

ارزیابی و انتخاب سناریوی مناسب پوشش هوایی مرز به کمک صفحه مجازی مکانی-زمانی

محمدعلی خصالی^۱، پژوهشگر؛ سیدمحمد مهدی دهقان^۲، استادیار؛ امیرحسین توکلی^۳، پژوهشگر

۱- مجتمع دانشگاهی هوافضا - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - mkhesali@gmail.com

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

۳- مجتمع دانشگاهی هوافضا - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - am_h_tavakoli@mut.ac.ir

چکیده: استفاده از پهپادها در پوشش مرز، ضرورت ایجاد الگوهای پوشش و طراحی سناریو برای این منظور را ایجاب می‌کند. سیستم برای حفظ بهینگی در پوشش به کمک پهپاد نیازمند روشی برای ارزیابی کیفیت پوشش و مقایسه الگوها در شرایط مختلف عملیاتی می‌باشد. این کار مستلزم ارائه معیاری برای ارزیابی احتمال رؤیت عوامل متجاوز و به عبارت دیگر کیفیت پوشش تمامی نقاط مرزی می‌باشد. هدف از این مقاله ارائه ابزاری جهت ارزیابی پوشش و انتخاب الگوی مناسب پایش مرز از میان الگوهای مختلف پوشش و گشت‌زنی بر اساس معیارهایی همچون به حداقل رساندن زمان بازدید مجدد در نقاط مختلف منطقه مرزی، درصد پوشش مکانی و میزان یکنواختی توزیع پوشش می‌باشد و برای این منظور به تعریف مفهوم جدیدی بانام صفحه مجازی مکانی-زمانی پرداخته می‌شود. صفحه مجازی مکانی-زمانی امکان بررسی حرکت نسبی پهپادها و عوامل متجاوز و نیز به دست آوردن سابقه عبور عوامل متجاوز از یک منطقه و احتمال یافته شدن عوامل متجاوز را به عنوان مسائل اصلی در بررسی سناریوی پوشش فراهم می‌نماید. نتایج حاصله قابلیت روش ارائه شده در زمینه ارزیابی سناریو بر اساس پارامترهای کیفی و کمی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پهپاد، پوشش هوایی، حفاظت از مرز، انتخاب سناریو، ارزیابی الگوی پوشش.

Evaluation and Selection of Proper Aerial Coverage Scenario Using Spatio-Temporal Virtual Plane in Border Patrolling Application

M. A. Khesali¹, Researcher; S. M. M. Dehghan², Assistant Professor; A. H. Tavakoli³, Researcher

1- MalekAshtar University of Tehran, Tehran, Iran, Email: mkhesali@gmail.com.

2- MalekAshtar University of Tehran, Tehran, Iran, Email: smm.dehghan@ut.ac.ir.

3- MalekAshtar University of Tehran, Tehran, Iran, Email: am_h_tavakoli@mut.ac.ir.

Abstract: Search pattern and coverage scenario are two important concepts, in using UAVs in border patrolling problem. It is necessary to define a quality evaluation method to compare different pattern under different implicational conditions to reach optimal coverage by a group of UAVs. The evaluation method calculates probability of seen intruders and shows the quality of coverage in any part of the border. This paper introduces a new tool which is called spatiotemporal virtual plane to evaluate coverage scenario and select proper pattern by considering criteria such as flight time, coverage percentage, and coverage uniformity. Along with UAVs and intruders' relative motions, their motion histories and probability of identification of intruders would be analyzed by spatiotemporal virtual plane. The results show that, this analysis method has powerful ability to evaluate scenarios based on qualitative and quantitative parameters.

Keywords: UAV, aerial coverage, border patrolling, scenario selection, evaluation of coverage pattern.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۲۶

نام نویسنده مسئول: سیدمحمد مهدی دهقان

نشانی نویسنده مسئول: تهران - کیلومتر ۲۲ اتوبان تهران-کرج - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی هوافضا.

۱- مقدمه

طراحی مسیر خودکار تیم پهپاد کاری بود که تیم لام لو در سال ۲۰۱۲ در تز خود به انجام رساند [۱۰]. حفاظت از یک محدوده به کمک گروهی از پهپادهای مجهز به دوربین که به وسیله خلبان از راه دور کنترل می‌شوند [۱۱] و تصمیم‌گیری خودکار در حفاظت از مرز به کمک چند پهپاد همراه با بهره‌گیری از حسگرهای زمینی بدون اپراتور از دیگر کارهای صورت پذیرفته در زمینه حفاظت از مرز به کمک گروهان پهپاد می‌باشد [۱۲].

در سناریوی پوشش مرز، منطقه وسعت بالایی دارد و پهپاد دارای حرکت بوده و همچنین زاویه دید بسیار محدودی دارد، تمام نقاط مرز نمی‌تواند به صورت همزمان مورد پایش قرار بگیرد. از سوی دیگر پهپاد باید بتواند حتی‌الامکان تمام متجاوزینی که از مرز عبور می‌کنند را شناسایی کند؛ ولی در بهترین شرایط و برای پهپادهای با سرعت بالا نیز بسیاری از اهداف قابل مشاهده نبوده و در دید دوربین قرار نخواهد گرفت. بنابراین تشخیص برتری هریک از این روش‌ها بر دیگری و نیز تأثیر هریک از این عوامل بر بهبود پوشش باید به گونه‌ای ارزیابی گردد. بررسی‌ها نشان داد که هیچ‌کدام از پژوهش‌های صورت گرفته روشی برای ارزیابی پوشش نقاط مختلف مرز در طول زمان ارائه نداده‌اند، در این مقاله به ارائه روشی برای تعیین میزان کارایی الگوهای پیشنهادی در کشف هدف در قالب چهارچوبی با قابلیت بیان کیفیت و کمیت پوشش در نقاط مختلف در زمان‌های مختلف، پرداخته خواهد شد. در این مقاله ابتدا معرفی چهارچوب و ابزار ارزیابی الگوی پوشش ارائه شده و در ادامه به بررسی نحوه به‌کارگیری صفحه مجازی، شبیه‌سازی و ارائه نتایج حاصله که شامل صحت‌سنجی روش نیز می‌شود، پرداخته شده است. بخش آخر مقاله نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از مطالب و بیان اقدامات آتی اختصاص یافته است.

