

طراحی الگوریتم عبور از مانع در برخورد های غیرمترقبه پهپادهای بال ثابت

چکیده: در این مقاله طراحی الگوریتم عبور از مانع برای پهپادهای بال ثابت در مواجهه با موانع متحرک و برخورد های غیر مترقبه مد نظر است. روش های متداول در طراحی سامانه های عبور از مانع مورد بررسی قرار گرفته و از آن بین روش توابع پتانسیل بدلیل مناسب بودن برای سامانه های برخط و موانع ناشناخته، بعنوان مبنای طراحی الگوریتم مزبور مورد استفاده قرار گرفته است. اما بدلیل دینامیک غیرهولونومیک پهپادهای بال ثابت چالش هایی از قبیل کمینه های محلی توابع پتانسیل، حداقل سرعت و اماندگی و حداقل شعاع گردش پهپادهای بال ثابت به هنگام برخورد با مانع وجود دارد که در این تحقیق با معرفی یک روش ابتکاری اقدام به حل آن مسائل شده است. در نهایت با اعمال الگوریتم پیشنهادی بر دینامیک غیرخطی یک پهپاد بال ثابت و شبیه سازی در نرم افزار متلب برای سناریوهای مختلف، عملکرد این الگوریتم مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های راهنما: عبور از مانع، پهپادهای بال ثابت، روش توابع پتانسیل.

علی میرزائی کهق *

استادیار
گروه هوایی دانشگاه
علوم انتظامی امین

فرشاد پازوکی

استادیار، گروه مهندسی هوافضا، واحد
علوم و تحقیقات،
دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

شهرام اعتمادی حقیقی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد
علوم و تحقیقات،
دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

داود اسدی

استادیار، گروه مهندسی هوافضا، واحد
علوم و تحقیقات،
دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

Ali Mirzaee Kahagh*

Assistant professor
Amin Police University,
Tehran

Farshad Pazooki

Assistant Professor,
Department of Aerospace
Engineering, Science and
Research Branch, Islamic
Azad University, Tehran

Shahram Etemadi Haghighi

Assistant Professor,
Department of Mechanical
Engineering, Science and
Research Branch, Islamic
Azad University, Tehran

Davood Asadi

Assistant Professor,
Department of Aerospace
Engineering, Science and
Research Branch, Islamic
Azad University, Tehran

Design of obstacle avoidance algorithm for fixed-wing UAVs in unexpected collisions

Abstract: This paper investigates the obstacle avoidance problem of fixed-wing Unmanned Aerial Vehicles (FWUAVs) while considering moving obstacles and unexpected collisions. The routine methods in designing obstacle avoidance systems are investigated and the potential function approach is selected since it is suitable for online missions and unexpected collisions. Due to the non-holonomic dynamic of FWUAVs, several challenges including the local minima, minimum stall speed, and minimum turn radius exist in obstacle avoidance. In this research, a novel approach is introduced to resolve the above challenges. Finally, the performance of the proposed algorithm is demonstrated through the application of the proposed algorithm on the nonlinear dynamic of FWUAV in several simulation scenarios in Matlab.

Keywords: Obstacle avoidance, fixed-wing UAVs, potential functions method.

۱- مقدمه

به صورت اتفاقی و روش هندسه برداری برای قرار نگرفتن در کمینه های محلی پیشنهاد شده است [۸].

روش میدان پتانسیل بدلیل سهولت طراحی و مناسب بودن برای کنترل برخط مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در این روش می توان همزمان با کنترل و هدایت ربات در مسیر ماموریت، قابلیت عدم برخورد ربات و موانع محیط را به راحتی با تعریف توابع پتانسیل جاذبه و دافعه تضمین نمود [۹]. از اینرو در این مقاله از این روش برای طراحی الگوریتم عبور از موانع استفاده شده است.

در سال های اخیر محققین با معرفی توابع پتانسیل جدید و ترکیب با سایر روش ها باعث توسعه و کاربرد تر شدن این روش شده اند [۱۰-۱۳].

بطور کلی تحقیقات زیادی با استفاده از توابع پتانسیل در خصوص طراحی الگوریتم عبور از موانع برای ربات های هولونومیک (مانند کوادروتورها) صورت گرفته است [۱۴-۱۶]. اما در خصوص پهپادهای بال ثابت که بدلیل داشتن قیدهای دینامیکی نوعی ربات غیر هولونومیک محسوب می شوند، تحقیقات کمتری صورت گرفته است [۱۷، ۱۸].

اما مشکلی که در دو کار اخیر [۱۷، ۱۸] وجود دارد این است که در مواقع برخورد پهپاد با مرکز مانع مشکل ایجاد مینماید و وجود دارد و همچنین تضمین و تصویر روشنی از رعایت محدودیت های عملکردی پهپادهای بال ثابت در محل برخورد ارائه نشده است.

در سال ۲۰۲۰ میرزایی و همکاران [۱۹] یک الگوریتم جدیدی معرفی کردند که در آن از دوایر حداقل شعاع گردش در طراحی مسیر حرکت در هنگام مواجهه با مانع ثابت استفاده شده است. هر چند که در آن کار ملزومات عملکردی پهپاد از قبیل حداقل شعاع گردش و حداقل سرعت و اماندگی در نظر گرفته شده است. اما نواقص آن کار برون خط^۱ بودن طراحی مسیر، ثابت بودن موانع و سنگین بودن الگوریتم طراحی شده بدلیل استفاده از دوایر متغیر رشد کننده در هر بار اجرای برنامه بود.

از این رو در این مقاله سعی شده است الگوریتم ارائه شده در منبع [۱۹] ارتقاء یابد و الگوریتمی طراحی شود که نیاز به دوایر متغیر رشد کننده نداشته باشد تا از لحاظ محاسباتی سبکتر و برای ماموریت های برخط و موانع متحرک نیز کاربرد داشته باشد و همچنین در حد امکان رد کردن مانع با تغییرات اندازه سرعت پهپاد صورت پذیرد و نیاز به تغییر مسیر ماموریت و دور زدن مانع توسط پهپاد به حداقل برسد.

امروزه توجه به سامانه های عبور از مانع در صنعت هوایی به موازات توسعه این صنعت مورد توجه روز افزونی قرار گرفته است. اکثر رویکردهای موجود برای عملکرد عبور از مانع خصوصاً در ربات های پرنده از زمینه هایی همچون ترافیک هوایی نشات می گیرند [۱]. برای طراحی سامانه عبور از مانع از روش های مختلفی در مقالات استفاده شده است که این روش ها را می توان در چهار گروه عمده طبقه بندی نمود.

الف) حذر از برخورد از پیش تعیین شده

یک روش طراحی مسیر از پیش تعیین شده جهت عبور از مانع است. مزیت این روش عکس العمل سریع نسبت به موانع، کاهش زمان و حجم محاسبات است. لکن بدلیل اینکه مسیر حرکت از قبل برنامه ریزی شده است در مواقع برخورد با موانع غیر منتظره و پیش بینی نشده و همچنین در ماموریت های برخط کارایی ندارد.

ب) روش هندسی

در این روش از روابط هندسی حاکم بین ربات ها و موانع موجود، جهت انجام محاسبات و طراحی الگوریتم عبور از مانع استفاده می شود. در طراحی الگوریتم از اطلاعات مکانی، سرعت و سمت ربات ها و موانع استفاده می گردد [۲]. در منبع [۳] یک الگوریتم عبور از مانع طراحی شده است که با استفاده از اشکال بیضی که موانع موجود در مسیر را احاطه کرده اند، اقدام به نقطه یابی و طراحی مسیر می نماید.

ج) روش بهینه سازی مسیر حرکت

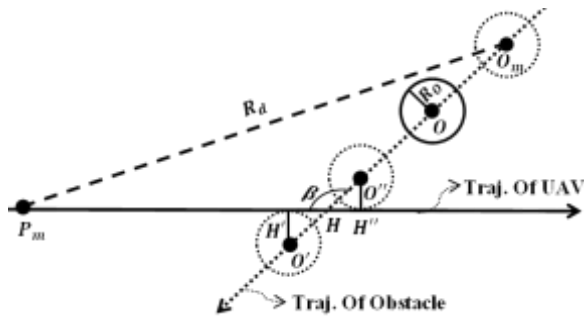
در این روش مسئله عبور از موانع به یک مسئله بهینه سازی تبدیل می شود و سپس با استفاده از روش های متداول در این حوزه مسئله حل می شود. این رویکرد دقت بالاتری نسبت به رویکرد از پیش تعیین شده دارد ولی پیاده سازی آن به دلیل الگوریتم های طراحی مسیر مشکل تر است [۴-۶].

