هزینه بهینه گره ها به صورت متوالی از لایه اول (شامل گره شروع) تا لایه نهایی (شامل گره پایانی) محاسبه شده و در فاز دوم، با بهره گیری از دیدگاه بازگشت به عقب<sup>۴</sup>، مسیر بهینه براساس برچسب هزینه گره ها استخراج می گردد.

### ۳- معادلات حرکت

معادلات حرکت را که در اینجا براساس معادلات عملکردی نقطه ای<sup>۵</sup> سه بعدی وسیله پرنده در حالت غیرخطی بیان می شوند یادآوری می کنیم. در حالت کلی، بردار سرعت پرنده نسبت به بدنه توسط زوایای حمله  $\alpha$  و لغزش جانبی  $\beta$  تعریف می شود. درحالی که بردار سرعت در صفحه تقارن (قائم) پرنده قرار گیرد، زاویه لغزش جانبی صفر در نظر گرفته می شود که به آن پرواز متقارن می گویند. این معادلات به صورت زیر تعریف می شوند [۱۴]:

$$m\dot{V} = T \cdot \cos \alpha - D - m \cdot g \cdot \sin \gamma \quad (۵)$$

$$m \cdot V \cdot \dot{\gamma} = (T \cdot \sin \alpha + L) \cdot \cos \mu - m \cdot g \cdot \cos \gamma \quad (۶)$$

$$m \cdot V \cdot \cos \gamma \cdot \dot{\chi} = (T \cdot \sin \alpha + L) \cdot \sin \mu \quad (۷)$$

$$\dot{m} = -\frac{T \cdot SFC}{3600 \cdot g} \quad (۸)$$

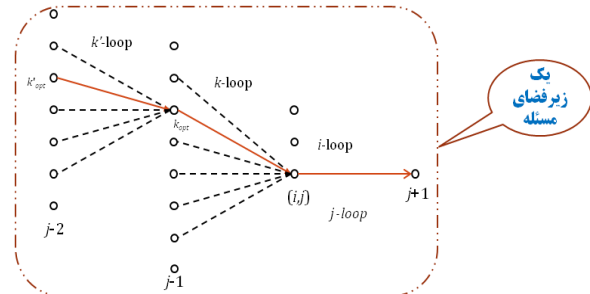
$$\dot{x} = V \cos(\gamma) \cos(\chi)$$

$$\dot{y} = V \cos(\gamma) \sin(\chi)$$

$$\dot{z} = V \sin(\gamma) \quad (۹)$$

که در آن،  $\gamma$  معرف زاویه مسیر پرواز یعنی زاویه بین بردار سرعت و صفحه x-y می باشد،  $\chi$  زاویه چرخش (هدینگ) یعنی زاویه بین تصویر بردار سرعت پرنده بر روی صفحه x-y و محور

کمان ها بوده و به صورت تابع  $X: A \rightarrow \mathbb{R}$  تعریف می شود. شکل ۱ نمایش شهودی از یک زیرفضای ایجاد شده از شبکه، کمان های واصله به گره جاری از گره های ماقبل و برچسب اولیه آنها را نشان می دهد.



شکل (۱): نمایشی از شبکه جریان لایه ای ایجاد شده.

مسئله موردنظر را می توان به صورت ریاضی زیر فرمول بندی کرد [۱۳]:

$$\begin{aligned} \text{Min } J &= \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} C_{(k,j-1),(i,j)} X_{(k,j-1),(i,j)} \\ \text{s.t. } \begin{cases} \sum X_{k,j-1,i,j} - \sum X_{i,j,k,j-1} = \begin{cases} m \times n - 1 & (i,j) = \text{Start Node} \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \\ X_{k,j-1,i,j} \in \{0,1\}, \forall [(k,j-1),(i,j)] \in A \end{cases} \quad (۱) \end{aligned}$$

که در آن،  $J$  معرف هزینه کل مسیری در شبکه بوده و  $X_{(k,j-1),(i,j)}$  مقدار جریان را نشان می دهد که از کمان  $[(k,j-1),(i,j)]$  عبور می کند و به عنوان متغیر تصمیم گیری قلمداد می شود. در صورتیکه کمان مزبور روی مسیر بهینه واقع شود خواهیم داشت:  $X_{(k,j-1),(i,j)} = 1$  و در غیر این صورت،  $X_{(k,j-1),(i,j)} = 0$ . اگر هیچ جریانی وجود نداشته باشد که به طور همزمان در هر دو محدودیت فوق صدق کند، شبکه را نشدنی<sup>۱</sup> می نامند.