۲- استفاده از صفحه مجازی مکانی-زمانی در ارزیابی سناریوی پوشش

به منظور رصد و کشف تمام عوامل متجاوز که احتمال عبور آن‌ها از مرز از هر نقطه و در هر زمان وجود دارد، تعدادی پهپاد با همکاری با هم در طول مرز به پایش و جستجو می‌پردازند. هریک از این پهپادها الگوی حرکت از پیش تعیین‌شده‌ای را برای پوشش دنبال می‌کند. نمایش نحوه پوشش نقاط مختلف در طول زمان، کمک شایانی به طراحان در جهت انتخاب مناسب الگوریتم‌ها و تشخیص مزایا و معایب آن‌ها خواهد نمود.

مشکل عمده در ارزیابی میزان کارایی الگوی پیشنهادی، سرعت‌های متفاوت و جهت‌های مختلف حرکت پهپادها و عوامل متجاوز است که رسیدن به یک درک مناسب از حرکت نسبی آن‌ها و نیز درک میزان کیفیت پوشش در هر ناحیه در زمان‌های مختلف را دشوار خواهد کرد، این مسئله ارائه چهارچوبی برای این منظور را ضروری می‌سازد.

اهمیت حفاظت از مرز به‌عنوان راه ورود به کشورها از جهت اقتصادی و امنیتی بر کسی پوشیده نیست. در این راستا حفاظت از مرز در برابر تروریست‌ها و قاچاقچیان سلاح و مهمات، مواد مخدر و کالاهای غیرقانونی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. حد مطلوب حفاظت، پوشش دائم تمام نقاط ورودی است ولی با توجه به اینکه امکان پوشش تمام نقاط بین دو پست حفاظت از مرز توسط روش‌های رایج وجود ندارد، بهره‌گیری از روش‌های نوین در این زمینه مورد بررسی قرار گرفت [۱]. یکی از مهم‌ترین این روش‌ها، استفاده از پهپاد است و تاکنون در این مورد پژوهش‌ها و پروژه‌های عملیاتی زیادی انجام پذیرفته است. از جمله پروژه SBInet به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین پروژه‌های حفاظت از مرز در جهان 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. در ژانویه ۲۰۱۱ به دلیل کارایی پایین و هزینه‌ای بسیار بیش از مقدار پیش‌بینی‌شده، بخش اصلی پروژه متوقف‌شده و تنها بخش مبتنی بر پهپادهای آن ادامه یافت [۲]. نتیجه این پروژه نشان داد که استفاده از پهپادها یک روش مناسب برای حفاظت از مرز می‌باشد [۳].

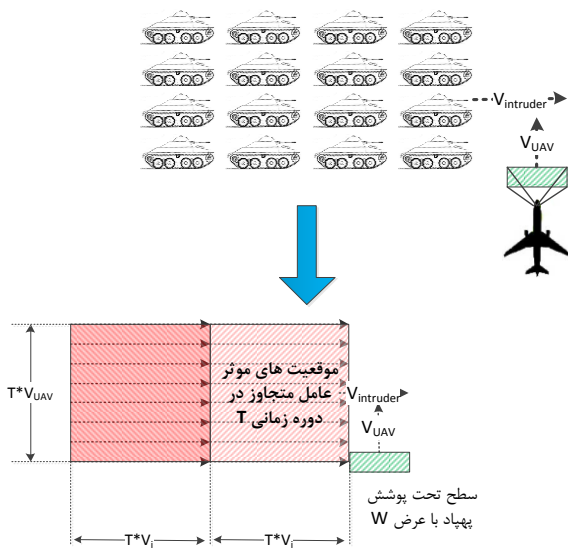
تحقیقات دیگری نیز بر روی حفاظت از یک منطقه جغرافیایی بلند و باریک همچون مرز به‌کمک پهپاد وجود دارد از جمله این تحقیقات می‌توان به پایش یک رودخانه در سال ۲۰۰۱ [۴]، مدل‌سازی حفاظت از برخی از مرزهای آمریکا توسط پهپاد در سال ۲۰۰۲ [۵]، کنترل یک مجموعه پهپاد در مأموریت حفاظت از مرز [۳]، کار جونز در سال ۲۰۰۹ در زمینه پیشنهاد الگو جهت پایش و حفاظت منطقه و مرز و تحقیقات گوناگون دیگر بر روی همکاری پهپادها به‌منظور پوشش یک منطقه اشاره کرد [۶-۹]. کار فلچر در استفاده از یک گروه پهپاد برای امنیت مرزها در سال ۲۰۱۱ و تحقیقات بر روی مسائلی همچون الگوی جستجو و انتخاب پهپاد مناسب برای مأموریت حفاظت مرز با در نظر گرفتن مسائل هزینه‌ای از دیگر کارهای صورت پذیرفته در این راستا می‌باشد [۲].

طراحی مسیر بهینه برای پهپادها در مأموریت حفاظت از مرز با استفاده از منطق فازی دید جدیدی به مسئله داشته که در آن منطقه به‌صورت وزن‌دار بررسی گردیده است مزیت این روش در نظر گرفتن خطر و اهمیت هر منطقه بوده که بر اساس آن مناطق آسیب‌پذیر مرز برای پایش اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. 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 [۱]. در این مقاله اثر مثبت افزایش سرعت که در کاهش زمان بازدید مجدد اثرگذار است، در نظر گرفته نشده است.

در زمینه استفاده گروهی از پهپادها نیز بهره‌گیری از تئوری بازی‌ها به‌منظور یافتن بهترین و کوتاه‌ترین روش برای رسیدن به هدف 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.

صفحه مجازی مکانی-زمانی در واقع 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. در واقع هدف این صفحه مجازی، مشخص نمودن مکان و درصد عوامل متجاوزی است که با گذشت زمان در ناحیه قابل رؤیت پهپاد قرار می‌گیرند (شکل ۱).



شکل ۱: مفهوم صفحه مجازی

طول این صفحه برابر با طول ناحیه مورد پایش این پهپاد در مرز (L_U) و عرض آن (L_i) برابر حداکثر جابه‌جایی عامل‌ها با سرعت V_i در طول پریود (T) می‌باشد. پریود زمانی با توجه به سرعت پهپاد (V_U) 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 رؤیت‌شده بر اساس سرعت پهپاد، سرعت عامل متجاوز و عرض و طول ناحیه قابل رؤیت برای پهپاد (به ترتیب W_x و W_y) 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 نشان‌دهنده 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. شکل ۲ صفحه مجازی و حرکت آن را نشان داده که در آن نواحی رؤیت‌شده توسط پهپاد به‌صورت هاشور خورده نشان داده شده است.

