

## الگوریتم واگذاری هدف متحرک زمینی میان دو پهپاد با قید بیشترین پوشش دهی منطقه‌ای

حسین خندانی<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ سیدمحمد مهدی دهقان<sup>۲</sup>، استادیار؛ هادی مرادی<sup>۳</sup>، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تهران - تهران - ایران - h.khandani@alumni.ut.ac.ir

۲- مجتمع دانشگاهی هوافضا - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - smm.dehghan@ut.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تهران - تهران - ایران - moradih@ut.ac.ir

**چکیده:** در ردیابی هوایی یک هدف زمینی، ممکن است ادامه مأموریت به دلایلی از قبیل اتمام سوخت به یک پهپاد جایگزین واگذار گردد. این مقاله به دنبال ارائه یک الگوریتم برخط، برای تأمین توأم بیشترین احتمال بازیابی هدف و بیشترین پوشش دهی منطقه‌ای در فرآیند واگذاری است. پهپاد جایگزین ابتدا با استفاده از مدل تخمینی حرکت هدف و آخرین موقعیت رؤیت آن، مسیر حرکت هدف را پیش‌بینی می‌کند. سپس محدوده عدم قطعیت موقعیت هدف را برای هر نقطه از مسیر تعیین می‌نماید. موقعیتی از هدف که در آن ناحیه عدم قطعیت موقعیت هدف و پهنای دید پهپاد کمترین تفاوت را دارند، نقطه مناسب بازیابی هدف توسط پهپاد جایگزین است. از بین مسیرهای ممکن به سمت نقطه بازیابی، مسیری که بیشترین پوشش منطقه‌ای را فراهم نماید، بهترین مسیر بازیابی است. این مسیر با یک الگوریتم ابداعی بر پایه «انتخاب جلورونده» تعیین می‌شود. این الگوریتم ابتدا نقاط پوشش داده نشده منطقه را برحسب فاصله آنها از یکدیگر به خوشه‌های متعدد تقسیم می‌کند. سپس هر مرکز خوشه برحسب تأثیرگذاری که بر روی میزان پوشش دهی دارد، مشروط بر آنکه زمان طی کردن مسیر جدید، کوچک‌تر از زمان رسیدن هدف به نقطه بازیابی باشد، به مسیر بازیابی افزوده می‌شود. در هر دور از اجرای الگوریتم، با استفاده از روش «اصلاح کاهنده» تکه‌مسیرها به صورت بازگشتی با یکدیگر تلفیق شده تا همه حالت‌های مسیر بازیابی هدف بررسی شده و الگوریتم در بهینه محلی قرار نگیرد. شبیه‌سازی این روش و مقایسه نتایج آن با بهترین مسیر ممکن، موفقیت بالای روش پیشنهادی در ردیابی هدف و حداکثر ساختن پوشش منطقه‌ای نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** پهپاد، هدف زمینی متحرک، ردیابی، واگذاری مأموریت، پوشش بهینه، پیش‌بینی حرکت.

## Ground Moving Target Handover between UAVs accompany with the Most Regional Coverage

H. Khandani<sup>1</sup>, MSc Student; S. M. M. Dehghan<sup>2</sup>, Assistant Professor; H. Moradi<sup>3</sup>, Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: h.khandani@alumni.ut.ac.ir

2- Aerospace Research Complex, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, Email: smm.dehghan@ut.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: moradih@ut.ac.ir

**Abstract:** In ground moving target tracking missions by UAVs, there are many reasons, such as running out of battery or fuel, to handover the mission to another UAV. In this paper we present an online handover algorithm with low probability of losing target while trying to maximize regional coverage along the takeover trajectory. The UAV that takes over the target predicts the target path using the estimated motion model and the last position of the target that is provided by the other UAV. Afterwards, the uncertainty surrounding each position of the target over the predicted path is computed. The position of the target in which the position uncertainty and the UAV's field of view have minimum difference, is the best place for retrieving the target. Among the possible paths to the retrieval point, the path that provides the most coverage is the best retrieval path. To determine this path, we have proposed an algorithm based on a "forward selection" strategy. In this algorithm, the uncovered and important positions of the region are clustered based on the distance from each other. Then, the centers of these clusters are added to the previous retrieved path recursively based on their effectiveness on the coverage value if the time of traveling on the new path is smaller than the time required for the target to reach the retrieval point. In each execution of the algorithm, using a "backward elimination" strategy, the coverage value of the retrieval path after recursive combination of each two adjacent clusters is checked to avoid from falling in local optima. We have simulated the proposed method and compared it with the optimal offline calculated path which shows the success of the proposed approach in retrieving the target and maximizing the regional coverage.

**Keywords:** UAV (Unmanned Aerial Vehicle), ground moving target, tracking, mission handover, optimized coverage, motion prediction.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۳ و ۱۳۹۵/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۷

نام نویسنده مسئول: سیدمحمد مهدی دهقان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - میدان نوبنیاد - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی هوافضا.

## ۱- مقدمه

با پیشرفت علم و فناوری، ربات‌های پرنده کاربردهای بسیاری همچون گشت مرزی [۱]، مشاهده ترافیک شهری [۲]، بازرسی مداوم [۳، ۴]، جستجو و عملیات نجات [۵، ۶] یافته‌اند. در بسیاری از این مأموریت‌ها، مسئله ردیابی اهداف متحرک مطرح می‌باشد. با توجه به اینکه ربات‌های پرنده مداومت پروازی محدودی دارند، واگذاری هدف از پهپاد تعقیب‌کننده به پهپاد جایگزین الزامی است. همچنین در شرایط دیگری مانند تغییر مأموریت، تعویض بار، انهدام پهپاد و موارد مشابه، تداوم مأموریت تعقیب هدف، مستلزم واگذاری هدف به پهپاد جایگزین است.

این مقاله مسئله واگذاری یک هدف متحرک زمینی را میان دو پهپاد بررسی می‌کند. در سناریوی مورد نظر این مقاله، پهپاد اول در حالت تعقیب هدف قرار دارد و به علت مشکل پدیدآمده مسئولیت تعقیب هدف به پهپاد دوم واگذار می‌شود. در شرایطی که هدف متحرک است، اطلاع از موقعیت کنونی هدف برای بازبایی آن کافی نیست. زیرا طی مدتی که پهپاد دوم خود را به موقعیت کنونی هدف می‌رساند، هدف جابجا شده و موقعیتش را تغییر می‌دهد. به همین منظور در مدت ردیابی هدف توسط پهپاد اول، همواره مدل حرکت هدف تخمین زده می‌شود. پهپاد دوم با دانستن الگوی حرکتی و آخرین موقعیت رؤیت هدف، مسیر حرکت هدف را پیش‌بینی کرده و موقعیت مناسب بازبایی هدف را تعیین می‌نماید. پهپاد جایگزین با توجه به زمان تعیین شده برای بازبایی هدف، مسیرهای مختلفی را پیش‌رو دارد. از میان این مسیرها، مسیری مطلوب است که بیشترین پوشش از منطقه مورد نظر را محقق سازد. منظور از پوشش‌دهی منطقه، مشاهده نقاطی از منطقه می‌باشد که پهپاد اول هنگام جستجو در منطقه آنها را ندیده است و یا زمان زیادی از آخرین مشاهده آن ناحیه گذشته است. برای هر نقطه از منطقه، معیار سطح آگاهی تعریف می‌شود که توسط آن نقاطی که قبلاً دیده شده‌اند از نقاط دیده نشده متمایز می‌گردد. هر قدر مسیر بازبایی هدف از نقاطی عبور نماید که سطح آگاهی از آنها پایین‌تر است، میزان پوشش‌دهی مسیر بازبایی هدف بیشتر خواهد بود.

پژوهش‌های مرتبط با مسئله یادشده به سه دسته تقسیم می‌شوند. ۱- مدل‌سازی و پیش‌بینی مسیر حرکت هدف؛ ۲- طراحی مسیر برای رؤیت هدف متحرک؛ ۳- طراحی مسیر بهینه برای رسیدن به موقعیت هدف. از این‌رو با بررسی و جمع‌بندی کارهای انجام‌شده، روش مناسب برای حل مسئله بیان می‌شود.

دسته اول مربوط به پیش‌بینی مسیر حرکت یک هدف متحرک است. در [۷]، ربات با استفاده از تصاویر دریافتی هدف را ردیابی کرده و مسیر حرکت آن را پیش‌بینی می‌نماید. سپس مسیر حرکت ربات با بهره‌مندی از کنترل‌کننده پیشنهادی، به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که هدف گرفته شود. در [۸] نیز یک بازوی ربات باید توپ پرتاب‌شده را دریافت کند. در اینجا با استفاده از تصاویر دوربین استریو، معادلات

حرکت و فیلتر کالمن غیرخطی، محل فرود توپ تخمین زده می‌شود. سپس ربات توپ را به کمک کنترل‌کننده طراحی‌شده، در محل فرود دریافت می‌کند. همین موضوع در [۹] برای ربات‌های فوتبالیست مطرح شده است. برای حل این موضوع، الگوی حرکتی هدف (توپ) بیان شده و بر اساس آن مسیر حرکت هدف پیش‌بینی می‌شود. سپس با استفاده از یک کنترل‌کننده فازی، ربات به‌سوی مقصد توپ حرکت کرده و آن را دریافت می‌کند. تفاوت این مراجع با مسئله موردنظر در این مقاله در این است که اولاً، در پژوهش‌های موجود، اهداف به سمت ربات‌ها حرکت می‌کنند و ربات هدف را می‌بیند؛ بنابراین عدم قطعیت موقعیت هدف به‌سرعت افزایش نمی‌یابد. ثانیاً علاوه بر مسیریابی معیار دیگری به‌منظور بهینه‌سازی پوشش منطقه یا انتخاب مسیر بهینه مطرح نیست.

