نشریه علمی- پژوهشی مهندسی هوانوردی
سال بیست و دوم، شماره دوم، پاییز ۹۹

طراحی سناریوی پوشش یک منطقه گسترده مرزی توسط گروهی از پهپادها با قابلیت تمرکز بر نواحی اولویت‌دار

سیدمحمدمهدی دهقان*[۱]، محمدعلی خصالی[۲]، الهام مشرقیان[۳]
۱- مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی مالک اشتر
۲- مجتمع دانشگاهی هوافضا - دانشگاه صنعتی مالک اشتر
۳- مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی مالک اشتر
(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۷)

چکیده

پوشش مداوم مناطق مرزی گسترده مستلزم بکارگیری گروهی از پهپادهای همکار می‌باشد. پژوهش‌های پیشین به کمک صفحه مجازی مکانی-زمانی زمینه‌ی مقایسه الگوها و سناریوهای مختلف پوشش را بر اساس معیارهایی همچون زمان بازدید مجدد، درصد پوشش مکانی-زمانی و میزان یکنواختی پوشش فراهم نمود. در ادامه این تحقیقات، مقاله حاضر به دنبال استفاده از مفهوم پوشش مکانی-زمانی برای ارائه روند طراحی خودکار سناریوی پوشش با قابلیت تمرکز بر مناطق اولویت‌دار از قبیل گذرگاه‌ها می‌باشد. سناریوی طراحی شده بر اساس تعداد و توزیع پهپادها در هر فرودگاه، اختلاف زمانی برخاست پهپادها، الگوی حرکت هر یک از پهپادها و سرعت آن‌ها در طول مسیر توصیف می‌گردد. تمرکز بیشتر بر مناطق بااهمیت نیز با تعیین اختلاف زمانی برخاستن پهپادها از فرودگاه‌ها و یا تغییر سرعت آن‌ها بر روی مناطق مورد نظر تأمین می‌شود. فرایند طراحی پیشنهادی قیودی از قبیل حداقل سرعت و حداکثر مداومت پروازی پهپادها، مشخصات مسیر، بار محموله و ... را در تولید مسیرهای مجاز در نظر گرفته و در انتخاب سناریوی نهایی، اولویت‌های کاربر را در خصوص کاهش تعداد پهپادها، افزایش میزان پوشش کل منطقه و کاهش حداکثر و متوسط زمان بازدید مجدد مدنظر قرار می‌دهد. فرایند پیشنهادی در قالب یک نرم‌افزار پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل از آن قابلیت این روش در طراحی سناریوی مناسب بر اساس مطالبات کاربر و قیود موجود را نشان می‌دهد. همچنین سناریوی پیشنهادی با حالتی که پوشش همه نقاط ناحیه مرزی از اولویت یکسان برخوردار است، مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: *همکاری پهپادها، حفاظت از مرز، پوشش هوایی، طراحی سناریو پوشش، صفحه مجازی مکانی-زمانی.*

Cooperative patrolling Scenario design providing the ability to focus on priority areas by a group of UAVs

S. M. M. Dehghan, M. A. Khesali and E. Mashreghian.

Abstract

Continuous aerial patrolling of long borders of a country requires a group of cooperative unmanned aerial vehicles (UAVs). Previous research based on the spatio-temporal virtual plane provided a framework for comparing different patterns and scenarios of patrolling from the point of view of criteria such as revisit time, percentage of spatio-temporal coverage and the degree of uniformity of coverage. Continuing previous research, the present paper uses the concept of spatio-temporal coverage to provide an automated process for patrolling scenario design with the ability to focus on priority areas such as intruder's corridors. The designed scenario is described based on the number and distribution of the UAVs at each airport, the time difference between their take-offs, the movement pattern of each UAV and their speed along the path. More focus on priority areas is provided by adjusting the time difference between taking-off the UAVs from the airports or changing their speed on the interested areas. The proposed process considers practical constraints such as minimum speed and maximum flight duration of UAVs, path specifications, payload specifications, and etc. in

* نویسنده پاسخگو: سید محمدمهدی دهقان، پست الکترونیک: smmd@mut.ac.ir

the production of feasible paths. In the following, the user's priorities regarding reducing the number of UAVs, increasing the coverage percentage, and the reduction of the maximum and average revisit time is considered in selecting the final scenario among the produced feasible path. The proposed process is implemented as a toolbox and the results show the ability of this method to design an appropriate scenario based on user requirements and existing constraints. Using the spatio-temporal concept, the proposed scenario is compared with the basic approach in which covering all parts of the border area has the same priority.

Keywords: *UAV cooperation, Border patrolling, Aerial coverage, Coverage scenario design, Spatial-Temporal virtual plan.*

۱- مقدمه

محافظت از مرزها در برابر ورودهای غیر قانونی، قاچاق کالا، سلاح، مواد مخدر و ... که امنیت کشورها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، از مسائل مورد توجه تمامی دولت‌ها می‌باشد. در ارائه راهکار مناسب برای پوشش مرزها بایستی طول مرز، زیرساخت‌های موجود و مورد نیاز در منطقه، هزینه‌های مرزبانی، حداقل‌سازی نیروهای مستقر، کاهش تعداد گشت‌ها و حداکثرسازی میزان کشفیات، بالا بردن امنیت مرز و مسائل بسیاری از این قبیل را مورد توجه قرار داد. استفاده از تجهیزات نوین از قبیل شبکه‌های حسگری و پهپادها از جمله راهکارهای اصلی برای تأمین توأم این اهداف می‌باشد [۱ و ۲]. در سال ۲۰۱۱ یک ساختار سه لایه شبکه‌ای برای کاربرد حفاظت از مرز براساس فناوری شبکه‌ی حسگرها پیشنهاد شد [۳]. در این روش از شبکه‌ای از حسگرهای چندرسانه‌ای که قابلیت نصب در زیر و روی زمین را دارند، استفاده شده است. در این تحقیق نویسنده به تحلیل یک ضریب پوشش پیشنهادی بر اساس چگالی پوشش منطقه مرزی توسط حسگرها در شرایط توزیع اتفاقی حسگرها در طول مرز در مقایسه با توزیع دستی و قطعی حسگرها توسط کاربر پرداخته است. در مرجع [۴] پیشنهاد شد با استفاده از نشانگری شامل ده گره‌ی حسگر، کارایی شبکه حسگری در پایش مرز با هدف کشف متجاوز مورد آزمایش قرار گیرد. قیمت بالای پیاده‌سازی حسگرهای چندرسانه‌ای بر پایه‌ی دوربین استفاده از این فناوری را در مرزهای بزرگ دچار مشکل می‌کند. علاوه‌بر آن چینش یکنواخت گره‌های حسگر در چنین محیط گسترده‌ای غیر قابل دستیابی است [۵]. مولتی‌روتورها و پهپادهای بال ثابت نیز از دیگر فناوری‌های مورد استفاده در مرزبانی است که فراگیری استفاده از آن نشان‌دهنده میزان کارایی این روش در مرزهای طولانی است [۱ و ۶]. پروژه SBInet به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین پروژه‌های حفاظت از مرز در جهان است که در آن به‌منظور پوشش ۶۰۰۰ مایل از مرزهای آمریکا از سال ۲۰۰۶ از روش‌های گوناگون و نوین همچون حسگرها، استفاده از تعداد زیادی برج مراقبت و مراکز حفاظتی مجهز به GPS و پهپاد استفاده شد [۷]. این پژوهش نشان داد که استفاده از پهپادها یک روش مناسب برای حفاظت از مرز می‌باشد. همچنین این مرجع به مسائلی همچون انتخاب پهپاد و الگوی جستجوی مناسب برای مأموریت حفاظت از مرز با در نظر گرفتن مسائل هزینه‌ای پرداخت. به گفته این مرجع، در ژانویه ۲۰۱۱ بخش اصلی پروژه SBInet به دلیل کارایی پایین و هزینه بسیار بیشتر از مقدار پیش‌بینی‌شده متوقف گردید و تنها بخش مبتنی بر پهپادهای آن ادامه یافت. تحقیقات بر روی استفاده‌ی گروهی از پهپادها، طراحی مسیر و نیز شبکه کردن پهپادها به منظور ارتقای کارایی عملیاتی و افزایش قابلیت‌ها از دیگر کارهای صورت گرفته در راستای استفاده از پهپادها در زمینه‌ی حفاظت از مرز می‌باشد [۸، ۹]. مرجع [۱۰] برای در نظر گرفتن خطر و اهمیت هر منطقه در مأموریت حفاظت از مرز و پایش بیشتر آنها، طراحی مسیر بهینه پهپادها را با استفاده از منطق فازی مد نظر قرار داده است. در این روش، با در نظر گرفتن زمانی ثابت برای پایش مرز، زمان حضور بر روی هر ناحیه از مرز با توجه به میزان اهمیت آن ناحیه مشخص می‌شود.

پوشش مناطق مرزی مستلزم پوشش مداوم و پیوسته همه نقاط مرزی است؛ لیکن پژوهش‌های انجام شده عمدتاً موضوع پوشش مکانی و فاصله زمانی بازدید مجدد را به صورت مجزا مد نظر قرار داده‌اند. از یک سو، مسئله پوشش از دیدگاه مشاهده نقاط مختلف یک منطقه مرزی توسط گروهی از پهپادها تحلیل شده و طراحی مسیر بهینه آنها برای پوشش مکانی انجام گرفته است [۱۱، ۱۲، ۱۳]. از سوی دیگر نیز بر کمینه‌سازی بیشترین زمان بازدید مجدد یک یا چند منطقهٔ مشخص توسط گروه پهپادها تمرکز شده است [۱۴، ۱۵]. پایش مداوم نیز از جمله زمینه‌های تحقیقاتی مرتبط با موضوع مورد نظر این مقاله است که به مسئله پوشش پیوسته مناطق مرزی به صورت یافتن کوتاه‌ترین مسیر برای سر زدن مداوم به یک سری سلول‌های پر اهمیت می‌پردازد [۱۶]. پژوهش مشابهی ماموریت پایش مداوم را با ارائه ساختاری برای مدیریت بهینه نیرو و باتری حل نموده است [۱۷]. از جمله پژوهش‌هایی که بهینه‌سازی چند هدفی را مد نظر قرار داده‌اند،

زمان مورد نیاز برای اتمام ماموریت جستجوی هدف -که مستلزم پوشش بهینه منطقه است- و زمان مورد نیاز برای قرار گرفتن پهپادها در موقعیت مناسب برای برقراری ارتباطات شبکه‌ای را توأم با یکدیگر بهینه نموده است [۱۸]. مرجع [۱۹] نیز کمترین بیشینه زمان بازبینی مجدد را در بازبینی‌های متوالی در مأموریت پایش مداوم دنبال کرده است. کمینه‌سازی توأم زمان بازبینی مجدد و تأخیر ارسال اطلاعات اخذ شده از منطقه پوشش به ایستگاه مرکزی کنترل در شرایطی که محدوده برقراری ارتباطات رادیویی پهپادها کمتر از فاصله منطقه مأموریت تا ایستگاه کنترل است، در مرجع [۲۰] مورد توجه قرار گرفته است.

مفهوم پوشش مکانی-زمانی در پژوهش‌های پیشین نویسندگان مقاله حاضر، چارچوبی برای تحلیل پوشش همه نقاط منطقه مرزی در طول زمان را ارائه نمود [۲۱، ۲۲]. این چارچوب به تحلیل وضعیت مشاهده تک‌تک نقاط یک منطقه مرزی گسترده در کنار یکدیگر و در طول زمان پرداخت. به عبارت دیگر، این ساختار رفتار تظاهری گروهی از پهپادها را در پوشش مناطق مرزی در طول زمان به صورت یکپارچه مورد مطالعه قرار داد. مقاله حاضر به دنبال ارائه فرایندی برای توسعه قابلیت‌های تحلیلی این مفهوم و ابزار صفحه مجازی مکانی-زمانی به قابلیت‌های طراحی به منظور تنظیم رفتار تظاهری پهپادهای همکار برای تأمین پوشش مطلوب مناطق اولویت‌دار می‌باشد. این قابلیت به کمک تعیین تعداد پهپادها در هر یک از فرودگاه‌ها، تعیین اختلاف زمانی پرواز هر یک از پهپادها نسبت به یکدیگر و سرعت پرواز هر یک از آنها فراهم می‌گردد.

