مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
مقاله پژوهشی
جلد۱۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳، صفحه ۳۵-۲۳

مدیریت ترافیک پهپادها در فضای هوایی دو بعدی با استفاده از کنترل حداقل زمان پیش‌بین توزیع‌شده

ملیکا هاتف[۱]، پیمان باقری[۲]، فرزاد هاشم‌زاده[۳ و ۴]

۱ کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، گرایش دینامیک پرواز و کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز،تبریز، ایران
hatefmelika@gmail.com
۲ استادیار گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران pbagheri@tabrizu.ac.ir
۳ دانشیار گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران hashemzadeh@tabrizu.ac.ir
[4] Control and Automation Engineering Department, Istanbul Technical University, 34469 Istanbul, Turkey
fhashemzadeh@itu.edu.tr

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۷

چکیده: هوانوردی از ابتدا به خلبانان و کنترل‌کننده‌های ترافیک هوایی بستگی داشته است که با مشارکت یکدیگر وسیله پرنده را کنترل و از برخورد جلوگیری می‌کنند. از سوی دیگر وسایل پرنده کاملاً مستقل (پهپادها) در حال حاضر از حریم هوایی غیرنظامی منع می‌شوند اما محققان تلاش زیادی برای توسعه روش‌ها و فناوری‌هایی برای افزایش قابلیت اطمینان پروازهای کاملاً مستقل و ادغام با فضای هوایی غیرنظامی می‌کنند. ایمنی در عملیات پهپادها به کاهش موانع فنی و بهبود قابلیت‌های مستقل آن‌ها بستگی دارد. در این مقاله یک الگوریتم اجتناب از برخورد در یک سناریوی چند پهپادی برای محاسبه و معرفی مسیر پروازی پیش‌بینی‌شده با کم‌ترین زمان انجام ماموریت، معرفی می‌شود. سپس یک سیستم اجتناب از برخورد بر اساس یک کنترل‌کننده پیش‌بین توزیع‌شده برای ردیابی مسیر، طراحی می‌شود که در آن محدودیت‌های ضد برخورد مطابق با قوانین حق تقدم سازمان بین المللی غیر نظامی ایکائو تعریف شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که طرح پیشنهادی می‌تواند تضادها را در زمان آنی و در یک فضای هوایی پرتعداد بدون ایجاد تضاد در مسیر و برخورد ثانویه حل کند.

کلمات کلیدی: ترافیک هوایی، پهپاد، کنترل پیش‌بین توزیع‌شده، برخورد، اجتناب از برخورد.

Air Traffic Management for UAVs in 2D Airspace using Minimum Time Distributed Predictive Control

Melika Hatef, Peyman Bagheri, Farzad Hashemzadeh

Abstract: From the beginning, aviation has depended on pilots and air traffic controllers working together to control aircraft and avoid collisions. On the other hand, fully autonomous flying devices are currently prohibited from civilian airspace, but researchers are making great efforts to develop methods and technologies to increase the reliability of fully autonomous flights and integration with civilian airspace. Safety in UAV operations depend on reducing technical barriers and improving their autonomous capabilities. In this paper, a collision resolution algorithm based on predictive control is introduced in a multi-UAV scenario to calculate and introduce the predicted path with the least mission completion time. Then, a collision avoidance system is designed based on a distributed MPC for trajectory tracking, where anti-collision constraints are defined in accordance with ICAO right-of-way rules. The simulation results show that the proposed design can solve the conflicts in real time and in a crowded airspace without creating conflicts in the path and secondary collision.

Keywords: Air traffic, UAVs, Distributed predictive control, Conflict, Collision avoidance.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-30]

۱- مقدمه

امروزه استفاده از سامانه‌های بدون سرنشین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در استفاده از وسایل پرنده دارای سرنشین و یا کنترل از راه دور، به دلیل احتمال بروز خطاهای انسانی، خسارات جانی و مالی به دور از ذهن نیست. با ظهور وسایل پرنده بدون سرنشین (پهپادها) و کارایی روزافزون آن‌ها در صنعت، دغدغه هدایت بدون مشکل آن‌ها در فضای هوایی مسئله مهمی برای کنترل ترافیک هوایی محسوب می‌شود. لازم به توضیح است که ترافیک هوایی به عبور و مرور وسایل نقلیه پرنده در فضای هوایی مجاز گفته می‌شود [۱]. پهپادها با استفاده از تکنولوژی روز دنیا هدایت و کنترل می‌شوند اما مدیریت ترافیک هوایی مسئله مهمی است که هنوز به طور کامل نواقص آن برطرف نشده است. امروزه با افزایش ترافیک هوایی، در نتیجه به وجود آمدن خطوط هوایی پرتردد و متراکم، با مسئله برخورد وسایل پرنده روبه‌رو هستیم و محققان در تلاش هستند الگوریتم‌هایی را برای جلوگیری از برخورد آن‌ها ارائه کنند. در این مقاله سعی شده است به یکی از نواقص مهم این حوزه یعنی طولانی بودن زمان انجام ماموریت پرداخته شود و در واقع نوآوری این مقاله در ارائه یک روش کنترلی موثری است که پرنده‌های بدون سرنشین، بدون برخورد، با انتخاب مسیر مناسب در فضای هوایی و در کم‌ترین زمان ممکن ماموریت خود را به سرانجام برسانند.

چشم‌انداز تعداد زیاد پهپادها در چرخه هوانوردی، مشکل به اشتراک گذاشتن حریم هوایی توسط هواپیماهای سرنشین‌دار و بدون سرنشین را مطرح می‌کند. پروژه‌های بین‌المللی مانند MIDCAS [۲]، NEXTGEN [۳] یا SESARUTM [۴] برای ایجاد یک فضای هوایی ترکیبی میان هواپیماهای بدون سرنشین و سرنشین‌دار متمرکز شده‌اند. مرجع [۵] یک روش برنامه‌ریزی مسیر برای فضای هوایی با تراکم بالا در محیطی پیچیده با ساختمان‌ها و موانع متعدد شهری پیشنهاد می‌کند. در این مرجع از یک الگوریتم تصادفی کاوش سریع درختی بهبودیافته برای انطباق ترافیک فضای هوایی شهری استفاده شده است. یک مدل فضای هوایی شهری با موانع مجازی متعدد برای پرواز وسیله نقلیه هوایی تنظیم و آزمایش‌های شبیه‌سازی انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی، اثربخشی الگوریتم پیشنهادی و نیاز به مدیریت زمان فضای هوایی با تراکم بالا در ترافیک هوایی شهری را نشان می‌دهد. در [۶] از یک شبکه عصبی برای پیش‌بینی دینامیک کامل انتقالی با چارچوب کنترل پیش‌بین برای یک پهپاد استفاده شده است. شبکه عصبی بر اساس داده‌های پروازی معادلات دینامیکی پرواز را یاد می‌گیرد و عملکرد کنترل پیش‌بین را افزایش می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد کنترل پیش‌بین مبتنی بر شبکه عصبی عملکرد ردیابی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این روش پیشنهادی کاملاً بر اساس داده‌های پروازی بوده و هیچ معادله دینامیکی ریاضی در آن دخالت ندارد. یک روش بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی مسیر پهپادها در فضای هوایی پیچیده از طریق تشکیل شبکه همکاری هنگام ردیابی هدف متحرک در [۷] ارائه شده است. چارچوبی برای طراحی سیستم ردیابی چند پهپادی و تحقیق برای به حداکثر رساندن پوشش سنسورهای پهپاد طراحی شده است که شبیه‌سازی کارایی این روش برای تشکیل همکاری بین پهپادها و کاهش برخورد را تایید می‌کند.

در [۸] استراتژی به کار رفته توسط اپراتور برای جلوگیری از برخورد، تجزیه و تحلیل شده و به طور خاص زمان سپری شده بین تشخیص و جلوگیری از برخورد ارزیابی می‌شود. سپس با ارائه طرح بهبود سطح اتوماسیون برای کمک به کنترل‌کننده‌ها، محیط کاری آن‌ها را به سمت تصمیم‌گیری استراتژیک سوق می‌دهد ولی به صورت مشخص نمی‌توان وظایف را به هریک از کنترل‌کننده‌های انسانی و اتوماتیک تخصیص دهد. جدا کردن هوایی یک مفهوم مدیریت ترافیک هوایی است که در آن به خلبانان اجازه داده می‌شود مسیر بهینه هواپیما را در لحظه انتخاب کنند. در چنین شرایطی، توسط یک سیستم هوایی به خلبانان کمک می‌شود تا برخوردهای احتمالی با هواپیماهای همسایه را تشخیص دهند و برای جلوگیری از برخوردها راه‌حل‌هایی شامل مانور ارائه می‌شود. با استفاده از روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی که هم برای برنامه‌ریزی مسیر و هم برای حل درگیری استفاده می‌شوند نیز می‌توان از برخوردهای احتمالی جلوگیری کرد [۹]. بار محاسباتی زیاد یک طرح مبتنی بر بهینه‌سازی، استقرار سیستم کنترل روی سیستم واقعی را به ندرت امکان‌پذیر می‌کند، به همین دلیل در [۱۰] برای حل این مشکل محققان بر کنترل پیش‌بین توزیع‌شده یا غیرمتمرکز، تاکید کرده‌اند. یک چهارچوب کنترل پیش‌بین غیرخطی توزیع‌شده متغیر با زمان برای پهپادهای اتوماتیک که برخورد غیرمتمرکز را بر اساس ارتباط بین پهپادهای درگیر در مسیرهای پرواز حل می‌کند، در [۱۱] پیشنهاد شده است. کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز توان پیش‌نمایش عملکردهای غیر قابل اجرا و تولید مسیرهای بدون برخورد را دارد، اما قادر به مشخص کردن تقدم وسایل نقلیه در سیستم نیست. دو ویژگی اصلی در این روش کنترلی، پیش‌بینی قابل اطمینان برخوردهای جاری وکنترل محدودیت‌ها برای حل برخوردهای پیش‌بینی شده در آینده، به وسیله مدیریت ورودی‌ها و حالت‌های جاری است. یک روش برای انتخاب پارامترهای تنظیم، برای کنترل پیش‌بین در [۱۲] ارائه شده است که در آن مساله جلوگیری از برخورد با استفاده از یک الگوریتم تکاملی چند وجهی، حل می‌شود. شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهند که الگوریتم تکاملی چند وجهی، ابزار مفیدی برای رسیدن به یک مصالحه مناسب بین عملکرد و هزینه‌های محاسباتی است. مرجع [۱۳] یک الگوریتم تصمیم‌گیری تحلیلی بر اساس رویکرد هندسی سه بعدی را برای اجتناب از برخورد در هواپیماهای مستقل ارائه می‌دهد. الگوریتم پیشنهادی مانورهایی را برای اجتناب از برخورد با حداقل انحراف هواپیما از مسیر هدف خود، در سطح افقی و عمودی انجام می‌دهد. در [۱۴] ادعا شده است که تمام وسایل پرنده بدون سرنشینی که از کنترل‌کننده مطرح شده در این مرجع استفاده می‌کنند، برخوردی نخواهند داشت. الگوریتم ارائه شده، واکنشی و توزیع شده است و برای برنامه‌های زمان آنی مناسب می‌باشد. در [۱۵] یک روش جلوگیری از برخورد غیرمتمرکز برای کنترل ترافیک هوایی در طول مسیر