د) روش توابع پتانسیل

در این روش فرض می شود که ربات بعنوان یک ذره، در محیطی تحت تاثیر یک میدان نیرو قرار دارد. در این محیط هدف یک نیروی جاذبه و موانع نیروهای دافعه ای به ربات وارد می کنند. در هر زمان، حرکت در راستای برآیند نیروهای مجازی وارد بر ذره انجام می شود [۷]. یکی از معایب این روش وجود کمینه های محلی است که ربات در این کمینه ها متوقف می گردد. البته روش های متعددی از قبیل برگشت به عقب، حرکت

¹ off line

۲- طراحی الگوریتم عبور از مانع



شکل ۱ موقعیت های مهم مانع در نزدیکی محل تلاقی مسیرهای پهپاد و مانع

۲-۱- رد کردن مانع از جلو

برای رد کردن مانع از روبرو بایستی سرعت پهپاد افزایش یابد تا تاخیر زمانی رسیدن به نقطه H'' را جبران نماید. برای این منظور مقدار شتاب مورد نیاز برای کاهش زمان بصورت زیر قابل محاسبه است.

$$\alpha_1 = 2(mH'' - v_m t_{O_m O''}) / t_{O_m O''}^2 \quad (1)$$

فاصله بین نقاط P_m تا H'' ، v_m سرعت پهپاد در نقطه P_m ، مدت زمان پیمایش مانع از نقطه O_m تا نقطه O'' و α_1 شتاب مورد نیاز جهت رد کردن مانع از روبرو است. حال با توجه به محدودیت شتاب وسیله پرنده سه حالت ممکن در این شرایط پیش خواهد آمد.

حالت اول: اگر $\alpha_1 > \alpha_{max}$ باشد امکان رد کردن مانع از جلو وجود ندارد و رد کردن مانع از پشت سر بررسی گردد. α_{max} حداکثر شتاب پهپاد است.

حالت دوم: اگر $v_{H''} < v_{max}$ & $\alpha_1 < \alpha_{max}$ باشد بدون هیچگونه مشکلی با اعمال همین شتاب می تواند مانع را از جلو رد کند. v_{max} حداکثر سرعت پهپاد و $v_{H''}$ سرعت در نقطه H'' است.

حالت سوم: اگر $v_{H''} > v_{max}$ & $\alpha_1 < \alpha_{max}$ باشد امکان رد کردن بصورت زیر قابل بررسی است:

اگر $t_{\alpha_{max}} + t_{v_{max}} < t_{O_m O''}$ باشد با اعمال شتاب α_1 و اشباع نمودن سرعت با سرعت حداکثر، پهپاد می تواند مانع را از جلو رد کند. در غیر اینصورت امکان رد نمودن از سمت عقب بررسی شود.

$t_{\alpha_{max}}$ مدت زمان لازم برای رسیدن سرعت پهپاد از v_m (سرعت در نقطه m) به v_{max} و $t_{v_{max}}$ مدت زمانی است که پهپاد از لحظه رسیدن به سرعت ماکزیمم تا رسیدن به نقطه H'' با سرعت ماکزیمم طی می کند.

در این مقاله اولین مرحله برای طراحی سامانه عبور از مانع، تنظیم سرعت پهپاد برای رد کردن پهپاد از سمت جلو یا عقب است. برای این کار ضرورت دارد نقطه برخورد مسیر حرکت پهپاد با مسیر حرکت مانع تخمین زده شود. هدف این تحقیق طراحی الگوریتم عبور از مانع با استفاده از داده های بدست آمده از سنسورهای محلی نصب شده بر روی پهپادها بصورت برخط است و هیچگونه اطلاعات اولیه ای از موقعیت مانع وجود ندارد. بنابراین فاصله تشخیص مانع کم است و خطی فرض کردن مسیرهای حرکت مانع و پهپاد در محدوده شعاع تشخیص سنسورها با توجه به فاصله کم، سرعت بالا و محدودیت حداقل سرعت پرواز پهپادهای بال ثابت می تواند فرض قابل قبولی برای کاربردهای عملی باشد.

مطابق شکل ۱ سه حالت ممکن زیر موقع مواجهه با مانع پیش خواهد آمد:

الف- اگر $t_{O_m O''} > t_{m H''}$ آنگاه برخورد صورت نمی گیرد و پهپاد مانع را از روبرو رد می کند. ($t_{m H''}$: مدت زمان پیمایش پهپاد از نقطه P_m تا H'' و $t_{O_m O''}$: مدت زمان پیمایش مانع از نقطه O_m و O'')

ب- اگر $t_{O_m O'} < t_{m H'}$ آنگاه برخورد صورت نمی گیرد و پهپاد مانع را از پشت سر رد می کند. ($t_{m H'}$: مدت زمان پیمایش پهپاد از نقطه P_m تا H' و $t_{O_m O'}$: مدت زمان پیمایش مانع از نقطه O_m و O')

ج- اگر $t_{O_m O'} > t_{m H'}$ و $t_{O_m O''} < t_{m H''}$ آنگاه حتماً برخورد با مانع حادث می شود.

در شرایط برخورد اگر $\overline{OO_m} < \overline{HO_m}$ باشد مانع از روبرو و در غیر اینصورت از پشت سر برخورد خواهد نمود.

نقطه O موقعیت لحظه ای مانع، R_d حداکثر شعاع تشخیص سنسورهای محلی پهپاد، O_m و P_m به ترتیب موقعیت مانع و پهپاد در اولین لحظه تشخیص مانع، O'' موقعیت مفروض مانع در لحظه اولین تماس با مسیر پهپاد و O' موقعیت مفروض مانع به هنگام ترک مسیر پهپاد می باشند.

۲-۲- رد کردن مانع از عقب

برای رد کردن مانع از عقب بایستی سرعت پهپاد کاهش یابد تا ایجاد تاخیر زمان رسیدن به نقطه H' فرصت رد شدن مانع از روبروی پهپاد فراهم گردد. برای این منظور مقدار شتاب مورد نیاز برای افزایش زمان بصورت زیر قابل محاسبه است.

$$\alpha_2 = 2(mH' - v_m t_{O_m O'}) / t_{O_m O'}^2 \quad (۲)$$

mH' فاصله بین نقاط P_m تا H' ، v_m سرعت پهپاد در نقطه P_m ، $t_{O_m O'}$ مدت زمان پیمایش مانع از نقطه O_m تا نقطه O' و α_2 شتاب لازم جهت رد کردن مانع از عقب است. حال با توجه محدودیت شتاب وسیله پرنده سه حالت ممکن در این شرایط پیش خواهد آمد.

حالت اول: اگر $\alpha_2 < \alpha_{min}$ باشد امکان رد کردن مانع از عقب وجود ندارد و ضرورت دارد سامانه برخورد غیرمترقبه فعال گردد. α_{min} حداقل شتاب کاهشی پهپاد است.

حالت دوم: اگر $\alpha_2 > \alpha_{min}$ & $v_{H'} > v_{min}$ باشد بدون هیچگونه مشکلی با اعمال همین شتاب می تواند مانع را از عقب رد کند. v_{min} حداقل سرعت پهپاد و $v_{H'}$ سرعت در نقطه H' است.

حالت سوم: اگر $\alpha_2 > \alpha_{min}$ & $v_{H'} < v_{min}$ باشد امکان رد کردن بصورت زیر قابل بررسی است:

اگر $t_{\alpha_{min}} + t_{v_{min}} > t_{O_m O'}$ باشد با اعمال شتاب α_2 و اشباع نمودن سرعت با سرعت حداقل، پهپاد می تواند مانع را از عقب رد کند. در غیر اینصورت سامانه برخورد غیرمترقبه فعال گردد.

$t_{\alpha_{min}}$ مدت زمان لازم برای رسیدن سرعت پهپاد از v_m (سرعت در نقطه m) به v_{min} و $t_{v_{min}}$ مدت زمانی است که پهپاد از لحظه رسیدن به سرعت مینیمم تا رسیدن به نقطه H' با سرعت مینیمم طی می کند.

۲-۳- رد کردن مانع در برخورد های غیر مترقبه

یکی از روش های متداول و کاربری در طراحی الگوریتم های عبور از مانع در مسائلی که بر مبنای توابع پتانسیل پایه گذاری شده، محصور کردن مانع در داخل دایره (کره در فضای ۳ بعدی) است. در این روش محیط دایره مثل یک سوئیچ عمل کرده و زمانی که پهپاد یا رباتی وارد محیط دایره می شود فعال شدن تابع پتانسیل دافعه باعث دفع پهپاد و عدم برخورد با مانع می شود. اما این روش در کاربردهای عملی خصوصاً در حرکت ربات

های غیرهولونومیک مانند پهپادهای بال ثابت، دوچرخه ها و موتورسیکلت ها غیر قابل استفاده است. برای اینکه در ناحیه برخورد با مانع بدلیل تداخل نیروهای هدایتی و نیروی دافعه مانع، حداقل های محلی اتفاق می افتد که در این نواحی سرعت ربات به صفر می رسد و همچنین تغییرات شدید برآیند نیروهای اعمالی به ربات، باعث تغییرات شدید بردار سرعت حرکت ربات ها می شود که در عمل با شرایط عملکردی خیلی از ربات ها سازگاری ندارد. اما در این مقاله سعی شده است با توسعه این الگوریتم ضمن حل چالش های مذکور، محدودیت های عملکردی ربات های مد نظر نیز در حل مسئله لحاظ گردد. یکی از کاربردهای عملی الگوریتم پیشنهادی، هدایت پهپادهای بال ثابت است. در این کار مدل سینماتیکی پهپاد بصورت زیر در نظر گرفته می شود [۲۰].