در چهارچوب پیشنهادی معیارهایی در نظر گرفته شده است که با توجه به پارامترهایی از قبیل سرعت پهپاد و سرعت عامل متجاوز و نیز عرض ناحیه قابل رؤیت توسط دوربین پهپاد و ... به ارزیابی الگوی پوشش خواهد پرداخت. به کمک این معیارها می‌توان به تخمینی از کمیت (احتمال رؤیت هدف) و کیفیت پوشش (توزیع پوشش در سراسر منطقه متناسب با میزان خطر و ایجاد حداقل تفاوت در زمان‌های بازدید مجدد) را ارزیابی نمود. همچنین از چهارچوب ارائه شده می‌توان برای مقایسه بین الگوریتم‌های پیشنهادی پوشش و بررسی نقاط ضعف و قدرت آن‌ها بهره جست.

چهارچوب در نظر گرفته شده مبتنی بر چند فرض و چند معیار ارزیابی الگو می‌باشد که به کمک آن می‌توان سناریوهای همکاری و نیز تقسیم مناطق را بررسی و انتخاب نمود. برخی از فرضیات عبارت‌اند از: (۱) پوشش پهپادها جهت پایش خط مرزی است، (۲) با توجه به تمایل عوامل متجاوز به کاهش احتمال رؤیت شدن توسط پهپادها، حرکت عوامل متجاوز در بدترین حالت (از دیدگاه مرزبانی) و در جهت عمود بر مرز در نظر گرفته می‌شود، این امر سبب می‌شود تا در کوتاه‌ترین زمان بیش‌ترین فاصله از مرز را به دست آورند. (۳) سرعت عامل متجاوز کمتر از پرنده در نظر گرفته می‌شود. (۴) در صورتی که عامل متجاوز در ناحیه تحت رؤیت دوربین پهپاد قرار گیرد آن عامل شناسایی می‌شود و در غیر این صورت عامل بدون شناسایی شدن از منطقه عبور می‌کند.

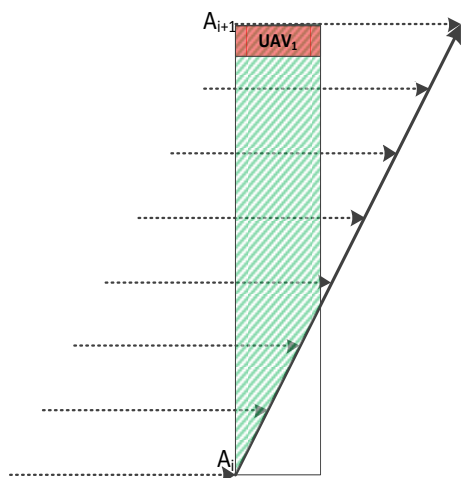
معیارهای کمی و کیفی برای ارزیابی عبارت‌اند از: (۱، ۲) میانگین حداکثر زمان بازدید مجدد، (۳) زمان یک پوشش مکانی کامل، (۴) درصد پوشش، (۵) یکنواختی توزیع بازدیدها از مناطق، (۶) وجود یا عدم وجود قابلیت توسعه الگو، (۷) قابلیت تطبیق با تغییرات، اختلاف فاز مناسب بین پروازها، ...

این چهارچوب از ابزاری با عنوان صفحه مجازی مکانی-زمانی (SVP) استفاده می‌کند که بر پایه بیان موقعیت نسبی عوامل متجاوز و پرنده‌ها با اطلاع از محدوده قابل رؤیت پهپادها در طول زمان استوار است و علاوه بر مشخص کردن کمیت و کیفیت پوشش، به درک و بهبود معیارهای ذکر شده و نیز انتخاب و یا ایجاد یک پوشش مناسب کمک خواهد نمود. در واقع این صفحه مجازی پوشش نقاط مختلف از منطقه جستجو را در طول زمان به تصویر می‌کشد و قابلیت تعیین مناطق با احتمال نفوذ بالا بر اساس کشفیات کنونی (حفظ تاریخچه پایش) را دارد.

۲-۱- معرفی چهارچوب و ابزار ارزیابی الگوی پوشش

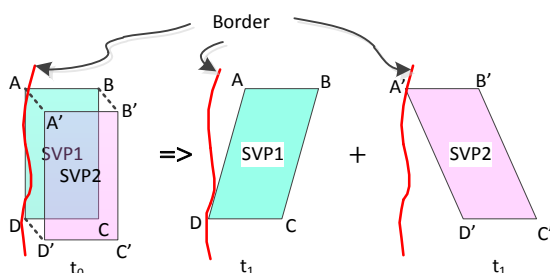
پوشش مکانی به‌صورت مساحت رؤیت شده به مساحت کل منطقه مرزی تعریف می‌شود اما در پوشش مکانی-زمانی علاوه بر پوشش مرز به بعد زمان نیز توجه دارد و در آن پوشش کامل به معنی پوشش تمام نقاط به‌طور تمام‌وقت تعریف می‌گردد (منظور از پوشش در این مقاله پوشش مکانی-زمانی می‌باشد). با پایش به کمک پهپاد تمام طول مرز پوشش داده می‌شود (پوشش کامل مکانی). پهپاد مجهز به دوربین در

ناحیه هاشور خورده، رؤیت شده و ناحیه سفید، ناحیه‌ای است که در آن زمان‌ها آن نقطه از مرز در دید پهباد قرار نگرفته‌اند.

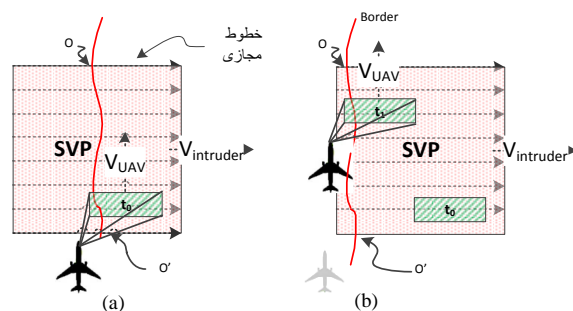


شکل ۳: صفحه مجازی پوشش ایجادشده توسط یک پهباد در یک پرواز مستقیم

برای سناریوهای دارای الگوی پیچیده و یا شرایط استفاده از چندین پهباد ترجیح بر این است که به جای ایجاد یک صفحه مجازی، برای هر بخش از مسیر و به ازای هر پرنده، یک صفحه مجازی در نظر گرفته و در نهایت از قاعده جمع آثار با در نظر گرفتن زمان و موقعیت هریک از صفحات استفاده شود. در استفاده از قاعده جمع آثار در صفحات مجازی باید صفحات مورد بحث مربوط به موقعیت‌های متناظر از نظر مکان و زمان باشند. به عنوان مثال، حرکت در الگوی مستقیم با دو پرنده و پرواز در خلاف جهت یکدیگر (پرنده دوم همزمان با پرنده اول و یا با یک اختلاف فاز حرکت خود را شروع می‌کند ولی از فرودگاه A_{i+1} تا مقصد A_i را روی مرز طی می‌کند) می‌تواند با قاعده جمع آثار بررسی شود. صفحه مجازی پرنده اول در این حالت مانند قبل بوده و در نهایت همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ روند آن نمایش داده شده است [۱۳]. صفحه مجازی برای پهباد دوم بر روی صفحه مجازی اول تصویر گردیده است.