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-30]

ارائه شده است. در این مطالعه روش‌هایی برای محاسبه محدودیت‌های هواپیما و دینامیک چرخشی بررسی شده است که ایمنی در هر یک از مسیرهای برخورد را تضمین می‌کند. یک چهارچوب آنالیز پیش‌بینی برخورد در سیستم کنترل ترافیک هوایی در [۱۶] ارائه شده است که موقعیت پرواز و تخمینی از زمان برخورد را ارائه می‌کند. به این ترتیب با پیش‌بینی برخورد، امکان تنظیم به موقع کنترل پرواز را امکان‌پذیر می‌سازد. مرجع [۱۷] از کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز برای اجتناب از برخورد در گروهی از پهپادها استفاده می‌کند. در این مرجع، هر وسیله نقلیه فقط برای اقدامات خاص خود برنامه‌ریزی می‌کند، اما پهپادها داده‌های مربوط به برنامه مسیر خود را برای اطمینان از سازگاری تصمیمات در سراسر گروه، ارسال می‌کنند. این مطالعه نشان می‌دهد که سرعت، نرخ چرخش و محدودیت‌های فاصله اجتناب از برخورد در بهینه‌سازی چگونه باید تغییر کنند تا بتوانند رعایت محدودیت‌ها را تضمین کنند. نتایج نشان می‌دهد که محاسبات مورد نیاز برای کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز تنها با افزایش اندکی در زمان پرواز پهپاد به طور قابل توجهی کم‌تر از نمونه متمرکز آن است. مشکلات ناوبری وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین که به صورت ترکیبی در محیط آزاد و محیط دارای مانع پرواز می‌کنند، در [۱۸] بررسی شده است. هنگامی که موانع در طول پرواز ظاهر می‌شوند، پهپادها ملزم به حرکت در اطراف آن‌ها و همچنین جلوگیری از برخورد با یکدیگر هستند. برای دستیابی به این اهداف، یک راهکار کنترلی دو حالته پیشنهاد شده است: "حالت ایمن" به عنوان عملیات در محیط بدون مانع و هنگامی که موانعی با احتمال برخورد در مسیر وجود دارند، "حالت خطر" فعال می‌شود. حالت ایمن با در نظر گرفتن حرکت همه پهپادهای شرکت‌کننده در سازماندهی فضا بهینه‌سازی می‌شود. در حالت خطر نیز، یک الگوریتم با استفاده از شبکه عصبی برای اجتناب از برخورد پیشنهاد شده است. این الگوریتم غیر متمرکز از هندسه فضای پرواز برای ایجاد مسیرهای بهینه استفاده کرده و به منظور رسیدگی به محدودیت‌های عملیاتی پرنده، از یک کنترل‌کننده پیش‌بین برای ردیابی مسیرهای تولید شده استفاده می‌کند. بار محاسباتی کنترل پیش‌بین عمدتاً به عملکرد و محدودیت‌های هدف بستگی دارد. در [۱۹] از یک معماری غیرخطی برای کنترل پهپاد استفاده می‌شود که دارای حلقه‌های بیرونی و درونی است. حلقه بیرونی از کنترل‌کننده‌های غیرخطی برای کنترل سینماتیک پهپاد و حلقه‌های درونی بر اساس شبکه عصبی پیچشی طراحی شده‌اند. شبکه عصبی پیچشی نوعی شبکه مصنوعی است که برای شناسایی و پردازش تصویر استفاده می‌شود و در واقع هوش مصنوعی قدرتمندی است که با استفاده از یادگیری عمیق به توصیف و تولید می‌پردازد، از عملکرد سلول‌های مغز انسان الگو می‌گیرد و خروجی آن به عنوان سیگنال‌های کنترلی برای هدایت و جلوگیری از برخورد استفاده می‌شود.

در اغلب روش‌های کنترلی بررسی‌شده، جلوگیری از برخورد جاری مطرح است ولی روشی برای اجتناب از برخوردهای بعدی ارائه نشده است. به همین دلیل روش ارائه شده در این مقاله به صورت الگوریتمی بیان می‌شود که در هر لحظه شرایط را بررسی کند و تا رسیدن به هدف از برخوردهای جاری و بعدی نیز جلوگیری نماید. این مساله منجر به غیرمحدب شدن فضای حالت و محدودیت‌های بهینه‌سازی خواهد شد که در این مرحله معادلات پهپاد را با استفاده از روش M-بزرگ بازنویسی کرده و پس از تبدیل به صورت یک مسئله درجه دوم عدد صحیح ترکیبی، بهینه‌سازی انجام می‌شود. همچنین در این مقاله با توجه به قوانین و محدودیت‌های تعریف شده سعی بر این است تا از هرگونه مانورهای طولانی و غیرضروری برای جلوگیری از برخورد جلوگیری شود تا پهپاد بتواند در کوتاه‌ترین زمان ممکن به مقصد برسد تا روش ارائه شده برای مأموریت‌های فوری قابل استفاده باشد.

ساختار این مقاله به این شکل است که در بخش دوم به تعریف مسئله، هدف و توضیح فرضیات پرداخته می‌شود. در بخش سوم، پهپاد در سیستم مختصات زمین مدل‌سازی شده و معادلات حرکتی آن تعریف می‌گردد. در بخش چهارم به مدیریت اجتناب از برخورد با استفاده از کنترل پیش‌بین توزیع‌شده پرداخته می‌شود و الگوریتم سازماندهی گروه برخورد تعریف شده و سپس برخورد شناسایی شده بر اساس کنترل پیش‌بین مدیریت می‌گردد. در بخش پنجم مسیر حرکت و مدیریت اجتناب از برخورد در سناریوهای مختلف فضای هوایی با ترافیک متفاوت شبیه‌سازی شده و در انتهای مقاله جمع‌بندی و ایده‌های کار برای تحقیقات آینده ارائه می‌شود.

۲- تعریف مسئله

در این بخش، هدف طرح مساله و ارائه توضیحات لازم در مورد روش ارائه شده در این مقاله است. این روش بر بهبود توانایی‌های مستقل پهپادها در برنامه‌ریزی مسیر و جلوگیری از برخورد، متمرکز شده است و شامل مدل‌سازی پهپاد و مدیریت برخورد، الگوریتم حل برخورد بر اساس کنترل پیش‌بین توزیع‌شده غیرخطی و طراحی کنترل‌کننده و تعریف محدودیت‌های مسئله می‌باشد.

مشکل عمده تشخیص و حل برخورد، پیش‌بینی دقیق برخورد و تنظیم مؤثر حالت پرواز برای جلوگیری از برخورد است. همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز توان پیش‌نمایش عملکردهای غیرقابل اجرا و تولید مسیرهای بدون برخورد را دارد اما نمی‌تواند تقدم وسیله نقلیه را در سیستم مشخص کند [۱۱]. در اغلب روش‌های کنترلی بررسی‌شده در مراجع، برای جلوگیری از برخورد جاری راه حل دارند اما نمی‌توانند برخوردهایی که متعاقباً رخ خواهند داد را پیش‌بینی کنند. روش بررسی شده در این مقاله از کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز و توزیع‌شده برای جلوگیری از برخورد استفاده می‌کند که در آن الگوریتم کنترلی به وسیله تطبیق مسیر وسیله پرنده از اولین برخورد پیش‌بینی‌شده جلوگیری می‌کند. در این روش از کنترل بهینه در چارچوب قوانین حق تقدم[1] ارائه شده توسط سازمان

[1] Right of way

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-30]

بین‌المللی هوانوردی استفاده می‌شود و کنترل پیش‌بین توزیع‌شده نقش مهم دنبال کردن مسیر پهپاد و جلوگیری از برخورد را به عهده دارد [۲۰]. برای هماهنگی کامل هواپیماهای بدون سرنشین در فضای هوایی غیرنظامی، پهپادها نیز باید مراحلی مشابه با هواپیماهای غیرنظامی سرنشین‌دار را دنبال کنند و به سیستم‌هایی مجهز شوند که امکان تبادل اطلاعات با سایر وسایل نقلیه هوایی را داشته باشند. به این ترتیب در این مقاله، تعداد N_v پهپاد را در یک فضای هوایی در ارتفاع یکسان و در امتداد مسیرهای از پیش تعیین شده توسط برنامه‌ریز مسیر با عنوان U_i برای $i = 1, 2, 3, \dots, N_v$ در نظر می‌گیریم. $\boldsymbol{X}_i(k)$ در دنباله زمانی گسسته $k = 1, 2, 3, \dots, t_f$، بردار متغیرهای حالت پرواز پهپاد iام را نمایش می‌دهد و حالت اولیه آن $\boldsymbol{X}_i(0)$ و حالت نهایی $\boldsymbol{X}_i(t_f)$ می‌باشد. هدف اصلی، ارائه راهکاری برای هدایت هر پهپاد به هدف خود بدون برخورد با سایر وسایل نقلیه هوایی در حداقل زمان است. فرضیات زیر در این مقاله درنظر گرفته خواهد شد:

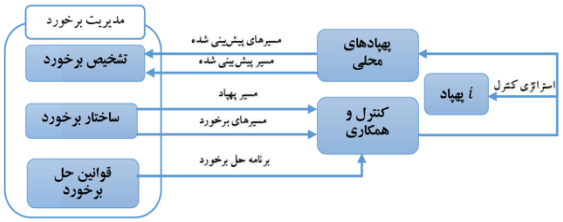
- هر پهپاد می‌تواند موقعیت، سرعت و مسیرهای پیش‌بینی شده تمام وسایل نقلیه هوایی را در دامنه حسگر خود دریافت کند.
- مانورهای جلوگیری از برخورد همیشه مطابق با قوانین حق تقدم انجام می‌شوند.
- وسیله دارای حق تقدم، سرعت و زاویه سر خود را حفظ می‌کند.
- طبق قوانین، مانورهای ضد برخورد شامل تغییر در ارتفاع و جدایی عمودی، به عهده مدیریت برنامه‌ریزی مسیر و کنترل ترافیک است. به این ترتیب در این مقاله فقط مانورهای سطحی در نظر گرفته می‌شود.