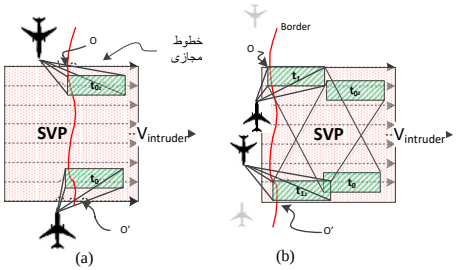
در ادامه ابتدا معرفی اجمالی از چهارچوب و ابزار ارزیابی صفحه مجازی مکانی- زمانی ارائه شده است. روش حل مسئله که شامل ورودی‌ها، قیود، فرضیه‌های طراحی و خروجی فرایند برای توصیف سناریوی پیشنهادی و تحلیل دقیق‌تر آن می‌باشد در بخش سوم مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش چهارم روند کلی طراحی سناریو ارائه شده است. تأمین پوشش مطلوب مناطق مهم که شامل محاسبه‌ی اختلاف فاز و تغییر سرعت، میزان تمرکز پوشش در ناحیه‌ی مورد نظر، تعیین زمان بازدید مجدد در دو روش اختلاف فاز و تغییر سرعت می‌باشد در بخش پنجم بیان شده است. در این بخش همچنین اثر روش اختلاف فاز بر انتخاب الگوی حرکت بررسی شده است. بخش ششم به ارائه‌ی نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی تحقق مطالبات کاربر پرداخته و درصد پوشش را در حالت مطالبه توزیع یکنواخت مناطق و حالت تمرکز بر بعضی مناطق مقایسه کرده است. بخش آخر مقاله نیز به جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و بیان فعالیت‌های آتی اختصاص یافته است.

۲- معرفی صفحه مجازی مکانی-زمانی به عنوان ابزار ارزیابی و طراحی سناریو

در این مقاله جهت طراحی و ارزیابی سناریوی پوشش مرزی از ابزاری به نام صفحه مجازی مکانی-زمانی۱ یا SVP استفاده می‌شود [۲۱، ۲۲]. این ابزار قادر است تا علاوه‌بر نمایش میزان پوشش مکانی منطقه توسط پهپاد، کیفیت و چگونگی توزیع این پوشش در بعد زمان را نیز به نمایش بگذارد. برای معرفی ساده‌تر مفهوم پوشش مکانی-زمانی و صفحه مجازی مکانی-زمانی به کمک یک مثال، فرض می‌شود یک پهپاد مسئولیت پوشش یک ناحیه‌ی مرزی با ابعاد W*L را داشته باشد، که در آن L طول مرز بوده و برای سادگی مسئله، W عرض ناحیه مرزی برابر با عرض ناحیه‌ی قابل رؤیت توسط پهپاد در نظر گرفته شده است. در صورتی که پهپاد بتواند نیمی از طول منطقه یا همان W*L/2 را پوشش دهد می‌توان گفت این سامانه پوشش مکانی ۵۰ درصدی را در منطقه‌ی مرزی مذکور ایجاد نموده است.

از جمله مشکلات ارائه‌ی نتایج پوشش بر اساس چنین معیاری این است که چگونگی توزیع این پوشش و نیز زمان آن قابل ارائه نمی‌باشد. در صورتی که کاربر بخواهد بر اساس زمان‌بندی این رؤیت‌ها و پوشش‌ها برنامه‌ای تهیه نماید با این معیار نمی‌تواند به درکی از میزان، چگونگی و کیفیت پوشش برسد. با استفاده از صفحه مجازی مکانی-زمانی می‌توان دقیقاً به نحوه‌ی توزیع پوشش در منطقه، زمان‌بندی حضور و عدم حضور، درک نقاط خطرناک و زمان‌های حساس و غیر حساس در هر بخش پی برد و مشکلات سناریوهای مختلف پوشش را به سادگی مشاهده نمود و برای حل آن راهکار مناسب در نظر گرفت. طول صفحه مجازی مکانی-زمانی برابر با طول ناحیه مورد پایش این پهپاد در مرز (Lu) و عرض آن (Li) برابر با حداکثر جابه‌جایی عامل‌ها با سرعت Vi در طول دوره زمانی (T) می‌باشد. دوره زمانی با توجه به سرعت پهپاد (Vu) و نیز طول قسمت مورد پایش در نظر گرفته می‌شود. با این کار می‌توان به‌جای بررسی تمام مرز در بازه زمانی طولانی تنها بخشی از مرز را در یک دوره تناوب بررسی نمود. مناطق رؤیت شده بر اساس سرعت پهپاد، سرعت عامل متجاوز و عرض و طول ناحیه قابل رؤیت برای پهپاد (به ترتیب W_y و W_x) مشخص می‌شود. عرض ناحیه قابل رؤیت تابع عوامل مختلفی همچون ارتفاع پرنده، عرض ناحیه دید دوربین و وجود یا عدم وجود جیمبال برای دوربین می‌باشد.

در هر لحظه با توجه به موقعیت پهپاد(ها) قسمتی از این صفحه در دید خواهد بود. ناحیه دید نیز با حرکت پهپاد جابه‌جا می‌گردد. از کنار یکدیگر قرار گرفتن نواحی دید پهپاد در طول زمان، بخشی از صفحه مجازی پوشش داده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی آن است که آیا امکان پیدا کردن عامل متجاوزی که از موقعیتی از مرز با یک اختلاف زمانی نسبت به شروع پرواز پهپاد، وارد منطقه جستجو شده است وجود دارد یا خیر. **Error! Reference source not found.** صفحه مجازی و حرکت آن را نشان داده که در آن نواحی رؤیت شده توسط پهپاد به‌صورت هاشور خورده نشان داده شده است. هر صفحه مجازی متشکل از مجموعه‌ای از خطوط می‌باشد (خطوط مجازی) که این خطوط در واقع عوامل متجاوز فرضی وارد شده از یک نقطه از مرز در زمان‌های مختلف می‌باشد که با سرعتی معادل حداکثر سرعت عوامل متجاوز پیشروی می‌کنند [۲۱]. از جمله مزایا و قابلیت‌های مهم این روش بدست آوردن زمان بازدید مجدد برای تک تک نقاط مرزی در هر بازه‌ی زمانی مورد نظر است. این پارامتر حتی در شرایط وجود تعداد زیادی پهپاد با دوره‌های تناوب گوناگون و زمان‌های پرواز مختلف برای هر نقطه از منطقه به صورت مجزا و نیز به صورت متوسط برای یک منطقه قابل محاسبه است. قابلیت تخمین محدوده‌ی مکانی حضور هدف از پیش دیده شده در زمان‌های مختلف به کمک این روش از دیگر مزایای آن است که در امر طراحی سناریو و نیز کشف اهداف از دست رفته به کاربر کمک شایانی خواهد نمود. شرح مکانیزم استفاده از صفحه‌ی مجازی مکانی-زمانی در منابع [۲۱، ۲۲] آمده است.



شکل ۱- ارزیابی پوشش منطقه در طول زمان به کمک صفحه مجازی مکانی-زمانی[۲۱]

۳- ورودی‌ها، قیود و خروجی‌های فرایند طراحی پیشنهادی

فرایند پیشنهادی برای طراحی سناریو پوشش مناطق مرزی وابسته به تعدادی ورودی است که بایستی توسط کاربر مشخص شوند. همچنین بایستی خروجی‌های فرایند طراحی برای توصیف سناریوی پیشنهادی مشخص شوند. از سوی دیگر تعدادی قید و فرض بر فرایند طراحی حاکم است که بایستی در سناریوی پیشنهادی در نظر گرفته شود. با توجه به این سه مؤلفه، سناریو یا سناریوهای پیشنهادی مشخص می‌شود. کارایی سناریوی پیشنهادی به کمک معیارهای مختلف قابل ارزیابی می‌باشد که خروجی‌های فرایند علاوه‌بر سناریوی پیشنهادی شامل مقادیر هر یک از این معیارها نیز می‌باشد.

۳-۱- ورودی‌های فرایند طراحی

ورودی‌هایی که توسط کاربر بایستی برای فرایند طراحی تأمین شود را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود. بخش اول شامل تنظیمات اولیه می‌باشد که شامل مشخصات مرز، پهپاد، محموله و عامل متجاوز است و بخش دوم ورودی‌ها، خواسته کاربر در خصوص محدوده پوشش مطلوب را دریافت می‌کند.

۳-۱-۱- تنظیم مقادیر اولیه

ورودی‌های مربوط به تنظیمات اولیه از چهار بخش تشکیل می‌شود؛ الف) ورودی‌های مربوط به معرفی منطقه مرزی همچون موقعیت مرز، ارتفاع و عوارض در نقاط مختلف مرز، مناطق پرخطر و در صورت امکان میزان اهمیت هر منطقه نسبت به مناطق دیگر، محل فرودگاه‌ها و ...، ب) ورودی‌های مربوط به پهپاد از قبیل حداکثر سرعت، حداقل سرعت، حداقل شعاع گردش، ارتفاع پروازی، اختلاف ارتفاع قابل قبول، حداکثر ارتفاع، حداکثر شتاب جانبی قابل تحمل و ...، پ) ورودی‌های مربوط به مشخصات محموله (دوربین) شامل کیفیت، برد قابل رؤیت، مشخصات جیمبال، زاویه‌ی دید در دو راستا و ...، ت) مشخصات عامل متجاوز از قبیل ابعاد به صورت حدودی، برآورد کاربر از حداکثر سرعت نفوذ و ... .

۳-۱-۲- ورودی‌های انتخابی کاربر

علاوه‌بر مقادیر اولیه‌ای که در ابتدای فرایند طراحی به عنوان ورودی دریافت می‌شود، بایستی خواسته کاربر در خصوص محدوده پوشش مطلوب کل، محدوده پوشش مطلوب هر منطقه و بازه زمان بازدید مجدد کل منطقه نیز به عنوان ورودی مشخص شود. سناریوی پیشنهادی بایستی این مقادیر مطلوب را تأمین نماید. همچنین کاربر می‌تواند از میان سه پارامتر تعداد پهپاد، درصد پوشش و یا زمان بازدید مجدد یکی را به عنوان اولویت اصلی خود انتخاب کند. در این صورت از میان سناریوهایی که بازه‌های مطلوب کاربر را تأمین می‌نماید، سناریویی که بهترین مقدار پارامتر اولویت‌دار کاربر را تأمین نماید، انتخاب خواهد شد. همچنین سایر ورودی‌هایی که از کاربر دریافت می‌شود و در فرایند طراحی تأثیرگذار است عبارتند از:

- قید کاربر در خصوص برابر بودن یا نبودن فواصل زمانی حرکت پهپادها: عدم وجود پهپاد کافی، ملاحظات اجتناب از برخورد، بهینه‌سازی پوشش هر پهپاد و ... در تنظیم فواصل زمانی بین حرکت پهپادها و نیز یکنواختی آن نقش خواهد داشت.