شکل ۴: استفاده از قواعد جمع آثار در صفحات مجازی



شکل ۲: پهباد و خط اثر دوربین آن بر روی صفحه مجازی مکانی - زمانی در چند زمان متفاوت

هر صفحه مجازی متشکل از مجموعه‌ای از خطوط موازی و عمود بر راستای مرز می‌باشد (خطوط مجازی) که این خطوط در واقع عوامل متجاوز فرضی واردشده از یک نقطه از مرز در زمان‌های مختلف می‌باشد که با سرعتی معادل سرعت عوامل متجاوز پیشروی می‌کنند. در شبیه‌سازی‌ها برای اجتناب از محاسبات اضافی خطوط مجازی پس از آخرین رصد توسط پهپادها بدون حرکت فرض می‌شوند که باعث ایجاد تغییر شکل در صفحات مجازی خواهد شد [۱۳].

گرچه این خروجی گرافیکی شامل اطلاعات جامعی از تمام نقاط در تمام دوره زمانی است ولی به منظور مقایسه و بررسی آماری داده‌ها می‌توان با حذف برخی جزئیات به اطلاعات عددی نظیر زمان بازدید مجدد، درصد پوشش و ... تبدیل شوند.

۲-۲- به کارگیری صفحه مجازی مکانی-زمانی

برای تولید صفحه مجازی پس از تعیین سرعت عامل متجاوز در منطقه مورد حفاظت، با توجه به تعداد پهپادها و نیز سادگی یا پیچیدگی الگوریتم حرکت، با توجه به الگوی مورد نظر برای پوشش و ... یک تناوب زمانی که دربرگیرنده حرکت یک دوره کامل از تمام پهپادهای فعال جهت پوشش منطقه می‌باشند، در نظر گرفته می‌شود. با این کار ابعاد و مختصات صفحه مجازی مکانی-زمانی مذکور مشخص می‌شود. می‌توان مرز را هموار و معادل یک خط صاف در نظر گرفت و از اثر شکستگی‌ها در شکل صفحه مجازی صرف نظر نمود [۱۳]. در ادامه با در نظر گرفتن زمان گذشته از شروع دوره و نیز عرض ناحیه دید، نقاط دیده شده در مرز در صفحه مجازی مذکور نگاشت می‌شود. صفحه حاضر قابلیت ارائه موقعیت مکانی-زمانی ناحیه قابل رؤیت توسط دوربین پهباد و نمایش درصد پوشش دقیق‌تر، کیفیت پوشش و همچنین نقاط ضعف و قوت الگوی پوشش را دارد.

در شرایط حضور تنها یک پهباد برای پوشش منطقه و استفاده از الگوهای پوشش ساده همچون حرکت در الگوی مستقیم با یک پرنده (حرکت از فرودگاه A_i و طی کردن مرز تا رسیدن به فرودگاه A_{i+1}) که ساده‌ترین سناریوی پوشش یک منطقه می‌باشد می‌توان از یک صفحه مجازی برای بررسی کل سناریو استفاده نمود. شکل ۳ صفحه مجازی مکانی-زمانی برای این حالت را در یک تناوب نشان می‌دهد که در آن

توجه: در برخی از بخش‌های مقاله برای سادگی از رابطه $W_x = 0.1 W_y$ استفاده می‌گردد و از W به جای W_y استفاده می‌شود.

جدول ۱: مقایسه نتایج پوشش در دو روش مونت کارلو و صفحه مجازی برای الگوی حرکت مستقیم

الگوی حرکت مستقیم (دو پهپاد)	الگوی حرکت مستقیم (یک پهپاد)	الگوی حرکت
۶۵۰		L_U
۱۳۰ min		T
۳۰۰ km/hr		V_U
۳۰ km/hr		V_i
۲ km		W
۶/۰۵۸۵	۳/۰۲۹۵	نتایج صفحه مجازی (%)
۶/۰۶۷۷	۳/۰۳۴۰	نتایج شبیه‌سازی به روش مونت کارلو

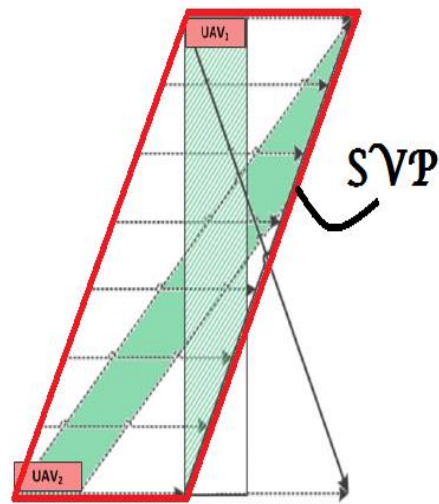
انطباق خوب نتایج حاصله از دو روش، صحت روش ارائه شده و قابلیت آن در به دست آوردن درصد پوشش و کیفیت آن را نتیجه می‌دهد.

۳-۲- نتایج شبیه‌سازی یک الگو با یک و دو پهپاد

صفحه مجازی مکانی-زمانی و درصد پوشش حاصل از الگوی حرکت حول یک نقطه با یک پهپاد و نیز با دو پهپاد که به صورت هم‌جهت و با اختلاف فاز مشخص ($T/2$) حرکت می‌کنند، بررسی شده است. شرایط شبیه‌سازی و درصد پوشش حاصل از آن در جدول ۲ و صفحه مجازی آن در شکل ۶ نشان داده شده است که در آن با افزایش سرعت پرنده از ۲۴۰ به ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت و عرض ناحیه دید از ۲ به ۳ کیلومتر درصد پوشش از ۸/۶۱ به ۳۱ درصد افزایش یافت.