لازم به توضیح است که هرگونه نقض این فرض‌ها، عملکرد روش ارائه شده را مختل خواهد کرد. به عنوان مثال، در اولین فرض داریم که هر پهپاد می‌تواند موقعیت، سرعت و مسیرهای پیش‌بینی شده تمام وسایل نقلیه هوایی را در دامنه حسگر خود دریافت کند. طبیعتاً هر گونه دریافت نادرست اطلاعات یا قطع شدن دریافت اطلاعات، کنترل‌کننده را دچار مشکل خواهد ساخت.

روش ارائه شده در این مقاله به دو بخش اصلی مدیریت برخورد و کنترل برخورد تقسیم می‌شود. در مدیریت برخورد سه زیرگروه تشخیص برخورد، ساختار برخورد و قوانین حل برخورد وجود دارد که در ادامه توضیحات هر کدام به شرح زیر ارائه می‌شود:

- ✓ گروه تشخیص برخورد که در آن مسیرهای پیش‌بینی شده در یک دامنه مشخص از پهپاد i و همسایه‌هایش دریافت و احتمال وجود برخورد را آنالیز و مشخص کرده و اطلاعات برخورد را ارائه می‌دهد.
- ✓ در گروه ساختار برخورد، برخوردها بر اساس اطلاعات‌شان مرتب می‌شوند.
- ✓ در گروه قوانین حل برخورد، برنامه حل برای هر گروه بر اساس قوانین و محدودیت‌ها و جلوگیری از برخورد تولید می‌شود.

در کنترل برخورد، با توجه به برخوردهای جاری و بر اساس برنامه حل برخورد، مسیرهای پهپادهای محلی و مسیرهای دارای برخورد مشخص شده و راهکارهای کنترلی مربوطه برای پهپادهای درگیر ارائه می‌شوند و مسیرهای تازه و بدون برخورد تولید می‌شوند و سپس دوباره اطلاعات مربوط به مسیرهای جدید و بدون برخورد در سیستم ثبت می‌شوند. تمام فرآیند همکاری در یک چرخه یک مرحله‌ای انجام شده و به طور مداوم تکرار می‌شود تا یک فرآیند بهینه‌سازی برخط شبیه به مفهوم کنترل پیش‌بین شکل بگیرد. فرض می‌کنیم پهپاد دستور انجام یک مأموریت فوری را از مرکز کنترل دریافت می‌کند. در این مرحله ابتدا پهپاد باید از مرکز کنترل مسیرهای قابل اجرا برای انجام ماموریت را دریافت کند و سپس زمان انجام ماموریت را مقایسه نموده و بهترین مسیر با کم‌ترین احتمال برخورد و کم‌ترین زمان ممکن را شناسایی کرده و به عنوان مسیر جدید اعلام کند. در این بخش به تفصیل مبحث برخورد، پیش‌بینی و جلوگیری از آن را تعریف کرده و در بخش‌های بعد به مدل‌سازی پهپاد و تعریف محدودیت‌های مدیریت پیش‌بینی و جلوگیری از برخورد خواهیم پرداخت. در شکل ۱ ساختار کلی مدنظر در این مقاله برای اجتناب از برخورد نشان داده شده است. لازم به توضیح است که بخش‌های مختلف این ساختار در ادامه مقاله توضیح داده خواهد شد.



شکل ۱. استراتژی اجتناب از برخورد.

۳- مدل‌سازی پهپاد

در این بخش از مقاله به مدل‌سازی پهپادهای مد نظر در این مقاله پرداخته می‌شود. فرض بر این است که همه پهپادها در سیستم مختصات زمین $(oxyz)$ پرواز می‌کنند و به وسیله نمونه‌برداری مجزا از فرآیند پرواز هر پهپاد، در زمان kام بردار حالت پرواز پهپاد iام به صورت $\boldsymbol{X}_i(k) = [x_i(k)\ z_i(k)\ \psi_i(k)]^{\mathrm{T}}$ مشخص می‌شود. روابط فضای حالت معادلات حرکتی این پهپاد به صورت زیر می‌باشد [۲۱]:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= x_i(k) + v(k)\Delta t \\ &\quad \times (\sin\psi(k+1) - \sin\psi(k))/\omega(k) \\ z_i(k+1) &= z_i(k) + v(k)\Delta t \\ &\quad \times (\cos\psi(k) - \cos\psi(k+1))/\omega(k) \\ \psi_i(k+1) &= \psi_i(k) + \omega(k)\Delta t \end{aligned} \tag{۱}$$

که در آن z و x مختصات طولی، v سرعت طولی، ψ زاویه سر(هدایت)، ω سرعت زاویه‌ای و Δt زمان نمونه‌برداری در پهپاد iام هستند. محدودیت‌های مسئله از ترکیب دو دسته عملکرد پرواز و جلوگیری از برخورد به وجود می‌آیند که به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-30]

$$0 \le |\omega(k)| \le \omega_{max} \qquad (۲)$$
$$v_{min} \le |v(k)| \le v_{max}$$

که در آن ω_{max} بیشینه سرعت زاویه‌ای و v_{min} و v_{max} به ترتیب کمینه و بیشینه سرعت خطی وسیله پرنده هستند. همچنین شعاع چرخش به صورت زیر تعریف شده و دارای محدویتی به شکل زیر خواهد بود:

$$r_{turn} = \frac{v_{min}}{\omega_{max}} \le \left|\frac{v(k)}{\omega(k)}\right| \qquad (۳)$$

که در آن r_{turn} شعاع چرخش پرنده است. فاصله بین پهپادهای i و j به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_{ij}(k) = \sqrt{\left(x_i(k) - x_j(k)\right)^2 + \left(z_i(k) - z_j(k)\right)^2} \qquad (۴)$$
$$r_{ij}(k) > r_{safe}\ ,\ \ \forall\, i,j = 1,2,3,\dots,N_\upsilon$$

که در آن r_{safe} شعاع امن پرواز است و طبیعتاً اگر $r_{ij} \le r_{\text{safe}}$ آن‌گاه برخورد اتفاق می‌افتد.

در این بخش از مقاله پهپاد در دستگاه مختصات زمین مدل‌سازی شده و همچنین معادلات حرکتی و محدودیت‌های حل مسئله مشخص گردید. در ادامه با استفاده از این معادلات، به مدیریت اجتناب از برخورد پرداخته خواهد شد.

٤- مدیریت اجتناب از برخورد با استفاده از کنترل پیش‌بین توزیع شده

در این بخش از مقاله، یک مدل کنترلی توزیع شده برای ارتباط پهپادها در نظر گرفته می‌شود و در واقع یک واحد مشخص مسئول تصمیم‌گیری نیست. با بررسی مسیرهای قابل پیش‌بینی با شرط شعاع امن پرواز، یک گروه شامل مسیرهای دارای درگیری ایجاد می‌شود. اگر در زمان kام پرواز، بیش از دو پهپاد وجود داشته باشند که $r_{ij} \le r_{\text{safe}}$ باشد این پهپادها به عنوان پهپادهایی که برخورد خواهند کرد، معرفی می‌شوند و مجموعه Cf_ε را تشکیل می‌دهند که به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$Cf_\varepsilon = \{(S_i\ ,S_j)|i,j \in \{1,\dots,N_\upsilon\}, \exists k \in \{1,\dots,t_f\}\ ,r_{ij} \le r_{safe}\}\ ,\varepsilon \in \{1,2,\dots,N_{Cf}\} \qquad (۵)$$

در این رابطه t_f زمان انتخاب مسیر جایگزین، ε شماره گروه برخورد، S مسیرهای پیش‌بینی شده پهپادهای دارای برخورد و N_{cf} تعداد گروه‌های درگیر را نشان می‌دهد. روند سازماندهی گروه برخورد به شکل زیر بیان می‌شود:

۱- در زمان kام مقادیر متغیرهای حالت پهپاد i دریافت می‌شود.

۲- برای پهپاد iام، تمام پهپادهای j که $r_{ij} \le r_{\text{safe}}$ است پیدا کرده و $\text{Cf}_\varepsilon = \{\text{S}_i, \text{S}_j\}$ را تشکیل دهید.

۳- اگر $\text{Cf}_{N_{\text{cf}}} = \emptyset$ باشد، پرواز به سمت هدف انجام می‌شود وگرنه مسیر برای پهپادهای i و j بهینه‌سازی می‌شود.

۴- گروه برخورد جدید تشکیل شود و مراحل ۲ و ۳ تا رسیدن به مقصد تکرار شوند.

برای هماهنگی مسیر چند پهپادی فرض می‌کنیم که پهپادها فقط دو حالت پرواز مستقیم به مقصد و انجام تنظیمات برای حل برخورد را دارند. در ادامه یک الگوریتم کنترل پیش‌بین غیرخطی توزیع شده برای هماهنگ کردن مسیرهای متضاد پهپادها در این بخش معرفی شده است. کنترل بهینه فعلی در دوره نمونه‌برداری بعدی اجرا می شود و فرآیند تکرار می‌شود.

۴-۱ مراحل جلوگیری از برخورد

در این بخش برای هماهنگ کردن مسیرهای متضاد پهپادها، یک الگوریتم کنترل پیش‌بین غیرخطی توزیع شده معرفی شده است. پهپاد موظف است در سریع‌ترین زمان ممکن بدون انحراف بی‌دلیل از مسیر مشخص، به هدف برسد. هدف پهپاد i به صورت نقطه‌ای با مختصات $\boldsymbol{P}_{i_t} = [x_{i_t}, z_{i_t}]$ معرفی می‌شود. تابع هزینه را به صورت زیر معرفی می‌کنیم [۲۲]:

$$dis_i = \left\|x_i(k) - x_{i_t}, z_i(k) - z_{i_t}\right\|_2 \qquad (۶)$$

$$J_{i1}(k) = \sum_{i=1}^{N_\upsilon} (dis_i/dis_0) = \sum_{i=1}^{N_\upsilon}\left(\frac{\left\|x_i(k) - x_{i_t}, z_i(k) - z_{i_t}\right\|_2}{\left\|x_i(0) - x_{i_t}, z_i(0) - z_{i_t}\right\|_2}\right) \qquad (۷)$$

$$C_i(k) = \frac{|\psi_i(k) - \psi_i(k-1)|}{|\psi_i(k-1)|} + \frac{|\upsilon_i(k) - \upsilon_i(k-1)|}{|\upsilon_i(k-1)|} \qquad (۸)$$

$$J_{i2}(k) = \sum_{i=1}^{N_\upsilon} C_i(k) \qquad (۹)$$

لازم به توضیح است که تابع هزینه کلی به صورت $J_{i1}(k) + J_{i2}(k)$ درنظر گرفته خواهد شد. تابع پنالتی برخورد را نیز به صورت زیر فرض کنید:

$$F_i(k) = \begin{cases} 0 & f_i(k) \ge 0 \\ |f_i(k)| & f_i(k) < 0 \end{cases} \qquad (۱۰)$$

که در آن

$$f_i(k) = \sqrt{\left[x_i(k) - x_j(k)\right]^2 + \left[z_i(k) - z_j(k)\right]^2} - r_{safe} \qquad (۱۱)$$

به این ترتیب شاخص عملکرد کلی برای اجتناب از برخورد در دوره زمانی $[k\ ,k+N]$ که در آن k لحظه شروع برخورد و N طول دوره برخورد و U_i دنباله ورودی بردار کنترل می‌باشد، به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\min_{U_i} J_i = \sum_{q=1}^{N_k}[J_{i1}(k+q) + J_{i2}(k+q) + \rho F_i(k)] \qquad (۱۲)$$

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-30]

که در آن متغیر بهینه‌سازی $\overline{U}_i$ سیگنال کنترلی و در واقع همان زاویه سر پهپاد (ψ) معرفی شده در رابطه (۱) می‌باشد. همچنین N_k افق پیش‌بینی می‌باشد.