- قید کاربر در خصوص نیاز و یا عدم نیاز به پوشش یکنواخت برای طول مرز: در صورت انتخاب گزینه پوشش یکنواخت، تعداد پهپادها در هر منطقه با توجه به ابعاد و قیود منطقه طوری تنظیم می‌گردد که میزان پوشش همه مناطق تقریباً مشابه باشد. در غیر این صورت کاربر برای هر محدوده به صورت مجزا محدوده‌ی درصد پوشش قابل قبول خود را تعیین می‌کند که بر چینش و توزیع تعداد پهپادها بین فرودگاه‌ها تأثیر خواهد شد.

- درخواست تمایل یا عدم تمایل کاربر به یکدست بودن زمان‌های بازدید مجدد: این امر در انتخاب الگوی حرکت و نیز تعیین اختلاف فاز بین پروازها تأثیرگذار خواهد بود.

۲-۳- خروجی‌های فرایند طراحی

می‌توان خروجی‌های فرایند طراحی را به دو بخش تقسیم نمود. بخش اول مربوط به توصیف سناریوی پیشنهادی است. بخش دیگر مربوط به تحلیل نتایج سناریوی پیشنهادی است که به طراح عملیات کمک می‌کند از چگونگی پوشش مطلع شده و نقاط قوت و ضعف سناریوی پیشنهادی را تحلیل نماید.

۱-۲-۳- خروجی‌های مربوط به توصیف سناریوی پیشنهادی

سناریوی پیشنهادی فرایند طراحی توسط مؤلفه‌های زیر توصیف می‌گردد:

الف) تعداد پهپادها، ب) چگونگی چینش پهپادها در هر منطقه، پ) الگوی پرواز، ت) اختلاف فاز بین پروازها. لازم به ذکر است که الگوی پروازی که نیازمند تعداد پهپاد کمتر می‌باشد و زمان بازدید مجدد بهتری را بر اساس قیود کاربر فراهم می‌نماید، در نهایت انتخاب می‌شود.

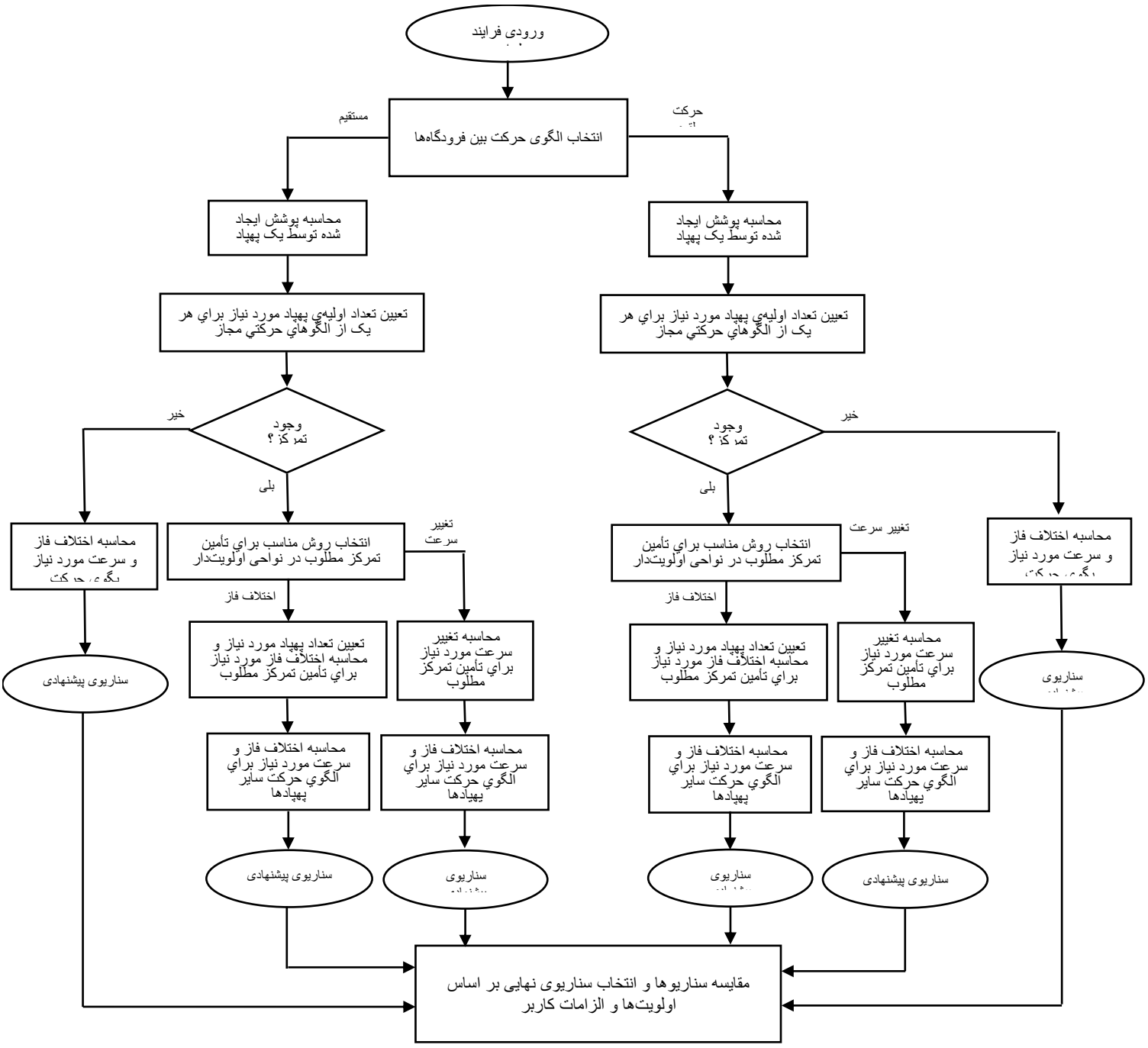
۲-۲-۳- خروجی‌های فرایند طراحی برای تحلیل دقیق‌تر سناریوی پیشنهادی

همانطور که گفته شد پوشش مکانی به‌صورت مساحت رؤیت شده به مساحت کل منطقه مرزی تعریف می‌شود اما پوشش مکانی-زمانی علاوه‌بر پوشش مرز به بعد زمان نیز توجه دارد و در آن پوشش کامل به معنی پوشش تمام نقاط به‌طور تمام‌وقت می‌باشد. با پایش منطقه به کمک پهپاد تمام طول مرز پوشش داده می‌شود و به عبارتی پوشش کامل مکانی فراهم می‌شود. اما پهپاد مجهز به دوربین در هر لحظه ناحیه محدودی با عرض و طول مشخص را مشاهده می‌کند. این ناحیه قابل رؤیت دوربین در طی زمان با پوشش مکانی-زمانی رابطه مستقیمی دارد. بنابراین ارزیابی کامل سناریوهای پیشنهادی فرایند طراحی مورد نظر این مقاله، توسط صفحه مجازی مکانی-زمانی انجام می‌گیرد. با استفاده از اطلاعات این صفحه، خروجی‌های دیگری شامل درصد پوشش کل، درصد پوشش هریک از نواحی، میانگین زمان بازدید مجدد، حداکثر زمان بازدید مجدد برای هر نقطه‌ی مرزی، نمودار هیستوگرام حداکثر زمان بازدید مجدد، نمودار هیستوگرام زمان بازدید مجدد، نمودار محدوده‌ی زمان‌های بازدید مجدد نقاط مختلف مرز برای ارزیابی آسان‌تر سناریوی پیشنهادی در اختیار کاربر قرار می‌گیرد (توضیح بیشتر نمودارها در مرجع [۲۲]). همچنین چگونگی توزیع پوشش مناطق مختلف - در صورتی که کاربر این انتخاب را به فرایند طراحی سپرده باشد- نیز به عنوان خروجی فرایند طراحی مشخص خواهد شد.

۳-۳- قیود و فرضیه‌های طراحی

قیود و فرضیه‌های حاکم بر فرایند طراحی سناریوی پرواز شامل موارد زیر می‌باشد:

- سرعت پهپاد بایستی بیش از سرعت عامل متجاوز باشد؛
- طول منطقه مرزی باید در حدی باشد که دور زدن پهپاد برای بازگشت در آن قابل صرف نظر باشد؛
- بیش از یک پهپاد و بیش از یک فرودگاه بکار گرفته شود؛
- محور دوربین پهپاد بر سطح زمین عمود باشد (در حالت کلی زاویه بین محور دوربین با سطح زمین قابل جبران‌سازی است و این فرض مقاله از کلیت روش پیشنهادی نمی‌کاهد)؛
- از همپوشانی‌های جزئی در پوشش مناطق در اثر عبور پهپادها از کنار هم و ... صرف نظر می‌شود.



شکل ۱- فرایند کلی طراحی سناریوی پوشش

۴- فرایند طراحی سناریوی پوشش

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های پیشین، فرایند طراحی سناریوی پوشش در شکل **۱** ارائه شده است. در ادامه، توضیحات بیشتر در خصوص بعضی از بخش‌های فلوچارت که ضرورت داشته است، ارائه شده است.

الف- انتخاب الگوی حرکت بین فرودگاه‌ها

الگوی حرکت بین فرودگاه‌ها با توجه به ارزیابی مرز از نظر موقعیت و فاصله با فرودگاه‌ها انتخاب می‌شود. در حالت کلی ممکن است همه‌ی الگوها قادر به پوشش مرز تعیین شده با موقعیت‌های فرودگاهی روی آن نباشند. برای مثال در صورتی که در نزدیکی ابتدا و انتهای بخش منتخب مرز، فرودگاهی وجود نداشته باشد با

انتخاب الگوی حرکت مستقیم بخش‌هایی از مرز بدون پوشش باقی می‌ماند. بنابراین در بسیاری از مواقع ممکن است از اولویت یک الگوی حرکتی کاسته شده و یا اصلاً قابل استفاده نباشد.

ب- تعیین تعداد اولیه‌ی پهپاد مورد نیاز برای هر یک از الگوهای حرکتی مجاز

تعیین تعداد اولیه‌ی پهپاد مورد نیاز برای هر یک از الگوهای حرکتی مجاز بر اساس تخمین اولیه و نیز شرایط مطلوب کاربر همچون حداکثر زمان بازدید مجدد برای هر منطقه و کل مرز و میزان یکنواختی مورد انتظار در پوشش هر منطقه صورت می‌گیرد.

ج- انتخاب روش مناسب برای تأمین تمرکز مطلوب در نواحی اولویت‌دار

با توجه به مناطق و شرایط مدنظر کاربر برای تمرکز پوشش، روش تمرکز انتخاب می‌شود. برای مثال در صورتی که محدودیت در مداومت پرواز یا تناوب پوشش وجود داشته باشد نمی‌توان تأکید زیادی بر روی روش تغییر سرعت داشت. از طرف دیگر در صورتی که تمرکز بر منطقه به صورت دائم مدنظر باشد تغییر سرعت گزینه‌ی اول خواهد بود؛ ولی در صورتی که تغییر تمرکز برای یک بازه‌ی کوتاه نیاز باشد استفاده از روش اختلاف فاز مفید می‌باشد. گزینه ترکیبی نیز برای شرایطی است که بطور صریح و دقیق نمی‌توان یک گزینه را انتخاب نمود و باید تلفیقی از مزایا و معایب هر دو را برای رسیدن به حالت بهینه در نظر گرفت. توضیح دقیق‌تر تأثیر این انتخاب‌ها در ادامه مقاله ذکر خواهد شد.

د- محاسبه اختلاف فاز و سرعت مورد نیاز

با توجه به اهمیت موضوع، محاسبه اختلاف فاز و سرعت مورد نیاز برای الگوی حرکت پهپادها در ادامه ذکر خواهد شد.