جدول ۲: شرایط آزمایش و درصد پوشش حاصل از آن

الگوی حرکت	حرکت روی مرز حول یک فرودگاه با دو پهپاد	حرکت روی مرز حول یک فرودگاه با یک پهپاد
L_U	۱۸۰	۱۸۰
T	۱/۲ hr	۱/۵ hr
V_U	۳۰۰ km/hr	۲۴۰ km/hr
V_i	۳۰ km/hr	۳۰ km/hr
W	۳ km	۲ km
درصد پوشش	۳۱	۸/۶۱



شکل ۵: پوشش دو پهپاد بر روی یک مرز در الگوی حرکت مستقیم و حرکت پهپادها از دو سمت مرز

۳- شبیه‌سازی و ارائه نتایج

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد ارزیابی پوشش بر اساس ملاک‌هایی شامل درصد پوشش، میانگین و حداکثر زمان بازدید مجدد در هر بخش مرز و نیز در کل مرز، توزیع پهپادها و یکنواختی پوشش متناسب با مأموریت و میزان تهدید هر منطقه و کیفیت توزیع پهپادها امکان‌پذیر است. همچنین در ارزیابی باید بتوان کیفیت پوشش در مناطق خاص و در هر زمان را یافت. صفحه مجازی این پارامترها را به صورت گرافیکی به نمایش می‌گذارد از طرف دیگر در این روش می‌توان داده‌هایی همچون میانگین و حداکثر زمان بازدید مجدد کل و درصد پوشش را به صورت کمی ارائه داد. در این بخش پس از صحت‌سنجی روش ارائه شده به کمک مقایسه نتایج آن و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو، این روش برای چند حالت مختلف شبیه‌سازی شده است.

۳-۱- صحت‌سنجی

به منظور صحت‌سنجی روش ارائه شده دو الگوی پوشش مرز با پرواز مستقیم بین دو فرودگاه یک بار با یک و بار دیگر با دو پرنده با حرکت هم‌زمان از دو فرودگاه پایایی، به هر دو روش شبیه‌سازی مونت کارلو و صفحه مجازی مکانی-زمانی شبیه‌سازی می‌شود. از آنجا که به کمک قاعده جمع آثار می‌توان تمام الگوهای پایش خط مرزی را به صورت مجموعه‌ای متشکل از این دو حالت بیان کرد، صحت نتایج برای این حالت تأییدکننده صحت نتایج برای سایر الگوها خواهد بود.

این شبیه‌سازی برای مرزی به طول ۶۵۰ کیلومتر و با شرایط ذکر شده در جدول ۱ انجام پذیرفته است و در شبیه‌سازی به روش مونت کارلو با در نظر گرفتن ورود یک میلیون متجاوز از نقاط مختلف مرز و با توزیع پراکنده در طول زمان شبیه‌سازی صورت پذیرفته است.

جدول ۳: شرایط حاکم بر مدل‌سازی‌های صورت پذیرفته

ارتفاع پرواز (km)	W_y (km)	FOV_y (درجه)	W_x (km)	FOV_x (درجه)	سرعت متجاوز	سرعت پهپاد (Km/hr)	شرایط حاکم
۵/۵	۲/۴۴	۲۵	۱/۴۵	۱۵	۳۰	۳۰۰	

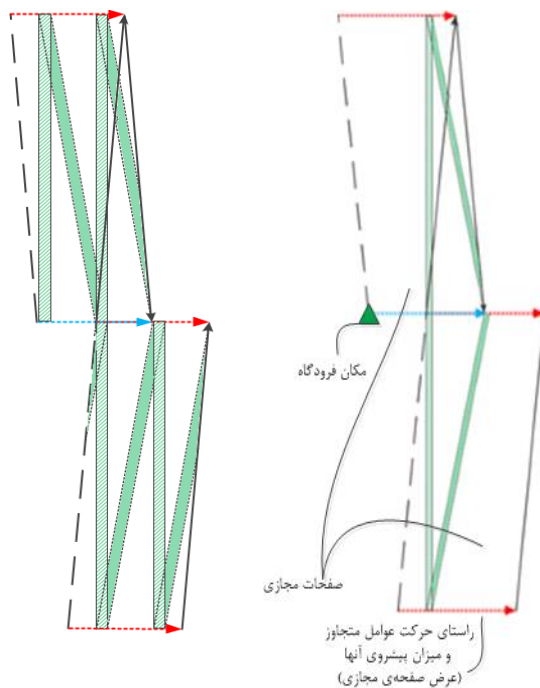
لازم به ذکر است بهینه بودن الگو براساس شرایط حاکم بر مرز مورد بحث تعیین می‌کند که کدامیک از عوامل درصد پوشش، میانگین زمان بازدید مجدد، حداکثر زمان بازدید مجدد و ... در پوشش مرز در اولویت است.

جدول ۴: نتایج پایش با تعداد مناسب پهپاد با توزیع و اختلاف فاز

مناسب در الگوها و جهات مختلف

حداکثر زمان بازدید مجدد	مؤسسط زمان بازدید مجدد	درصد پوشش	جهت حرکت	الگوی حرکت
۰/۲۹	۰/۲۷	۲۴/۹۸	همه در یک جهت	A حرکت مستقیم به فرودگاه بعدی
۰/۸۱	۰/۲۹	۲۴/۹۸	در دو جهت	B
۰/۵۱	۰/۲۶	۲۷/۹۵	همه در یک جهت	C حرکت حول فرودگاه
۱/۰۲	۰/۲۸	۲۷/۹۵	در دو جهت	D

پس از تعیین تعداد پهپاد مورد نیاز و توزیع مناسب پهپادها بین فرودگاه‌ها و نیز انتخاب الگوی حرکتی، تعیین اختلاف فاز بین شروع پرواز پهپادها اهمیت ویژه‌ای دارد. با توجه به نوع مأموریت، اختلاف فاز بین شروع پروازها باید طوری تعریف گردد که در مناطق با خطر بالاتر حداکثر زمان بازدید مجدد از میانگین منطقه‌ای پایین‌تر آید. در شرایطی که قید اولویت برخی مناطق نسبت به سایر مناطق مطرح نباشد، همه بخش‌های مرز از اهمیت یکسانی برخوردارند، اختلاف فاز برابر، شرایط بهینه را برای سیستم فراهم می‌آورد. در شکل ۷ و جدول ۶ نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای ۷ پهپاد با اختلاف فاز بیان شده در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در مقایسه با حالت پایه زمان بازدید مجدد میانگین و درصد پوشش بدون تغییر باقی مانده حال آنکه حداکثر زمان بازدید مجدد افزایش چشم‌گیری داشته بنابراین آنچه در اثر اختلاف فاز ایجاد خواهد شد تغییر در حداکثر و حداقل زمان بازدید مجدد می‌باشد که با توزیع یکنواخت این اختلاف فازها این حداکثر زمان، حداقل خواهد شد.