به این ترتیب در این بخش به بررسی پیش‌بینی و جلوگیری از وقوع یک برخورد پرداخته شد و یک الگوریتم کنترل پیش‌بین غیرخطی توزیع شده برای هماهنگ کردن مسیرهای متضاد پهپادها معرفی گردید.

۲-۴ شرح قوانین کنترلی در فضای هوایی برای جلوگیری از برخورد

الگوریتم اجتناب از برخورد و هماهنگی مسیر برای هر پهپاد را می‌توان به این صورت توصیف کرد که هر پهپاد به طور مستقل مسئله بهینه‌سازی خود را حل کرده و در مواقع ضروری با سایر پهپادها ارتباط برقرار می‌کند. این الگوریتم برای تمامی مسیرهای قابل اجرای اعلام شده توسط مرکز انجام می‌شود و زمان‌های مأموریت اعلام شده در پایان مراحل الگوریتم باهم مقایسه می‌شود سپس پهپاد i، مسیر مربوط به کم‌ترین زمان را انتخاب و شروع به انجام مأموریت می‌نماید. پس از بررسی اولیه مسیرها و انتخاب مسیر حرکت بهینه، شروع به بررسی مسیر انتخاب شده و اجرای قوانین و محدودیت‌های دقیق‌تری می‌کند که از هرگونه برخورد احتمالی جلوگیری شود و پهپاد i در سریع‌ترین زمان ممکن به مقصد برسد. در پیش‌بینی برخورد، فقط برخورد با هواپیماهای دارای حق تقدم براساس قوانین بین‌المللی در نظر گرفته می‌شود [۲۱]. فلوچارت این الگوریتم در جدول ۱ مشاهده می‌شود که در آن k لحظه حال و N طول دوره نمونه‌برداری و $\overline{\boldsymbol{U}}_i(k)$ دنباله ورودی بردار کنترل می‌باشد.

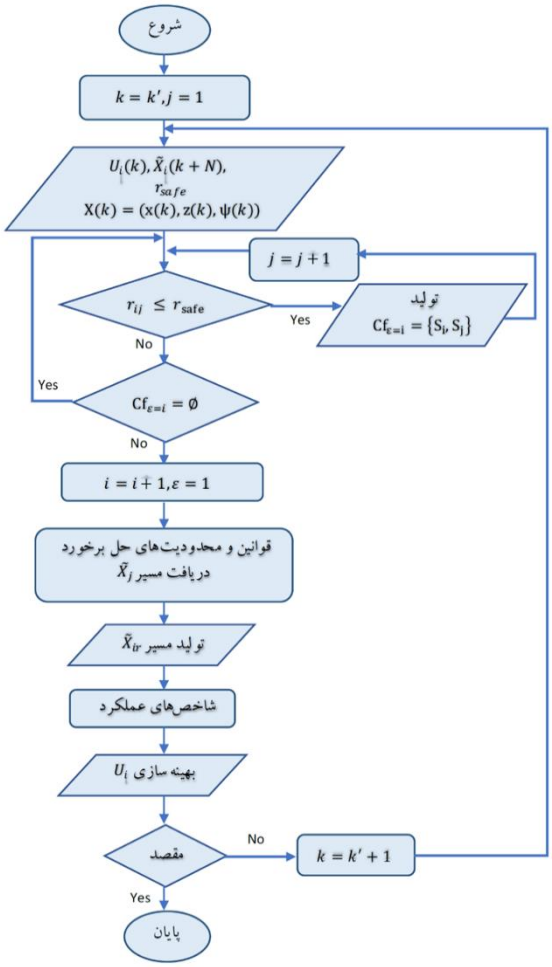
همچنین از پیوست دوم قوانین ایکائو موارد زیر برای تعریف قوانین حاکم بر واحد پیش‌بینی انتخاب شده است:

۱) *نزدیک شدن رأس به رأس*[1]: اگر دو هواپیما در یک مسیر واحد ولی خلاف جهت به هم نزدیک شوند هریک باید به سمت راست خود تغییر مسیر دهند.

۲) *همگرایی در یک سطح*[2]: وقتی دو پرنده در دو سطح تقریباً برابر و مسیرهایی مختلف به سمت هدف خود در نقطه‌ای از مسیرشان همگرا می‌شوند، پرنده‌ای که دیگری را در سمت راست خود دارد، الزاماً باید به دیگری راه بدهد.

۳) *در حال سبقت*[3]: هواپیمای سبقت‌گیرنده، هواپیمایی است که با محور تقارن هواپیمای دیگر زاویه ۷۰ درجه بسازد. یعنی اگر در یک مسیر اما سرعت‌هایی متفاوت به هم نزدیک شوند، هواپیمایی که از او سبقت گرفته می‌شود دارای حق تقدم است و سبقت گیرنده باید به سمت راست تغییر راستا بدهد.

جدول ۱. فلوچارت طراحی کنترل پیش‌بین برای پیش‌بینی و جلوگیری از برخورد.



۳-۴ شرح الگوریتم اجتناب از برخورد

با توجه به کنترل پیش‌بین توزیع‌شده برای حل برخورد چندین پهپاد، الگوریتم اجتناب از برخورد و هماهنگی مسیر برای هر پهپاد را به صورت زیر می‌توان توصیف کرد:

مرحله ۱: زمان نمونه‌برداری k را تنظیم کنید. $\overline{\boldsymbol{U}}_i(k)$ بردار کنترل ورودی و $\tilde{\boldsymbol{X}}_i(k+N)$ حالت‌های پرواز پیش‌بینی‌شده در دوره $[k, k+N]$ هستند.

مرحله ۲:

۱. متغیرهای حالت پهپاد i در زمان k را دریافت کنید.

۲. برای i، تمام jهایی که $r_{ij} \le r_{\text{dec}}$ است پیدا و گروه $Cf_{\varepsilon=i}$ را تشکیل دهید.

۳. اگر $Cf_i = \emptyset$ باشد، پرواز به سمت هدف بدون هماهنگی و عدم اعلام برخورد و بروید به مرحله ۳ وگرنه بروید به مرحله ۴ (بهینه‌سازی هدف برای i و j).

[1] Annex II, 3.2.2.2
[2] Annex II, 3.2.2.3
[3] Annex II, 3.2.2.4

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-30]

۴. $\varepsilon = \varepsilon + 1$ و $i = i + 1$.

مرحله ۳: طبق $\tilde{\boldsymbol{X}}_j$ و قوانین حل و محدودیت‌ها یک مسیر مرجع بدون برخورد برای i تولید کنید با عنوان $\tilde{\boldsymbol{X}}_{ir}$.

مرحله ۴: بر اساس $\tilde{\boldsymbol{X}}_{ir}$ و $\tilde{\boldsymbol{X}}_i$ و شاخص‌های عملکردی، بردار کنترل بهینه $\bar{\boldsymbol{U}}_i$ را حل کرده و به پهپاد i برگردانید.

مرحله ۵: $\bar{\boldsymbol{U}}_i$ در زمان k را اجرا و سپس وضعیت پهپاد i در $[k+1]$ را بدست آورید و به عنوان $\hat{\tilde{\boldsymbol{X}}}_i$ برای پهپادهای موجود در دامنه، ارسال کنید.

مرحله ۶: اگر پهپاد i به هدف رسید، محاسبه پایان می‌یابد و k را به عنوان زمان مأموریت اعلام کنید وگرنه مراحل ۱ تا ۶ در زمان نمونه‌برداری بعدی تکرار شود.

۴-۴ شرح الگوریتم اجتناب از برخورد

چارچوب راه‌حل برای طراحی کنترل‌کننده توزیع‌شده برای حل برخورد در شکل ۲ نمایش داده شده است که در آن k نمونه حال و $\boldsymbol{U}_i(k)$ دنباله ورودی بردار کنترل هستند. هر پهپاد به طور مستقل مسئله بهینه‌سازی خود را حل کرده و در مواقع ضروری با سایر پهپادها ارتباط برقرار می‌کند. این چارچوب یک کنترل‌کننده توزیع‌شده را بیان می‌کند.

برای پهپاد تحت کنترل iام، کنترل پیش‌بین را بر اساس مدل زمان‌گسسته خطی به شرح زیر در نظر می‌گیریم:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= x_i(k) + v_i^x(k)\Delta t \\ y_i(k+1) &= v_i(k) + v_i^y(k)\Delta t \\ v_i^x(k+1) &= v_i^x(k) + a_i^x(k)\Delta t \\ v_i^y(k+1) &= v_i^y(k) + a_i^y(k)\Delta t \end{aligned} \qquad (۱۳)$$

موقعیت پهپاد i در سیستم مرجع اینرسی به صورت $\boldsymbol{X}_i(k) = [x_i(k), y_i(k)]^T$ و $\boldsymbol{V}_i(k)$ بردار سرعت و $\boldsymbol{a}_i(k)$ بردار شتابی است که باید بهینه شود تا پهپاد بتواند مسیر برنامه‌ریزی شده از نظر موقعیت و سرعت را در زمان مشخص دنبال کند. استفاده از شتاب طولی و جانبی برای تضمین فاصله ایمن و در مواردی شتاب چرخشی $(\dot{\psi})$ مورد نیاز است. به این ترتیب $\boldsymbol{\xi}(k) = \left[x_i(k), y_i(k), v_i^x(k), v_i^y(k)\right]^T$ را بردار حالت پهپاد i و $\boldsymbol{u}(k) = \boldsymbol{a}_i(k) = \left[a_i^x(k), a_i^y(k)\right]^T$ را بردار سیگنال کنترلی آن در نظر می‌گیریم. لازم به توضیح است که اگر یک سیستم مرجع زمان متغیر متمرکز در موقعیت $\boldsymbol{X}_i(k)$ وسیله نقلیه با محورهای مماس و عمود به مسیر پرواز در زمان k در نظر بگیریم، هواپیما در معرض شتاب مماسی $\boldsymbol{a}_i(k)$ قرار می‌گیرد.