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \gamma \cos \chi \\ \dot{y} = v \cos \gamma \sin \chi \\ \dot{z} = v \sin \gamma \end{cases} \quad (۳)$$

x و y و z موقعیت مکانی پهپاد در دستگاه مختصات اینرسی هستند. v و γ و χ به ترتیب سرعت خطی و زاویه اوج مسیر و زاویه سمت پهپاد می باشند. مدل دینامیکی بدون بعد پهپاد نیز بصورت زیر است.

$$\begin{cases} \dot{v} = \frac{(T - D)}{m} - g \sin \gamma \\ \dot{\gamma} = \frac{L \cos \phi - mg \cos \gamma}{mv} \\ \dot{\chi}_i = \frac{L \sin \phi}{mv \cos \gamma} \end{cases} \quad (۴)$$

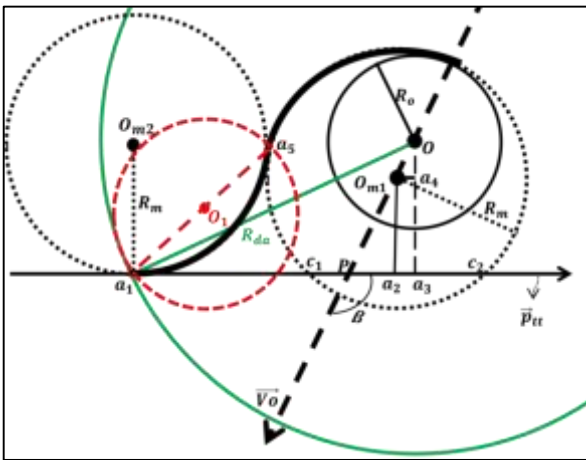
m جرم، T نیروی پیشران، L نیروی برآ، D نیروی پسا، g جاذبه زمین و ϕ زاویه غلت پهپاد می باشند. T و L و ϕ ورودیهای کنترل پهپاد هستند.

برای طراحی مسیر پهپاد های بال ثابت می بایست محدودیت های عملکردی این وسایل پرنده را در نظر گرفت. این وسایل پرنده دینامیک غیر هولونومیک داشته و دارای محدودیت های عملکردی زیر می باشند.

$$\begin{aligned} v_{min} < v < v_{max} \\ \phi_{min} < \phi < \phi_{max} \\ T_{min} < T < T_{max} \\ R_m = \frac{v_{min}^2}{g \tan(\phi_{max})} = \frac{v_{min}^2}{g \sqrt{n_{max}^2 - 1}} \end{aligned} \quad (۵)$$

و O_{m2} است که این قطاع ها در واقع مسیر مطلوب حرکت پهباد در هنگام مواجهه با مانع خواهد بود.

برای هدایت کردن پهبادها جهت تبعیت از مسیر مطلوب (یعنی قطاع های مد نظر از دواير حدافل شعاع گردش)، دو تابع پتانسیل در مرکز هر کدام از دواير \vec{O}_{m1} و \vec{O}_{m2} تعریف می شود که جهت نیروی دافعه در دایره \vec{O}_{m2} از بیرون به سمت داخل است ولی در O_{m1} از درون به سمت بیرون است. لازم به ذکر است تابع پتانسیل دایره \vec{O}_{m2} فقط در داخل دایره O_1 فعال است. مراکز دواير \vec{O}_{m1} و \vec{O}_{m2} بصورت زیر قابل محاسبه است.



شکل ۲ سامانه عبور از مانع غیر مترقبه

$$\vec{O}_{m1} = \vec{O} + (R_m - R_o) \vec{e}_{v_o} \quad (۶)$$

\vec{e}_{v_o} بردار یکه سرعت مانع، R_o شعاع مانع، \vec{O} بردار موقعیت مکانی مانع و \vec{O}_{m1} موقعیت مکانی دایره محیط بر مانع با شعاع R_m است.

$$\overline{a_2 O_{m1}} = \sin \beta \overline{PO_{m1}}$$

$$\overline{Pa_2} = (\overline{PO_{m1}}^2 - \overline{a_2 O_{m1}}^2)^{0.5}$$

$$\overline{a_1 a_2} = [4R_m^2 - (R_m - k \overline{a_2 O_{m1}})^2]^{0.5}$$

$$\overline{a_1 P} = \overline{a_1 a_2} - k_1 \overline{Pa_2}$$

$$\vec{a}_1 = \vec{P} - \overline{a_1 P} \vec{e}_{\vec{v}}$$

$$R_{da} = \overline{a_1 O} = \|\vec{O} - \vec{a}_1\| \quad (۷)$$

$$\vec{O}_{m2} = \vec{a}_1 + k_2 \begin{bmatrix} \vec{e}_{\vec{v}}(2) \\ -\vec{e}_{\vec{v}}(1) \end{bmatrix} R_m \quad (۸)$$

زاویه بین بردارهای سرعت مانع و پهباد می باشد و R_{da} شعاع لحظه ای فعال شدن سامانه عبور از مانع است.

R_m حدافل شعاع دور زدن است که بر اساس رابطه (۵) به حدافل سرعت (v_{min}) و حداکثر زاویه غلت (Φ_{max}) یا حداکثر ضریب بار (n_{max}) بستگی دارد.

یکی از مهمترین محدودیت های عملکردی پهبادها حدافل سرعت پرواز و به تبع آن حدافل شعاع دور زدن است که باید در طراحی مسیر حرکت مورد توجه قرار گیرد. از آنجایی که استفاده از توابع پتانسیل مبنای طراحی الگوریتم معرفی شده در این مقاله است، فلذا روشی ابتکاری با استفاده از توابع پتانسیل برای مواجهه با موانع معرفی شده است. در این روش با استفاده از ترسیم دواير حدافل شعاع دور زدن مطابق شکل ۲ توابع پتانسیل اطراف مانع طوری ترکیب شده که پهباد هنگام مواجهه با مانع با تغییرات شدید جهت و اندازه سرعت مواجه نشوند.

در طراحی استراتژی عبور از مانع متحرک بدلیل اینکه موقعیت مانع مداوم با گذر زمان تغییر می کند ضرورت دارد از رفتارهای لحظات آینده آگاهی داشته باشیم تا براساس این اطلاعات پیش بینی مقتضی برای عدم برخورد پهباد با مانع بعمل آید. در غیر اینصورت، یعنی در مواقعی که اطلاعات بصورت برخط است و اطلاعی از رفتار مانع در لحظات پیشرو در دست نیست ناگزیر حاشیه امنی در نظر گرفته می شود تا در صورت بروز رفتارهای غیرمترقبه از سوی مانع، فرصت لازم برای انجام اقدامات عبور از مانع فراهم باشد. بنابراین ضرورت دارد ضمن رعایت ملزومات عملکردی پهباد پیش بینی لازم جهت مواجهه با مانع انجام شود. بنابر این مطابق شکل ۲ مانع را طوری در داخل دایره حدافل شعاع گردش محاط می کنیم که بیشترین فاصله بین دایره مانع و دایره حدافل شعاع گردش در راستای حرکت مانع باشد تا بدینوسیله خط مماس بر مسیر حرکت قبل از اینکه به مانع برخورد کند با دایره گردش برخورد می کند و قبل از اینکه به خود مانع برخورد کند سیستم تغییر مسیر را فعال کند. در ادامه مراحل طراحی این مکانیزم توضیح داده شده است.

برای طراحی الگوریتم عبور از مانع در پروازهای برخط، زمانی که پهباد به شعاع R_{dam} (حدافل شعاع لازم برای اینکه پهباد بتواند مانع را دور بزند) از مانع می رسد، سامانه عبور از مانع فعال می شود. سپس خطی مماس بر مسیر حرکت از لحظه رسیدن پهباد به شعاع R_{dam} ترسیم می شود. اگر این خط دایره محاط مانع را در دو نقطه قطع کند، قطعاً برخورد صورت خواهد گرفت. نقاط تقاطع را C_1 و C_2 می نامیم. دایره ای به شعاع R_m و مرکز O_{m2} (رابطه (۸)) طوری رسم می کنیم که از یک طرف مماس بر مسیر حرکت و از طرف دیگر مماس بر دایره O_{m1} باشد. اکنون هدف، انتخاب قطاع هایی از دو دایره معرفی شده ی O_{m1}

مانع را اجرا کند، تعیین شود. این فاصله در واقع حداقل فاصله مورد نیاز است که پهباد فرصت بیشترین انحراف از مسیر اصلی را دارد و به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$R_{dam} = [(\sin\beta(R_m - R_o) + R_m)^2 - (2R_m + \cos\beta(R_m - R_o))^2]^{0.5} \quad (9)$$

R_{dam} حداقل شعاع لازم برای فعال شدن سامانه عبور از مانع است و به عبارت دیگر حداکثر مقدار R_{da} می باشد.

در ادامه به منظور تعیین نیروهای عبور از مانع، با مطالعه رفتار انواع توابع پتانسیل نسبت به تغییرات فاصله و با روش سعی و خطا، توابع پتانسیل دافعه و جاذبه به ترتیب به شرح ذیل تعریف شده اند.

$$U_{o1} = \begin{cases} w_{o1} (\|O_{m1} - p\|_{\sigma} \operatorname{csch}^{-1} \left(\frac{\|O_{m1} - p\|_{\sigma}}{\mu} \right) + \mu \sinh^{-1} \left(\frac{\|O_{m1} - p\|_{\sigma}}{\mu} \right)) & \|O_{m1} - p\| \leq R_m \\ 0 & \|O_{m1} - p\| > R_m \end{cases} \quad (10)$$

$$U_{o2} = \begin{cases} \frac{w_{o2}}{2} (p - O_{m2})^2 & \|p - O_{m2}\| \geq R_m \\ 0 & \|p - O_{m2}\| < R_m \end{cases} \quad (11)$$

$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ و $p_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix}$ به ترتیب موقعیت عناصر مجازی و حقیقی در دستگاه مختصات اینرسی می باشند.