۵- تحلیل روش‌های مختلف تأمین پوشش مطلوب مناطق اولویت‌دار

امکان تعیین مناطقی که نیاز به تمرکز بیشتری برای پوشش دارند از مهمترین قابلیت‌های روش پیشنهادی در این مقاله است. بر این اساس برای ایجاد تمرکز بیشتر بر روی مناطق تعیین شده دو مکانیزم مجزا در نظر گرفته شده است. مکانیزم اول ایجاد تمرکز بر اساس ایجاد و تنظیم اختلاف فاز بین حرکت پهپادها از یک فرودگاه می‌باشد و مکانیزم دوم بر تغییر سرعت هر پهپاد استوار است. به کمک این دو مکانیزم و یا ترکیبی از آن‌ها می‌توان میزان تمرکز بر یک منطقه‌ی خاص و یا چند منطقه را افزایش داد و تمرکز بر بخش‌هایی را ثابت نگاه داشت و در بخش‌های غیر ضروری تمرکز پوشش را کم نمود. همچنین در شرایطی می‌توان تمرکز را به صورت موقت در بخشی از منطقه افزایش داد بدون آنکه بر بار سیستم افزوده شود. به عبارت دیگر، سناریو را می‌توان به نوعی تنظیم کرد که در بخشی از یک تناوب تمرکز بیشتر و در باقی دوره تمرکز کمتری در منطقه وجود داشته باشد. هر دو مکانیزم دارای ظاهری ساده و قابلیت عملیاتی کردن بالا می‌باشند ولی برای اجرا و طراحی آن باید نکاتی را مد نظر قرار داد که در ادامه اشاراتی به آن‌ها خواهد شد.

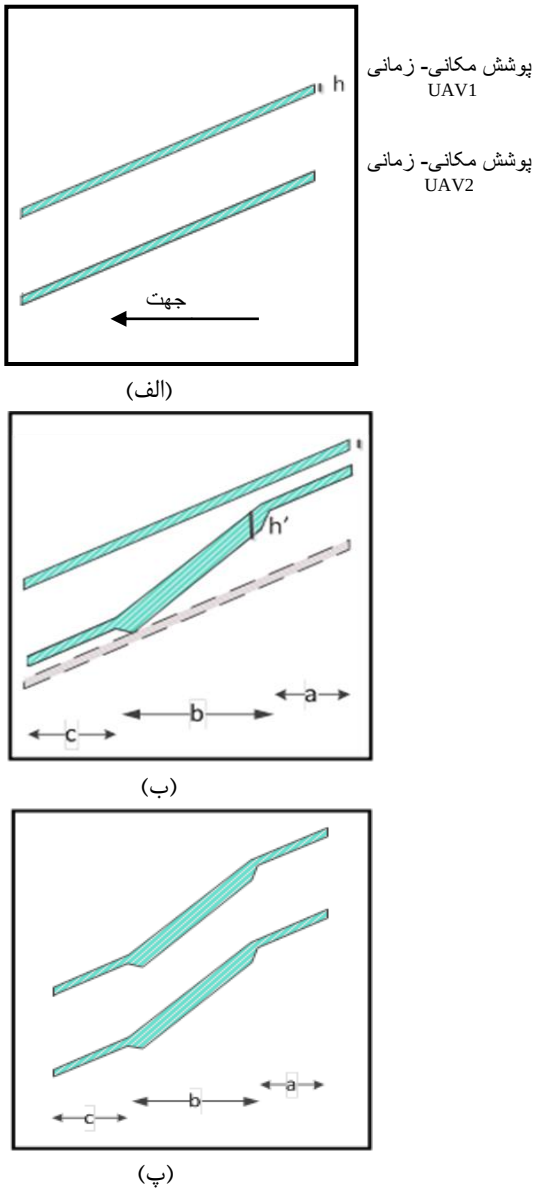
در شکل **۲**، بخشی از صفحه‌ی مجازی مکانی-زمانی مربوط به یک پوشش توسط دو پهپاد به نمایش درآمده است که اختلاف فاز پرواز دو پهپاد با $d\varphi$ و عرض مؤثر ناحیه‌ی قابل رؤیت هر پهپاد با h نشان داده می‌شود. در شکل **۳**- الف دو پهپاد با اختلاف فاز $d\varphi$ در حال پوشش دادن منطقه می‌باشند. در شکل **۳**- ب پرنده‌ی دوم پرواز را با اختلاف فاز کمتری نسبت به حالت (الف) آغاز نموده (ناحیه‌ی a) و در ناحیه‌ی b سرعت حرکت پهپاد نیز نسبت به حالت قبل (ناحیه a) کاهش پیدا می‌کند. به واسطه‌ی این تغییر سرعت در اختلاف فاز نیز تغییراتی ایجاد می‌شود. با توجه به کاهش سرعت در ناحیه b، عرض مؤثر ناحیه‌ی قابل رؤیت (h') بیشتر می‌شود. در ناحیه‌ی c حرکت به سرعت قبل (مشابه با سرعت در ناحیه a) بازگشته و روند پایش با اختلاف فاز جدید و زمان بازدید مجدد متفاوتی ادامه می‌یابد. در حالت کلی می‌توان گفت a وb مناطق نیازمند تمرکز بالاتر هستند. البته تمرکز در این دو حالت با هم متفاوت است. در ناحیه a تمرکز مقطعی در اثر اختلاف فاز و در ناحیه b تمرکز بواسطه هر دو عامل اختلاف فاز و تغییر سرعت بوجود می‌آید. در این مثال برای اجمال هر دوی این حالت‌ها در یک شکل گنجانده شده است. در شکل **۳**- پ نیز برای ایجاد تمرکز در ناحیه‌ی b تنها از عامل تغییر سرعت استفاده شده است. با توجه به تغییر یکسان سرعت هر دو پهپاد، اختلاف فاز حرکت آن‌ها تغییر نکرده است. در حالت کلی، عرض مؤثر ناحیه‌ی قابل رؤیت هر پهپاد (h) تابعی از سرعت پهپاد (V_{UAV})، سرعت عامل مهاجم (V_{int})، میدان دید افقی (FOV_x)، میدان دید عمودی (FOV_y)، ارتفاع پرواز(H_{flight})، ارتفاع سطح زمین از سطح دریا (H_{earth}) و زمان می‌باشد (رابطه (۱)).

$$h = F\left(t\ ,\ V_{UAV}\ ,\ V_{int}\ ,\ FOV_x\ ,\ FOV_y\ ,\ H_{flight}\ ,\ H_{earth}\right) \qquad (۱)$$

۵-۱- محاسبه اختلاف فاز مورد نیاز برای تأمین تمرکز مطلوب

همانطور که گفته شد یکی از روش‌های تأمین پوشش مطلوب استفاده از اختلاف فاز آغاز حرکت پهپادها از فرودگاه‌های

مختلف می‌باشد. برای این منظور، ابتدا کاربر بازه‌ی زمانی مورد تمرکز و میزان افزایش پوشش مورد نظر خود را تعیین می‌کند. برای بازه‌ی



شکل ۲- تصویر شماتیک از تغییر صفحه‌ی مجازی، الف) پوشش مکانی-زمانی تأمین شده توسط دو پهپاد با اختلاف فاز مشخص (حالت مبنا برای مقایسه با حالت‌های بعدی)، ب) پوشش مکانی-زمانی ناشی از تغییر اختلاف فاز، تغییر سرعت و تغییر اختلاف فاز ناشی از تغییر سرعت برای یکی از پرنده‌ها، پ) پوشش مکانی-زمانی ناشی از تغییر سرعت همه‌ی پهپادها در ناحیه‌ی b.

زمانی a به صورت درصدی از T و محدوده‌ی مدنظر کاربر در خصوص درصد افزایش پوشش b (حداقل) و c (حداکثر)، رابطه‌ی ۲ برقرار است:

$$n_{\min} = n \times \left[\frac{a}{100} \times (1+b)\right]$$
$$n_{\max} = n \times \left[\frac{a}{100} \times (1+c)\right] \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، n تعداد کل پهپادها در فرودگاه مورد نظر است که بخشی از آن براساس رابطه (۲) برای تأمین پوشش مطلوب کاربر به ناحیه مورد تمرکز اختصاص می‌یابد. $n_{\min}$ و $n_{\max}$ به ترتیب حداقل و حداکثر تعداد پهپادی است که برای تأمین حداقل و حداکثر پوشش مورد نظر کاربر بایستی بکار گرفت. لازم به ذکر است که این اعداد باید برای هر فرودگاه (ناحیه) به صورت مجزا محاسبه گردد. دلیل در نظر گرفتن حداکثر برای پوشش مطلوب، این است که بالا بردن تمرکز موجب کاهش تمرکز بر سایر بخش‌ها خواهد شد و این امر لزوماً مطلوب نخواهد بود. در ادامه با در نظر گرفتن قید اشباع برای تعداد پهپادهای موجود در منطقه، تعداد پهپاد مورد نیاز برای تمرکز را به آن بازه اختصاص داده و بر حسب آن اختلاف فاز بین حرکت پهپادها در آن بازه با استفاده از رابطه (۳) بدست می‌آید. در نهایت ماتریس اختلاف فاز پروازهای مختلف، که سطرهای آن فروگاه‌ها و ستون‌های آن پهپادها می‌باشند، را می‌توان از رابطه‌ی (۳) بدست آورد:

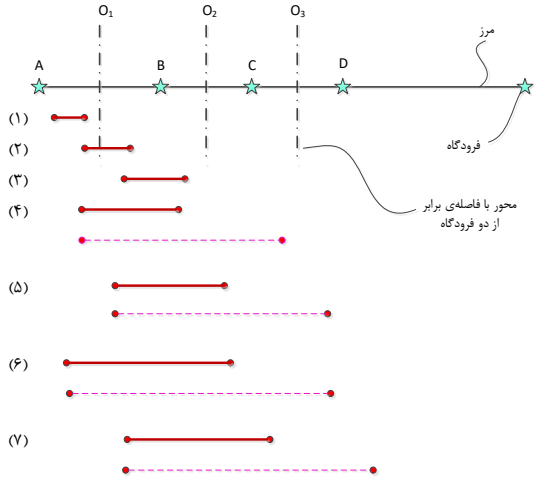
$$d\varphi(i) = \frac{100-a}{(n_i - n_d)+1}$$
$$d\varphi_C(i) = \frac{a}{n_d+1} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) n_i تعداد کل پهپادها در فرودگاه i-ام و n_d تعداد پهپادهای محاسبه شده از رابطه (۲) در فرودگاه i-ام می‌باشد. اختلاف فاز پروازها در فرودگاه i-ام برای پهپادهایی که در تمرکز پوشش مشارکت ندارد از رابطه $d\varphi(i)$ و برای پهپادهایی است که تمرکز پوشش بر عهده آن‌ها می‌باشد از رابطه $d\varphi_C(i)$ محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که با توجه به اولویت کاربر، n_d می‌تواند برابر با $n_{\min}$ یا $n_{\max}$ انتخاب شود و یا با توجه به سایر شرایط تأثیرگذار در انتخاب تعداد پهپادها، می‌تواند بین این دو مقدار در نظر گرفته شود.