با توجه به مسیر برنامه‌ریزی شده $\boldsymbol{\xi}_{\text{ref}}$، حرکت کنترل بهینه را در زمان k می‌توان به صورت دنباله‌ای از n_t تصمیم کنترلی $\boldsymbol{U}^*(k)$ تعیین کرد که سیستم را مجبور به ردیابی مسیر دلخواه کند. اگر $\boldsymbol{\xi}(k+p)$ بردار حالت پیش‌بینی شده در زمان $k+p$ $(\forall p \in [0,1,\dots,n_t])$ و $g(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{u}, k)$ محدودیت و $L(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{u})$ تابع هزینه را نمایش دهند، داریم:

$$\min_{\boldsymbol{U}} \sum_{p=0}^{n_t} L\big(\boldsymbol{\xi}(k+p+1), \boldsymbol{u}(k+p)\big) \qquad (۱۴)$$
$$s.t. \quad g(\boldsymbol{\xi}(k+p), \boldsymbol{u}(k+p), k) \le 0$$

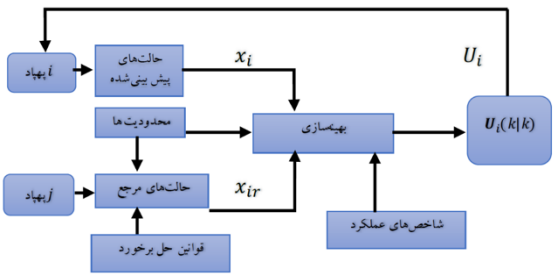
اگر چه دنباله ای از حرکات کنترلی n_t در هر زمان نمونه برداری k محاسبه می شود، اما با توجه به اصول کنترل پیش‌بین، اولین تصمیم اجرا می شود و سپس یک دنباله جدید در زمان بعدی $k+1$ مطابق با رویکرد افق عقب‌رونده محاسبه می‌شود. در تابع معیار (۱۴)، یک انتخاب مناسب برای تابع L می‌تواند فرم استاندارد درجه دوم خطا باشد، $L(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{u})$ را یک تابع درجه دوم شامل فاصله بین $\boldsymbol{\xi}(k+p)$ پیش‌بینی شده و مقدار مرجع $\boldsymbol{\xi}_{ref}(k+p)$ در نظر گرفته می‌شود و همچنین می‌دانیم که $\boldsymbol{u}(k+p)$ بردار سیگنال کنترلی پیش‌بینی شده و $\boldsymbol{u}_{ref}(k+p)$ مقدار مرجع آن هستند و در واقع ترم دوم هم تلاش دارد خطا در سیگنال کنترلی را نسبت به سیگنال کنترل مطلوب کاهش دهد. به این ترتیب (۱۴) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\min_{\boldsymbol{U}} \sum_{p=1}^{n_t} \Big(\boldsymbol{e}_\xi(k+p)^T \boldsymbol{Q} \boldsymbol{e}_\xi(k+p)\Big) + \Big(\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{u}}(k+p-1)^T \boldsymbol{R} \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{u}}(k+p-1)\Big) \qquad (۱۵)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \boldsymbol{e}_\xi(\tau) &= \boldsymbol{\xi}(\tau) - \boldsymbol{\xi}_{ref}(\tau) \\ \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{u}}(\tau) &= \boldsymbol{u}(\tau) - \boldsymbol{u}_{ref}(\tau) \end{aligned} \qquad (۱۶)$$

همچنین $\mathbf{Q}$ و $\mathbf{R}$ ماتریس‌های وزنی هستند که به ترتیب مثبت نیمه معین و مثبت معین هستند. لازم به توضیح است که تنظیم صحیح پارامترهای کنترل‌کننده پیش‌بین تاثیر به‌سزایی بر روی پایداری و عملکرد سیستم حلقه بسته دارد [۲۳-۲۴] و به همین دلیل روش‌های تنظیم متنوعی از جمله روش‌های تنظیم تحلیلی برای انتخاب صحیح پارامترهای وزنی و افق پیش‌بینی ارائه شده است [۲۵].



شکل ۲. چارچوب راه حل برای کنترل پیش‌بین توزیع‌شده.

همچنین لازم به توضیح است که در کنترل‌کننده‌های پیش‌بین برای حذف خطای ردیابی در حالت ماندگار، یا از انتگرال‌گیر در تابع معیار استفاده می‌شود و یا از مقدار مطلوب حالت ماندگار سیگنال کنترلی کمک گرفته می‌شود [۲۵-۲۴]. در این مقاله از راهکار دوم بهره گرفته شده است. همان‌طور که در رابطه زیر دیده می‌شود، محدودیت در نظر گرفته‌شده

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-30]

برای حل مسئله بهینه‌سازی (۱۴)، روی سرعت وسیله پرنده، غیرمحدب[1] و غیرخطی است:

$$V_{i,min} \leq \|\boldsymbol{V}_i(k+p+1)\|_2 \leq V_{i,max} \qquad (۱۷)$$

با توجه به غیرمحدب و غیرخطی شدن محدودیت‌های سیستم، از پلیتوپ محدب برای این محدودیت می‌توان استفاده کرد. پلیتوپ مجموعه‌ای فشرده با تعداد محدودی از نقاط ابتدایی و انتهایی که در ادامه آورده شده تعریف می‌شود. یک مجموعه $\mathfrak{B}$ از $\mathbb{R}$ محدب است اگر برای هر جفت نقطه متمایز α و β در $\mathfrak{B}$، حلقه بسته‌ای با نقاط α و β در $\mathfrak{B}$ قرار داشته باشد. این تعریف از پلیتوپ محدب به عنوان بدنه محدب مجموعه محدودی از نقاط است که نمایش راس نامیده می‌شود و یک پلیتوپ محدب توسط مجموعه رئوس چند توپ ارائه می‌شود. یک پلیتوپ بسته را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از نابرابری‌های خطی نمایش داد که در آن α، $m \times n$ و β، $n \times 1$ هستند. مقدار نقاط α و β براساس الگوریتم ایجاد پلیتوپ مورد نظر برای حل مسئله و بر اساس مقدار کمینه و بیشینه در نظر گرفته شده برای هر پلیتوپ محاط شده در دایره مورد نظر در دامنه سرعت و تعداد پلیتوپ مورد نیاز برای دقت تخمین سرعت خطی بدست می‌آید. شکل ۳ پلیتوپ استفاده شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

با توجه به غیرمحدب و غیرخطی بودن این محدودیت‌ها، دو دایره متحدالمرکز با شعاع $V_{i,min}$ و $V_{i,max}$ به نام‌های $C_{\boldsymbol{V}_{i,min}}$ و $C_{\boldsymbol{V}_{i,max}}$ که $C_{V_{i,max}} - C_{V_{i,min}}$ مجموعه دامنه $\boldsymbol{V}_i$ را نشان می‌دهد، تعریف می‌کنیم. می‌توان چندوجهی‌های $P_{\boldsymbol{V}_{i,min}}$ و $P_{\boldsymbol{V}_{i,max}}$ با رأس‌های $n_v \geq 3$ را به گونه‌ای تعریف کرد که $C_{\boldsymbol{V}_{i,min}}$ در $P^i_{\boldsymbol{V}_{min}}$ و $C_{\boldsymbol{V}_{i,max}}$ در $P^i_{\boldsymbol{V}_{max}}$ محاط شده باشند. مجموعه $\mathfrak{B}^i = \{\mathfrak{B}^i_s,\ s = 1,2,\dots,n_v\}$ چندوجهی‌های مورد نیاز برای تعریف $P^i_{\boldsymbol{V}_{max}} - P^i_{\boldsymbol{V}_{min}}$ است که در آن روابط زیر برقرار است و $\boldsymbol{\alpha}^v_s$ و $\boldsymbol{\beta}^v_s$ به‌ترتیب ماتریس و یک بردار ثابت هستند:

$$\mathfrak{B}^i_s = \{\boldsymbol{V}_i(k+p+1) \in \mathbb{R}^2 :\ \boldsymbol{\alpha}^v_s \boldsymbol{V}_i(k+p+1) \leq \boldsymbol{\beta}^v_s\} \qquad (۱۸)$$

با استفاده از روش M-بزرگ، محدودیت غیر محدب $\boldsymbol{V}_i(k+p+1) \in \boldsymbol{\beta}^i$ را می‌توان به محدودیت‌های محدب تبدیل کرد [۲۶]. با معرفی متغیرهای باینری $\delta^v_s(k+p+1) \in \{0,1\}$ در هر مرحله زمانی $k+p\ (p = 0,\dots,n_t)$ ، محدودیت‌های (۱۷) را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}^v_1 \boldsymbol{V}_i(k+p+1) &\leq \boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\beta}^v_1 + \boldsymbol{M}\big(1-\delta^v_1(k+p+1)\big) \\ \boldsymbol{\alpha}^v_2 \boldsymbol{V}_i(k+p+1) &\leq \boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\beta}^v_2 + \boldsymbol{M}\big(1-\delta^v_2(k+p+1)\big) \\ &\vdots \\ \boldsymbol{\alpha}^v_n \boldsymbol{V}_i(k+p+1) &\leq \boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\beta}^v_n + \boldsymbol{M}\big(1-\delta^v_n(k+p+1)\big) \end{aligned} \qquad (۱۹)$$

که در آن $\mathbf{M} = [M_{\mathbf{x}}, M_{\mathbf{y}}]^T$ و $M_{\mathbf{x}}$ و $M_{\mathbf{y}}$ اعداد بزرگی هستند و همچنین داریم $\sum_{s=1}^{n} \delta^v_s(k+p+1) = 1$. محدودیت‌های شتاب نیز برای در نظرگرفتن محدودیت‌های مانور پهپاد مورد نیاز است. اگر یک سیستم مرجع زمان-متغیر متمرکز در موقعیت $\boldsymbol{X}_i(k)$ وسیله نقلیه با محورهای مماس و عمود به مسیر پرواز در زمان k در نظر بگیریم، هواپیما در معرض شتاب مماسی $\boldsymbol{a}_i(k)$ قرار می‌گیرد و شتاب عمودی را می‌توان به صورت زیر تقریب زد.