تابعی که عنصر واقعی را به سمت عنصر مجازی می راند از گرادیان تابع پتانسیل تعریف شده روی متغیر خطای e بصورت زیر بدست می آید.

$$u_n = -\Delta U_n - W_v(v - v_n) \quad (14)$$

ترم دوم در معادله (۱۴)، ترم ضربه گیر است که با ضریب وزنی W_v قابل تنظیم است. v و v_n به ترتیب سرعت عنصر واقعی و مجازی می باشند. U_n تابع پتانسیل بین عناصر حقیقی و مجازی است که در این مقاله از تابع زیر استفاده شده است.

$$U_n = \frac{w}{2} \|p_n - p\|^2 \quad (15)$$

W ضریب وزنی تابع پتانسیل بین عناصر حقیقی و مجازی است. در نهایت خروجی کلی الگوریتم یعنی تجمیع نیروهای هدایت و عبور از مانع بصورت زیر قابل خلاصه است.

$$u = u_n + u_o \quad (16)$$

u_o مجموع نیروهای عبور از مانع، u_n نیروی هدایتی اعمال شده از طرف عنصر مجازی، u ورودی کلی وارده به دینامیک پهباد است. مدل غیر خطی داده شده در روابط (۳) و (۴) را می توان

نکته ۱: لازم به ذکر است بایستی زمانی که $\overline{PO} > \overline{PO}_{m1}$ است $k_1 = 1$ و در غیر اینصورت $k_1 = -1$ در نظر گرفته شود.

نکته ۲: لازم به ذکر است در مواقعی که مقدار حداکثر سرعت مانع در دست نباشد و مجبور شویم با استفاده از حسگرهای محلی نصب شده بر روی پهبادها سرعت لحظه ای را اندازه گیری کنیم، ضرورت دارد شعاع دایره O_{m1} بصورت تابعی از سرعت مانع تغییر کند. ولی ضرورتی برای تغییر شعاع دایره O_{m2} وجود ندارد.

لازم به ذکر است برای شروع فعالیت این سامانه، ضرورت دارد حداقل مسافتی (بین پهباد و مانع) را که سامانه نیاز دارد تا در این فاصله بتواند بر اساس معیارهای مورد نظر فرایند عبور از

W_{o1} و W_{o2} ضرایب وزنی نیروهای دافعه هستند و μ عدد ثابت مثبتی است که نرخ تغییرات نیروی دافعه را مشخص می کند. برآیند نیروهای عبور از مانع که از گرادیان توابع پتانسیل بدست می آید، بصورت زیر محاسبه است.

$$u_o = \Delta U_{o1} + \Delta U_{o2} \quad (12)$$

از آنجایی که الگوریتم ارائه شده بصورت برخط و در هر لحظه از زمان بر مبنای خط مماس بر مسیر حرکت استوار است، ضرورت دارد در هنگام مواجهه با مانع این خطوط مماس بصورت مداوم در مسیر ایده آل باقی بمانند. فلذا نیاز است همزمان با تعریف مسیر واقعی، یک مسیر ایده آل که مانع را درک نمی کند و از درون آن می گذرد، بصورت مجازی تعریف شود و خط مماس بر مسیر ایده آل مبنای طراحی مکانیزم عبور از مانع قرار بگیرد.

با تعریف توابع پتانسیل بین عناصر واقعی و مجازی، عنصر حقیقی را مجبور میکنیم که به سمت عنصر مجازی رانده شوند و به عبارتی عنصر مجازی را تعقیب نمایند. برای این کار خطای فاصله بین دو عنصر مجازی و حقیقی را بصورت زیر تعریف می شود.

$$e = p_n - p \quad (13)$$

با خطی سازی فیدبک به یک مدل خطی رسته دو بصورت زیر تبدیل نمود.

با خطی سازی فیدبک به یک مدل خطی رسته دو بصورت زیر تبدیل نمود.

با خطی سازی فیدبک به یک مدل خطی رسته دو بصورت زیر تبدیل نمود.

$$\begin{cases} \ddot{x} = a_x \\ \ddot{y} = a_y \\ \ddot{z} = a_z \end{cases} \quad (17)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{a_y \cos \chi - a_x \sin \chi}{(a_z + g) \cos \gamma - (a_x \cos \chi + a_y \sin \chi) \sin \gamma} \right)$$

$$L = m \frac{(a_z + g) \cos \gamma - (a_x \cos \chi + a_y \sin \chi) \sin \gamma}{\cos \phi} \quad (18)$$

$$T = D + m \left((a_z + g) \sin \gamma + (a_x \cos \chi + a_y \sin \chi) \cos \gamma \right)$$

جدول ۱ پارامترهای شبیه سازی

مقادیر	پارامترها
۰/۳	W : ضریب وزنی تابع پتانسیل بین عناصر حقیقی و مجازی
۵/۱	W_v : ضریب وزنی ترم ضربه گیر رابطه (۱۴)
۵	W_{01} : ضریب وزنی نیروی عبور از مانع رابطه (۱۰)
۷	W_{02} : ضریب وزنی نیروی عبور از مانع رابطه (۱۱)
۶۰	R_0 : شعاع مانع
۷۱	R_m : حداقل شعاع گردش پهپاد
۱۰۰۰	μ : ضریب ثابت در رابطه (۱۰)
۱۲m/s	v_{min} : حداقل سرعت پهپاد
۳۸m/s	v_{max} : حداکثر سرعت پهپاد
۱۳/۵	m : جرم پهپاد
۰/۰۴۳	C_{D0} : ضریب پسای در حالت بدون برا
۱/۵	C_L : ضریب برا
۳۰°	ϕ_{max} : حداکثر زاویه غلت
۶۰m	R_0 : شعاع مانع
۲۰۰N	T_{max} : حداکثر نیروی پیشران
۱/۲۱۱	ρ : چگالی هوا

۳- شبیه سازی

در این قسمت نتایج شبیه سازی انجام شده در نرم افزار متلب به نمایش گذاشته می شود. در تمامی مراحل شبیه سازی محدودیت های عملکردی پهپاد ابروسوند^۱، معرفی شده در مرجع [۲۲]، بصورت زیر اعمال شده است.

$$12 \text{ m/s} < v < 38 \text{ m/s}$$

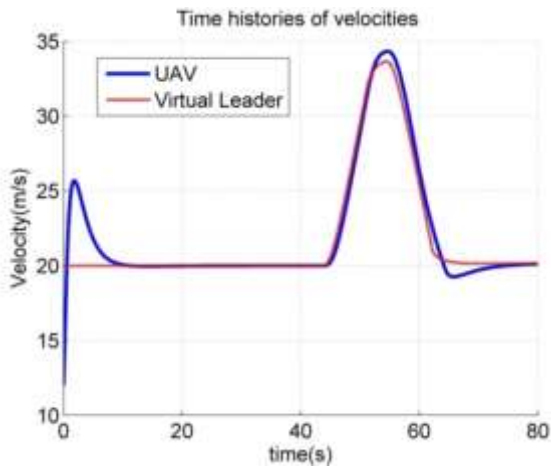
$$-30^\circ < \phi < 30^\circ$$

$$0 < T < 200$$

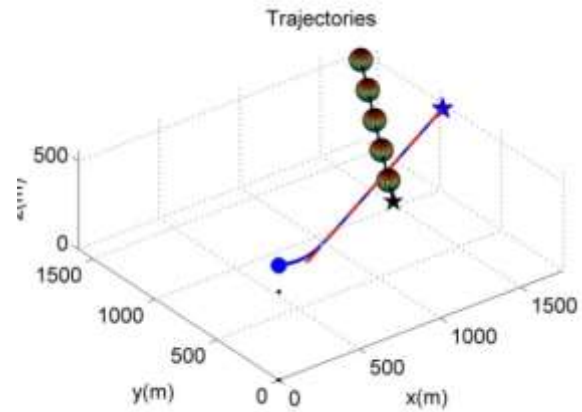
v : سرعت پهپاد، ϕ زاویه غلت و T نیروی پیشران می باشند. پارامترهای شبیه سازی الگوریتم طراحی شده در جدول ۱ آمده است.

برای نمایش کارآمدی الگوریتم معرفی شده سه حالت ممکن در برخورد با مانع نشان داده شده است. در حالت اول شرایط به گونه ای است که پهپاد فرصت افزایش سرعت و عبور از جلوی مانع بدون برخورد را دارد (شکل ۳). حالت دوم فاصله از مانع به هنگام تشخیص آنقدر نیست که فرصت عبور از جلوی مانع فراهم شود فلذا الگوریتم شرایط عبور از پشت سر مانع را بررسی کرده و با کاهش سرعت پهپاد، مانع را از پشت رد کرده است (شکل ۴). حالت سوم بدلیل غیر مترقبه بودن برخورد با مانع، الگوریتم هم سرعت پهپاد را کاهش داده و هم سامانه عبور از مانع را فعال نموده است (شکل ۵).