دسته دوم پژوهش‌ها مربوط به طراحی مسیر برای رؤیت هدف متحرک است. برای این منظور، [۱۰] الگوریتمی برای طراحی مسیر ربات‌های پرنده خودگردان معرفی کرده است که برای مرزبانی یک منطقه به کار گرفته می‌شود. ربات پرنده وظیفه دارد پیش از اینکه مهاجم‌ها به منطقه ایمن برسند، آن‌ها را بازبایی نماید و مأموریت مشخصی را روی آن‌ها به انجام برساند. این مسئله به‌صورت چالش نگهبانی ایساکس (یک سؤال بنیادی در مبحث تعقیب و گریز است) نوشته شده است و از روش کاوش درختان تصادفی به‌منظور گرفتن مهاجم‌ها استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها برای دو و سه عامل مهاجم اجرا شده است و مسیر بهینه حرکت ربات‌ها توسط روش برنامه‌نویسی غیرخطی به دست آمده است. در [۱۱]، ربات ردیاب استراتژی متفاوتی را برای گرفتن ربات مهاجم پیش‌رو دارد. در این مرجع حرکت ربات به سمت موقعیت لحظه‌ای مهاجم، بهترین راهبرد برای انجام مأموریت معرفی شده است. در مراجع یادشده، مسیر از نظر پوشش‌دهی منطقه بهینه نشده است. همچنین زمان رسیدن به هدف نیز محدود نیست، در صورتی که در مسئله مطرح‌شده باید هدف در زمان مشخصی بازبایی شود.

دسته سوم مربوط به طراحی مسیر بهینه برای رسیدن به موقعیت هدف است. [۱۲] مسیر رسیدن به هدف را طی دو گام طراحی می‌کند. در گام اول یک گراف با استفاده از روش ژرونی فراهم می‌شود، به طوری که یال‌های این گراف دورترین مسافت را نسبت به رادارهای موجود در منطقه داشته باشند و مسیر مناسب رسیدن به هدف با یال‌های این گراف مشخص می‌شود. در گام دوم شکستگی‌های مسیر به‌وسیله یک چندجمله‌ای نرم می‌شود. بدین صورت ربات پرنده با وجود محدودیت‌هایی که دارد، مسیر مشخص‌شده را طی کرده و به هدف می‌رسد. [۱۳] نیز قیود وابسته به پرواز ربات‌های پرنده را در نظر گرفته است و با به‌کارگیری از روش بهینه‌سازی MILP، مسیر بهینه را به دست می‌آورد. علاوه بر بهینه‌سازی مسیر حرکت، قیود حرکتی مربوط به ربات پرنده نیز در شکستگی‌های مسیر لحاظ می‌شود. تفاوت این مقالات با موضوع مقاله حاضر در این است که هدف در تمام این

۴- پهپاد برای پوشش‌دهی ناحیه عدم قطعیت از مسیر حلزونی شکل استفاده می‌نماید. استفاده از الگوهای دیگر برای پوشش، در کلیات روش پیشنهادی تأثیری نداشته و تنها زمان پوشش ناحیه عدم قطعیت را تغییر داده و منجر به جابجایی نقطه بازیابی هدف می‌شود.

۵- هدف متحرک بوده و مسیر حرکت آن نامشخص است. از این رو مسیر حرکت آن توسط پهپاد اول پیش‌بینی می‌شود.

۶- سرعت حرکت پهپاد از سرعت هدف بیشتر است؛ زیرا در غیر اینصورت امکان بازیابی هدف وجود نخواهد داشت.

۷- با توجه به اینکه ارتفاع پرواز پهپاد در طول مسیر، ثابت در نظر گرفته شده است، پهنای دید پهپاد همواره اندازه ثابتی خواهد داشت. همچنین پهنای دید به صورت مربعی فرض می‌شود.

## ۲-۲- پیش‌بینی حرکت هدف

با توجه به اینکه مدل حرکتی هدف را می‌توان به صورت مقطعی خطی و دارای سرعت ثابت در نظر گرفت. از این‌رو برای پیش‌بینی مسیر حرکت هدف از فیلتر کالمن استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که این فرض بر جامعیت روش ارائه شده خدشه‌ای وارد نمی‌کند و در صورت نیاز می‌توان از مدل‌های حرکت مرتبه بالاتر و روش‌های غیرخطی برای مدل‌سازی حرکت هدف بهره برد.

پهپاد اول زمانی که در وضعیت ردیابی هدف قرار دارد، تخمینی از پارامترهای حرکتی هدف را در قالب یک الگوی خطی و سرعت ثابت در اختیار پهپاد جایگزین قرار می‌دهد. پهپاد جایگزین با داشتن مدل تخمینی از حرکت هدف، مسیر حرکت هدف را با استفاده از روش فیلتر کالمن پیش‌بینی می‌کند. نحوه پیش‌بینی مسیر حرکت هدف مشابه با روش ارائه شده در مقاله [۱۵] است و برای جلوگیری از طولانی و چندموضوعی شدن مقاله از ارائه جزئیات آن خودداری شده است.

لازم به ذکر است که عدم قطعیت از حضور هدف را نیز می‌توان در قالب نویز مدل فرآیند در نظر گرفت. از این‌رو برای هر نقطه از مسیر پیش‌بینی شده، یک بیضی به مرکزیت همان نقطه وجود دارد که نشان‌دهنده ناحیه عدم قطعیت از موقعیت هدف است؛ اما با فرض اینکه نامعینی در راستای حرکت هدف و عمود بر آن، مستقل از یکدیگر و دارای انحراف معیار یکسان است؛ بنابراین ناحیه عدم قطعیت برای هر نقطه از مسیر پیش‌بینی به شکل یک دایره خواهد بود. از این رو مسیر پیش‌بینی شده برای حرکت هدف به صورت یک خط مستقیم است که هر نقطه از این مسیر دارای یک دایره‌ای است که محدوده نامعینی از حضور هدف را در اطراف موقعیت پیش‌بینی شده نشان می‌دهد (شکل ۱).

مقالات ثابت فرض شده و فقط مسیر رسیدن به یک نقطه ثابت بهینه می‌شود؛ لیکن در مقاله حاضر هدف متحرک بوده و ممکن است از محدوده بازیابی خارج شود.

مسئله بیان شده در این مقاله، حالت دینامیکی از مسئله‌ای است که در [۱۴] مطرح شده است؛ لیکن روش پیشنهادی [۱۴] به علت بالا بودن زمان محاسباتی برای کاربردهای بلادرنگ مناسب نیست. علاوه بر این که هدف آن طراحی یک مسیر بهینه پوشش‌دهی با طول مسیر مقید بوده و با مسئله واگذاری هدف متحرک زمینی تفاوت دارد. همانطور که گفته شد در این مقاله مسئله واگذاری مأموریت ردیابی هدف متحرک زمینی به پهپاد جایگزین بررسی شده است. نوآوری این مقاله در تأمین توأم بیشترین احتمال ممکن برای بازیابی هدف و بیشترین پوشش منطقه جستجو در مسیر بازیابی هدف است. برای انجام این منظور، نخست مسیر حرکت هدف با بهره‌مندی از فیلتر کالمن پیش‌بینی شده و میزان عدم قطعیت موقعیت هدف برای هر نقطه از این مسیر تعیین می‌شود. سپس نقطه مناسب بازیابی هدف با استفاده از اطلاعات مسیر پیش‌بینی شده تعیین می‌شود. موقعیت این نقطه به نحوی است که اولویت اصلی مسئله یا همان اطمینان‌یافتن از بازیابی هدف محقق گردد. موقعیتی از هدف که محدوده عدم قطعیت اطراف آن با پهنای دید پهپاد برابر باشد، نقطه مناسب بازیابی هدف توسط پهپاد جایگزین است. از بین مسیرهای ممکن به سمت نقطه بازیابی، مسیری که بیشترین پوشش را فراهم نماید، بهترین مسیر بازیابی می‌باشد. به این وسیله هم بیشترین احتمال بازیابی هدف و هم بیشترین پوشش‌دهی در فرآیند واگذاری حاصل می‌گردد.