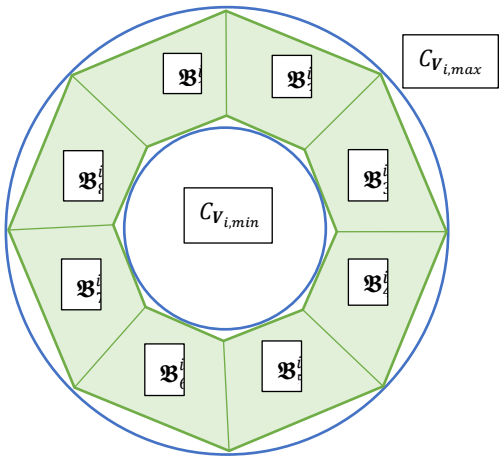
$$\boldsymbol{a}^{\perp}_i(k) \approx \|\boldsymbol{V}_i(k)\|^2/R \qquad (۲۰)$$

که در آن R شعاع چرخش است و حدود شتاب عمودی $\boldsymbol{a}^{\perp}_i(k)$ توسط چرخش‌های هماهنگ تعیین می‌شود. به این ترتیب در هر لحظه k، محدودیت‌های شتاب را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{a}^{\parallel}_{i,min} \\ \boldsymbol{a}^{\perp}_{i,min} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \boldsymbol{a}^{\parallel}_{i}(k+p) \\ \boldsymbol{a}^{\perp}_{i}(k+p) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \boldsymbol{a}^{\parallel}_{i,max} \\ \boldsymbol{a}^{\perp}_{i,max} \end{bmatrix} \qquad (۲۱)$$

برای سازگار کردن محدودیت‌ها با سیستم تعریف‌شده در معادله (۱۴) یک چرخش در بردار شتاب باید انجام شود که $\mathcal{M}(k+p)$ در آن ماتریس چرخش از دستگاه محلی به اینرسی است، داریم:

$$\begin{aligned} \mathcal{M}(k+p)\begin{bmatrix} \boldsymbol{a}^{\parallel}_{i,min} \\ \boldsymbol{a}^{\perp}_{i,min} \end{bmatrix} &\leq \mathcal{M}(k+p)\begin{bmatrix} \boldsymbol{a}^{\parallel}_{i}(k+p) \\ \boldsymbol{a}^{\perp}_{i}(k+p) \end{bmatrix} \\ &\leq \mathcal{M}(k+p)\begin{bmatrix} \boldsymbol{a}^{\parallel}_{i,max} \\ \boldsymbol{a}^{\perp}_{i,max} \end{bmatrix} \end{aligned} \qquad (۲۲)$$



شکل ۳. مجموعه دامنه برداری سرعت و تقریب آن به وسیله پلیتوپ [۱۴].

برای جلوگیری از غیرخطی شدن قیدها، در هر زمان k، ماتریس $\mathcal{M}$ توسط واحد پیش‌بین محاسبه می‌شود و توسط کنترل پیش‌بین در طول افق پیش‌بینی ثابت فرض می‌شود. در نهایت صورت جدید بردار متغیرهای تصمیم‌گیری به صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\boldsymbol{\Omega}(k) = \left[u(k)^T, \cdots, u(k+n_t)^T, \delta^v_s(k+1), \cdots, \delta^v_s(k+n_t+1)\right]^T \qquad (۲۳)$$

[1] Non-convex

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-30]

طبق مطالب ارائه شده در این بخش اگر اطلاعات ارائه شده توسط مرکز کنترل صحیح باشد و در بخش اول برخورد پیش‌بینی شود، بخش دوم نیز آن را تشخیص داده و با ارائه مسیر جدید از برخورد جلوگیری می‌کند. در صورت عدم وجود برخوردهای پیش‌بینی شده، هواپیما مسیر نامی برنامه‌ریزی شده را دنبال خواهد کرد. این استراتژی ممکن است از نوسانات در مرز منطقه‌ای که در آن یک برخورد پیش‌بینی می‌شود، مانند هر استراتژی کنترلی دیگر که در آن برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در هنگام حرکت از یک منطقه به منطقه دیگر، اتخاذ می‌شود، دچار آسیب شود که راه‌حل‌های مختلفی از قبیل تنظیم مجدد کنترل‌کننده برای غلبه بر مشکل وجود دارد اما برای شبیه‌سازی ارائه‌شده در بخش بعدی مقاله تنظیم دقیق کنترل پیش‌بین کافی است.

۵- شبیه‌سازی و بررسی نتایج

در این فصل به بررسی ۴ مثال برای طراحی کنترل‌کننده و مدیریت مسیر پهپادها با استفاده از الگوریتمی که در این مقاله ارائه شد، پرداخته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB آورده شده است. براساس نظریه ارائه شده در بخش اول، ۳ مثال شامل ۳ فضای هوایی دارای پهپادهایی با ماموریت‌های مختلف برای رسیدن پهپاد ۱ به مقصد مورد نظر بررسی می‌شود (در مثال ۱ پهپاد ۱ با پهپاد ۲، در مثال ۲ پهپاد ۱ با پهپاد ۳ ، در مثال ۳ پهپاد ۱ با پهپاد ۴ و در مثال ۴ پهپاد ۱ با پهپادهای ۵، ۶ و ۷)، و پس از مقایسه زمان انجام ماموریت در هر مثال کم‌ترین زمان به مدیریت کنترل هوایی اعلام شده و مسیر انجام ماموریت انتخاب می‌شود سپس طبق برنامه دوم پهپاد به سمت هدف حرکت می‌کند.

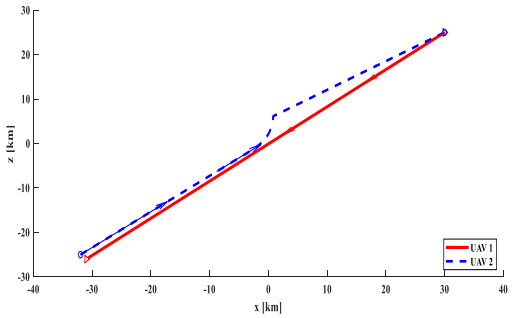
با فرض این‌که تمام پهپادها دارای مشخصات پروازی یکسانی باشند، شرایط اولیه و سایر پارامترهای شبیه سازی به صورت جدول۲ در نظر گرفته شده است و فاصله ایمن ۳ کیلومتر و فاصله تشخیص ۸ کیلومتر فرض شده و سرعت پهپادها در طول پرواز ثابت درنظر گرفته می‌شود. یعنی سرعت طولی، سرعت زاویه‌ای و زاویه سر ثابت هستند اما به هنگام شروع مانور $\psi(k)$ تغییر کرده و سیگنال کنترلی وسیله پرنده جهت عملکرد صحیح پهپاد اعمال می‌شود. فرض می‌کنیم سیستم سنجش برد با استفاده از سیستم‌های نظارت و انتشار خودکار می‌تواند موقعیت و سرعت هواپیمای همسایه را در شعاع ۱۰۰ کیلومتری شناسایی کند. فاصله نمونه برداری Δt از کنترل پیش‌بین غیرخطی توزیع‌شده ۱ ثانیه، حداکثر مرحله تکرار ۲۰۰ و دامنه زمانی پیش بینی ۱۰ مرحله تنظیم شده است. پهپادها را در سایز متوسط با برد نزدیک و وزن برخاست حدود ۲۰۰ کیلوگرم، سرعت کروز روی ۴۰ متر بر ثانیه، حداقل شعاع چرخش ۳۰۰ متر و حداقل فاصله جدایی ۱ کیلومتر در نظر می‌گیریم. همچنین پارامترهای وزنی $\mathbf{Q}$ و $\mathbf{R}$ در تابع معیار (۱۵) به ترتیب $10\mathbf{I}$ و $\mathbf{I}$ انتخاب شده است.

جدول ۲. شرایط اولیه و پارامترهای شبیه‌سازی در فضای هوایی تعریف شده در مثال های ۱ تا ۴.

پهپاد	نقاط شروع (km)	نقاط مقصد (km)	سرعت (m/s)	ψ (deg)
۱	(۳۰،۲۵)	(۳۱،-۲۶)	۱۸۰	۲۳۰
۲	(-۳۲،-۲۵)	(۳۰،۲۵)	۲۰۰	۵۲
۳	(۴۰،۳۳)	(-۳۷،-۳۱)	۲۸۰	۲۳۰
۴	(۲۶،-۳۱)	(-۲۸،۳۱)	۱۸۰	۲۳۰
۵	(-۲۶،۳۱)	(۲۵،-۳۰)	۲۰۰	۳۱۰,۹
۶	(-۳۲،-۲۰)	(۲۸،۳۱)	۲۰۰	۴۰,۳
۷	(۲۱،-۳۶)	(-۳۰،۲۳)	۲۰۰	۱۳۰,۸

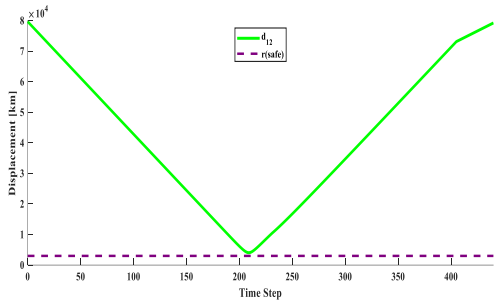
۵-۱ مثال اول (جلوگیری از برخورد دو پهپاد رو به رو در یک مسیر)

در این مثال دو پهپاد در یک مسیر و در جهت مخالف به هم نزدیک می‌شوند و از برخورد شناسایی شده جلوگیری می‌شود. در این شبیه‌سازی، نتایج حل تعارض به صورت شکل ۴ نشان داده شده است. بنابراین، کنترل پیش‌بین با دو پهپاد در یک گروه برخورد سر و کار دارد که از رو به رو سبقت می‌گیرند. زمان مورد نیاز برای جلوگیری از این برخورد ۴۴۰ ثانیه است. با توجه به شکل ۴-الف و قوانین حق تقدم تعریف شده در بخش چهارم این مقاله، بین دو پهپاد که از رو به رو به هم نزدیک می‌شوند پس از تشخیص برخورد توسط واحد پیش‌بینی وسیله با سرعت کم‌تر (پهپاد ۱) مسیر خود را به سمت راست تغییر داده و از برخورد جلوگیری می‌کند. همچنین روند کاهش فاصله بین دو پهپاد و فاصله آن با شعاع امن جدایی در شکل ۴-ب مشهود است. درشکل ۴-ج نیز سیگنال کنترلی، یعنی تغییرات زاویه سر پهپادها برای جلوگیری از برخورد نمایش داده شده است.