### شرایط بهینگی و توسعه الگوریتم شبکه جریان

شرایط بهینگی موردنظر، اتکا به این خاصیت می کند که هر مسیر بهینه بین دو گره، شامل مسیری بهینه در داخلش می باشد. به عبارت دیگر، زیرساختار بهینه، که در روش های حریمانه<sup>۲</sup> و برنامه ریزی پویا به کار گرفته می شود، نشانه ای از قابلیت اعمال روش مزبور است [۷]. لم بعدی، ویژگی زیرساختار بهینه مسیری بهینه را دقیق تر بیان می کند.

لم ۱: (زیرمسیرهای مسیر بهینه، خود، مسیرهای بهینه هستند):

فرض کنید  $P = \langle V_1, V_2, \dots, V_n \rangle$  مسیر بهینه از گره  $V_1$  به گره

3- Cost Label

4- Backtracking

5- Point Performance Equations

1- Infeasible Network Flow

2- Greedy Approach

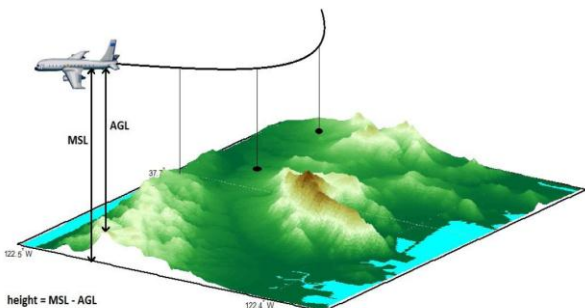
سنجش عملکرد و بهینه‌سازی مسیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. معیاری که در اینجا مدنظر قرار گرفته کوتاه‌ترین مسیر است. این معیار را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$C(t) = \int \dot{S} dt = \int dS \quad (16)$$

لازم به ذکر است که اگر بخواهیم مسئله فوق را به صورت عددی و مثلاً با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی پویای پیوسته یا کنترل بهینه حل کنیم بایستی چندبار از کل فضای حالت گذر کنیم تا به جواب بهینه برسیم. اما با طرح‌های گسسته‌سازی مناسب فضای جواب، الگوریتم کارآمد شبکه جریان لایه‌ای، با یک‌بار عبور از فضای جواب، مسیر بهینه را در قالب بهینه‌سازی چندمعیاری می‌یابد.

#### ۶- ملاحظات سامانه انطباق عوارض زمینی

الگوریتم سامانه انطباق عوارض زمینی با استفاده از تطبیق داده‌های عوارض زمینی و ارتفاع سنج راداری برای یافتن موقعیت دقیق پرنده و در نتیجه به‌عنوان سامانه کمک ناوبری استفاده می‌گردد (شکل ۲).



شکل (۲): نمایش مفهومی انطباق عوارض برای کاربردهای هوایی.

به عبارت دیگر، فرآیند سامانه مزبور در سه مرحله انجام می‌شود؛ مرحله اول، آماده‌سازی داده‌های عوارض زمینی مبتنی بر نقشه‌های دیجیتالی، تشکیل ماتریس‌های ارتفاع عوارض و ذخیره آنها در حافظه پرنده است. مرحله دوم، اکتساب داده‌ها توسط حس‌گر ارتفاع سنج رادیویی در طول مسیر و مرحله سوم، انطباق داده‌های اکتساب‌شده با ماتریس مزبور در مناطق موردنظر می‌باشد. شکل ۳، نمایش متداول فرآیند مزبور را نشان می‌دهد [۱۵].

x بوده و  $\mu$  معرف زاویه غلت<sup>۱</sup> حول محور خط سراسری می‌باشد، D و L به ترتیب نیروهای برآ و پسا، T و SFC به ترتیب تراست و مصرف سوخت ویژه، m جرم و (x,y,z) موقعیت مکانی پرنده می‌باشند.