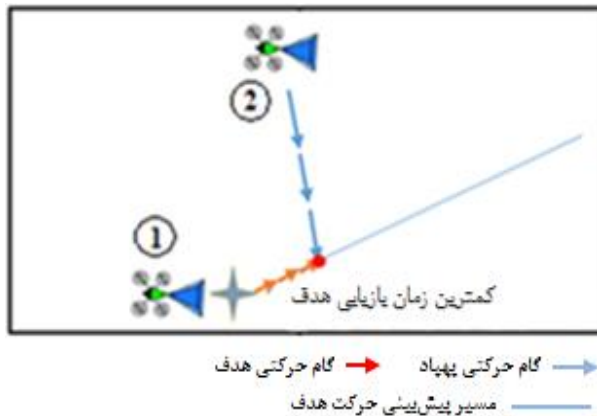
## ۲- روش پیشنهادی

راه‌حل پیشنهادی از سه بخش تشکیل شده است. بخش اول مربوط به پیش‌بینی مسیر حرکت هدف است که با به‌کارگیری فیلتر کالمن انجام می‌گیرد. در بخش دوم بر اساس اطلاعات مسیر پیش‌بینی شده حرکت هدف، نقطه مناسب بازیابی تعیین می‌شود. سپس در بخش سوم مسیر بازیابی هدف به منظور تأمین حداکثر پوشش‌دهی، توسط الگوریتم پیشنهادی بهینه می‌گردد.

## ۲-۱- قیود و فرضیات مسئله

قیودها و فرضیاتی که در طول مقاله از آنها استفاده خواهد شد، عبارتند از:

- ۱- حرکت هدف به صورت محلی، حرکت دارای سرعت ثابت در نظر گرفته می‌شود.
- ۲- عدم قطعیت موقعیت هدف در دو راستای حرکت، مستقل از یکدیگر و دارای انحراف معیار یکسان در نظر گرفته شده است.
- ۳- پهپاد دارای سرعت پرواز ثابت و محدود است.



شکل ۲: کمترین زمان بازیابی هدف نزدیک‌ترین نقطه تقاطع روی مسیر پیش‌بینی شده حرکت هدف است. طول گام حرکتی هدف و پرنده الزاماً برابر نیست.

از سوی دیگر، زمان بازیابی هدف نمی‌تواند از حد مشخصی طولانی‌تر شود. برای تعیین بیشترین زمان بازیابی باید توجه داشت که متحرک بودن هدف باعث می‌شود تا زمانی که پهپاد مساحت عدم قطعیت را پوشش می‌دهد، ناحیه عدم قطعیت لحظه به لحظه بزرگ‌تر شود، در نتیجه پهپاد همه ناحیه را پوشش نمی‌دهد.

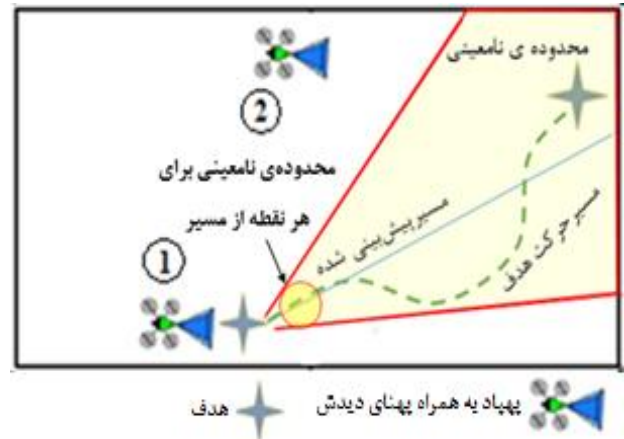
بیشترین زمان بازیابی هدف، آخرین نقطه مسیر پیش‌بینی هدف است که پهپاد می‌تواند مساحت ناحیه عدم قطعیت آن را پوشش دهد. برای محاسبه این نقطه، دایره نامعینی با یک مربعی که ضلع آن برابر با قطر دایره عدم قطعیت است، تخمین زده می‌شود.

حال برای محاسبه بیشترین زمان بازیابی هدف، فرض کنید که ضلع مربع نامعینی برابر  $a$  است. به خاطر تحرک هدف در هر لحظه، از هر طرف مقدار  $v_u t_n$  به عرض این ناحیه اضافه می‌شود.  $v_u t_n$  به ترتیب واحد زمان و اندازه سرعت متوسط حرکت هدف هستند (شکل ۳).

$$s_u = (a + 2v_u t_n)^2 \quad (2)$$

چنانچه حرکت پهپاد برای پوشش‌دهی ناحیه عدم قطعیت به صورت حلزونی باشد، در هر لحظه مقدار  $lv_u t_n$  از شعاع نامعینی توسط پرنده رؤیت می‌شود. از آنجا که در این الگو، ناحیه عدم قطعیت از مرکز به سمت بیرون پوشش داده می‌شود، امکان نفوذ هدف به داخل ناحیه پوشش داده شده به حداقل می‌رسد. در رابطه (۳) عرض پهنای دید پهپاد و  $v_u$  اندازه سرعت متوسط پهپاد هستند (شکل ۴ الف).

$$s_c = l^2 + lv_u t_n \quad (3)$$



شکل ۱: پهپاد اول در حالت ردیابی هدف قرار داشته و به دلیل مشکل ایجاد شده باید مأموریت ردیابی هدف متحرک را به پهپاد دوم واگذار کند. پهپاد دوم با دریافت اطلاعات مدل حرکتی و آخرین موقعیت هدف، مسیر حرکت هدف را پیش‌بینی کرده و محدوده عدم قطعیت هدف را برای هر نقطه از مسیر تعیین می‌کند. محدوده عدم قطعیت به اندازه‌ای است که مسیر حقیقی حرکت هدف در این ناحیه قرار گیرد.

### ۲-۳- تعیین زمان بازیابی هدف

در گام بعدی نیاز است نقطه بازیابی هدف توسط پهپاد جایگزین روی مسیر پیش‌بینی شده، تعیین گردد. با فرض اینکه پهپاد دارای سرعت ثابت و محدود است، از لحظه ره‌اشدن هدف به دست پهپاد اول، پهپاد دوم تنها در محدوده مشخصی می‌تواند هدف را بازیابی کند. محدوده بازیابی هدف به جهت‌گیری و سرعت حرکت هدف و پرنده بستگی دارد. چنانچه پهپاد به صورت مستقیم به سوی نقطه تقاطع با هدف حرکت کند، آن را در کوتاه‌ترین زمان ممکن دریافت می‌کند. برای محاسبه نقطه تقاطع کافی است نقطه تماس دایره‌ای که مرکز آن موقعیت اولیه پهپاد و شعاع آن گام‌های حرکتی پهپاد است را با همان تعداد گام برای هدف روی خط پیش‌بینی شده برخورد داد. مدت زمانی که نیاز است تا پهپاد به این نقطه برسد کمترین زمان بازیابی هدف نامیده می‌شود (شکل ۲).

$$\begin{cases} X_{min} - X_{t_0} = V_t t_{min} \\ |X_{min} - X_{u_0}| = |V_u| t_{min} \end{cases} \quad (1)$$

معادله (۱) به صورت برداری می‌باشد.  $X_{min}$  موقعیت کمترین زمان بازیابی هدف است و شامل طول و عرض نقطه است.  $V_t$  بردار حرکتی هدف می‌باشد که از بخش پیش‌بینی حرکت هدف محاسبه شده است.  $X_{u_0}$  و  $X_{t_0}$  به ترتیب موقعیت اولیه پهپاد و هدف،  $|V_u|$  اندازه بردار سرعت پهپاد و  $t_{min}$  کمترین زمان بازیابی هدف است. با حل دستگاه معادلاتی (۱) کمترین زمان بازیابی هدف به دست می‌آید.

به عبارت دیگر تنها یک نقطه برخورد دارند. این نقطه، همان بیشترین زمان بازیابی هدف است (شکل ۴ ب).

ربات پرنده باید روی مسیر پیش‌بینی هدف حد فاصل کمترین و بیشترین زمان بازیابی هدف، نقطه مناسب بازیابی هدف را تعیین کند. لازم به ذکر است که در حالت‌های ویژه‌ای، دستیابی به این حد فاصل ممکن نیست. چنانچه سرعت نسبی نزدیک شدن به هدف کوچک‌تر یا مساوی صفر باشد، هیچ‌گاه پهباد به هدف نمی‌رسد. همچنین، در حالتی که رفتار هدف بسیار غیرخطی است؛ با مدل خطی فرض شده، سرعت افزایش مساحت عدم قطعیت بسیار زیاد خواهد بود. از این‌رو ممکن است حد فاصل گرفتن هدف، فقط در کوتاه‌ترین زمان بازیابی هدف خلاصه شود.