۲-۵- اثر روش اختلاف فاز بر انتخاب الگوی حرکت

وقتی از روش اختلاف فاز برای تأمین پوشش مورد نظر استفاده می‌شود ممکن است نتوان از الگوهای حرکت از قبل انتخاب شده استفاده کرد و یا ممکن است بتوان الگوی مناسب‌تری پیدا نمود. این در حالی است که وقتی از روش تغییر سرعت

استفاده می‌شود مکانیزم انتخاب الگو تغییری نمی‌کند. در حالت کلی که تعدادی فرودگاه با تعداد پهپادهای متفاوت وجود دارد و بخش‌هایی از مرز با ابعاد مختلف به عنوان نواحی مورد نظر کاربر برای تغییر الگوی پوشش انتخاب می‌گردد، از فرایند زیر برای تعیین الگوی حرکت با توجه به اختلاف فاز پرواز پهپادهای هر یک از فرودگاه‌ها استفاده می‌شود. در این حالت اولویت بر انتخاب الگویی قرار می‌گیرد که تعداد منطقه‌ی کمتری را درگیر نماید. با توجه به ماهیت الگوها در صورتی که ناحیه‌ی مورد تمرکز پیش از اولین فرودگاه و یا پس از آخرین فرودگاه باشد به دلیل عدم توانایی الگوی مستقیم در پوشش این مناطق، الگوی حرکت حول فرودگاه انتخاب می‌گردد. برای انتخاب الگو در سایر حالت‌ها، ابتدا باید حالت‌های ممکن برای مناطق مورد تمرکز بررسی گردد. برای این منظور، مناطق مورد تمرکز را می‌توان با توجه به شکل **۳**، به چند حالت زیر تقسیم نمود. محورها نشان‌دهنده نقاطی در حد فاصل دو فرودگاه مجاور است که دارای فاصله یکسانی از هر دو فرودگاه باشند و فقط به دلیل تمایز با فرودگاه‌ها با یک محور نمایش داده شده‌اند.



شکل ۳- انواع گوناگون مناطق مورد نظر برای تمرکز

۱- تمرکز در ناحیه‌ای بین فرودگاه A و محور O_1 که در این حالت، استفاده از هر دو الگوی مستقیم و الگوی حرکت حول فرودگاه یکسان است؛

۲- تمرکز در ناحیه‌ای بین فرودگاه A و B که در این حالت استفاده از الگوی مستقیم بهینه‌تر است؛

۳- تمرکز در ناحیه‌ای بین محور O_1 و محور O_2 که در این حالت استفاده از الگوی حرکت حول فرودگاه بهینه‌تر است؛

۴- تمرکز در ناحیه‌ای بین فرودگاه A و محور O_2 که در این حالت، استفاده از هر دو الگوی مستقیم و الگوی حرکت حول فرودگاه یکسان است؛

۵- تمرکز در ناحیه‌ای بین محور O_1 و فرودگاه C که در این حالت نیز استفاده از هر دو الگوی مستقیم و الگوی حرکت حول فرودگاه یکسان است؛

۶- تمرکز در ناحیه‌ای بین فرودگاه A و C که در این حالت استفاده از الگوی مستقیم بهینه‌تر است؛

۷- تمرکز در ناحیه‌ای بین محور O_1 و محور O_3 که در این حالت استفاده از الگوی حرکت حول فرودگاه بهینه‌تر است.

در مورد خطوط نقطه‌چین، بایستی به این نکته توجه کرد که با افزایش طول ناحیه‌ی مورد تمرکز در حالت‌های تشریح شده در بندهای ۴ و ۷ تا محورهای بعد و بندهای ۵ و ۶ تا فرودگاه‌های بعد تغییری در اولویت‌های انتخاب الگو حاصل نمی‌شود. در واقع این خطوط نشان‌دهنده شکل دیگری از همان حالت‌های کلی می‌باشند.

یک راه کلی برای انتخاب الگوی حرکت، استفاده از الگوی حرکت حول فرودگاه برای تمام حالت‌های هفتگانه‌ی فوق‌الذکر است. به عبارت دیگر، الگوی حرکت حول فرودگاه در تمام حالت‌ها قابل استفاده می‌باشد. مشکل این راه‌حل محدود نمودن بیش از حد کاربر و نیز احتمال بهتر بودن الگوی حرکت بین فرودگاه‌ها می‌باشد. راهکاری که در این شرایط منطقی به نظر می‌رسد، بررسی هر دو الگوی قابل استفاده در منطقه و تعیین الگویی که تعداد کمتری از مناطق تحت پوشش را درگیر شرایط خاص محاسبه اختلاف فاز برای تأمین پوشش مورد نظر می‌کند، می‌باشد. برای این منظور، الگوریتم پیشنهادی تک‌تک مناطق مورد تمرکز نواحی درگیر را برای الگوهای مختلف بررسی کرده و پس از حذف مناطق تکراری در هریک از این الگوها، تعداد مناطق درگیر در هر الگو را محاسبه کرده و الگوی دارای تعداد ناحیه درگیر کمتر را انتخاب می‌کند. به طور مثال اگر شش ناحیه تحت پوشش وجود داشته باشد و از بین این شش ناحیه، در دو ناحیه استفاده از هر دو الگوی مستقیم و الگوی حرکت حول فرودگاه یکسان، در یک ناحیه الگوی حرکت حول فرودگاه و در سه ناحیه دیگر الگوی مستقیم بهینه‌تر باشد، مناطقی که استفاده از هر دو الگو یکسان است حذف می‌شوند و از بین مناطق باقی‌مانده با توجه به بیشتر بودن استفاده از الگوی مستقیم در مناطق و با فرض مجاز نبودن استفاده از الگوی ترکیبی، الگوی مستقیم به عنوان الگوی بهینه برای پوشش کل منطقه انتخاب می‌شود.

۳-۵- محاسبه‌ی میزان تمرکز پوشش در ناحیه‌ی مورد نظر در روش اختلاف فاز

بایستی در نظر داشت که به دلایل مختلف از قبیل رند شدن تعداد پهپادهای مورد نیاز برای منطقه مورد تمرکز و همپوشانی‌های احتمالی میزان پوشش ناحیه مورد نظر بعد از محاسبه تعداد پهپادها و اختلاف فاز حرکت آن‌ها با مقادیر از پیش تعیین شده توسط کاربر ممکن است اندکی تفاوت داشته باشد. با توجه به اینکه میزان درصد پوشش کل منطقه و متوسط زمان بازدید مجدد در حالت تمرکز با اختلاف فاز نسبت به حالت عادی تفاوتی نمی‌کند (و تنها در درصدی از دوره‌ی زمانی افزایش و در سایر بخش‌ها طوری کاهش می‌یابد که درصد کلی بدون تغییر باقی بماند)، می‌توان با استفاده از میزان درصد پوشش کل در منطقه‌ی مورد نظر و زمان بازدید مجدد مربوطه، میزان درصد پوشش در بازه‌ی مشخص شده از T (یک دوره‌ی زمانی برای پوشش) و نیز زمانی باقی‌مانده دوره‌ی T را بدست آورد.

در صورتی که تعداد n پهپاد در حال پوشش منطقه باشند و یک پوشش کامل آن‌ها زمانی معادل T صرف کند، در شرایطی که تمرکز پوشش بر اساس اختلاف فاز صورت گیرد، درصد پوشش در ناحیه‌ی تمرکز با زمانی معادل T' و در بازه‌ی زمانی باقی‌مانده یعنی $T-T'$ با استفاده از روابط (۵) و (۶) بدست می‌آید.

$$Cover_{Total} \times T = T' \times Cover_{T'} + (T-T') \times Cover_{(T-T')} \qquad (۴)$$

که از آن می‌توان روابط زیر را استخراج نمود:

$$Cover_{T'}(\%) = n' \times \frac{Cover_{Total}}{n} \times \frac{T}{T'} \qquad (۵)$$

$$Cover_{(T-T')}(\%) = (n-n') \times \frac{Cover_{Total}}{n} \times \frac{T}{T-T'} \qquad (۶)$$

که در آن n' تعداد پهپادهای مورد استفاده در بازه‌ی زمانی T'، $Cover_{T'}$ درصد پوشش ایجاد شده در بازه‌ی زمانی T' و $Cover_{Total}$ درصد پوشش کل در بازه‌ی زمانی T می‌باشد.

از طرفی باید ذکر گردد که این درصد پوشش در صورت عدم وجود همپوشانی بین پوشش‌های پهپادهای مختلف قابل تحقق خواهد بود که با صرف نظر از آن، درصد پوشش به صورت غیر واقعی و حتی در مواردی بالاتر از صد درصد نیز نشان داده خواهد شد. بنابراین فرایند طراحی پیشنهادی باید برای اجتناب از این مشکل مسائل مختلفی از جمله حداقل اختلاف فاز مجاز و ... را در نظر بگیرد. برای مثال در صورتی که درصد پوشش در مناطق تحت تمرکز به ۱۰۰ درصد برسد و یا همپوشانی در پوشش‌ها زیاد شود، درصد پوشش‌ها به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$If \quad Cover_{T'}(\%) > 100 \quad Then \quad Cover_{T'}(\%) = 100 \qquad (۷)$$

$$Cover_{(T-T')}(\%) = \frac{T \times Cover_{Total}^{OLL} - T' \times Cover_{T'}^{OLL}}{T-T'} \qquad (۸)$$

$$Cover_{Total}(\%) = \frac{(T' \times Cover_{T'} + (T-T') \times Cover_{(T-T')})}{T} \qquad (۹)$$

که در آن $Cover_{Total}^{OLL}$ و $Cover_{T'}^{OLL}$ به ترتیب پوشش ناحیه در تمام زمان T و پوشش ناحیه تمرکز در بازه‌ی زمانی T' است در حالتی که ممکن است به دلیل همپوشانی، پوشش بالاتر از ۱۰۰ درصد شده باشد.

تعیین زمان بازدید مجدد در روش اختلاف فاز

به صورت کلی می‌توان زمان بازدید مجدد از یک منطقه را به دو صورت زمان عبور مجدد پهپاد از نقطه‌ی مورد نظر و یا زمان بازدید مجدد منطقه با در نظر گرفتن عرض ناحیه‌ی قابل رؤیت برای پهپاد محاسبه نمود. روش اول ساده‌تر بوده ولی در روش دوم عدد بدست آمده دقیق‌تر و کاربردی‌تر است و بازه‌ی زمانی معین شده تقریباً بازه‌ای است که از دید دوربین پهپاد پنهان مانده است. این مسئله در حالی است که در بازه‌ی زمانی ارائه شده در روش اول ممکن است برخی از اهداف در حال عبور از مرز توسط پهپاد دیده شده باشند. می‌توان عدد بدست آمده از روش اول را محافظه‌کارانه و با در نظر گرفتن ضریب ایمنی دانست. در روش دوم در شرایطی که از روش اختلاف فاز برای تأمین تمرکز پوشش مورد نظر استفاده شده است، تعیین زمان بازدید مجدد از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. زمان بازدید مجدد در روش اول از روی زمان‌بندی عبور پهپاد از هر نقطه بدست می‌آید و در روش دوم این عدد به صورت تقریبی به کمک روابط (۱۰) قابل محاسبه می‌باشد. در این رابطه RT_{avg} میانگین زمان بازدید مجدد کل، RT_{T_1} میانگین زمان بازدید مجدد ناحیه تمرکز و RT_{T_2} میانگین زمان بازدید مجدد ناحیه بدون تمرکز، n تعداد کل پهپادها در آن منطقه، W_{eq} عرض ناحیه پوشش معادل، T_1 دوره زمانی تمرکز، n_{T_1} تعداد پهپادهای اختصاص داده شده برای ناحیه تمرکز، T_2 دوره زمانی بدون تمرکز، n_{T2} تعداد پهپادهای اختصاص داده شده برای ناحیه بدون تمرکز می‌باشد.

$$RT_{avg} = \frac{\left(T \times V_{\text{int}} - n \times W_{eq}\right)}{n \times V_{\text{int}}}$$
$$RT_{T_1} = \frac{\left(T_1 \times V_{\text{int}} - n_{T_1} \times W_{eq}\right)}{n_{T_1} \times V_{\text{int}}} \qquad (۱۰)$$
$$RT_{T_2} = \frac{\left(T_2 \times V_{\text{int}} - n_{T_2} \times W_{eq}\right)}{n_{T_2} \times V_{\text{int}}}$$