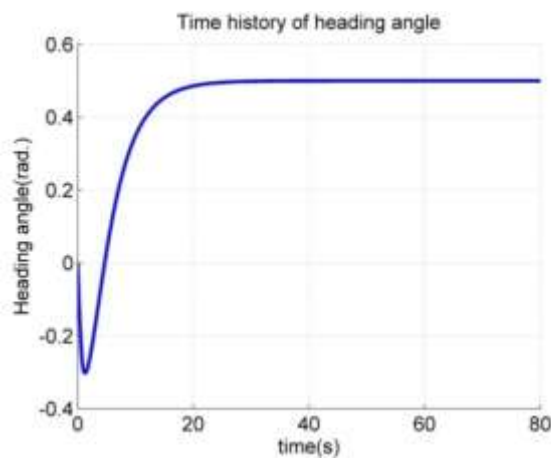
¹ Aerosonde



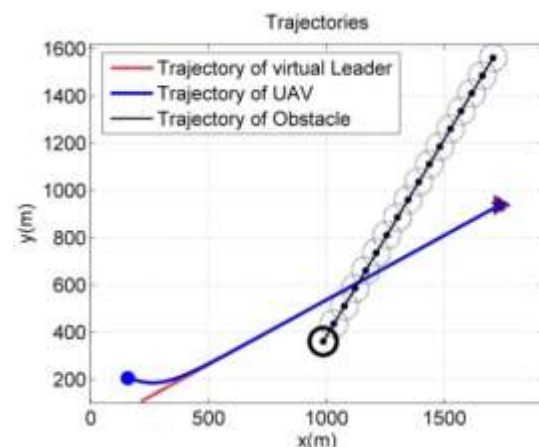
الف) تغییرات سرعت پهپاد حقیقی و مجازی در گذر زمان



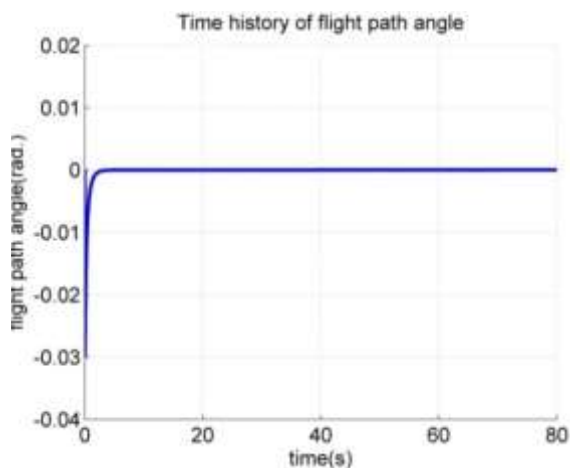
الف) مسیره‌های حرکت (سه بعدی)



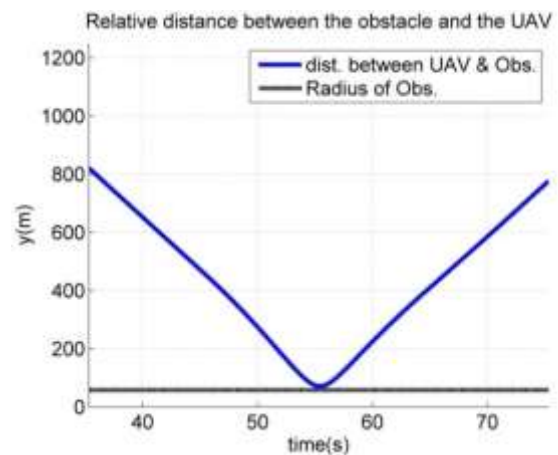
ب) تغییرات زاویه سمت در گذر زمان



ب) مسیره‌های حرکت در صفحه افقی



ج) تغییرات زاویه اوج مسیر در گذر زمان



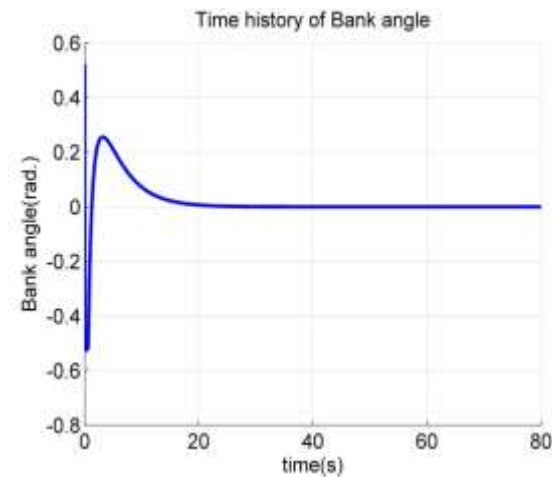
ج) فاصله نسبی بین پهپاد و مانع در گذر زمان

شکل ۴ رفتار متغیرهای حالت

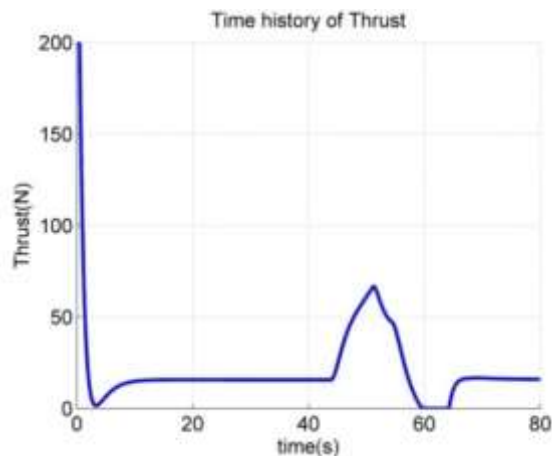
تمامی سناریوها در ارتفاع ثابت ۵۰۰ متر انجام شده و پهپاد مجازی و مانع به ترتیب با سرعت های $[-9 - 15 0]^T$ و $[18 10 0]^T$ در حال حرکت می باشند. موقعیت مکانی اولیه پهپاد نقطه $[160 205 500]^T$ است اما برای ایجاد حالت های

شکل ۳ مسیره‌های حرکت پهپاد و مانع که با افزایش سرعت از جلوی مانع عبور می کند.

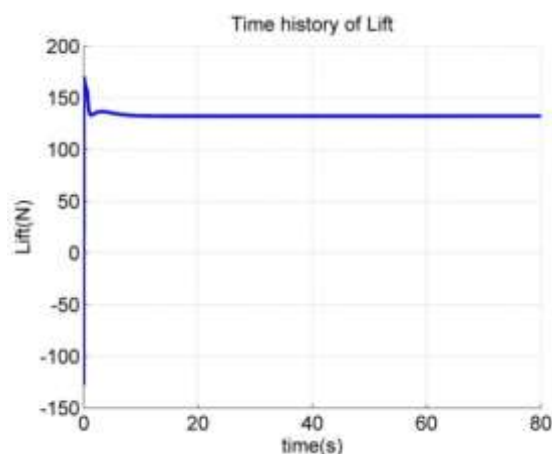
معناست که پهپاد بدون هیچگونه تغییر مسیری، فقط با کاهش سرعت مانع را رد کرده است.



الف) تغییرات زاویه غلت در گذر زمان



ب) تغییرات نیروی پیشران در گذر زمان



ج) تغییرات نیروی برا در گذر زمان

شکل ۵ ورودی های کنترل سیستم پهپاد

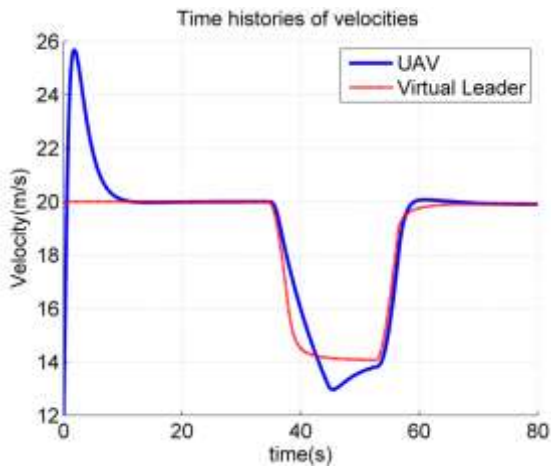
مختلف برخورد موقعیت مکانی اولیه مانع در تمامی سناریوها متفاوت است.

از شکل ۳ تا شکل ۵ مربوط به سناریوی حالت اول می باشند. در این حالت موقعیت مکانی اولیه مانع $[1700 \ 1500 \ 500]^T$ بوده و حسگرهای پهپاد قابلیت تشخیص مانع از شعاع ۵۰۰ متری را دارند. در این حالت الگوریتم با بررسی موقعیت پهپاد با مانع، امکان عبور پهپاد از جلوی مانع را با افزایش سرعت، مثبت تشخیص داده است. بنابراین پهپاد در حدود ثانیه ۴۵ به محض تشخیص مانع شروع به افزایش سرعت تا حدود ۳۵ متر بر ثانیه نموده است (مطابق شکل ۴ الف). برای نشان دادن موقعیت لحظه ای پهپاد نسبت به مانع، نمودار فاصله لحظه ای بین پهپاد و مرکز مانع در شکل ۳ ج به تصویر کشیده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، در هیچ زمانی فاصله نسبی بین پهپاد و مانع کمتر از شعاع مانع (۶۰ متر) نشده است، یعنی برخوردی صورت نگرفته و پهپاد از جلوی مانع عبور کرده است. شکل ۳ الف مسیره های حرکت پهپاد و مانع را در ارتفاع ۵۰۰ متری بصورت سه بعدی نشان می دهد و در شکل ۳ ب برای درک بهتر مسیره های حرکت، تصویر دو بعدی از شکل قبلی نمایش داده شده است.