در حالت‌های متداول که سرعت حرکت پرنده چندین برابر سرعت حرکت هدف است و مدل‌سازی حرکت خطی از دقت کافی برخوردار است، روش مطرح‌شده پاسخ مناسبی خواهد داشت. در این حالت‌ها، میان کمترین و بیشترین زمان بازیابی هدف، نقطه‌ای برای بازیابی انتخاب می‌شود که ناحیه عدم قطعیت موقعیت هدف و پهنای دید ربات پرنده کمترین تفاوت را دارا باشند. به عبارت دیگر، دورترین نقطه‌ای از مسیر پیش‌بینی شده هدف که ناحیه عدم قطعیت آن کوچکتر یا مساوی اندازه پهنای دید پهباد باشد، به‌عنوان نقطه مناسب بازیابی انتخاب می‌شود ( $X_{ideal}$ ).

#### ۲-۴- الگوریتم طراحی مسیر

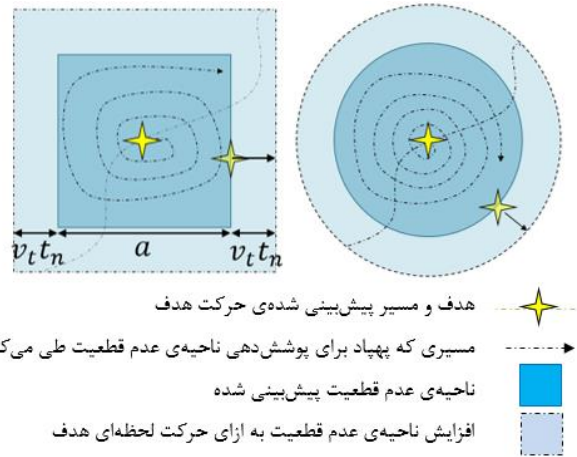
الگوریتم پیشنهادی مرحله‌به‌مرحله بوده و در هر مرحله سعی بر این است که با بررسی شرط زمان بازیابی هدف، مسیر ایجادشده که از لحاظ پوشش‌دهی بهبود یابد. مدت زمانی که پهباد دوم فرصت دارد تا از لحظه رهاشدن هدف ( $X_{t_0}$ ) به نقطه مناسب بازیابی هدف برسد را زمان لازم برای بازیابی هدف می‌نامند ( $t_{ideal}$ ). بر اساس زمان لازم برای بازیابی هدف و سرعت متوسط حرکت پهباد، طول مسیر ایده‌آل برای بازیابی هدف تعیین می‌گردد ( $d_{ideal}$ ). طول مسیر ایده‌آل برابر حاصل ضرب سرعت متوسط حرکت پهباد در زمان لازم برای بازیابی هدف است.

$$d_t = |X_{ideal} - X_{t_0}| \quad (4)$$

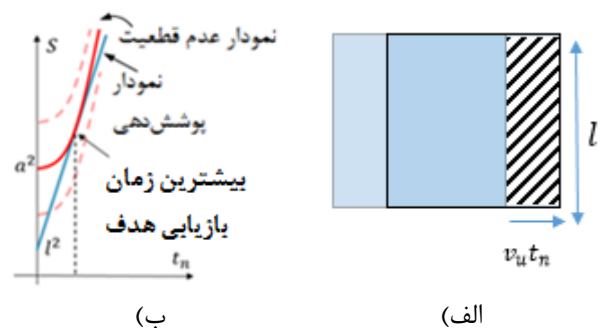
$$t_{ideal} = \frac{d_t}{v_t} \quad (5)$$

$$d_{ideal} = t_{ideal} v_u \quad (6)$$

در آغاز، مسیر بازیابی هدف همان پاره‌خط میان دو نقطه موقعیت کنونی پهباد و مقصد مناسب بازیابی هدف است. حال زمان پیمودن این مسیر پیشنهادی توسط پهباد محاسبه می‌شود ( $t_{path}$ ). اختلاف این زمان محاسبه‌شده با زمان لازم برای بازیابی هدف، می‌تواند صرف بهینه پوشش دادن مسیر بازیابی هدف شود ( $t_{optimization}$ ). بر پایه این زمان اضافه، مسیرهای حرکت به‌سوی نقطه بازیابی هدف محدود می‌شود.



شکل ۳: تخمین دایره عدم قطعیت با یک مربع به منظور محاسبه بیشترین زمان بازیابی هدف.



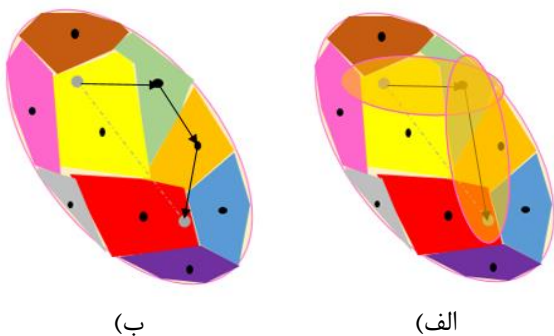
شکل ۴: الف) ناحیه مربعی شکل، پهنای دید پهباد است که با حرکت پهباد به سمت راست ناحیه هاشورخورده به محدوده دیده شده پهباد اضافه می‌شود. ب) نمودار آبی‌رنگ تغییرات مساحت پوشش‌دهی با تغییر زمان و نمودار قرمز رنگ تغییرات مساحت ناحیه عدم قطعیت در واحد زمان را نشان می‌دهند. نقطه تقاطع این دو نمودار جایی است که پهباد تمام ناحیه عدم قطعیت را پوشش می‌دهد و بیشترین زمان ممکن را برای بازیابی هدف مشخص می‌کند.

برای هر نقطه روی مسیر پیش‌بینی هدف، لازم است تا دو نمودار  $s_1$  و  $s_2$  که به ترتیب، نمودارهای مربوط به مساحت عدم قطعیت و مساحت پوشش‌دهی هستند، مقایسه شوند. هر نقطه از مسیر پیش‌بینی حرکت هدف، دارای یک مساحت اولیه نایقینی  $a^2$  است. نمودار رشد ناحیه عدم قطعیت به‌صورت سهمی شکل و نمودار پوشش‌دهی منطقه به‌وسیله پهنای دید پهباد، رابطه خطی با زمان دارند. نمودار پوشش‌دهی برای همه نقاط مسیر پیش‌بینی حرکت هدف ثابت است، اما نمودار عدم قطعیت وابسته به مقدار مساحت عدم قطعیت اولیه، روی محور عمودی جابجا می‌شود.

چنانچه نقطه تقاطعی میان این دو نمودار وجود داشته باشد، پوشش دادن کل مساحت نامعینی توسط ربات پرنده ممکن است؛ لیکن چنانچه دو نمودار یکدیگر را قطع نکنند، پوشش‌دهی منطقه نایقینی غیرممکن است. تنها در یک حالت دو نمودار بر هم مماس می‌شوند و

برای این منظور ابتدا و انتهای هر تکه مسیر رئوس بیضی در نظر گرفته شده و محیط بیضی به فاصله مجموع طول تکه مسیر به علاوه اختلاف میان طول مسیر کنونی و ایده آل است (شکل ۶).

این چنین طول مسیر به صورت جلو رونده افزایش می یابد تا برای بهبود کیفیت پوشش دهی مسیر، بیشترین استفاده از زمان اضافی صورت گیرد. باید توجه داشت که افزایش ترتیبی مرکز خوشه ها به ایجاد بهترین مسیر بازیابی هدف نمی انجامد؛ زیرا با اضافه شدن یک مرکز جدید، شاید با حذف یکی از مراکز پیشین، مسیر بهتری به دست آید. از این رو زمانی که تعداد مراکز اضافه شده به مسیر بزرگ تر یا مساوی دو شود، به ازای افزودن هر مرکز جدید به مسیر، بررسی می شود آیا مرکز خوشه ای روی مسیر است که با حذف آن پوشش دهی مسیر بیشتر شود؟ در صورت بهبود پوشش دهی، آن مرکز از مسیر حذف می شود و مسیر ایجاد شده برای بازیابی هدف مناسب خواهد بود.



شکل ۶: بیضی بزرگ ناحیه مسیره های مجاز را برای حد فاصل موقعیت اولیه پهپاد و هدف نشان می دهد. قطعه های رنگی در واقع خوشه های پوشش دهی منطقه هستند؛ که مرکز آن با یک نقطه مشکلی مشخص شده است. در (الف) برای هر تکه مسیر بازیابی هدف ناحیه مسیره های مجاز با یک بیضی نارنجی رنگ مشخص شده است. در (ب) مرکز خوشه مناسبی که در ناحیه مسیره های مجاز برای هر تکه مسیر قرار دارد به حد فاصل همان تکه مسیر اضافه شده است.

الگوریتم پیشنهادی خوشه های با ارزش را به ترتیب اولویت به مسیر اضافه می کند. این فرایند تا زمانی ادامه پیدا می کند که یکی از سه عامل زیر محقق گردد:

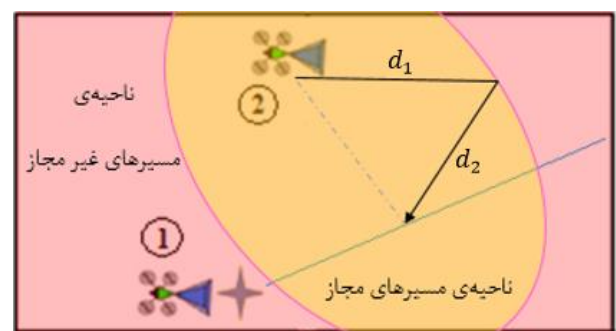
- ۱- اختلاف طول مسیر به دست آمده از الگوریتم با طول مسیری ایده آل، کمتر از دو گام پرنده باشد.
- ۲- برای تمام تکه مسیره ها، هیچ مرکزی در ناحیه مسیره های مجاز قرار نگیرد.
- ۳- تمام مراکز به مسیر اضافه شده باشند.