۴-۵- درصد پوشش، انتخاب الگوی حرکت و زمان بازدید مجدد در روش تغییر سرعت

در صورت اعمال تمرکز با استفاده از اهرم سرعت، دوره‌ی تناوب پایش تغییر کرده و محاسبات پوشش و بررسی مداومت پروازی پرنده بایستی مجدداً صورت پذیرد. میزان تمرکز پوشش در ناحیه‌ی مورد نظر در روش تغییر سرعت به کمک مکانیزم ارائه شده در مقالات [۲۱، ۲۲] قابل محاسبه می‌باشد. همچنین روش تغییر سرعت تأثیری بر مکانیزم انتخاب الگوی حرکت ندارد. سرعت مطلوب در منطقه مورد تمرکز برای رسیدن به پوشش مورد نظر از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$V_C = \frac{Cover_T}{Cover_{T_C}} V$$
$$T' = T + \frac{L_C}{V_C} - \frac{L_C}{V} \qquad (۱۱)$$
$$T_C = \frac{L_C}{V_C}$$

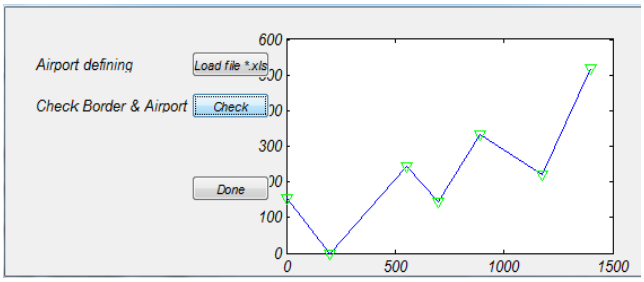
در رابطه (۱۱) $Cover_T$ و V مقدار پوشش ناحیه مورد نظر و سرعت پهپاد قبل از تمرکز، $Cover_{T_C}$ و V_C مقدار پوشش ناحیه مورد نظر وسرعت پهپاد برای تأمین تمرکز مطلوب است. T و T' به ترتیب دوره‌ی تناوب کل پایش در حالت بدون تمرکز و با اعمال تمرکز است. همچنین T_C دوره‌ی تناوب پایش در ناحیه تمرکز و L_C طول ناحیه تمرکز می‌باشد. با توجه به افزایش (یا کاهش) پوشش، سرعت حرکت پهپاد تعیین و با توجه به آن زمان تمرکز و دوره زمانی مشخص می‌گردد. زمان بازدید مجدد با فرض استفاده از روش تغییر سرعت، وابسته به دوره زمانی و تعداد پهپادها است که برابر زمان بازدید مجدد متوسط است. به عبارت دیگر، زمان بازدید مجدد ناحیه تمرکز برابر زمان بازدید مجدد متوسط است.

۶- شبیه‌سازی و ارائه نتایج

فرایند طراحی توضیح داده شده در این مقاله در قالب یک نرم‌افزار پیاده‌سازی شده است تا کاربر بتواند با استفاده از رابط کاربری گرافیکی، نیازمندی‌ها و شرایط خود را اعلام کرده و سناریوی مناسب را طراحی نماید. در ادامه به نتایج حاصل از طراحی سناریوی پوشش به کمک فرایند طراحی پیشنهادی پرداخته شده است. ابتدا، توانایی فرایند طراحی برای تأمین مطالبات کاربر ارزیابی شده و سپس پوشش نواحی مختلف قبل و بعد از اولویت‌دهی به بعضی مناطق مقایسه شده است.

۶-۱- معرفی مسئله‌ی نمونه (مقادیر اولیه و مطالبات کاربر)

در این مسئله هدف پوشش مرزی با شکل از پیش تعیین شده به طول ۱۴۰۰ کیلومتر توسط گروهی از پهپادها است (شکل **۴**) مشخصات و ورودی‌های سیستم به شرح زیر می‌باشد. ورودی نمونه در این مثال مرز شرقی بر حسب داده‌های جغرافیایی است. برای سادگی، فرودگاه‌ها در روی نقاط مشخصی از مرز تعریف شده است که در شکل **۴** قابل رؤیت می‌باشد. ارتفاع در سراسر مرز ثابت و ضرایب خطر و اهمیت در طول مرز یکنواخت فرض گردیده است.



شکل ۴- تعیین موقعیت فرودگاه‌ها و تأیید موقعیت مرز و فرودگاه‌ها

با توجه به شکل **۴**، پنج فرودگاه در طول مرز و دو فرودگاه مجازی در ابتدا و انتهای مرز در نظر گرفته شده است. فرودگاه‌های مجازی فقط به منظور سهولت در برنامه‌نویسی و همواره در ابتدا و انتهای مرز در نظر گرفته می‌شوند. در نظر گرفتن این فرودگاه‌ها تأثیری بر کلیت فرایند طراحی ندارد.

منطقه‌ی مورد تمرکز به صورت دو ناحیه‌ی مجزا و از نوع اختلاف فاز توسط کاربر تعیین گردیده است که محدوده‌ی آن در نتایج مندرج در شکل **۷** قابل مشاهده است. مشخصات مورد نظر برای پهپاد، محموله و عامل متجاوز در

جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱- مشخصات پهپاد، محموله و عامل متجاوز

سرعت پهپاد (Km/hr)	سرعت متجاوز (km/hr)	FOV_x (درجه)	FOV_y (درجه)	ارتفاع پرواز (km)	تغییرات ارتفاع قابل پذیرش (km)	حداقل سرعت پهپاد (Km/hr)
۳۰۰	۳۰	۱۵	۲۵	۵	۰/۵	۱۰۰

همچنین حداقل و حداکثر افزایش پوشش مطلوب بر نواحی اولویت‌دار به ترتیب برابر با ۵ و ۱۵ درصد توسط کاربر تعیین شده است.

۶-۲- ارزیابی توانایی فرایند طراحی پیشنهادی در تأمین مطالبات کاربر

در این بخش به ارائه‌ی نتایج حاصل از حل مسئله‌ی نمونه و ارزیابی میزان تحقق مطالبات کاربر پرداخته می‌شود.

۶-۲-۱- سناریوی پیشنهادی فرایند طراحی

انتخاب الگوی حرکت: در این مثال با توجه به مکان فرودگاه‌ها و قید کاربر بر پوشش تمام منطقه و دلایل ذکر شده در بخش قبل، الگوی پوشش حرکت به صورت حرکت حلقوی انتخاب گردیده است.

تعداد پهپاد مورد نیاز: فرایند طراحی حداقل و حداکثر تعداد پهپاد لازم را بر اساس مطالبات کاربر در خصوص پوشش و محدوده مجاز تعیین کرده است و اولویت اصلی را بر انتخاب تعداد کمتر پهپاد داده است. با در نظر گرفتن مشخصات از پیش تعیین شده برای پهپاد و محموله، حداکثر تعداد پهپاد مورد نیاز برای پوشش کل منطقه برابر با ۲۳ و حداقل آن برابر با ۱۶ تعیین شده و با توجه به اولویت کاربر در خصوص تعداد کمتر، کمترین تعداد پهپاد یعنی ۱۶ برای ادامه کار انتخاب شده است. تعداد پهپادهای مورد نیاز در هر منطقه ممکن است با تعداد پهپادها برای پوشش مناطق دیگر متفاوت باشد. بنابراین بایستی علاوه‌بر ذکر تعداد کل پهپادهای مورد نیاز، تعداد پهپادهای مورد نیاز به تفکیک برای هر منطقه ارائه شود (جدول **۲**).

جدول ۲- تعداد پهپادهای مورد نیاز در هر منطقه

شماره فرودگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
حداقل تعداد پهپاد	۰	۴	۳	۲	۳	۴	۰
حداکثر تعداد پهپاد	۰	۷	۴	۲	۴	۶	۰
تعداد پهپاد پیشنهادی	۰	۴	۳	۲	۳	۴	۰

دوره زمانی پوشش: دوره زمانی پوشش هر منطقه در جدول **۳** ارائه گردیده است.

جدول ۳- دوره زمانی پوشش هر منطقه

شماره فرودگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
دوره زمانی (ساعت)	۰	۳/۵۴۳۶	۲/۳۰۶۱	۱/۴۹۴۳	۲/۱۴۸۱	۳/۳۰۲۳	۰

نتایج عددی مربوط به پوشش: نتایج عددی پوشش شامل درصد پوشش، حداکثر و میانگین زمان بازدید مجدد می‌باشد که در جدول **۴** مقادیرآن‌ها برای فرایند طراحی پیشنهادی این مقاله نشان داده شده است.

جدول ۴- نتایج حاصل از پوشش به کمک سناریوی طراحی شده

درصد پوشش کل	زمان بازدید مجدد کل (ساعت)	
	میانگین	حداکثر
۱۸/۷۸۶۷	۰/۴۶۷۰۷۷	۰/۸۹۰۶۷۱

نتایج عددی درصد پوشش بدست آمده برای هریک از مناطق نیز در جدول **۵** ارائه گردیده است.

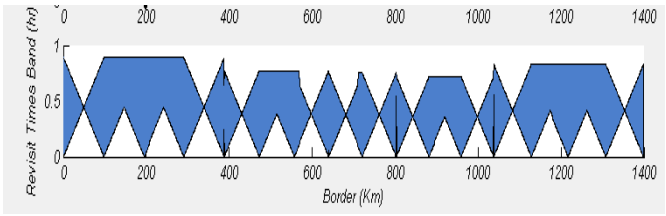
جدول ۵- میزان پوشش هریک از مناطق مرزی

شماره فرودگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
درصد پوشش منطقه با تعداد پهپادهای	NAN	۱۷/۲۴۹۲	۱۹/۸۷۹۷	۲۰/۵۷۴۷	۲۱/۳۱۰۴	۱۸/۵۵۱۴	NAN

حداقل اختلاف زمانی بین دو پرواز: حداقل اختلاف زمانی بین دو پرواز با پرنده‌هایی با مشخصات بیان شده و محموله‌ی تعیین شده بر حسب ساعت برای مسئله‌ی مورد بحث برابر ۰/۰۷۸ ساعت معادل ۴ دقیقه و ۴۱ ثانیه می‌باشد.

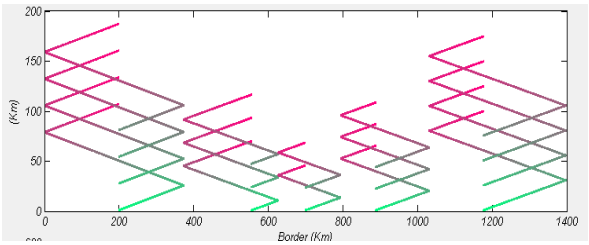
نمودار زمان‌های بازدید مجدد:

شکل **۵** محدوده‌ی زمان‌های بازدید مجدد نقاط مختلف مرز را به نمایش گذاشته است که در آن می‌توان دامنه‌ی تغییرات بازدید مجدد را در هر نقطه از مرز مشاهده نمود.



شکل ۵- محدوده‌ی زمان بازدید مجددها در طول مرز

صفحه‌ی مجازی مکانی-زمانی: در شکل **۶** صفحه‌ی مجازی مکانی-زمانی مربوط به سناریوی تعیین شده ارائه شده است. همانطور که گفته شد، این صفحه حاوی تمامی اطلاعات لازم برای تحلیل سناریوی پیشنهادی می‌باشد و می‌توان با استفاده از آن مشکلات موجود در پوشش پیشنهادی و نقاط حساس را درک نمود. برای اطلاعات بیشتر به چگونگی تهیه صفحه مجازی مکانی-زمانی مراجعه شود [۲۱، ۲۲].