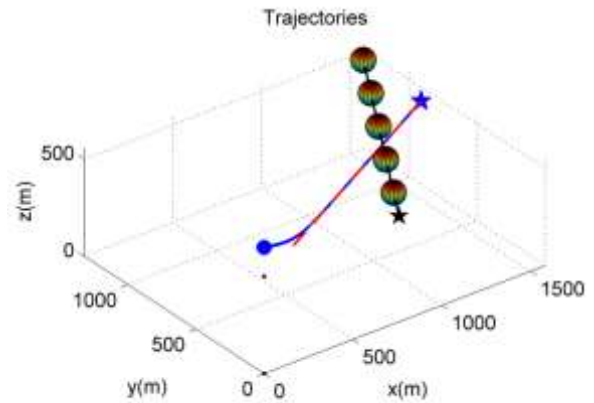
شکل ۴ و شکل ۵ به ترتیب متغیرهای حالت و ورودی های کنترل دینامیک پهپاد را نشان می دهند. با دقت در رفتار تاریخچه زمانی این متغیرها ملاحظه می شود که در بازه زمانی برخورد با مانع (فاصله زمانی بین ۴۵ تا ۷۰ ثانیه) صرفاً متغیرهای نیروی پیشران و سرعت تغییر کرده اند و بدین معناست که پهپاد بدون هیچگونه تغییر مسیری، فقط با افزایش سرعت مانع را رد کرده است.

از شکل ۶ تا شکل ۷ مربوط به سناریوی حالت دوم می باشند. در این حالت موقعیت مکانی اولیه مانع $[1500 \ 1200 \ 500]^T$ بوده و حسگرهای پهپاد قابلیت تشخیص مانع از شعاع ۵۰۰ متری را دارند. در این حالت الگوریتم با بررسی موقعیت پهپاد با مانع، امکان عبور پهپاد از جلوی مانع را با افزایش سرعت منفی تشخیص داده، بنابراین با کاهش سرعت (مطابق شکل ۷ الف) پهپاد از پشت سر مانع رد شده است و همانطور که در شکل ۶ ج نشان داده شده در هیچ زمانی فاصله نسبی بین پهپاد و مانع کمتر از شعاع مانع نشده است.

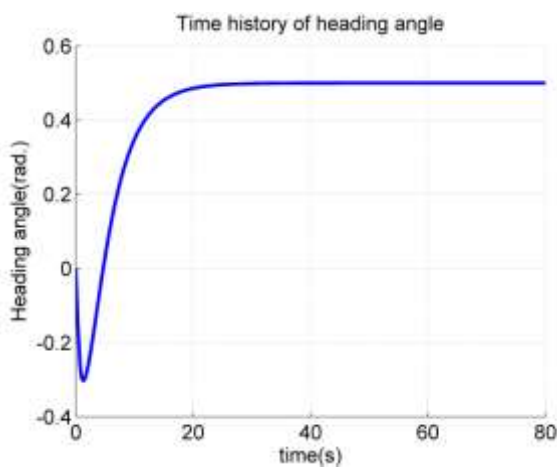
شکل ۷ و شکل ۸ به ترتیب متغیرهای حالت و ورودی های کنترل دینامیک پهپاد را نشان می دهند. در این حالت نیز با دقت در رفتار تاریخچه زمانی این متغیرها ملاحظه می شود که در بازه زمانی برخورد با مانع (فاصله زمانی بین ۳۵ تا ۶۰ ثانیه) صرفاً متغیرهای نیروی پیشران و سرعت تغییر کرده اند و بدین



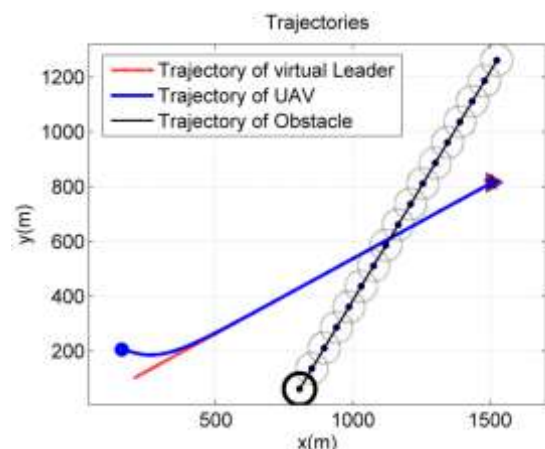
الف) تغییرات سرعت پهپاد حقیقی و مجازی در گذر زمان



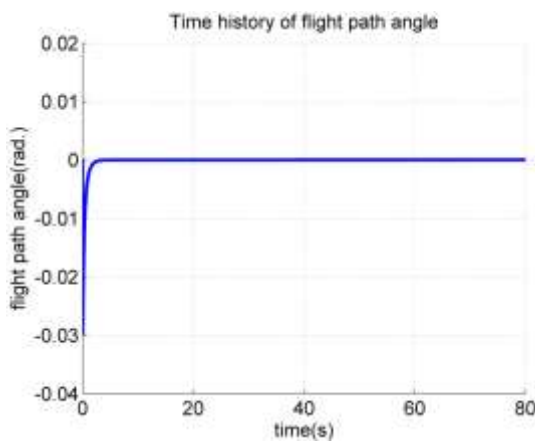
الف) مسیره‌های حرکت (سه بعدی)



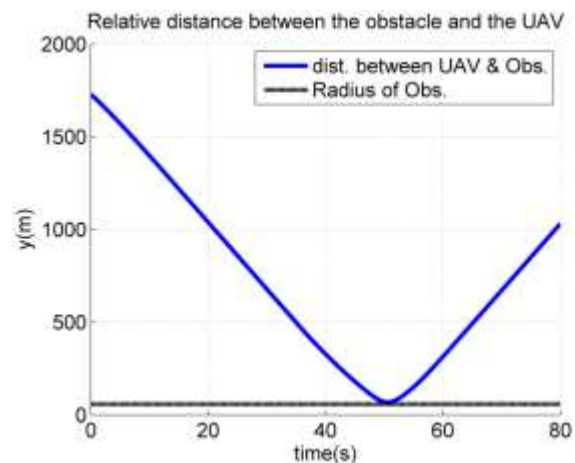
ب) تغییرات زاویه سمت در گذر زمان



ب) مسیره‌های حرکت در صفحه افقی



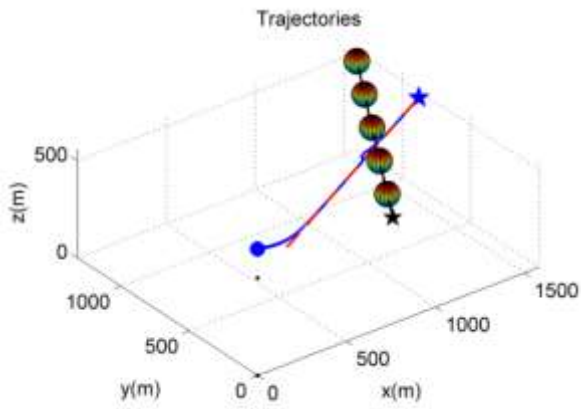
ج) تغییرات زاویه اوج مسیر در گذر زمان



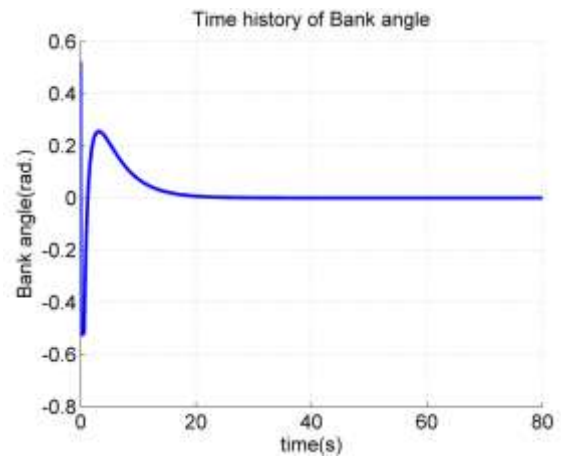
ج) فاصله نسبی بین پهپاد و مانع در گذر زمان

شکل ۷ رفتار متغیرهای حالت

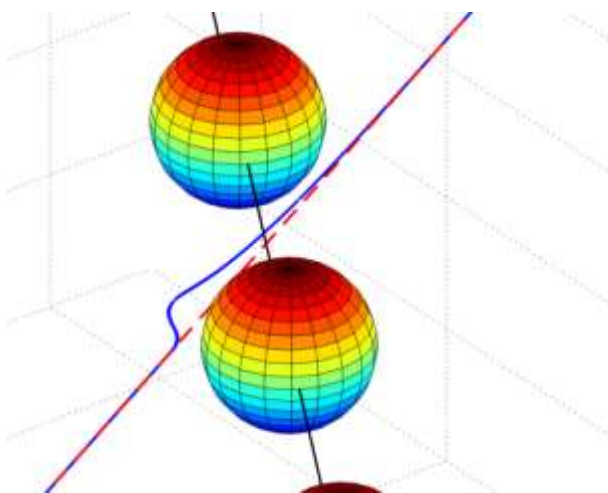
شکل ۶ مسیره‌های حرکت پهپاد و مانع که با کاهش سرعت از پشت مانع عبور می‌کند.