#### ۴- قیود دینامیکی

عملکرد پرنده تحت تاثیر محدودیت‌های عملکردی و آیرو دینامیکی است که مانورپذیری آن را تحت تاثیر قرار می‌دهند. برای تضمین راحتی اتوپیلوت پرنده محدودیت‌های بیشتری نیز می‌توانند لحاظ شوند.

نرخ صعود و نرخ گردش به‌عنوان دوتا از محدودیت‌های عملکردی به صورت زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$ROC_{max} = V_{ROC-max} \sin(\gamma_{ROC-max}) \quad (13)$$

$$\dot{\chi}_{max} = 57.3 \times \frac{V}{R_{min}} \quad (14)$$

که در آن،  $ROC_{max}$  و  $\dot{\chi}_{max}$ ، به ترتیب حداکثر نرخ اوج‌گیری<sup>۲</sup> و حداکثر نرخ گردش را نمایش می‌دهند و  $R_{min} = \frac{V^2}{g \sqrt{n_{max}^2 - 1}}$  حداقل شعاع گردش پرنده است که در آن،

g شتاب جاذبه و  $n_{max}$  حداکثر ضریب بار پرنده هستند. لذا از بین پارامترهای مذکور، حداکثر نرخ اوج‌گیری، حداکثر نرخ گردش و حداکثر ضریب بار به‌عنوان ۳ محدودیت مستقل از پارامترهای عملکردی در نظر گرفته می‌شوند.

از طرف دیگر، زاویه غلت نیز از محدودیت‌های جدی در پرنده‌های BTT<sup>۳</sup> به حساب می‌آید. این محدودیت یکی به‌خاطر محدودیت در مانورپذیری در کانال عرضی-سمتی و دیگری به دلیل محدودیت در سنسورها و ادوات ناوبری مانند ارتفاع سنج رادیویی است که الزامات سیستمی بر مقدار غلت پرنده حاکم می‌کنند.

همچنین، محدودیت در سرعت پرنده (و یا به عبارتی، میزان تراست موردنیاز) به‌عنوان ورودی مقید در نظر گرفته می‌شود، چراکه پرنده مجاز نیست هرچقدر که بخواهد سرعت خود را افزایش یا کاهش دهد.

#### ۵- تابع هزینه

برای دستیابی به مسیریابی با کیفیت مطلوب، تابع معیار لازم است. در پرنده‌های بدون سرنشین، معیارهای مختلفی برای

1- Bank Angle (Velocity Roll)

2-Rate Of Climb

3-Bank-To-Turn

## ۷- محدودیت حداکثر ارتفاع پروازی

محدودیت حداکثر ارتفاع پروازی، از قیود سامانه‌ای است که در مسئله طراحی مسیر بهینه لحاظ می‌شود. به عبارت دیگر، مسیر بهینه به گونه‌ای مقید می‌شود که تحت هیچ شرایطی، وسیله پرنده بالاتر از ارتفاع مزبور پرواز نکرده و مجبور به استفاده از مانورهای ترکیبی TF و TA برای انجام پرواز خود خواهد شد. دلایلی چون پنهان ماندن از دید رادار و پرواز در پوشش عوارض با ارتفاع پایین، محدودیت در عملکرد موتور، برد بعضی از سنسورها یا دوری از ابرهای خطرناک و... از دلایل تعریف چنین قیدی به شمار می‌روند. لذا جهت نیل به این هدف، محدودیت حداکثر ارتفاع پروازی ( $h_{max}$ ) در الگوریتم موردنظر منظور می‌شود بدین صورت که ارتفاع پروازی در هر گره جاری ( $i, j$ ) با مقدار حداکثر فوق مقایسه شده و اگر بیش از آن باشد جریان عبوری از آن گره برابر با صفر قرار داده می‌شود. بدین ترتیب مسیر طراحی شده توسط الگوریتم به‌طور خودکار از نقاط مزبور عبور نمی‌کند.