در شکل ۷، فلوجارت مربوط به نحوه کارکرد الگوریتم نمایش داده شده است.

$$t_{path} = \frac{d_{path}}{v_u} \quad (7)$$

$$t_{optimization} = t_{ideal} - t_{path} \quad (8)$$

محدوده های که مسیره های پاسخ در آن هستند، برابر است با محوطه یک بیضی که رئوس آن موقعیت کنونی پهپاد و نقطه بازیابی هدف هستند. فاصله محوطه این بیضی از رئوس آن برابر با سرعت متوسط پرنده در زمان لازم برای بازیابی هدف است. این بیضی ناحیه مسیره های مجاز برای رسیدن به هدف را مشخص می کند (شکل ۵). مزیت تعریف ناحیه مسیره های مجاز در این است که منطقه جستجوی مسیره ها را کوچک تر کرده و در نتیجه تعداد محاسبات لازم برای یافتن مسیر بازیابی هدف کاهش می یابد.



شکل ۵: محدوده مسیره های مجاز برابر با یک بیضی است که یک مرکز آن توسط موقعیت کنونی پهپاد و مرکز دیگر آن توسط نقطه مناسب بازیابی هدف مشخص می گردد.

$$d_1 + d_2 = v_u \times t_{ideal} \quad (9)$$

منظور از پوشش دهی منطقه، مشاهده نقاطی از منطقه است که قبلاً توسط پهپاد رؤیت نشده است؛ پس هرچه پهپاد نقاط بیشتری را طی مسیر بازیابی هدف مشاهده کند، کیفیت پوشش دهی مسیر یاد شده نیز بیشتر می شود.

در مرحله بعدی الگوریتم، نقاطی از ناحیه مسیره های مجاز که پوشش دهی کافی ندارند به گونه ای خوشه بندی می شوند که مساحت بزرگترین خوشه، از مساحت پنجره دید پهپاد کوچک تر شود. با این کار زمانی که پهپاد در مرکز هر خوشه قرار می گیرد، تمام خوشه پوشش داده می شود.

حال به ترتیب مرکز هر خوشه به حد فاصل نقطه ابتدا و انتهای مسیر افزوده می شود و مقدار پوشش دهی مسیر ایجاد شده در ازای اضافه شدن مرکز خوشه مذکور سنجیده می شود. سپس مرکز خوشه ای که بیشترین پوشش دهی منطقه را برای مسیر بازیابی فراهم کرده است، به نقاط قبلی مسیر اضافه می شود.

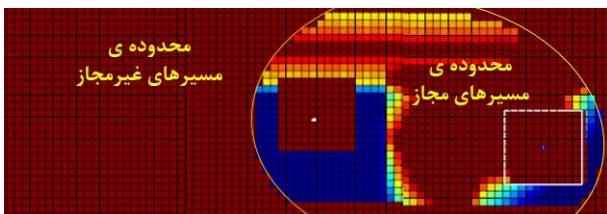
از این پس همین مراحل برای تکه مسیره هایی که در اثر اضافه شدن مرکز خوشه جدید ایجاد شده اند، تکرار می شود. با این تفاوت که این بار ناحیه مسیره های مجاز، برای هر تکه مسیر جداگانه محاسبه می شود.



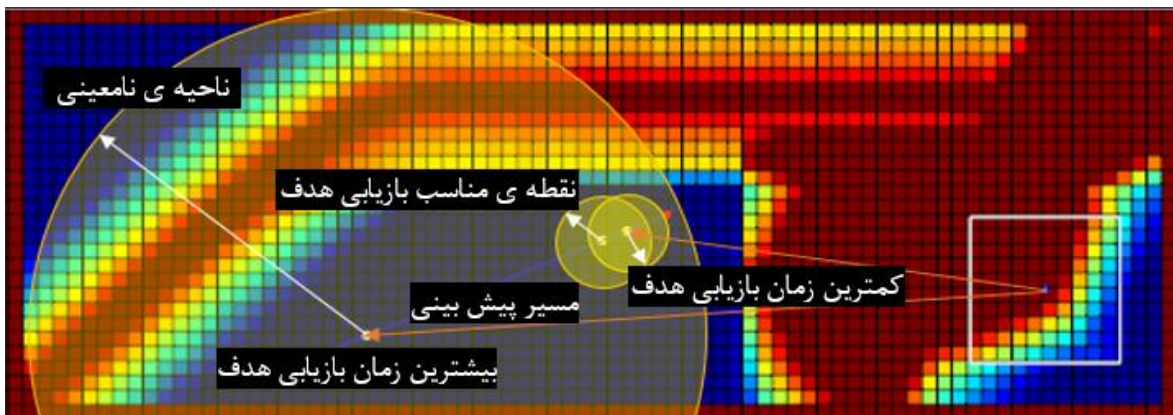
تصویر با پنجره دید سفیدرنگ، موقعیت اولیه هدف و مسیر پیش‌بینی شده آن نیز با خط آبی‌رنگ مشخص شده است. میزان عدم قطعیت سه نقطه کمترین، بیشترین و نقطه مناسب بازیابی هدف با دایره‌های زردرنگ نشان داده شده است. نقاط قرمز رنگ محیط نشان‌دهنده میزان پوشش‌دهی بالا و سلول‌های آبی‌رنگ بدون پوشش‌دهی هستند. در ادامه نتایج یک مرتبه از اجرای مراحل مختلف الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌گردد.

### ۳-۱- تعیین محدوده مسیرهای مجاز

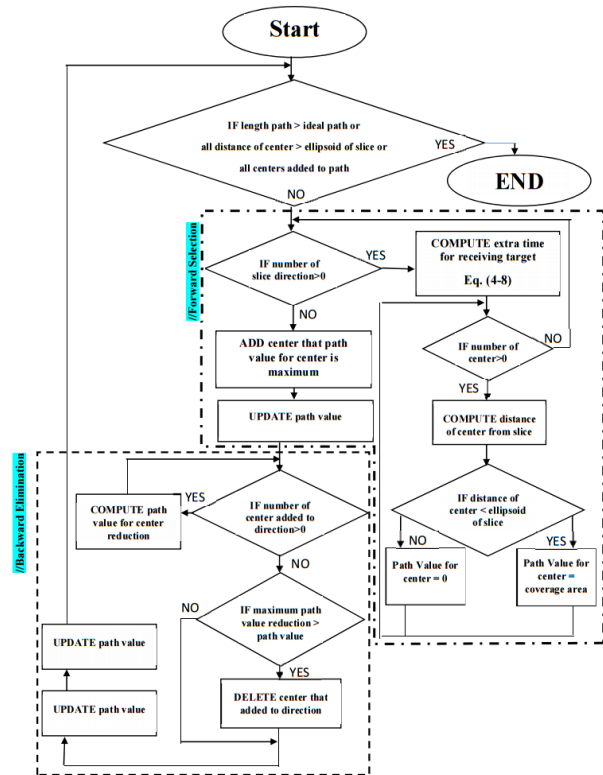
رشد شعاع نامعینی، خطی و متناسب با زمان است و مقدار آن برای هر نقطه برابر با  $0.12$  سلول در واحد زمان است. با توجه به محاسبات انجام‌گرفته، کمترین زمان بازیابی هدف در لحظه ۲۹ با شعاع نامعینی  $3/48$  سلول و بیشترین زمان بازیابی هدف در لحظه ۲۱۷ با شعاع نامعینی  $26/04$  سلول است. در این حد فاصل، نقطه‌ای که کمترین شعاع نامعینی آن  $5/64$  سلول است. مدت زمانی که باید صرف بهینه‌سازی مسیر رسیدن تا هدف شود،  $17/22$  فریم می‌باشد. در ابتدا ناحیه مسیرهای مجاز برای بازیابی هدف مشخص می‌شود. این چنین تعداد محاسبات لازم برای یافتن مسیر بازیابی هدف، کاهش می‌یابد (شکل ۹).



شکل ۹: محدوده مسیرهای مجاز توسط یک بیضی زردرنگ جدا شده‌اند. موقعیت ابتدایی و انتهایی پهپاد همواره در مسیر بازیابی هدف واقع هستند، بنابراین دو مربع قرمز رنگ به اندازه محدوده پهنای دید پهپاد در اطراف این نقاط پوشش‌دهی داده شده است.



شکل ۸: در این شکل یک سناریوی تصادفی شبیه‌سازی شده است. سلول‌های آبی‌رنگ نشان‌دهنده پوشش‌دهی کم و سلول‌های قرمز رنگ مقدار پوشش‌دهی بالایی دارند. کادر سفیدرنگ در سمت راست تصویر پهنای دید پهپاد را نشان می‌دهد.