شکل ۶- صفحه‌ی مجازی مکانی-زمانی پوشش مرزی

۲-۲-۶- ارزیابی تحقق مطالبات کاربر

در این بخش به منظور صحت‌سنجی سناریوی ارائه شده، نرم‌افزار سناریو را تحلیل کرده و خروجی‌های سناریو با مطالبات کاربر مقایسه می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد از آنجا که ممکن است مطالبات کاربر فراتر از توان هر سیستم پیشنهادی باشد باید دانست که سناریوی ارائه شده لزوماً تمام مطالبات کاربر را تأمین نکرده و ممکن است برخی از خواسته‌ها در محدوده‌ی مجاز قرار نگیرند و سناریوی ارائه شده تنها توانایی تأمین نزدیک‌ترین خروجی‌های ممکن به مطالبات کاربر را داشته باشد. به منظور اطلاع کاربر از این موضوع و نیز توان دست‌کاری و تغییر فعالیت برای ارضای قیود کاربر در نرم‌افزار، قیود پاس شده، قیود ارضا نشده و محدوده‌ی مورد درخواست کاربر ارائه می‌شود.

جدول ۶- بررسی داده‌های پوشش نهایی برای حالتی که برای همه‌ی مناطق پوشش یکنواخت در نظر گرفته شده است.

		مقدار به دست آمده	حداقل مطلوب	حداکثر مطلوب	
پوشش کل		۱۸/۷۸۶۷	۰	۲۰	OK
زمان بازدید مجدد(ساعت)	میانگین	۰/۴۶۷۰۸	۰/۵	۱	OK*
	حداکثر	۰/۸۹۰۶۷	-	۱	OK

* در این حالت مقدار بدست آمده برای مقدار میانگین زمان بازدید مجدد کمتر از خواسته‌ی کاربر می‌باشد و پوشش بهتری نسبت به مطالبه‌ی کاربر فراهم شده است. همچنین اختلاف این عدد با عدد مطلوب کم است. بنابراین این نتیجه قابل قبول خواهد بود.

جدول ۷- میزان پوشش هر منطقه

شماره فرودگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
حداقل مطلوب	NAN	۰	۰	۰	۰	۰	NAN
حداکثر مطلوب	NAN	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	NAN
مقدار به دست آمده	NAN	۱۷/۲۴۹۲	۱۹/۸۷۹۷	۲۰/۵۷۴۷	۲۱/۳۱۰۴	۱۸/۵۵۱۶	NAN
تحقق مطالبات کاربر		OK	OK	OK*	OK*	OK	

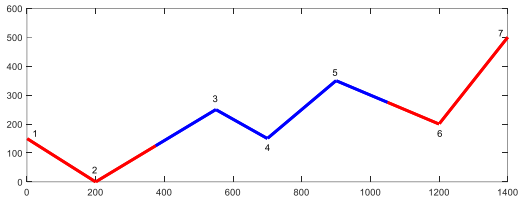
*در این دو منطقه، هر چند پوشش به دست آمده خارج از بازه مطلوب کاربر است ولی از آنجا که درصد پوشش به دست آمده بهتر از خواسته کاربر می‌باشد، فرض شده است که نظر کاربر تأمین شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جداول **۶** و **۷** مشاهده می‌شود که سناریوی پیشنهادی مطالبات کاربر را به خوبی پاسخ گفته است.

۳-۶- ارزیابی قابلیت فرایند پیشنهادی در افزایش تمرکز نواحی اولویت‌دار

در این بخش به ارائه‌ی نتایج پوشش در شرایط وجود قید تمرکز پوشش بر مناطقی خاص پرداخته شده است و می‌توان تغییر میزان پوشش در این مناطق را مشاهده نمود. مرز به همراه نواحی مورد تمرکز (مناطق قرمز رنگ) و شماره هر فرودگاه در شکل **۷** نشان داده شده است.

ابتدا فرایند طراحی بدون در نظر گرفتن نواحی مورد تمرکز اجرا شده و نتایج آن در جدول **۸** ارائه شده است. سپس فرایند طراحی پیشنهادی با وجود نواحی مورد تمرکز اجرا شده که نتایج آن در جدول **۹** قابل مشاهده است. در خصوص جدول **۹** به این نکته توجه شود که T_1 دوره تناوب در حالت تمرکز و T_2 دوره تناوب در حالت بدون تمرکز می‌باشد.



شکل ۷- خط مرزی به همراه نواحی مورد تمرکز (مناطق قرمز رنگ)

جدول ۸- نتایج عددی حاصل از پوشش بدون ناحیه‌ی مورد تمرکز

شماره فرودگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
دوره زمانی (ساعت)	۰	۳/۴۷۳۴	۲/۲۵۷۸	۱/۴۸۵۵	۲/۱۲۶۲	۳/۲۵۸۴	۰
تعداد پهپاد	۰	۵	۴	۲	۴	۵	۰
درصد پوشش کل در T بدون ناحیه‌ی مورد تمرکز	NAN	۲۱/۸۵۶۲	۲۰/۳۰۲۷	۲۰/۶۹۶۲	۲۱/۵۳۱۴	۲۳/۳۶۷۳	NAN

با مقایسه نتایج مندرج در جداول **۸** و **۹**، افزایش درصد پوشش در فرودگاه شماره ۲ و ۶ که کاربر متقاضی افزایش تمرکز در آنها بوده است، مشاهده می‌شود. همچنین، با توجه به درصد افزایش پوشش ۱۱/۱۱۱۱ و حداقل و حداکثر درصد افزایش پوشش مطلوب کاربر که برابر با ۵ و ۱۵ می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که خواسته کاربر در افزایش تمرکز بر مناطق اولویت‌دار تحقق پیدا کرده است.

جدول ۹- نتایج عددی حاصل از پوشش با وجود ناحیه‌ی مورد تمرکز

شماره فرودگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
درصد پوشش تمرکز یا نرمال	ناحیه مورد تمرکز	ناحیه مورد تمرکز	نرمال	نرمال	نرمال	ناحیه مورد تمرکز	ناحیه مورد تمرکز
ثابت زمانی T_1	۰	۱/۲۵۰۴	۰/۸۱۲۸	۰/۵۳۴۸	۰/۷۶۵۴	۱/۱۷۳۰	۰
تعداد پهپاد در زمان T_1	۰	۲	۱	۰	۱	۲	۰
درصد پوشش T_1	۰	۲۴/۲۸۴۷	۲۰/۳۰۲۷	۲۰/۶۹۶۲	۲۱/۵۳۱۴	۲۵/۹۶۳۶	۰
اختلاف فاز پرواز	۰	۰/۶۲۵۲	۱/۲۹۴۵	۰	۱/۲۱۹۰	۰/۵۸۶۵	۰
ثابت زمانی T_2	۰	۲/۲۲۳۰	۱/۴۴۵۰	۰/۹۵۰۷	۱/۳۶۰۸	۲/۰۸۵۴	۰
تعداد پهپاد در زمان T_2	۰	۴	۲	۲	۲	۴	۰
درصد پوشش T_2	NAN	۲۰/۴۹۰۲	۲۱/۱۴۸۶	۲۰/۶۹۶۲	۲۲/۴۲۸۶	۲۱/۹۰۶۸	NAN
اختلاف فاز پرواز	۰	۰/۵۵۵۷	۰/۴۸۱۷	۰	۰/۴۵۳۶	۰/۵۲۱۳	۰
هم‌پوشانی	–	–	–	–	–	–	–
درصد افزایش پوشش	NAN	۱۱/۱۱۱۱	۰	۰	۰	۱۱/۱۱۱۱	NAN
دستیابی به افزایش پوشش	–	OK	–	–	–	OK	–

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله روندی برای طراحی سناریوی پوشش مرز به کمک گروهی از پهپادها با قابلیت تمرکز بیشتر بر مناطق اولویت‌دار ارائه شد. این فرایند برای کمک به کاربر انسانی در طراحی سناریوی عملیات گروهی با رعایت قیدهای مختلف سیستم بکار می‌رود. فرایند طراحی پیشنهادی محدوده پوشش

مطلوب کل، محدوده پوشش هر منطقه و بازه زمان بازدید مجدد کل منطقه را دریافت کرده و سناریوی مطلوب را برحسب الویت کاربر از نظر تعداد پهپاد، درصد پوشش و یا زمان بازدید مجدد طراحی می‌نماید. قابلیت تمرکز بیشتر بر مناطق بااهمیت با تعیین مقادیر مطلوب اختلاف زمانی برخاستن پهپادها از فرودگاه‌ها و یا تغییر سرعت آن‌ها بر روی مناطق مورد نظر تأمین می‌گردد. انتخاب الگوی حرکت بین فرودگاه‌ها نیز برای بهبود سناریوی پیشنهادی از منظر کاهش تعداد پهپادهای مورد نیاز، افزایش پوشش و یا کاهش زمان بازدید استفاده شده است.

در پژوهش‌های آتی، توسعه بخش‌های طراحی و افزودن انتخاب‌های کاربر همچون قابلیت اعمال الگوهای پیچیده و دستی، تعیین عوارض زمین و پیش‌بینی الگوی حرکت عامل متجاوز به صورت دقیق‌تر، در نظر گرفتن تغییرات سرعت عامل متجاوز در شبیه‌سازی‌ها و ... می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. همچنین قابلیت تلفیق سایر مشاهدات سنسوری (توسط پهپادهای دیگر و یا سایر حسگرهای موجود حتی در محل‌های با فاصله از مرز) در صفحه‌ی مجازی زمانی- مکانی و طراحی سناریوی بهینه پوشش با لحاظ این مشاهدات و نیز قابلیت ارائه‌ی محتمل‌ترین موقعیت حضور هدف پیش‌تر دیده شده و ارائه‌ی سناریویی برای رسیدن به آن هدف با بالاترین احتمال کشف و تعقیب، در نظر گرفتن قابلیت مخفی شدن و استتار عامل مهاجم، تغییرات در سرعت عامل مهاجم در طی مسیر، قدرت تفکیک دوربین و به عبارتی کیفیت پوشش می‌تواند به عنوان زمینه‌های قابل توسعه در تحقیقات آتی محسوب شود.

پیوست یک: معرفی خروجی‌های تحلیلی فرایند طراحی

همانطور که در متن مقاله گفته شد، خروجی‌های فرایند پیشنهادی شامل موارد زیر می‌باشد. تشریح هر یک از این خروجی‌ها و نمونه‌ای از آنها در مرجع [۲۲] ارائه شده است. در اینجا برای دسترسی سریع‌تر خوانندگان مقاله، به معرفی مختصر آنها پرداخته شده است.

صفحه‌ی مجازی مکانی-زمانی پوشش مرزی: این خروجی گرافیکی شامل اطلاعات جامعی از وضعیت پوشش تمام نقاط در تمام دوره زمانی است. در واقع صفحه مجازی مکانی-زمانی، مکان هندسی موقعیت‌های ممکن حضور عوامل متجاوز در هر بخش از مرز با گذشت زمان می‌باشد که در آن موقعیت عوامل متجاوز فرضی که با الگوی پوشش ارائه شده رؤیت می‌شوند، مشخص شده است.

درصد پوشش کل: درصد پوشش کل، درصد پوشش مکانی-زمانی ایجاد شده در کل منطقه است که با توجه به ابعاد و درصد پوشش ایجاد شده در هر منطقه بدست می‌آید. این معیار درصد عوامل متجاوزی را که با گذشت زمان در ناحیه قابل رؤیت پهپاد قرار می‌گیرند و به عبارت دیگر، احتمال رؤیت عوامل مهاجم را نشان می‌دهد.

درصد پوشش هریک از نواحی: درصد پوشش مکانی-زمانی تأمین شده برای هر منطقه‌ی براساس الگوی حرکت پهپادها بین فرودگاه‌های آن منطقه می‌باشد و به صورت ناحیه‌ای کیفیت پوشش را به نمایش می‌گذارد.

میانگین زمان بازدید مجدد: متوسط فاصله‌ی دو بازدید متوالی از یک منطقه است. از آنجا که این فاصله زمانی ممکن است عددی متغییر باشد از میانگین آن استفاده می‌شود. با توجه به این که دوربین در هر لحظه یک منطقه و نه فقط یک نقطه از آن را مشاهده می‌کند، محاسبه‌ی این عدد ملاحظاتی دارد که در ادامه بیان خواهد شد.