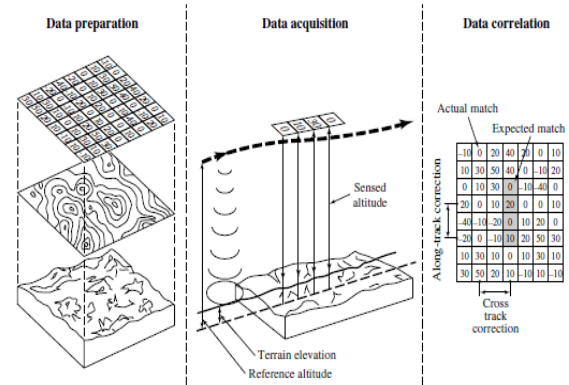
## ۸- پیاده‌سازی الگوریتم و اخذ نتایج

به‌منظور پیاده‌سازی و اخذ نتایج شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی از محیط نرم‌افزاری MATLAB استفاده شده است. اجرای الگوریتم با سناریوهای متنوعی براساس انواع مختلف تابع هزینه، قیود و شرایط اولیه متعدد انجام شده و بخشی از نتایج آنها در اینجا آورده شده است.

برای اجرای الگوریتم از یک نقشه DEM نوعی استفاده شده است. شبکه جریان ساخته شده روی نقشه موردنظر، دارای ۲۳۲۰۵۰ گره می‌باشد. مشخصات پیش‌رانش و آیرودینامیک پهباد موردنظر نیز معلوم می‌باشد.

همچنین به‌منظور بررسی تاثیر اجتناب از مناطق ممنوعه، مدل استوانه‌ای به شعاع ۴۰۰۰ متر در محل موردنظر استفاده شده است (شکل ۴). مسیر بهینه با معیار کوتاه‌ترین مسیر به‌دست آمده که در شکل مزبور قابل نمایش است. دیده می‌شود که مسیر مزبور از نقطه شروع به نرمی از کنار منطقه تهدید عبور نموده و به نقطه هدف رسیده است. طول مسیر ۷۶۹۵۷ متر و زمان پروازی ۳۳۶ ثانیه توسط الگوریتم حاضر با پردازش ۹۰ ثانیه حاصل شده است.

به‌منظور بررسی تاثیر الزامات سامانه انطباق عوارض روی مسیر، شبیه‌سازی با مقادیر جدول ۱ انجام و نتایج آن کسب گردید. شکل ۴ مسیر حاصله را در کنار مسیر نامی (بدون



شکل (۳): نمایش مفهومی انطباق عوارض در سه مرحله.

از عوامل موثر بر انتخاب ناحیه به‌روزرسانی موقعیت توسط این الگوریتم، ناهمواری و یکتایی عوارض است و لذا کیفیت سیگنال‌های تولیدشده توسط آن مستقیماً با افزایش دامنه، فرکانس و تصادفی بودن عوارض افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، الگوریتم موردنظر روی هر نوع عوارضی کار نمی‌کند. مثلاً هرچقدر عوارض ناهموارتر باشد، سامانه مزبور بهتر کار می‌کند. اما عوارض خوب باید ویژگی دیگری نیز به‌جز ناهمواری داشته باشد؛ عوارض باید یکتا باشد (به‌عبارت دیگر یک پروفایل خارج از نقشه راقمی نباید مشابه هیچ نقشه دیگری باشد).

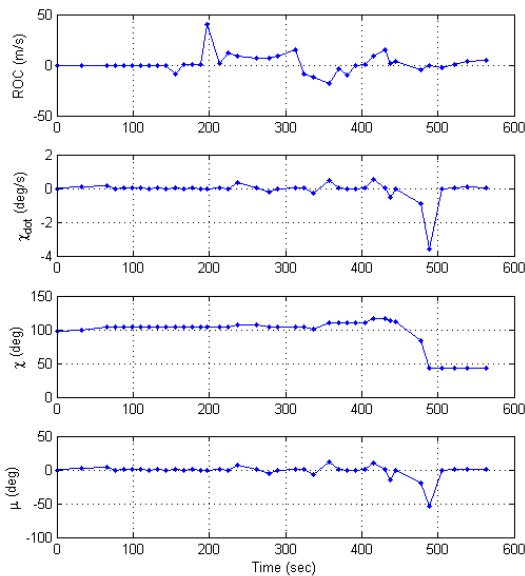
ناهمواری عوارض به‌صورت انحراف استاندارد نمونه‌های گردایان ارتفاع عوارض به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\nabla h(x_i)\|^2} \quad (17)$$