شکل ۶: صفحه مجازی پوشش یک ناحیه با الگوی حرکت روی مرز حول یک فرودگاه؛ (الف) با یک پهپاد ۸/۶۱ درصد پوشش، (ب) با دو پهپاد ۳۱ درصد پوشش

۳-۳- انتخاب سناریوی پوشش مناسب

در شرایط واقعی، مرز مستقیم نبوده و دارای شکستگی می‌باشد اما این شکستگی‌ها اگرچه در شکل ظاهری صفحه مجازی مکانی-زمانی ایجاد شکستگی می‌کند ولی در اصل مفهوم تأثیری ندارد [۱۳]، همچنین سرعت پرواز و سطح ناحیه قابل رؤیت و ارتفاع پرواز و ... در طول زمان پوشش تغییر می‌کند.

تغییرات سرعت، ارتفاع، عرض ناحیه دید دوربین و اثر عوامل جانبی همچون باد که در نهایت در سرعت تأثیرگذار است را می‌توان به صورت تغییر در پارامترهای مؤثر در تشکیل صفحه مجازی بیان کرد.

انتخاب سناریوی پوشش بهینه تحت شرایط ارائه شده در جدول ۳ با اختصاص ۵ پهپاد به هر ناحیه جستجو صورت پذیرفته که در آن تمام طول مرز دارای اهمیت یکسان است و پوشش حداکثری با بالاترین احتمال کشف در نظر می‌باشد. به جای استفاده از W می‌توان از FOV دوربین و ارتفاع پرواز استفاده نمود. در ادامه تأثیر هر یک از این دو عامل نیز بر میزان و کیفیت پوشش بررسی خواهد شد.

نتایج شبیه‌سازی برای ۴ الگوی مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. در نهایت حرکت هم‌جهت پهپادها در الگوی پرواز حول یک فرودگاه به دلیل درصد پوشش بالاتر و زمان بازدید مجدد پایین‌تر انتخاب گردید.

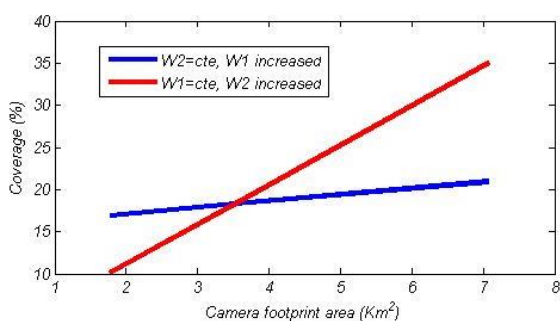
این نتیجه برای پوشش با شرایط ذکر شده نسبت به سایر روش‌ها پوشش بهینه‌تری را ایجاد کرده است. لازم به ذکر است که در این ۴ حالت اختلاف فاز پروازها همگن و برابر تقسیم شده است که سبب ایجاد پوشش یکنواخت‌تر و کاهش حداکثر زمان بازدید مجدد می‌شود.

۴-۳- بررسی عوامل تأثیرگذار بر پوشش

در این بخش به بررسی تأثیر عوامل مختلفی همچون تأثیر ارتفاع پرواز، سرعت پرنده و عرض ناحیه قابل رؤیت برای پهپاد بر کیفیت و کمیت پوشش پرداخته خواهد شد. به منظور فراهم آوردن امکان مقایسه تغییرات اعمالی با حالت پایه، تمامی شرایط پوشش شامل سرعت پهپاد، سرعت عامل متجاوز، زاویه دید دوربین و ارتفاع و ... مطابق حالت پایه در نظر گرفته شده و تنها پارامتر مورد بررسی تغییر داده شده است. در جداول ۱۰-۷ و شکل‌های ۱۰-۸، تغییر در کمیت و کیفیت پوشش نمایش داده شده است.

جدول ۷: تغییرات درصد پوشش با تغییر در میزان عرض و طول ناحیه دید دوربین

درصد پوشش	عرض×طول ناحیه دید	مساحت ناحیه دید
۱۸/۳۰۱۲	W1*W2	A
۱۶/۸۷۲۴	0.5W1*W2	0.5A
۱۰/۱۲۷۳	W1*0.5W2	
۲۰/۹۳۸۸	2W1*W2	2A
۳۵/۰۷۵۳	W1*2W2	



شکل ۸: نمودار کلی تغییرات درصد پوشش با تغییر در میزان عرض و طول ناحیه دید دوربین

جدول ۸: تأثیر ارتفاع پروازی در میزان پوشش و زمان بازدید مجدد

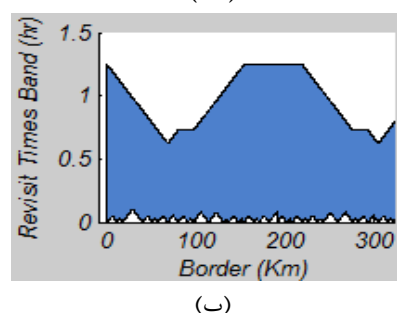
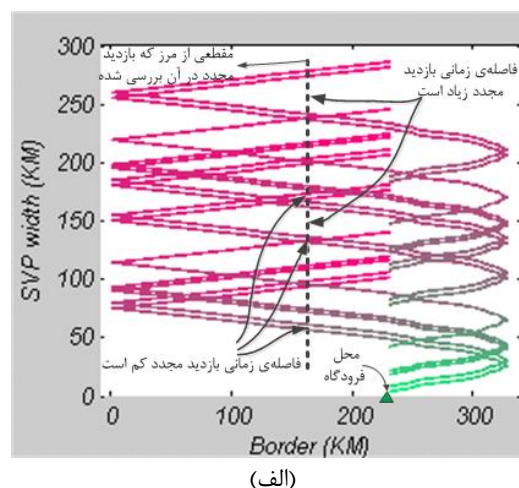
زمان بازدید مجدد (hr)	درصد پوشش		ارتفاع پرواز ۲ کیلومتر
	میانگین	حداکثر	
۰/۵۱۸۴	۰/۲۶۶۴	۱۲/۸۳	حالت پایه با ارتفاع پرواز ۵/۵ کیلومتر
۰/۵۰۸۵	۰/۲۵۸۷	۳۶/۸۷	