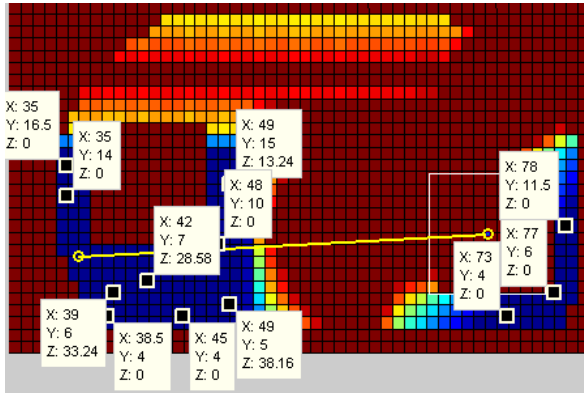
شکل ۷: فلوچارت نحوه تصمیم‌گیری الگوریتم

### ۳- شبیه‌سازی

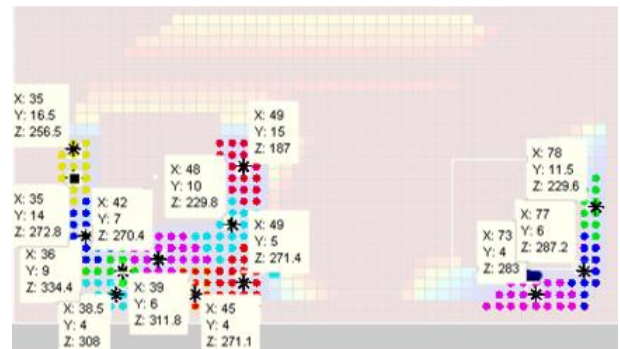
در این بخش توضیحات مربوط به نحوه کارکرد الگوریتم پیشنهادی در یک سناریوی تصادفی بیان می‌شود. ابعاد منطقه  $30 \times 80$  سلول و پنجره دید ربات پرنده  $10 \times 10$  سلول است. پهپاد در موقعیت  $(71/24, 10/84)$  با سرعت ۱ سلول بر فریم و هدف در موقعیت  $(46, 16)$  با سرعت  $0.1$  سلول بر فریم مقداردهی اولیه شده‌اند. پوشش‌دهی اولیه منطقه و موقعیت اولیه هدف و پهپاد با اجرای سناریوی جستجوی منطقه و ردیابی هدف از [۱۶] ایجاد شده است. مسیر پیش‌بینی هدف و اطلاعات مربوط به میزان نامعینی هر نقطه و زمان‌بندی آن‌ها در شکل ۸ مشخص است. پهپاد در سمت راست

### ۳-۲- خوشه‌بندی محدوده مسیرهای مجاز

در این مرحله، ناحیه مسیرهای مجاز خوشه‌بندی می‌شود. در این مثال منطقه به ۱۳ خوشه تقسیم شده است، با این تعداد خوشه مساحت تمام خوشه‌ها از پنجره دید ربات پرنده کمتر خواهد بود. حال هر مرکز به مسیر بازیابی هدف اضافه می‌شود و کیفیت پوشش‌دهی مسیر به ازای مرکز جدید سنجیده می‌شود. مرکز خوشه‌ای که در موقعیت (۶، ۳۹) قرار دارد، بیشترین پوشش‌دهی را فراهم می‌کند. با اضافه کردن این مرکز خوشه به مسیر بازیابی هدف، به مقدار  $۳۱۱/۸$  واحد پوشش‌دهی حاصل می‌شود (شکل ۱۰).

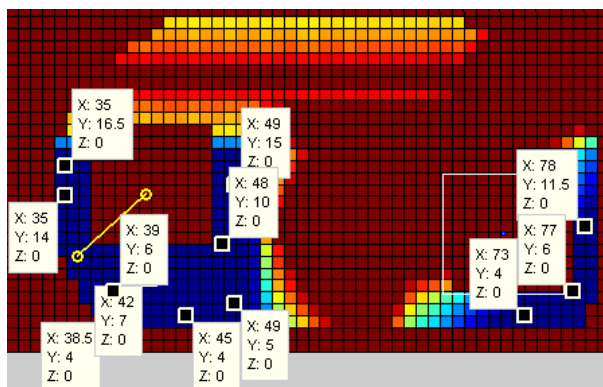


شکل ۱۰: تنها مرکز خوشه موقعیت (۷، ۴۲) در ناحیه‌ی مجاز تکه مسیر زردرنگ قرار دارد. پوشش‌دهی مسیر بازیابی هدف به مقدار  $۲۸/۵۸$  واحد بهبود می‌یابد.



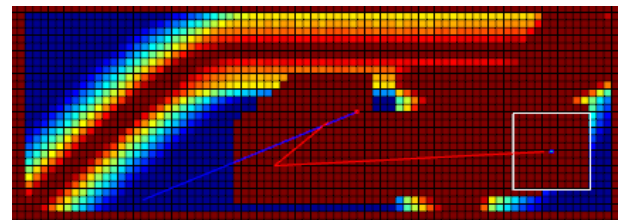
شکل ۱۱: ناحیه مسیرهای مجاز خوشه‌بندی شده است و هر خوشه با یک رنگ متفاوت مشخص است. هر خوشه متناسب با پوشش‌دهی که در اثر اضافه شدن به مسیر بازیابی ایجاد می‌کند، ارزش‌گذاری شده است.

با اضافه شدن اولین مرکز خوشه، طول مسیر به ۴۵ واحد می‌رسد. درحالی‌که طول مسیر ایده‌آل ۴۷ واحد است (شکل ۱۱).



شکل ۱۲: فاصله همه مرکز خوشه‌ها از تکه مسیر دوم به شکلی است که هیچ مرکز خوشه‌ای در ناحیه مجاز این تکه مسیر قرار نمی‌گیرد. در نتیجه تمام مراکز ارزش صفر دارند.

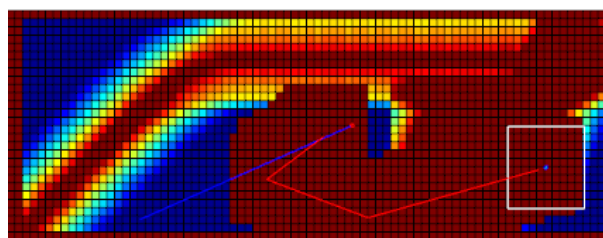
یادآوری می‌شود مراکزی که خارج از ناحیه مجاز برای هر تکه مسیر قرار دارند، ارزش صفر داشته و انتخاب نمی‌شوند. در این حالت طول مسیر حاصل شده به ۴۷ واحد می‌رسد که برابر با طول ایده‌آل است. پوشش‌دهی این مسیر بازیابی برابر با  $۳۴۰/۳۸$  واحد می‌باشد (شکل ۱۴).



شکل ۱۳: به ازای اضافه شدن اولین مرکز خوشه به حد فاصل موقعیت اولیه پهباد و نقطه مناسب دریافت هدف، مسیر بازیابی هدف به همراه پوشش‌دهی ایجاد شده با رنگ قرمز مشخص است.

### ۳-۳- انتخاب مرکز مناسب برای هر تکه مسیر

با توجه به اختلاف طول مسیر ایده‌آل و طول مسیر محاسبه شده، همچنان می‌توان با افزودن مرکز خوشه دیگر به مسیر بازیابی هدف، پوشش‌دهی مسیر پهباد را بهبود بخشید. از این رو مراکزی که بیشترین پوشش‌دهی مسیر را فراهم می‌کنند به تکه مسیر مربوطه افزوده می‌شود. چنانچه مرکز خوشه موقعیت (۷، ۴۲) به تکه مسیر اول اضافه شود، به مقدار  $۲۸/۵۸$  واحد پوشش‌دهی تکه مسیر اول را ارتقا می‌بخشد (شکل ۱۲ و ۱۳).

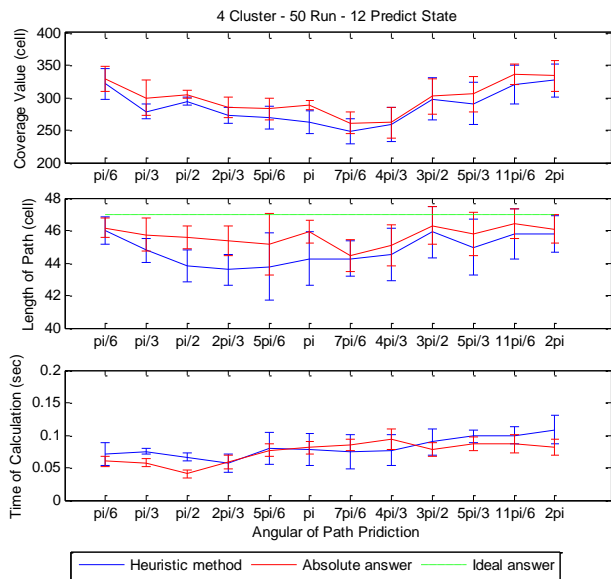


شکل ۱۴: مسیر بازیابی هدف و کیفیت پوشش‌دهی ایجاد شده در انتهای شبیه‌سازی با رنگ قرمز مشخص می‌باشد.