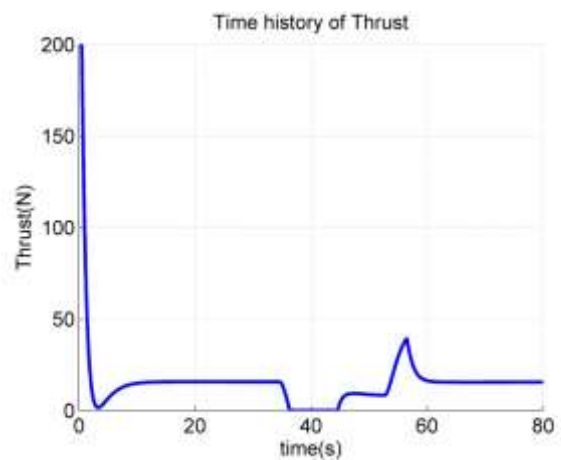
الف) مسیرهای حرکت (سه بعدی)



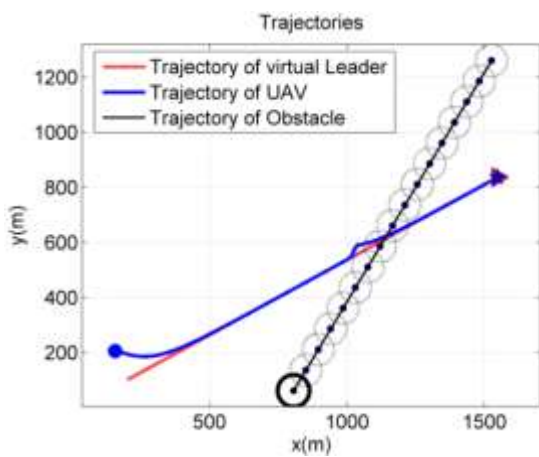
الف) تغییرات زوایه غلت در گذر زمان



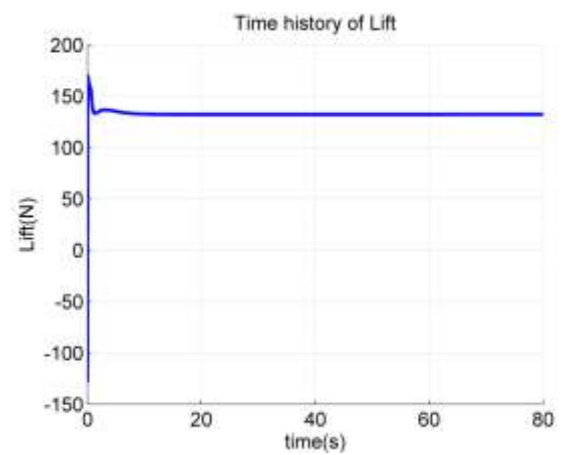
ب) بزرگ نمایی شده شکل الف



ب) تغییرات نیروی پیشران در گذر زمان

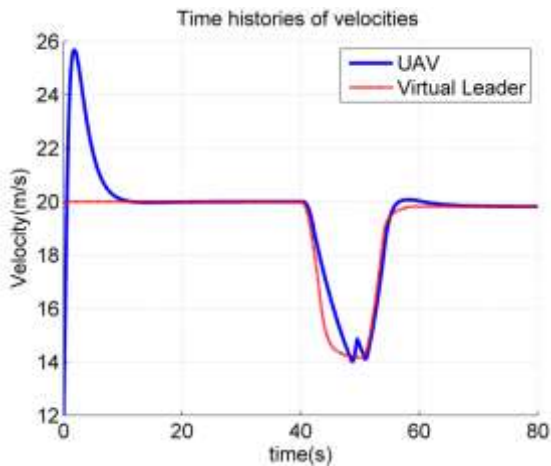


ج) مسیرهای حرکت در صفحه افقی

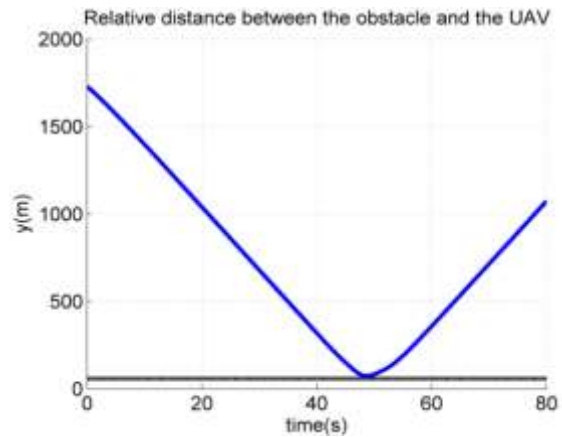


ج) تغییرات نیروی برا در گذر زمان

شکل ۸ ورودی های کنترل سیستم پهباد

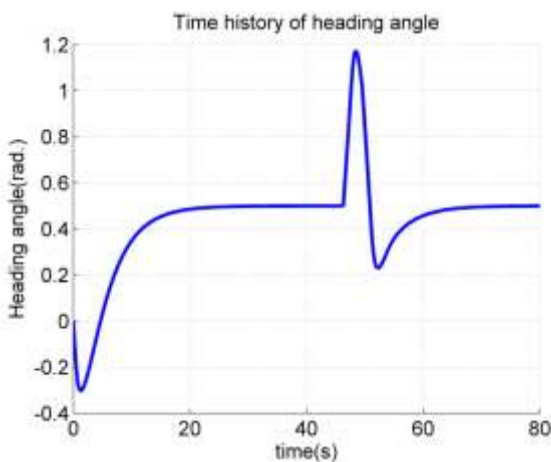


الف) تغییرات سرعت پهپاد حقیقی و مجازی در گذر زمان

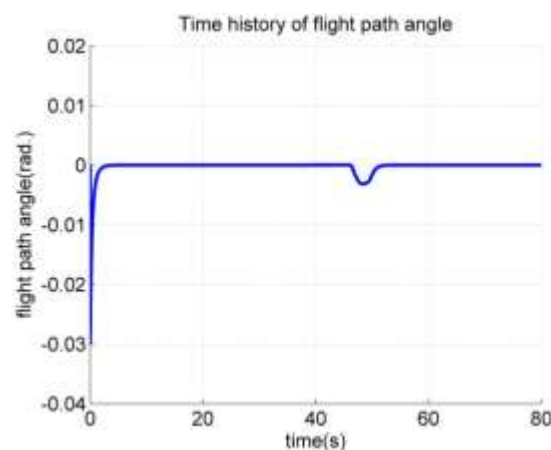


د) فاصله نسبی بین پهپاد و مانع در گذر زمان

شکل ۹ عبور از مانع در برخورد های غیر مترقبه



ب) تغییرات زاویه سمت در گذر زمان



ج) تغییرات زاویه اوج مسیر در گذر زمان

شکل ۱۰ رفتار متغیرهای حالت

از شکل ۸ تا شکل ۱۱ مربوط به سناریوی حالت سوم می باشند. در این حالت موقعیت مکانی اولیه مانع $[1500 \ 1200 \ 500]^T$ بوده و حسگرهای پهپاد قابلیت تشخیص مانع از شعاع ۳۰۰ متری را دارند. در این حالت الگوریتم با بررسی موقعیت پهپاد با مانع، امکان عبور پهپاد هم از جلوی مانع با افزایش سرعت و هم از عقب مانع با کاهش سرعت منفی تشخیص داده است. بنابراین الگوریتم با کاهش سرعت پهپاد و همزمان فعال نمودن سامانه برخورد غیرمترقبه (مطابق شکل ۱۰ الف) پهپاد را از پشت سر مانع هدایت کرده است و همانطور که در شکل ۹ د نشان داده شده در هیچ زمانی فاصله نسبی بین پهپاد و مانع کمتر از شعاع مانع نشده است.

شکل ۱۰ و شکل ۱۱ به ترتیب متغیرهای حالت و ورودی های کنترل دینامیک پهپاد را نشان می دهند. با دقت در رفتار تاریخچه زمانی این متغیرها ملاحظه می شود که در بازه زمانی برخورد با مانع (فاصله زمانی بین ۴۰ تا ۶۰ ثانیه) تمامی متغیرهای ورودی و حالت سیستم تغییر پیدا کرده اند و این رفتار بیانگر آن است که پهپاد برای رد کردن مانع در مواقع غیرمترقبه ضمن کاهش سرعت باید تغییر مسیر داده و مانع را دور بزند. البته از آنجایی که گردش پهپاد در ارتفاع ثابت رخ داده و از طرفی تمامی ورودی های کنترلی و متغیرهای حالت دینامیک پهپاد فعال بوده اند، در واقع دور موزون^۱ انجام داده است [۲۳].