جدول ۹: مقایسه تغییر میزان پوشش با افزایش سرعت پرنده

زمان بازدید مجدد (hr)	درصد پوشش		سرعت پهپاد (km/hr)
	میانگین	حداکثر	
۰/۲۹۹۱	۰/۱۵۲۲	۶۱/۴۳	۵۱۰
۰/۵۰۸۵	۰/۲۵۸۷	۳۶/۸۷	۳۰۰
۱/۶۹۴۷	۰/۸۶۲۴	۱۱/۹۳	۹۰

جدول ۵: اختلاف فاز نسبت به پرواز اول

شماره پهپاد	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
اختلاف فاز (درصدی از T)	۰	۰/۰۴۳	۰/۱۴۳	۰/۱۷۱	۰/۳۷۱	۰/۷۱۴	۰/۷۵۷



شکل ۷: تأثیر اختلاف فاز نامناسب در فرودگاه‌ها در میزان و کیفیت پوشش، (الف) صفحه مجازی، (ب) بازه تغییرات زمان‌های بازدید مجدد،

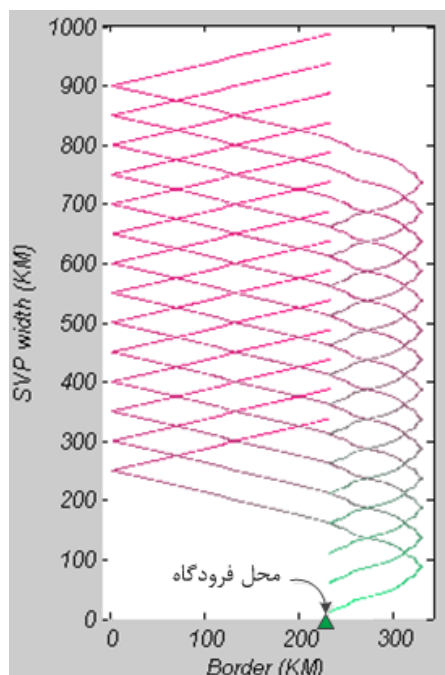
جدول ۶: نتایج پوشش حاصل از اختلاف فاز نامناسب در فرودگاه‌ها

زمان بازدید مجدد (hr)	درصد پوشش فرودگاه ۱		حالت پایه با اختلاف فاز نامناسب
	میانگین	حداکثر	
۱/۲۸۱۲	۰/۲۵۸۵	۳۶/۸۷	حالت پایه
۰/۵۰۸۵	۰/۲۵۸۷	۳۶/۸۷	

در صورتی که اختلاف فاز بین پروازها کم باشد احتمال رؤیت مجدد و غیرضروری (اگر رؤیت منطقه با فاصله کوتاهی از رؤیت قبل صورت پذیرد عملاً رؤیت این مناطق بر پوشش تأثیر مثبتی نخواهد گذاشت) مناطق دیده‌شده، بالا می‌رود و بنابراین میزان بهره‌وری سیستم پایین می‌آید و از طرف دیگر اختلاف فاز زیاد موجب افزایش زمان بازدید مجدد خواهد شد. (محور افقی هر دو شکل صفحه مجازی و زمان بازدید مجدد از جنس کیلومتر و نشان‌دهنده طول مرز می‌باشد).

جدول ۱۰: تأثیر تغییر عرض ناحیه قابل رؤیت در راستای عمود بر حرکت بر میزان پوشش

زمان بازدید مجدد (hr)		درصد پوشش						کل		
		فرودگاه ۱	فرودگاه ۲	فرودگاه ۳	فرودگاه ۴	فرودگاه ۵	کل			
حداکثر	میانگین	۰/۵۰۴۵	۰/۳۵۳۱	۳۵/۰۸	۲۶/۴۲	۳۳/۰۲	۳۳/۰۲	۳۳/۰۲	۴۶/۳۳	۲×W2
۰/۵۱۵۷	۰/۳۶۴۸	۱/۰۱۳	۷/۶۳	۹/۵۴	۹/۵۴	۹/۵۴	۹/۵۴	۱۳/۳۵	۰/۵×W2	



(د)

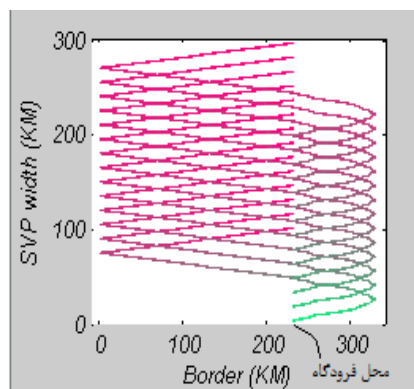
شکل ۹: صفحه مجازی پوشش تحت الگوی حرکت حول یک فرودگاه در چند تناوب در شرایط مختلف،

الف) $h=5/5$ km, $V_{UAV}=300$ km/hr, $W=2/5$ km

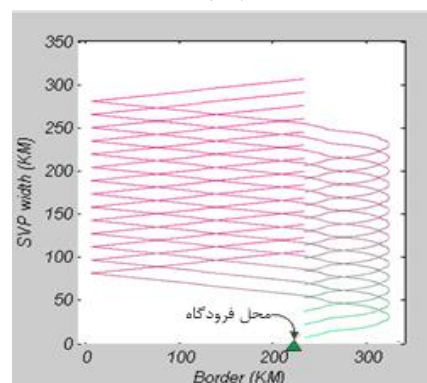
ب) $h=2$ km, $V_{UAV}=300$ km/hr, $W=2/5$ km

ج) $h=5/5$ km, $V_{UAV}=300$ km/hr, $W=1/2$ km

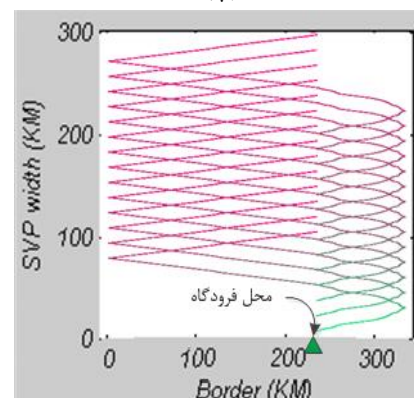
د) $h=5/5$ km, $V_{UAV}=90$ km/hr, $W=2/5$ km



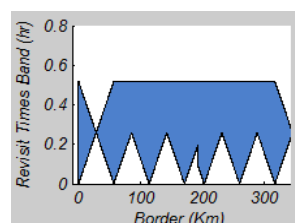
(الف)