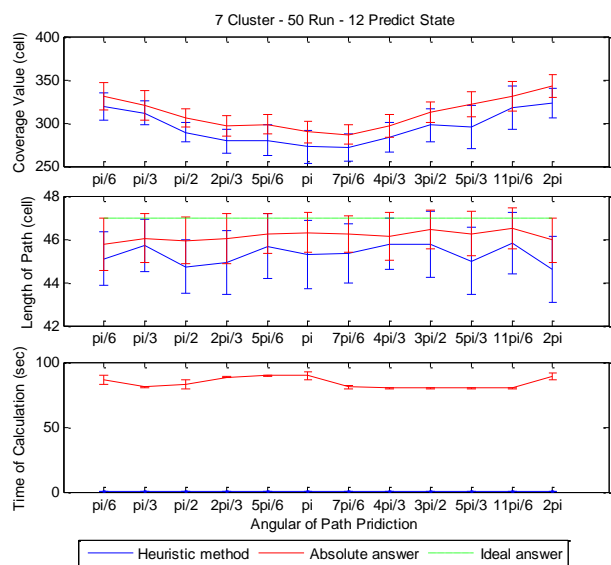
### ۳-۴- حذف مرکز خوشه نامناسب از مسیر بازیابی

در این مرحله مراکز اضافه شده به مسیر دوباره سنجیده شوند تا اگر با حذف یکی از مراکز قبلی کیفیت پوشش‌دهی بهبود یابد، مرکز خوشه





شکل ۱۵: الگوریتم با روش بهینه مطلق به ازای تعداد چهار خوشه در راستای پیش‌بینی حرکت هدف شبیه‌سازی شده‌اند. نمودار سبزرنگ برای نشان‌دادن فاصله تا طول مسیر ایده‌آل رسم شده است. نمودارهای آبی و قرمز به ترتیب مربوط به روش ارائه شده در این مقاله و جواب بهینه مطلق است.



شکل ۱۶: به ازای تعداد هفت خوشه سه معیار طول مسیر، میزان پوشش‌دهی و زمان محاسباتی برای الگوریتم پیشنهادی و روش بهینه مطلق مقایسه شده‌اند. با اضافه‌شدن تعداد خوشه‌ها طول مسیر به نمودار سبزرنگ نزدیک‌تر می‌شود.

شکل ۱۷ تغییرات معیارهای مقایسه‌ای را به ازای تعداد مختلف خوشه‌ها نشان می‌دهد. این نتایج از میانگین ۵۰ تکرار متوالی در ۱۲ راستای مختلف حاصل شده است. می‌توان گفت زمان محاسباتی روش مطرح‌شده وابستگی ضعیفی به تعداد خوشه‌ها داشته و با افزایش تعداد خوشه‌ها بدون اینکه زمان محاسباتی تغییر محسوسی کند، کیفیت

مدنظر از مسیر حذف شود. با حذف مرکز خوشه موقعیت (۴۲، ۷۵) میزان پوشش‌دهی ۳۱۱/۸ واحد شده و با حذف مرکز خوشه موقعیت (۳۶، ۹)، پوشش‌دهی منطقه ۲۷۰/۴ واحد می‌رسد. از این‌رو نیازی به حذف هیچ کدام نیست، زیرا پوشش‌دهی حاصل‌شده کمتر از حالت فعلی می‌شود.

#### ۴- بحث و گفتگو

پس از بررسی چگونگی اجرای الگوریتم، بایستی بهینگی مسیر طراحی‌شده سنجیده شود. برای این منظور روش مطرح‌شده می‌باید با سایر روش‌های بهینه‌سازی با قیود مقایسه شود. راه دیگر، مقایسه با مسیر بهینه مطلق است.

مسیر بهینه مطلق، مسیری است که بیشترین پوشش‌دهی را با رعایت قید طول مسیر فراهم می‌کند. این مسیر از بررسی تمام مسیرهای ممکن در گرافی که رؤس آن شامل مراکز خوشه‌ها است، تعیین می‌شود. نقطه آغاز این مسیر موقعیت کنونی پرنده و سرانجام آن نقطه مناسب بازبایی هدف است.

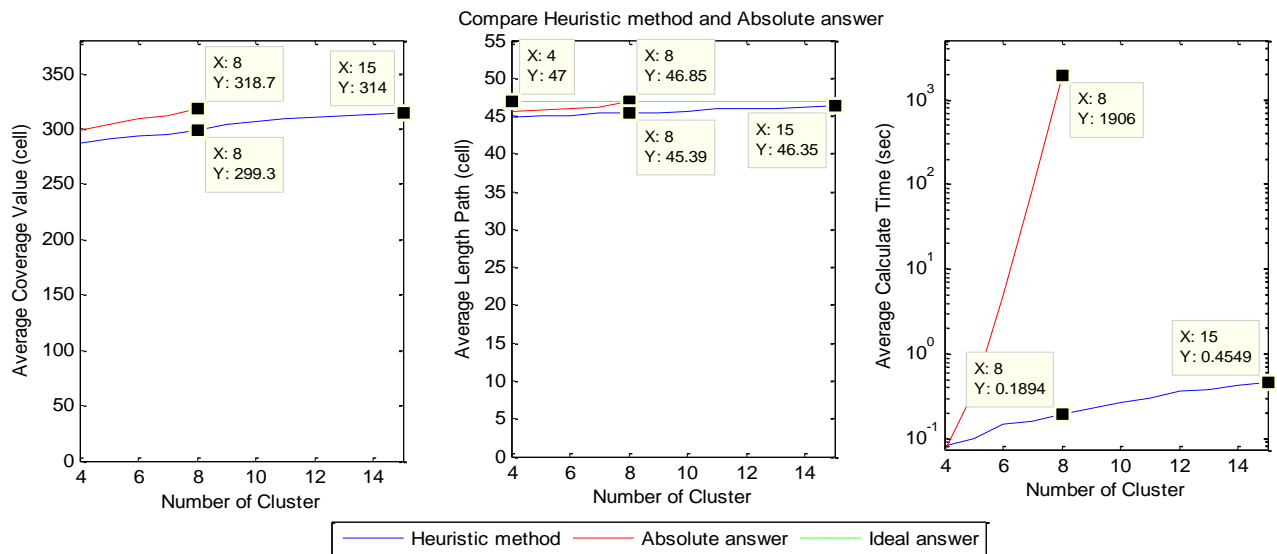
کیفیت مسیر تولیدشده از نظر زمان رسیدن به پاسخ، میزان پوشش‌دهی مسیر و درصد انحراف از طول مسیر ایده‌آل با مسیر بهینه مطلق مقایسه خواهد شد.

در این سنجش نیز همانند بخش شبیه‌سازی، پهباد و هدف هر دو در همان موقعیت‌های قبلی قرار داشته و پوشش‌دهی اولیه منطقه نیز همانند حالت قبل است. معیارهای ذکرشده به ازای ۱۲ جهت پیش‌بینی شده متفاوت سنجیده می‌شود. مسیرهای پیش‌بینی‌شده حرکت هدف در راستاهای مضارب  $\frac{\pi}{6}$  جهت گرفتند، به‌طوری که در شماره‌های ۱، ۴، ۷ و ۱۰ مسیر پیش‌بینی‌شده برای حرکت هدف در راستاهای غرب، شمال، شرق و جنوب فرض شده است.

با توجه به اینکه خوشه‌بندی به صورت تصادفی انجام می‌گیرد، برای حذف تأثیر تصادفی موقعیت خوشه‌ها، هر جهت مسیر پیش‌بینی را ۵۰ بار متوالی تکرار کرده و از معیار میانگین و انحراف معیار برای نشان‌دادن نتایج استفاده می‌شود.

در نتایج مسئله مسیریابی برای حالات گفته‌شده به ازای تعداد چهار و هفت خوشه سنجیده شده است. برای تعداد چهار خوشه، چون تعداد خوشه‌ها کم است، هر دو روش زمان محاسباتی بسیار کمی دارند و مسیر تولیدشده از حد ایده‌آل فاصله زیادی دارد. در این حالت هر دو روش، کیفیت پوشش‌دهی تقریباً یکسانی دارند (شکل ۱۵).

به ازای تعداد هفت خوشه نتایج متفاوتی حاصل می‌شود. با توجه به بیشتر شدن حق انتخاب مرکز خوشه‌ها، زمان محاسباتی بیشتری صرف یافتن مسیر بازبایی هدف می‌شود. زمان محاسبه مسیر طبق روش ارائه‌شده به مراتب کمتر از روش بهینه مطلق است. علاوه بر این مسیرهای ایجادشده در ۱۲ حالات به طول ایده‌آل نزدیک‌تر بوده و میزان پوشش‌دهی روش بهینه مطلق برتر از الگوریتم ارائه شده است (شکل ۱۶).