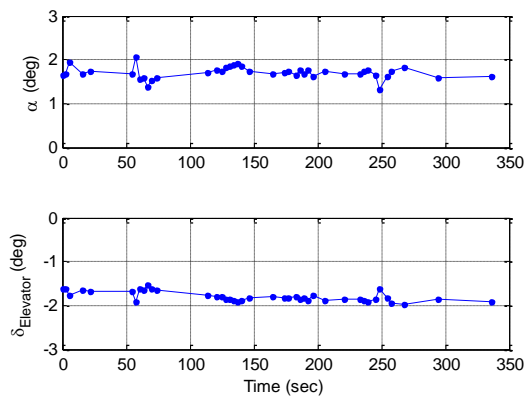
که در آن،  $x_i$ ها موقعیت‌های توزیع شده یکنواخت در ناحیه موردنظر می‌باشند. دیده می‌شود که  $\sigma_T$  معیاری برای میزان تغییر ارتفاع عوارض حول ارتفاع متوسط است. نواحی که در آنها  $\sigma_T$  دارای مقادیر ۵۰ فوت یا بیشتر باشد، معمولاً کاندیداهای خوبی برای نواحی تصحیح و انطباق درنظر گرفته می‌شوند. دریاچه‌ها و نواحی هموار یا خیلی مسطح مقدار  $\sigma_T$  خیلی کمی دارند و لذا نواحی تصحیح مناسبی نمی‌باشند.

تأمین محدوده مجاز پارامتر تاثیرگذار فوق، تضمین به‌کارگیری سامانه مزبور می‌باشد و بدین صورت در الگوریتم موردنظر درنظر گرفته می‌شود که ابتدا مقدار پارامترهای مذکور برای هر گره از ابتدا تا انتهای لایه‌های شبکه براساس پروفیل عوارض محاسبه می‌شوند و در صورتی که خارج از حد مجاز خود باشند جریان عبوری از آن گره برابر با صفر قرار داده می‌شود. بدین ترتیب مسیر طراحی شده توسط الگوریتم به‌طور خودکار از نقاط مزبور عبور نمی‌کند.

کامل آن در مرجع [۱۷] آمده پیاده‌سازی و نتایج آن با الگوریتم پیشنهادی مقایسه گردیده است. برای این سناریو نیز، یک منطقه DEM با نقاط شروع و پایان مشترک با محدودیت‌های یکسان  $\dot{\chi}_{max} = 4.5^\circ/sec$  و  $ROC_{max} = 30m/sec$  (بدون قید ارتفاع حداکثر) با معیار حداقل زمان پروازی در نظر گرفته شد.



شکل (۵): تغییرات زوایای مسیر پروازی، هدینگ، غلت و نرخ اوج‌گیری در طول مسیر پروازی حاصله.



شکل (۶): تغییرات زاویه حمله و زاویه الویتور پرنده در طول مسیر پروازی حاصله.

زمان اجرا برای الگوریتم حاضر حدود ۸۹ ثانیه و برای الگوریتم کاشف، ۱۹۰ ثانیه به‌دست‌آمده که نشان می‌دهد سرعت پردازش الگوریتم حاضر، بیش از دو برابر دیگری است. همچنین، زمان پرواز به‌دست‌آمده مسیر حاصله براساس