حداکثر زمان بازدید مجدد برای هر نقطه‌ی مرزی: حداکثر زمان بازدید مجدد برای هر نقطه‌ی مرزی بر حسب ساعت می‌تواند مدت عدم رؤیت منطقه را در بدترین شرایط در طول مرز به نمایش بگذارد که این عدد در کنار اهمیت منطقه و نیز شرایط حاکم بر آن همچون چگونگی عوارض زمین و ... در تصمیم برای انتخاب سناریو نقش مهمی خواهد داشت.

دوره‌ی زمانی: این عدد به صورت کلی برای هر منطقه به صورت مجزا محاسبه می‌شود و بازه‌ای از زمان می‌باشد که برای الگوی حاکم با تعداد پهپادهای موجود یک چرخه تا بازگشت به شرایط اولیه تکرار گردد. این عدد بر حسب ساعت تعیین می‌گردد.

نمودار محدوده‌ی زمان بازدید مجددها در طول مرز: این نمودار نشان‌دهنده‌ی وضعیت نقطه به نقطه‌ی مرز بین بدترین و بهترین حالت آن نقطه می‌باشد. به کمک این نمودار، علاوه‌بر درک محدوده‌ی تغییرات کیفیت پوشش می‌توان به گونه‌ای به انحراف معیار از پوشش حالت میانگین که در خروجی‌های عددی آورده می‌شود، پی برد.

با استفاده از صفحه‌ی مجازی مکانی-زمانی پوشش و نمودار محدوده‌ی زمان بازدید مجددها در طول مرز می‌توان به وجود گره‌هایی در پوشش پی برد که این مناطق حداکثر هم‌پوشانی پوشش را دارند و بنابراین زمان بازدید مجدد در آن‌ها بهبود یافته و از طرفی هر بازدید آن‌ها نیز با کیفیت بالاتری صورت می‌گیرد. در استفاده از یک سناریو باید این مزایا و معایب در کنار هم بر

اساس شرایط حاکم بر منطقه به خوبی دیده شده و از آن در جای مناسب استفاده شود. برای مثال قرارگیری مناطقی که حداقل تعداد بازدید مجدد را دارند برای مناطقی که خطر بالایی دارند و نیز مناطقی که احتمال عبور عامل در آن بالا است غالباً مناسب نبوده و ترجیح به اصلاح سناریو به گونه‌ای است که این مناطق بیشترین بازدید را داشته باشند و حتی‌المقدور دوره‌ی بازدید مجدد آن‌ها تقریباً یکنواخت ولی غیر ثابت و تا حدودی غیر قابل تخمین باشد. البته در توسعه‌ی کار، میزان حساسیت، درصد عدم تشخیص هدف واقع در منطقه‌ی رؤیت شده، ابعاد قابل تشخیص سیستم و بسیاری مسائل دیگر می‌تواند در معیار ارزیابی گنجانده شود. این خروجی‌ها در حل مسئله‌ی نمونه در بخش نتایج ارائه گردیده است.

نمودار حداکثر زمان بازدید مجدد برای طول مرز: این نمودار برای درک کیفیت پوشش در بدترین حالت بکار می‌رود.

پیوست دو: معرفی یکپارچه متغیرهای مورد استفاده در مقاله

متغیر	توصیف متغیر
Lu	طول صفحه مجازی مکانی-زمانی
Li	عرض صفحه مجازی مکانی-زمانی
Vi	حداکثر سرعت جابه‌جایی عامل متجاوز
T	دوره زمانی
Vu	سرعت پهپاد
W_x	طول ناحیه قابل رؤیت برای پهپاد
W_y	عرض ناحیه قابل رؤیت برای پهپاد
$d\varphi$	اختلاف فاز پرواز دو پهپاد
h	عرض مؤثر ناحیه‌ی قابل رؤیت هر پهپاد
V_{UAV}	سرعت پهپاد
V_{int}	سرعت عامل متجاوز
FOV_x	میدان دید افقی
FOV_y	میدان دید عمودی
H_{flight}	ارتفاع پهپاد از سطح زمین
H_{earth}	ارتفاع زمین از سطح دریا
n	تعداد کل پهپادها در فرودگاه مورد نظر
$n_{\min}$	حداقل تعداد پهپادی است که برای تأمین حداقل پوشش مورد نظر کاربر بایستی بکار گرفت
$n_{\max}$	حداکثر تعداد پهپادی است که برای تأمین حداکثر پوشش مورد نظر کاربر بایستی بکار گرفت
n_i	تعداد کل پهپادها در فرودگاه i-ام
n_d	تعداد پهپادهای محاسبه شده از رابطه (۲) در فرودگاه i-ام
$d\varphi$	اختلاف فاز پروازها برای پهپادهایی که در تمرکز پوشش مشارکت ندارد
$d\varphi_C$	اختلاف فاز پروازها برای پهپادهایی است که تمرکز پوشش بر عهده آن‌ها می‌باشد
T	یک دوره‌ی زمانی برای پوشش
T'	بازه‌ی زمانی پوشش ناحیه تمرکز
$Cover_{Total}^{OLL}$	پوشش ناحیه در تمام زمان است در حالتی که ممکن است به دلیل همپوشانی، پوشش بالاتر از ۱۰۰ درصد شده باشد.
$Cover_{T'}^{OLL}$	پوشش ناحیه تمرکز است در حالتی که ممکن است به دلیل همپوشانی، پوشش بالاتر از ۱۰۰ درصد شده باشد.
W_{eq}	عرض ناحیه پوشش معادل
T_1	دوره زمانی تمرکز
T_2	دوره زمانی بدون تمرکز
n_{T_1}	تعداد پهپادهای اختصاص داده شده برای ناحیه تمرکز
n_{T_2}	تعداد پهپادهای اختصاص داده شده برای ناحیه بدون تمرکز
RT_{avg}	میانگین زمان بازدید مجدد کل
RT_{T_1}	میانگین زمان بازدید مجدد ناحیه تمرکز
RT_{T_2}	میانگین زمان بازدید مجدد ناحیه بدون تمرکز
$Cover_T$	مقدار پوشش ناحیه مورد نظر قبل از تمرکز
$Cover_{T_C}$	مقدار پوشش ناحیه مورد نظر بعد از تمرکز
V	سرعت پهپاد قبل از تمرکز
V_C	سرعت پهپاد برای تأمین تمرکز مطلوب
L_C	طول ناحیه تمرکز
T_C	دوره‌ی تناوب پایش در ناحیه تمرکز

مراجع

[1] R. Koslowski, M. B. Schulzke, 2018, "*Drones along Borders: Border Security UAVs in the United States and the European Union*." International Studies Perspectives 19.4, 305-324.

[2] M. G. Jumbert. 2018, "*Control or rescue at sea? Aims and limits of border surveillance technologies in the Mediterranean Sea*." Disasters 42.4, 674-696.

[3] Z. Sun, P. Wanga, M. C. Vuran, M. A. Al-Rodhaan, A. M. Al-Dhelaan and I. F. Akyildiz, 2011 "*BorderSense: Border patrol through advanced wireless sensor networks*," Ad Hoc Networks 9(3), 468-477.

[4] D. Dudek, C. Haas, A. Kuntz, M. Zitterbart, D. Krger, P. Rothenpieler, D. Pfisterer and S. Fischer, 2009, "*A Wireless Sensor Network For Border Surveillance*," ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys09), Berkeley, CA, USA.

[5] N. Boudriga, 2016, "*A WSN-based system for country border surveillance and target tracking*," Advances in remote sensing, 5(1), 51-72.

[6] S. Berrahal, J. H. Kim, S. Rekhis, N. Boudriga, D. Wilkins and J. Acevedo, 2016, "*Border surveillance monitoring using Quadcopter UAV-Aided Wireless Sensor Networks*", Journal of Communications Software and Systems, 12(1), 67-82.

[7] D. Flesher, O. Oni and A. Sassoon, 2011, "*Border Security: Air Team*", Institute for Systems Research, James Clark School of Engineering, Universirt of Maryland.

[8] D. T. Ho, E. I. Grøtli, P. B. Sujit, T. A. Johansen and J. B. Sousa, 2015, "*Optimization of Wireless Sensor Network and UAV Data Acquisition*", Journal of Intelligent & Robotic Systems 78(1), 159-179.

[9] V. Sharma and R. Kumar, 2015, "*A Cooperative Network Framework for Multi-UAV Guided Ground Ad Hoc Networks*", Journal of Intelligent & Robotic Systems 77(3-4), 629-652.

[10] C. Kiekintveld, V. Kreinovich and O. Lerma, 2011, "*Optimizing Trajectories for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Patrolling the Border*", University of Texas, San Francisco, CA, 23-26.

[11] DeLima, Pedro, and Daniel Pack, 2009, "*Maximizing search coverage using future path projection for cooperative multiple UAVs with limited communication ranges*" Optimization and Cooperative Control Strategies. Springer, Berlin, Heidelberg, 103-117.

[12] S. Perez-Carabaza, E. Besada-Portas, J. A. Lopez-Orozco, M. Jesus, 2018, "*Ant colony optimization for multi-UAV minimum time search in uncertain domains.*" Applied Soft Computing 62, 789-806.

[13] I. Maza, A. Ollero, 2007, "*Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms*." Distributed Autonomous Robotic Systems 6: 221-230, Springer, Tokyo.

[۱۴] حقیقی، حسن، ساداتی، سید حسین، کریمی، جلال، دهقان، سید محمد مهدی، "*بهینه‌سازی هیوریستیکی زمان بازبینی نظارت مداوم چندعاملی با استفاده از توابع وزنی کمترین مسافت*"، دانش و فناوری هوافضا ۶ (۲)، ۱۲۹-۴۱، ۱۳۹۶.

[۱۵] حقیقی، حسن، ساداتی، سید حسین، کریمی، جلال، دهقان، سید محمد مهدی، "*نظارت مداوم چندفروندی به‌وسیله الگوهای پیمایشی پایه با هدف کمینه‌سازی زمان بازبینی*"، مهندسی هوانوردی ۲۰ (۱) :۱-۱۲، ۱۳۹۷.

[16] N. Nigam, S. Bieniawski, I. Kroo, J. Vian, 2012, "*Control of multiple UAVs for persistent surveillance: algorithm and flight test results. IEEE Transactions on Control Systems Technology*", 20(5):1236-51.

[17] N.K. Ure, G. Chowdhary, T. Toksoz, J.P. How, M.A. Vavrina, J Vian, 2015, "*An automated battery management system to enable persistent missions with multiple aerial vehicles*", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 20(1): 275-86.

[18] S. Hayat, et al, 2017, "*Multi-objective UAV path planning for search and rescue*." Robotics and Automation (ICRA), 2017 IEEE International Conference on, IEEE.

[19] N. Nigam, 2014, "*The Multiple Unmanned Air Vehicle Persistent Surveillance Problem: A Review*", Journal of Machines, 2(1):13-72.

[20] J. Scherer, B. Rinner, 2019, "*Persistent Multi-UAV Surveillance with Data Latency Constraints*."arXiv preprint arXiv:1907.01205.

[21] M. A. Khesali, S. M. Mehdi Dehghan and S. H. Cheheltani, 2014, "*A new spatiotemporal virtual plane to evaluate the performance of the border coverage scenarios*", 2014 Second RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM). IEEE.

[۲۲] خصالی، محمدعلی، دهقان، سید محمد مهدی، توکلی، "*ارزیابی و انتخاب سناریوی مناسب پوشش هوایی مرز به*

کمک صفحه مجازی مکانی-زمانی"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲، ۱۳۹۶.

پی نوشت ها:

[1] Spatio-Temporal Virtual Plane