شکل ۱۷: سه معیار میزان پوشش‌دهی مسیر، طول مسیر و زمان محاسباتی برای یافتن مسیر بازیابی هدف به ازای تعداد متفاوت خوشه مشخص می‌باشد. واضح است که زمان یافتن مسیر مناسب با روش ارائه‌شده وابستگی ناچیزی به تعداد خوشه‌های منطقه دارد.

متحرک و اصلاح مسیر بازیابی به‌منظور ایجاد بیشینه پوشش‌دهی منطقه‌ای است.

در این الگوریتم با در اختیار داشتن الگوی حرکتی هدف، ابتدا مسیر حرکت هدف پیش‌بینی شده و ناحیه عدم قطعیت موقعیت هدف برای هر نقطه از مسیر مشخص می‌گردد. سپس در بازه زمانی مجاز برای بازیابی هدف، نقطه مناسب بازیابی هدف تعیین می‌شود. دورترین نقطه از مسیر پیش‌بینی حرکت هدف که مساحت ناحیه نایقینی آن توسط پنجره دید پهناد قابل پوشش‌دهی باشد، بهترین نقطه برای بازیابی هدف معرفی شده است. با استفاده از این روش، مسیر بازیابی هدف هم پوشش‌دهی خوبی داشته و هم از اطمینان لازم برای بازیابی هدف برخوردار است. همچنین این روش از سرعت اجرای خوبی برخوردار بوده و مسیر طراحی شده توسط آن به مسیر بهینه مطلق بسیار نزدیک است.

### ۶- فعالیت‌های آتی

یکی از مهم‌ترین اقدامات آتی، توسعه روش برای تولید مسیرهای پیوسته و نرم برای پهپادهای بال ثابت است. مسیر تولیدشده با روش پیشنهادی دارای شکستگی‌های فراوانی است که می‌توان آن‌ها را با استفاده از روش‌هایی مانند نوار ارتجاعی [۱۷] و منحنی bezier [۱۸] نرم کرد. همچنین روش پیشنهادی بایستی قابلیت اصلاح مسیر را براساس اطلاعات لحظه‌ای داشته و هنگام پیمودن مسیر بازیابی، با پردازش کم و به‌صورت برخط مسیر اولیه را اصلاح کند. آزمایش الگوریتم پیشنهادی در فضای آزمایشگاهی درون ساختمان نیز می‌تواند کمک شایانی به ارزیابی قابلیت‌های روش پیشنهادی نماید. برای این منظور می‌توان طرح ارائه‌شده را روی یک نمونه از ربات‌های چهارمخه پیاده‌سازی کرد. یک روش کنترلی مناسب برای این دسته از ربات‌های

مسیر بازیابی از لحاظ نزدیک‌بودن به طول ایده‌آل و مقدار پوشش‌دهی بهبود می‌یابد. این در حالی است که هرچه تعداد خوشه‌های منطقه بیشتر شود به دلیل ازدیاد مسیرهای ممکن، زمان سنجش مسیر بهینه مطلق به‌صورت توانی افزایش می‌یابد تا آنجا که مشاهده می‌شود که به ازای بیشتر از هشت خوشه، محاسبه مسیر بازیابی از نظر زمانی قابل قبول نخواهد بود.

تعداد ۱۵ خوشه برای منطقه‌ای با  $30 \times 80$  سلول و پنجره دید پهپادی با  $10 \times 10$  سلول مناسب است. در این حالت الگوریتم ارائه‌شده به‌طور متوسط در زمانی نزدیک به  $0.46$  ثانیه، مسیر مناسبی را برای بازیابی هدف تعیین می‌کند. این زمان محاسباتی برای کاربردهای آنلاین کافی است. انتظار می‌رود طول مسیر به دست آمده  $46/35$  سلول باشد که از طول  $47$  سلول تجاوز نکرده است و این یعنی از دریافت هدف اطمینان حاصل می‌شود. این در حالی است که به‌طور متوسط مقدار  $314$  سلول را پوشش می‌دهد.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت که روش مطرح‌شده به ازای تعداد خوشه برابر با پذیرفتن سه درصد فاصله با طول مسیر ایده‌آل و شش درصد خطا در پوشش‌دهی مسیر بازیابی نسبت به روش بهینه مطلق توانسته  $10.62$  برابر زمان محاسباتی مسیر مناسب را کاهش دهد.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یکی از دشواری‌های موجود در ردیابی اهداف زمینی توسط چند پهپاد بررسی شد. به دلایلی چون پایان سوخت، ضروری است که پهپاد دیگری جایگزین پهپاد تعقیب‌کننده هدف شود. این مقاله روشی را برای تولید مسیر بازیابی هدف ارائه داده است که علاوه بر اطمینان‌داشتن از واگذاری هدف، مسیر بازیابی هدف حداکثر پوشش‌دهی منطقه را فراهم می‌کند. این مسئله دارای سه بخش مدل‌سازی و پیش‌بینی مسیر حرکت هدف، طراحی مسیر بازیابی هدف

- [10] G. Lau and H. H. Liu, "Real-time path planning algorithm for autonomous border patrol: design, simulation, and experimentation," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 75, no. 3-4, pp. 517-539, September 2014.
- [11] R. Isaacs, *Differential Games: A Mathematical Theory with Applications to Warfare and Pursuit*, Control and Optimization, United States of America, NY: Donver, 1999.
- [12] S. A. Bortoff, "Path planning for UAVs," in *American Control Conference, Proceedings of the 2000*, Chicago, IL, vol. 4, pp. 364-368, Sep 2000.
- [13] Y. Kuwata, *Real-Time Trajectory Design for Unmanned Aerial Vehicles Using Receding Horizon Control*, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, June 2003.
- [14] S. M. Ahmadi, H. Kebraie and H. Moradi, "Adaptive operator selection for path planning in static environments," in *SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys)*, vol. 5, pp. 285-289, 2015.
- [15] P. Kalane, "Target tracking using kalman filter," *International Journal of Science & Technology*, pp. 16-24, April 2012.
- [16] H. Khandani, H. Moradi and J. Y. Panah, "A Real-time coverage and tracking algorithm for UAVs based on potential field," *Proceeding of the 2nd RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics*, Tehran, Iran, October 15-17, 2014.
- [17] B. Graf, J. M. H. Wandosell and C. Schaeffer, "Flexible path planning for nonholonomic mobile robots," in *4th European workshop on advanced Mobile Robots (EUROBOT'01)*, Lund, Sweden, vol. 8, pp. 1-8, 2001.
- [18] K. Yang and S. Sukkarieh, "3D smooth path planning for a UAV in cluttered natural environments," in *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 6, pp. 794-800, 2008.

[۱۹] علیرضا مدیرروستا و مهدی خدابنده، «طراحی یک روش کنترل مد لغزشی انتگرالی تطبیقی برای پایداریسازی زمان محدود و مقاوم پرنده چهارمخه»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحات ۳۲۱-۳۳۲، ۱۳۹۵.

پرنده که سرعت، دقت و مقاومت کنترلی بالایی دارد در [۱۹] ارائه شده است.

## مراجع

- [1] G. T. Lau, *Path Planning Algorithms for Autonomous Border Patrol Vehicles*, Department of Aerospace Studies, University of Toronto, 2012.
- [2] A. Puri, *A Survey of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for Traffic Surveillance*, Department of Computer Science and Engineering, Florida, 2005.
- [3] E. Arvelo, E. Kim and N. C. Martins, "Memoryless control design for persistent surveillance under safety constraints," *Department of Electrical and Computer Engineering and Maryland Robotics Center*, vol. 7, pp. 1-7, 8 Nov 2012.
- [4] N. Nigam and I. Kroo, "Persistent surveillance using multiple unmanned air vehicles," in *Aerospace Conference*, vol. 14, pp. 1-14, March 2008.
- [5] A. Ryan and J. Hedrick, "A mode-switching path planner for UAV-assisted search and rescue," in *Decision and Control and European Control Conference, 44th IEEE Conference on*, vol. 6, pp. 1471-1476, 2005.
- [6] S. Waharte and N. Trigoni, "Supporting search and rescue operations with UAVs," in *Emerging Security Technologies (EST), 2010 International Conference on*, Canterbury, vol. 6, pp 142-147, Sept. 2010.
- [7] G. C. Buttazzo, B. Allotta and F. P. Fanizza, "Mousebuster: a robot for real-time catching," in *Control Systems, IEEE*, vol. 8, pp. 49-56, Feb. 1994.
- [8] U. Frese, B. Bauml, S. Haidacher, G. Schreiber, I. Schaefer and M. Hahnle, "Off-the-shelf vision for a robotic ball catcher," in *Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference on*, Maui, HI, vol. 7, pp. 1623-1629, 2001.
- [9] C. C. Wong, B. C. Lm and C. T. Cheng, "Fuzzy tracking method with a switching grey prediction for mobile robot," in *The 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, vol. 3, pp. 103-106, 2001.