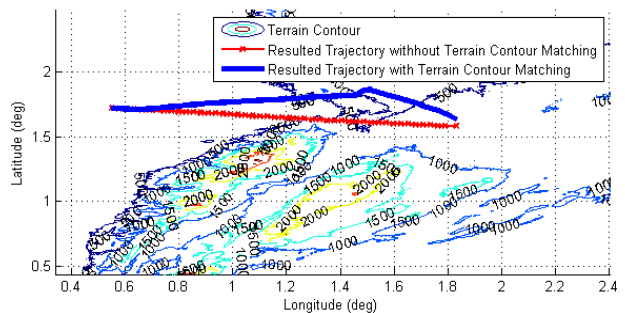
الزامات سامانه مزبور) در مجاورت عوارض نشان می‌دهد. مطابق شکل دیده می‌شود که مسیر حاصله، سعی نموده خود را به عوارض زمینی نزدیک‌تر کند تا پارامترهای زبری سطح را در محدوده موردنیاز خود تامین نماید.

جدول (۱): مقادیر کران پارامترهای سامانه انطباق عوارض.

$\sigma_{T min}$	۱۰
$\sigma_{T max}$	۱۰۰

شکل ۵ پارامترهای دینامیکی و عملکردی شامل نرخ اوج‌گیری، زاویه گردش (هدینگ)، سرعت زاویه هدینگ و زاویه غلت وسیله پرنده حاصل از الگوریتم طراحی مسیر را برحسب زمان و متناسب با نقاط مسیر حاصله نشان می‌دهد. دیده می‌شود که دامنه تغییرات زاویه غلت در محدوده مجاز خود به‌خوبی قرار گرفته و لذا قیود صفحه عرضی پرنده ارضاء شده است. همچنین دامنه تغییرات نرخ اوج‌گیری و زاویه اوج‌گیری در محدوده مجاز خود به‌خوبی قرار گرفته و لذا قیود صفحه قائم پرنده نیز ارضاء شده است. زاویه هدینگ نیز رفتاری متناسب با مسیر حرکت به خود اختصاص داده است.

شکل ۶، تغییرات زاویه حمله و زاویه الویتور وسیله پرنده را برحسب زمان در طول مسیر پروازی نشان می‌دهد. مطابق شکل، تغییرات زاویه حمله تریم در همسایگی ۱/۶ درجه و زاویه الویتور تریم نیز زیر در همسایگی ۱/۷- درجه (به‌صورت تقریباً کاهشی و متناسب با کاهش وزن پرنده و تغییر مرکز جرم) به‌خوبی مشهود است و نشان می‌دهد که شرایط پروازی حالت دائم (تریم) پرنده در کل زمان پرواز حاصل شده است.



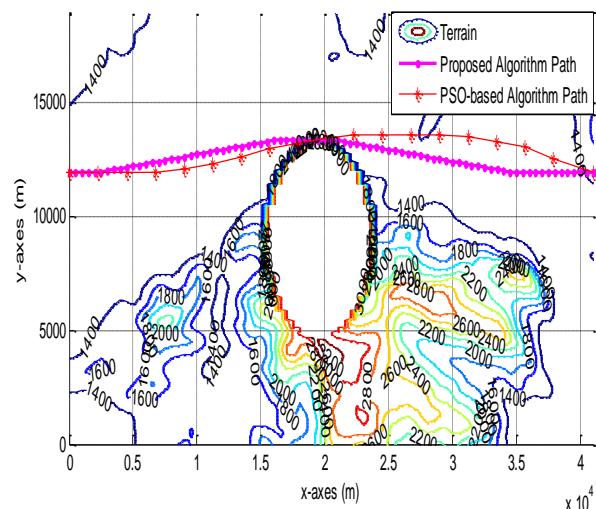
شکل (۴): مقایسه دو مسیر با و بدون در نظر گرفتن پارامترهای تاثیرگذار سامانه انطباق عوارض زمینی.