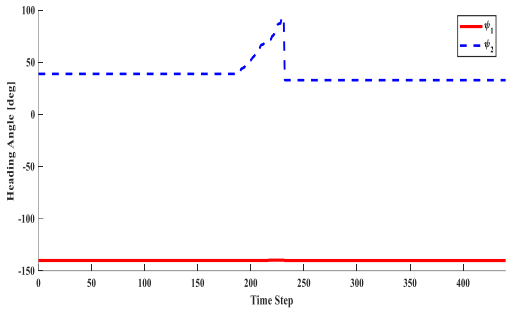


[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-30]

الف) مسیر دو پهپاد روبه‌رو



ب) تغییرات فاصله دو پهپاد



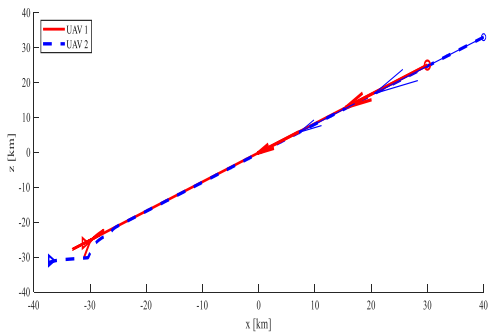
ج) تغییرات زاویه سر دو پهپاد

شکل ۴. نتایج شبیه‌سازی مثال اول.

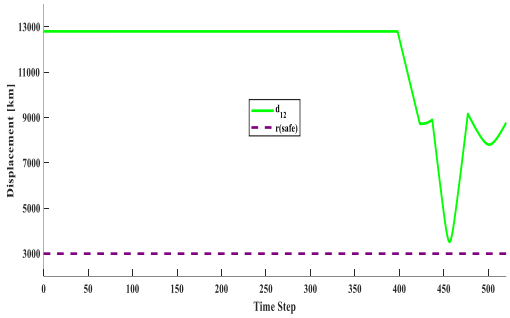
لازم به توضیح است که در نمودار الف و ج در تمام شکل‌های مربوط به نتایج شبیه‌سازی، شاهد تغییرات زاویه سر پهپاد یا انجام مانورهایی برای رفع تداخل میان مسیر بین دو یا چند پهپاد برای جلوگیری از برخورد هستیم و همچنین در نمودار ب از هر شکل، شاهد تغییرات فاصله بین پهپادها و نزدیک شدن آن‌ها به یکدیگر و احتمال برخورد با توجه به شعاع امن پرواز هستیم.

۵-۲ مثال دوم (جلوگیری از برخورد دو پهپاد در حال سبقت گرفتن از یک‌دیگر)

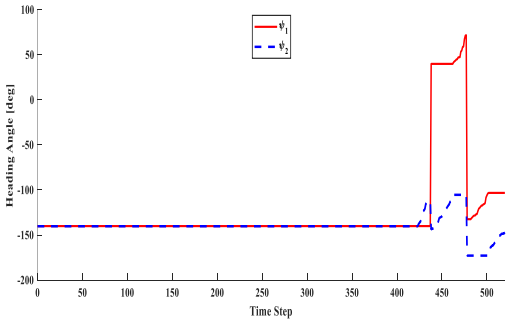
در این مثال هواپیمای سبقت گیرنده از عقب به دیگری نزدیک می‌شود و نتایج حل تعارض در شکل ۵ نشان داده شده است. کنترل پیش‌بین باید برخورد دو پهپاد در یک گروه برخورد را که در یک جهت حرکت می‌کنند و می‌خواهند از هم سبقت بگیرند، حل کند. زمان مورد نیاز برای اجتناب از این برخورد ۵۲۰ ثانیه است.



الف) مسیر دو پهپاد هم‌جهت



ب) تغییرات فاصله دو پهپاد



ج) تغییرات زاویه سر دو پهپاد

شکل ۵. نتایج شبیه‌سازی مثال دوم.

همان‌طور که در شکل ۵-الف دیده می‌شود، هر دو پهپاد در یک جهت و با سرعت‌های متفاوت شروع به حرکت به سمت هدف می‌کنند و با توجه به شکل ۵-ب پس از مدتی به هم نزدیک و واحد پیش‌بینی امکان برخورد را تشخیص می‌دهد. برای جلوگیری از برخورد با توجه به شکل ۵-الف از مانور استفاده می‌شود و سپس به مسیر خود در همان جهت قبلی ادامه می‌دهند. شکل ۵-ب فاصله بین دو پهپاد و نزدیک شدن آن به شعاع امن و تشخیص برخورد را نمایش می‌دهد. درشکل ۵-ج تغییرات زاویه سر پهپادها به عنوان سیگنال کنترلی برای جلوگیری از برخورد آمده است.

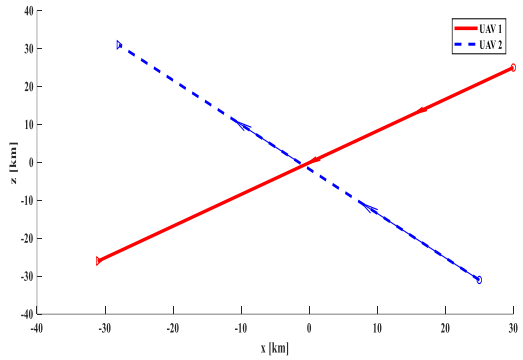
۵-۳ مثال سوم (جلوگیری از برخورد دو پهپاد که مسیرشان همگرا است)

در مثال سوم، دو پهپاد همگرا با مسیرهای مختلف که در یک نقطه تلاقی می‌کنند، مدنظر است و نتایج حل تعارض در شکل ۶ نشان داده شده است. کنترل پیش‌بین باید برخورد دو پهپاد در یک گروه که به صورت متقاطع همگرا می‌شوند را حل کند. در این سناریو به دلیل سرعت‌های متفاوت و تفاوت طول مسیر شروع حرکت تا تقاطع مشخص شده در شکل ۶-الف برخورد رخ نمی‌دهد و زمان مورد نیاز برای تشخیص عدم وجود برخورد ۴۰۰ ثانیه است. در شکل ۶-الف مسیری همگرا بین دو پهپاد، در شکل ۶-ب فاصله مناسب دو پهپاد از یکدیگر و فاصله کافی از شعاع امن و در نهایت در شکل ۶-ج تغییرات زاویه سر پهپادها برای جلوگیری از برخورد دیده می‌شود.

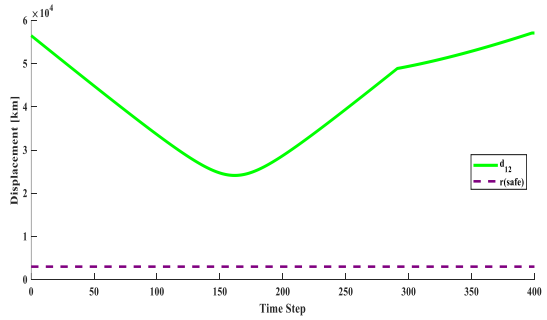
[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-30]

۴-۵. مثال چهارم (جلوگیری از برخورد چهار پهپاد همگرا که از جهات مختلف به یک‌دیگر نزدیک می‌شوند)

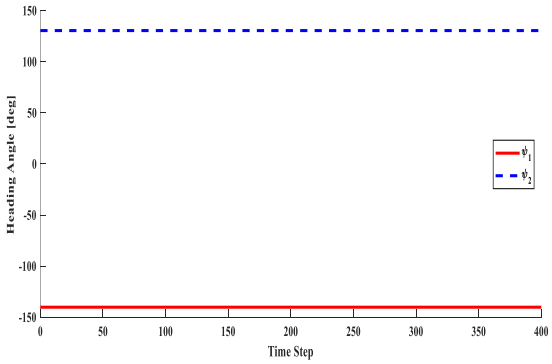
نتایج حل تعارض در این شبیه‌سازی در شکل ۷ آمده است.



الف) مسیر دو پهپاد همگرا



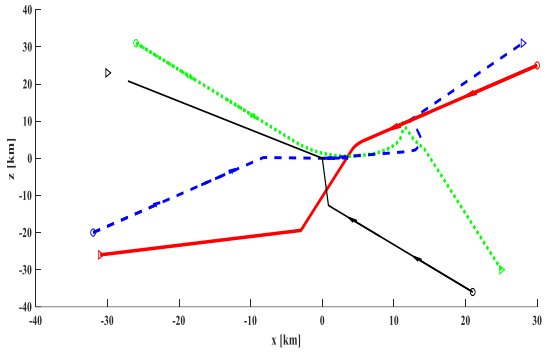
ب) تغییرات فاصله دو پهپاد



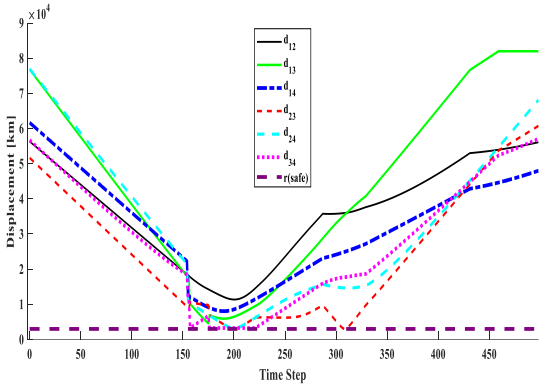
ج) تغییرات زاویه سر دو پهپاد

شکل ۶. نتایج شبیه‌سازی مثال سوم.

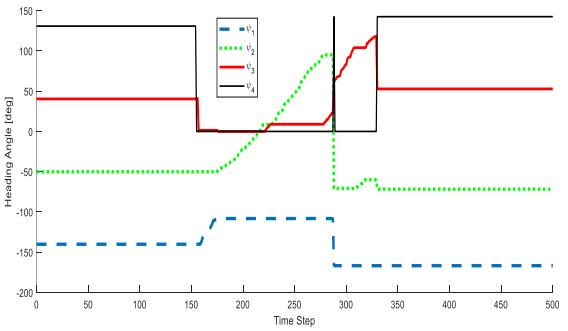
زمان مورد نیاز برای جلوگیری از برخوردها ۵۰۰ ثانیه است. با توجه به شکل ۷-ب برخوردهایی بین پهپادهای(۱ و ۵)، (۱ و ۶)، (۵ و ۶)، (۵ و ۷) و (۶ و ۷) پیش‌بینی شده است که با تغییر در زاویه سر پهپادها که با توجه به شکل ۷-الف شاهد آن هستیم حل می‌شوند. در این مانورها در برخورد بین پهپادهای اول و پنجم، پهپاد اول با انجام مانور و پنجم با ادامه مسیر، در برخورد بین پهپادهای اول و ششم، پهپاد اول با گردش به راست و پهپاد ششم با انجام مانور، در برخورد بین پهپادهای پنجم و ششم، پهپاد پنجم با گردش به راست و پهپاد ششم با ادامه مسیر، در برخورد بین پهپادهای پنجم و هفتم، پهپاد پنجم با انجام مانور و پهپاد هفتم با گردش به راست و در برخورد بین پهپادهای ششم و هفتم، هر دو پهپاد با گردش به راست از برخورد اجتناب می‌کنند.