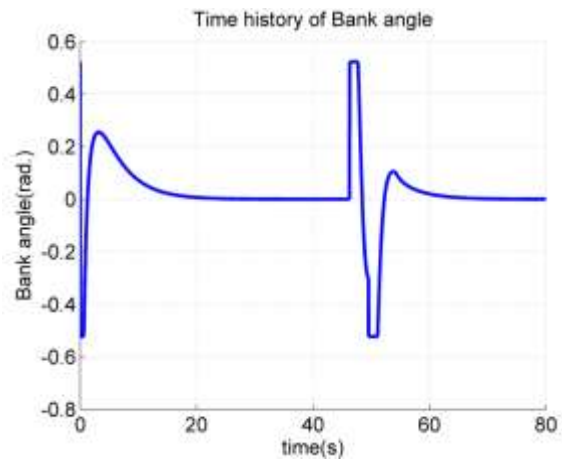
^۱ Coordinated Turn

الگوریتم عبور از مانع مد نظر قرار گرفت. از این رهگذر به اجبار سه مرحله بررسی در مواقع برخورد با مانع پیش رو بود. مرحله اول: بررسی عبور از جلوی مانع با افزایش سرعت تا سقف ماکزیمم سرعت پهباد. مرحله دوم: بررسی عبور از پشت مانع با کاهش سرعت تا کف حداقل سرعت واماندگی پهباد. مرحله سوم: در صورت موفقیت آمیز نبودن دو مرحله قبل، دور زدن مانع با رعایت حداقل شعاع گردش پهباد است. مرحله سوم زمانی رخ می دهد که شعاع تشخیص مانع کم بوده و برخورد غیرمترقبه است. در این مرحله دوایر دافعه و جاذبه با شعاعی معادل حداقل شعاع گردش پهباد، اطراف مانع طوری ترکیب شده اند که اطراف مانع را هاله ای از توابع پتانسیل به شکل دوکی پوشانده است. در هیچ نقطه از محیط شکل دوکی حاصل، انحناء کمتر از حداقل شعاع گردش نیست. بنابراین در بدترین شرایط ممکن برخورد نیز سرعت و زاویه گردش پهباد از محدوده مجاز تجاوز نخواهد کرد. از طرفی بدلیل طراحی مسیر بر مبنای حداقل شعاع گردش، مسیر حاصل نزدیکترین و بهینه ترین مسیری است که ممکن است پهباد از کنار یک مانع عبور کند و به عبارت دیگر با کمترین انحراف از مسیر اصلی مانع را رد کند.

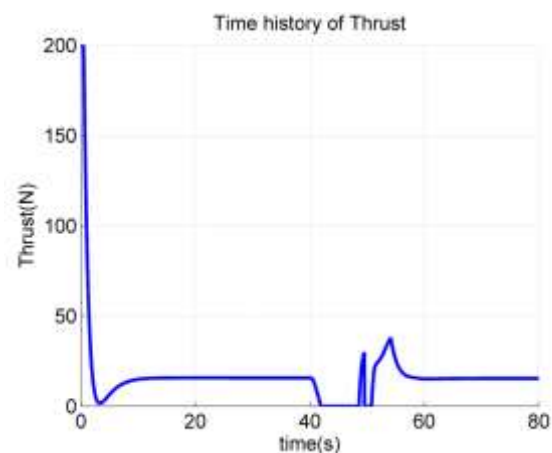
لازم به ذکر است در صورت تغییر نوع پهباد و ویژگی های عملکردی آن، الگوریتم جهت کارکرد مطلوب نیاز به تنظیمات مجددا ضرایب وزنی توابع پتانسیل خواهد داشت و این نکته از معایب استفاده از روش تابع پتانسیل می باشد. رفع این مشکل می تواند از جمله کارهای آتی جهت ادامه تحقیق باشد.

۵- مراجع

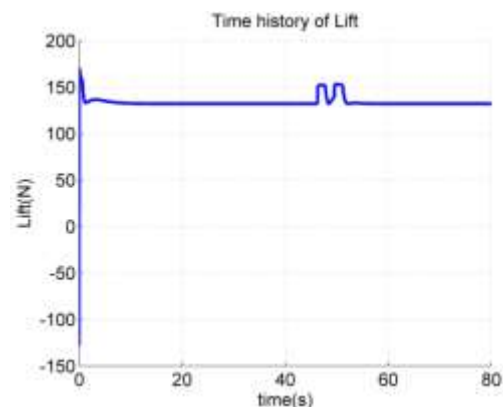
- [1] Zibaei, E. and M.A. Amiri Atashgah, A behavior-based approach to simultaneous realization of leader-following and obstacle-avoidance behaviours for a flying robot, *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, 34(1): pp. 73-85,(2018).
- [2] Pham, H., et al., A survey on unmanned aerial vehicle collision avoidance systems, *arXiv preprint arXiv:1508.07723*, (2015).
- [3] Sasongko, R.A., S. Rawikara, and H.J. Tampubolon, Uav obstacle avoidance algorithm based on ellipsoid geometry, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 88(2-4): pp. 567-581, (2017).
- [4] Islam, M.R., et al., Mobile robot path planning with obstacle avoidance using chemical reaction optimization, *Soft Computing*, 25(8): pp. 6283-6310, (2021).
- [5] Cai, Z., et al., Quadrotor trajectory tracking and obstacle avoidance by chaotic grey wolf



الف) تغییرات زاویه غلت در گذر زمان



ب) تغییرات نیروی پیشران در گذر زمان



ج) تغییرات نیروی برا در گذر زمان

شکل ۱۱ ورودی های کنترل سیستم پهباد

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور رعایت محدودیت های عملکردی پهبادهای بال ثابت چهار عامل مهم حداقل سرعت واماندگی، حداقل شعاع گردش، حداکثر سرعت و حداکثر شتاب در طراحی

- Mechanical Engineering*, 53(2 (Special Issue)): p. 4-4, (2021).
- [15] Ma'Arif, A., et al. Artificial Potential Field Algorithm for Obstacle Avoidance in UAV Quadrotor for Dynamic Environment, in *2021 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)*. IEEE, (2021).
- [16] Heidari, H. and M. Saska, Collision-free trajectory planning of multi-rotor UAVs in a wind condition based on modified potential field, *Mechanism and Machine Theory*, 156: pp. 104140, (2021).
- [17] Han, K., J. Lee, and Y. Kim, Unmanned aerial vehicle swarm control using potential functions and sliding mode control, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 222(6): pp. 721-730, (2008).
- [18] Stastny, T.J., G.A. Garcia, and S.S. Keshmiri, Collision and obstacle avoidance in unmanned aerial systems using morphing potential field navigation and nonlinear model predictive control, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 137(1), (2015).
- [19] Mirzaee Kahagh, A., F. Pazooki, and S. Etemadi Haghghi, Obstacle avoidance in V-shape formation flight of multiple fixed-wing UAVs using variable repulsive circles, *The Aeronautical Journal*, 124(1282): pp. 1979-2000, (2020).
- [20] Ai, X.L., et al., Optimal formation control with limited communication for multi-unmanned aerial vehicle in an obstacle-laden environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 231(6): pp. 979-997, (2017).
- [21] Chang, K., Y. Xia, and K. Huang, UAV formation control design with obstacle avoidance in dynamic three-dimensional environment, *SpringerPlus*, 5(1): pp. 1124, (2016).
- [22] Niculescu, M. Lateral track control law for Aerosonde UAV, in *39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, (2001).
- [23] Roskam, J., *Airplane flight dynamics and automatic flight controls*, DARcorporation, (1998:).
- optimization-based active disturbance rejection control, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 128: pp. 636-654, (2019).
- [6].Ajeil, F.H., et al., Autonomous navigation and obstacle avoidance of an omnidirectional mobile robot using swarm optimization and sensors deployment, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17(3): pp. 1729881420929498, (2020).
- [7].Vadakepat, P., T. Kay Chen, and M.-L. Wang. Evolutionary artificial potential fields and their application in real time robot path planning, in *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation*. CEC00 (Cat. No.00TH8512), (2000).
- [8].Park, M.G. and M.C. Lee, A new technique to escape local minimum in artificial potential field based path planning, *KSME International Journal*, 17(12): pp. 1876-1885, (2003).
- [9].Sabudin, E., R. Omar, and C. Che Ku Melor, Potential field methods and their inherent approaches for path planning, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(18): p. 10801-10805, (2016).
- [10] Yan, X., et al., Formation Control and Obstacle Avoidance Algorithm of a Multi-USV System Based on Virtual Structure and Artificial Potential Field, *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2): pp. 161, (2021).
- [11] Feng, S., Y. Qian, and Y. Wang, Collision avoidance method of autonomous vehicle based on improved artificial potential field algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, pp. 09544070211014319, (2021).
- [12] Duhé, J.-F., S. Victor, and P. Melchior, Contributions on artificial potential field method for effective obstacle avoidance, *Fractional Calculus and Applied Analysis*, 24(2): pp. 421-446, (2021).
- [13] Chen, Y., et al., Path Planning and Obstacle Avoiding of the USV Based on Improved ACO-APF Hybrid Algorithm With Adaptive Early-Warning, *IEEE Access*, 9: pp. 40728-40742, (2021).
- [14] Keymasi Khalaji, A. and I. Saadat, Tracking control of quadrotors in the presence of obstacles based on potential field method. *Amirkabir Journal of*