به‌منظور اعتبارسنجی روش حاضر، روش کاشف مبتنی بر بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیک ترکیبی (DHPSO)<sup>(۱)</sup> که شرح

## ۱۰- مراجع

1. Vincent T.L. and Grantham W.J. "Nonlinear and Optimal Control Systems", John Wiley and Sons, Inc., 1999.
2. Babaei, 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. 55-68. 2012 (in Persian).
3. Lu, P. and Pierson, B.L. "Optimal Aircraft Terrain-Following Analysis and Trajectory Generation", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 18, No. 3, 1995.
4. Menon, P.K.A. and Kim, E. "Optimal Helicopter Trajectory Planning for Terrain Following Flight", Georgia Institute of Technology, School of Aerospace Engineering Atlanta, NASA Contractor Report 177607, 1990.
5. Menon, P.K.A., Kim, E., and Cheng, V.H.L. "Optimal Trajectory Synthesis for Terrain - Following Flight", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 14, No. 4, pp. 807-813, 1991,
6. Betts J.T. and Huffman W.P. "Path Constrained Trajectory Optimization Using Sparse Sequential Quadratic Programming", Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 16, No. 1, pp. 59-68, 1993.
7. Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R.L. and Stein C. "Introduction to Algorithms", McGraw Hill, New York, 2002.
8. 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, 2012 (in Persian).
9. Berger, A., Razouk, N. and Angelides, G. "Distance and Curvature Constrained Shortest Paths and an Application in Mission Planning", ACM SE'06, Melbourne, Florida, USA, March 10- 12, 2006.
10. Zheng, C., Li, L., Xu, F., Sun, F. and Ding, M. "Evolutionary Route Planner for Unmanned Air Vehicles", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 21, No. 4, 2005.
11. 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, 2007.
12. Zardashti, R., Nikkiah, A.A, and Yazdanpanah M.J. "Constrained Optimal Terrain Following/Threat Avoidance Trajectory Planning Using Network Flow", The Aeronautical Journal, Vol. 118, No. 1203, 2014.
13. Ahuja, R.K., Magnanti, T.L., and Orlin, J.B. "Network Flows, Theory, Algorithms and Applications", Prentice Hall Englewood Cliffs, Vol. 24, No. 4, pp.133-135, 1993.
14. Miele, A. "Flight Mechanics, Vol. I, Theory of Flight Paths", Addison-Wesley, Reading MA, 1962.

الگوریتم حاضر، ۱۷۸/۸ ثانیه و براساس الگوریتم فوق، ۱۸۲/۵ ثانیه شده که نشان می‌دهد الگوریتم حاضر، ۳/۷ ثانیه زمان پرواز کمتری را مبتنی بر معیار حداقل زمان پروازی حاصل نموده است. شکل ۷، مسیرهای تولیدشده توسط دو روش مزبور با شرایط اولیه یکسان را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که القای محدودیت‌هایی چون الزامات سامانه انطباق عوارض زمینی نیز در این روش پیچیده بوده و لذا از استفاده آنها اجتناب گردید. از طرف دیگر، به دلیل ماهیت اتفاقی بودن جست‌وجوی جواب در روش مزبور، مسیرهای منتهی به ازای هر اجرا متفاوت بوده و لذا جواب حاصله قطعی نمی‌باشد.



شکل (۷): مقایسه مسیرهای حاصل از یک روش کاشف (PSO) و الگوریتم حاضر در شرایط یکسان.

## ۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله احتساب پارامترهای تاثیرگذار سامانه کمک‌ناوبری انطباق عوارض زمینی در فرآیند طراحی مسیر بهینه و مقید چهاربعدی (سه‌بعد مکانی و یک‌بعد زمانی) برای وسایل پرنده بدون سرنشین مورد بررسی قرار گرفته و الگوریتم جدیدی برای حل آن ارائه شده است. جنبه‌های نوآورانه این الگوریتم، تولید جواب بهینه و قطعی در کنار اعمال قیود مختلف، قابلیت پذیرش و اعمال الزامات محدودکننده الگوریتم‌های کمک‌ناوبری مانند سامانه انطباق عوارض زمینی، سادگی در پیاده‌سازی و سرعت بالای پردازش آن می‌باشد. نتایج حاصله و اعتبارسنجی روش پیشنهادی نیز کاملاً مؤید مسائل فوق است.



15. Siouris, G.M. "Missile Guidance and Control Systems", Published by: Springer, 2003.
16. Zipfel, P.H. "Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics", Published by: AIAA, 2007.
17. Karimi J. "Optimal Maneuver-Based Motion Planning Over Terrain and Threats Using Heuristic Optimization Approach", PhD Thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2011.