الف) مسیر بین چهار پهپاد همگرا



ب) تغییرات فاصله بین پهپادها



ج) تغییرات زاویه سر پهپادها

شکل ۷. نتایج شبیه‌سازی مثال چهارم.

با توجه به شکل ۷-ب می‌توانیم فاصله بین پهپادها و فاصله آن‌ها با شعاع امن و نیز امکان ایجاد برخورد را ببینیم. درشکل۷-ج تغییرات زاویه سر پهپادها برای جلوگیری از برخورد نشان داده شده است.

٦- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله، یک الگوریتم جلوگیری از برخورد پهپادها ارائه شد که برخوردهای مسیر را تحت چارچوب‌های کنترل پیش‌بین غیرخطی توزیع‌شده حل می‌کند. پهپاد مورد نظر قبل از پرواز با استفاده از الگوریتم

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-30]

پیشنهادی اولیه اطلاعات مسیر پهپادهای متضاد با مسیر خود به سمت هدف را به منظور جلوگیری از برخوردهای احتمالی دریافت می‌کند تا با هماهنگی مسیر، مسیری با کم‌ترین زمان ممکن به سمت هدف را تخمین زده و بهترین مسیر را انتخاب کند. پس از انتخاب مسیر وارد الگوریتم دوم می‌شود و مسیر خود را شروع می‌کند. سیستم جلوگیری از برخورد مبتنی بر کنترل پیش‌بین غیرخطی توزیع‌شده ثانویه به گونه‌ای طراحی شده است که با فضای هوایی مشترک بین هواپیماهای سرنشین‌دار و بدون سرنشین سازگار باشد و این ویژگی را با استفاده از قوانین حق تقدم موجود در پیوست دوم قوانین ایکائو که رفتار پهپاد را قابل پیش‌بینی و سازگار با تصمیمات انسانی می‌کند، ضمانت می‌شود. سیستم کنترل پیش‌بین توزیع‌شده ارائه شده با فرض کنترل مسیرهای فضای هوایی توسط یک کنترل کننده ترافیک هوایی سطح بالا و انتشار اطلاعات ترافیکی برای کنترل مسیر خودش از دو واحد پیش‌بینی برخوردهای مسیر و محاسبه محدودیت‌های مورد نیاز و کنترل پیش‌بین برای بهینه‌سازی مسیر و در عین حال اجتناب از برخورد، استفاده می‌کند. مزیت اصلی این الگوریتم‌ها در این است که می‌تواند راه حل‌های پایدار و عملی برای اجتناب از برخورد بدون ایجاد تضاد بیشتر و برخورد ثانویه ایجاد می‌کند. در پایان عملکرد پهپاد با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی توسط نرم‌افزار *MATLAB* شبیه‌سازی شد که نتایج شبیه‌سازی عملکرد مطلوب الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. در نهایت باید ذکر گردد که این ساختار کنترلی به ارتباط بسیار قوی بین کنترل‌کننده‌های زیرمجموعه و به زبان ساده‌تر تعامل و همکاری بین پهپادها نیاز جدی دارد که در صورت قطع ارتباط لحظه‌ای بین کنترل‌کننده‌ها الگوریتم کاملا غیرقابل اعتماد خواهد بود. همچنین الگوریتم پیشنهادی بر اساس بسیاری از شبیه‌سازی‌های عددی تحت یک محیط ایزوله و بدون تاثیر نویز، تاخیر ارتباطی و آشفتگی هوا انجام شده است. در فضای هوایی حقیقی وجود برخی از تعارضات ناگهانی کشف نشده و تاخیر ارتباطات بر کیفیت محاسبات بهینه‌سازی تاثیر می‌گذارد. در تحقیقات آینده می‌توان بر حل برخی از تعارضات ناگهانی کشف نشده و حذف تأثیر حجم محاسبات و تأخیر ارتباطات و وجود نویز بر کیفیت حل مساله تمرکز کند.

مراجع

[1] G. Picard, "Trajectory Coordination based on Distributed Constraint Optimization Techniques in Unmanned Air Traffic Management," *Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS*, vol. 2, pp. 1065-1073, 2022.

[2] J. Pellebergs and S. Aerosystems, "The MIDCAS project," *27th Congr. Int. Counc. Aeronaut. Sci. 2010, ICAS 2010*, vol. 4, pp. 3241–3247, 2010.

[3] M. Strohmeier, M. Schäfer, V. Lenders, and I. Martinovic, "Realities and challenges of nextgen air traffic management: The case of ADS-B," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 111–118, 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6815901.

[4] C. A. Nava-Gaxiola and C. Barrado, "Performance measures of the SESAR Southwest functional airspace block," *J. Air Transp. Manag.*, vol. 50, pp. 21–29, 2016, doi: 10.1016/j.jairtraman.2015.09.003.

[5] L. Bo, C. Song, S. Bai, J. Huang, R. Ma, K. Wan, and E. Neretin, "Multi-UAV trajectory planning during cooperative tracking based on a Fusion Algorithm integrating MPC and standoff." *Drones*, vol. 7, no. 3, pp. 196-220, 2023, doi: 10.3390/drones7030196.

[6] B. Jiang, B. Li, W. Zhou, L.Y. Lo, C.K. Chen, C.Y. Wen, "Neural Network Based Model Predictive Control for a Quadrotor UAV." *Aerospace*, vol. 9, no. 8, pp. 460-465, 2022, doi: 10.3390/aerospace9080460.

[7] W. Pan, Q. He, Y. Huang, L. Qin, "Four-Dimensional Trajectory Planning for Urban Air Traffic Vehicles Based on Improved RRT Algorithm," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 81113-811123, 2023.

[8] J. Mercer *et al.*, "Impact of Automation Support on the Conflict Resolution Task in a Human-in-the-Loop Air Traffic Control Simulation," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 19, pp. 36–41, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.10.458.

[9] E. D'Amato, M. Mattei, and I. Notaro, "Bi-level Flight Path Planning of UAV Formations with Collision Avoidance," *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, vol. 93, no. 1–2, pp. 193–211, 2019, doi: 10.1007/s10846-018-0861-1.

[10] J. Dentler *et al.*, "Collision Avoidance Effects on the Mobility of a UAV Swarm Using Chaotic Ant Colony with Model Predictive Control," *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, vol. 93, no. 1–2, pp. 227–243, 2019, doi: 10.1007/s10846-018-0822-8.

[11] H. X. Chen, Y. Nan, and Y. Yang, "Real-time conflict resolution algorithm for multi-UAV based on model predict control," *Algorithms*, vol. 12, no. 2, 2019, doi: 10.3390/a12020047.

[12] R. C. Gutiérrez-Urquídez, G. Valencia-Palomo, O. M. Rodríguez-Elias, and L. Trujillo, "Systematic selection of tuning parameters for efficient predictive controllers using a multiobjective evolutionary algorithm," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 31, pp. 326–338, 2015, doi: 10.1016/j.asoc.2015.02.033.

[13] C. Carbone, U. Ciniglio, F. Corraro, and S. Luongo, "A novel 3D geometric algorithm for aircraft autonomous collision avoidance," *Proc. IEEE Conf. Decis. Control*, pp. 1580–1585, 2006, doi: 10.1109/cdc.2006.376742.

[14] E. D'Amato, M. Mattei, and I. Notaro, "Distributed Reactive Model Predictive Control for Collision Avoidance of Unmanned Aerial Vehicles in Civil

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-30]

Airspace," *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, vol. 97, no. 1, pp. 185–203, 2020, doi: 10.1007/s10846-019-01047-5.

[15] J. Yoo and S. Devasia, "Application of provably-safe conflict resolution for air traffic control," *Proc.* IEEE *Conf. Decis. Control*, pp. 478–483, 2012, doi: 10.1109/CDC.2012.6427035.

[16] C. C. Fattori *et al.*, "Analysis Framework for Improved Conflict Prediction in ATC System Modernization," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 14650–14655, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1905.

[17] A. Richards and J. How, "Decentralized model predictive control of cooperating UAVs," *Proc. IEEE Conf. Decis.* Control, vol. 4, pp. 4286–4291, 2004, doi: 10.1109/CDC.2004.1429425.

[18] X. Wang, V. Yadav, and S. N. Balakrishnan, "Cooperative UAV formation flying with obstacle/collision avoidance," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 15, no. 4, pp. 672–679, 2007, doi: 10.1109/TCST.2007.899191.

[19] Y. Seifouripour, H. Nobahari, "Model-free control of a fixed-wing aircraft based on convolutional neural networks," *Journal of Control*, Just Accepted, 2024.

[20] FOCA, "Annexes to the Convention on International Civil Aviation (ICAO)," *Fed. Off. Aviat.*, 2020.

[21] R. P. Anderson and D. Milutinovic, "A stochastic approach to dubins vehicle tracking problems," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 59, no. 10, pp. 2801–2806, 2014, doi: 10.1109/TAC.2014.2314224.

[22] P. K. Menon, G. D. Sweriduk, and B. Sridhar, "Optimal strategies for free flight air traffic conflict resolution," *1997 Guid. Navig. Control Conf.*, pp. 455–468, 1997, doi: 10.2514/6.1997-3546.

[23] A. K. Sedigh, P. Bagheri, "Review of model predictive control tuning methods and modern tuning solutions," *Journal of Control*, Vol. 3, No. 8, pp. 69-85, 2014.

[24] P. Bagheri, "Model Predictive Controller Based on Steady-State Value of Control Signal, Analytically Tuning and Closed-Loop Studies," *Journal of Control*, Vol. 10, No. 3, pp.39-51, 2016.

[25] P. Bagheri, P, "Pole-zero assignment in model predictive control, using analytical tuning approach," *Optimal Control Applications and Methods*, Vol. 42, No. 5, pp.1253-1268, 2021.

[26] Y. B. Chen, J. Q. Yu, X. L. Su, and G. C. Luo, "Path Planning for Multi-UAV Formation," *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, vol. 77, no. 1, pp. 229–246, 2015, doi: 10.1007/s10846-014-0077-y.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-30]