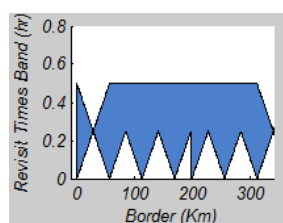
(ب)



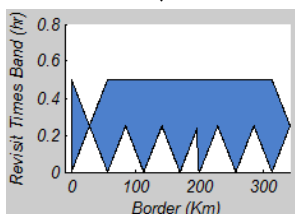
(ج)



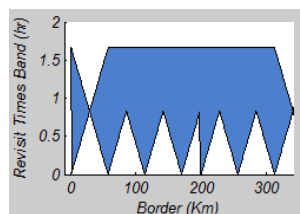
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۰: زمان بازدید مجدد برای ۴ حالت گوناگون،

الف) $h=5/5$ km, $V_{UAV}=300$ km/hr, $W=2/5$ km

ب) $h=2$ km, $V_{UAV}=300$ km/hr, $W=2/5$ km

ج) $h=5/5$ km, $V_{UAV}=90$ km/hr, $W=2/5$ km

د) $h=5/5$ km, $V_{UAV}=300$ km/hr, $W=1/2$ km

همان طور که انتظار می‌رفت زمان‌های بازدید مجدد با سرعت پهپاد رابطه معکوس داشته و با افزایش سرعت کاهش قابل ملاحظه‌ای در آن مشاهده می‌شود. همچنین قابل ذکر است که درصد پوشش نیز با این

توسعه صفحه مجازی مکانی-زمانی در حالتی که عواملی همچون اختلاف فاز بین پروازها، سرعت پهپاد، سرعت عامل متجاوز و راستای حرکت آن در داخل با توجه به اهمیت مناطق و عوارض زمین و اهمیت مناطق متغیر است، می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. همچنین تشریح اولویت‌بندی زمان‌های بازدید مجدد متوسط و حداکثر و درصد پوشش در کنار تغییر نگاه به مسئله مانند تحلیل تغییر عملکرد عامل مهاجم به واسطه اطلاع از وجود سیستم پایش مرز پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [1] C. Kiekintveld, V. L. Kreinovich and O. Lerma, *Optimizing Trajectories for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Patrolling the Border*, University of Texas, San Francisco, CA, May 23-26, 2011.
- [2] O. O. A. S. Daniel Flesher, *Border Security: Air Team*, University of Maryland, May, 12, 2011. <https://www.isr.umd.edu/~austin/enes489p/projects2011a/bordersecurity-air-team-finalreport.pdf>
- [3] A. R. Girard, A. S. Howell and J. K. Hedrick, "Border patrol and surveillance missions using multiple unmanned air vehicles," *Decision and Control*, pp. 620-625, 2004.
- [4] M. H. Chen, C. F. Chen and W. S. Wu, "A river monitoring system using UAV and GIS", *22nd Asian Conference on Remote Sensing*, 2001.
- [5] K. J. Ordóñez, *Modeling the U.S. Border Patrol Tucson Sector for the Deployment and Operations of Border Security Forces*, NAVAL Postgraduate School, Arizona State, March 2006.
- [6] J. Blazakis, *Border Security and Unmanned Aerial Vehicles*, CRS Report for Congress, January 2, 2004.
- [7] J. G. Chad and C. Haddad, "Homeland security: unmanned aerial vehicles and border surveillance", *Congressional Research Service*, 2010.
- [8] J. Barnard, "Unmanned aircraft in border patrol activities", *Annual UAS Conference – Operational and Technology Readiness*, 2011.
- [9] P. J. Jones, *Cooperative Area Surveillance Strategies Using Multiple Unmanned Systems*, The Academic Faculty, School of electrical and computer engineering, Georgia institute of technology, 2009.
- [10] G. T. L. Lau, *Path Planning Algorithms for Autonomous Border Patrol Vehicles*, M.Sc. Thesis, Graduate Department of Aerospace Studies, University of Toronto, 2012.
- [11] K. Kalyanam, P. Chandler, M. Pachter, and S. Darbha, "Optimization of perimeter patrol operations using unmanned aerial vehicles", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 35, no. 2, pp. 434-441, 2012.
- [12] D. Bein, W. Bein, A. Karki and B. B. Madan, "Optimizing border patrol operations using unmanned aerial vehicles", *12th International Conference on Information Technology - New Generations (ITNG 2015)*, 2015.
- [13] M. A. Khesali, S. M. Mehdi Dehghan and S. H. Cheheltani, "A new spatiotemporal virtual plane to evaluate the performance of the border coverage scenarios", *Robotics and Mechatronics (ICRoM), Second RSI/ISM International Conference*, 2014.

افزایش سرعت به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. از طرف دیگر می‌توان نتیجه گرفت با افزایش ارتفاع زمان بازدید مجدد تفاوت محسوسی نمی‌کند ولی درصد پوشش افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد شبیه همین نتایج نیز برای افزایش عرض ناحیه قابل رؤیت توسط دوربین پهپاد می‌توان در نظر گرفت (اشکال ۱۰-۸ و جداول ۱۰-۷).

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که پوشش بهینه مرز با استفاده از الگوی حرکت روی مرز حول یک فرودگاه و در شرایط اختلاف فاز مساوی بین پهپادها و نیز حرکت هم‌جهت پهپادها تحقق خواهد یافت (اشکال ۶ و ۷ و جداول ۶-۴). از دیگر عواملی که باید در بهینه نمودن پوشش در نظر گرفت توزیع متوازن پهپادها بین فرودگاه‌ها و استفاده از حداکثر سرعت و حداکثر ارتفاع پروازی ممکن پهپاد و نصب دوربین با FOV بالاتر و به گونه‌ای که ابعاد تصویر دریافتی در جهت عمود بر حرکت پرنده بزرگتر از اندازه آن در راستای حرکت پرنده باشد، می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله صفحه مجازی مکانی-زمانی به‌عنوان ابزاری گرافیکی در جهت ارزیابی و مقایسه بین الگوهای مختلف پوشش و درک بهتر از مناطق پوشش داده شده و مناطق مغفول مانده مرزی توسط دسته‌ای از پهپادها ارائه شد. مقایسه و انتخاب سناریوی مناسب با در نظر گرفتن معیارهای کمی و کیفی همچون درصد پوشش بالا، حداقل زمان بازدید مجدد، ایجاد حداقل ممکن تفاوت میان بازدیدهای مجدد در تمام نقاط مرز و حفظ حداقل فاصله زمانی بین دو بازدید برای اجتناب از رؤیت‌های مجدد از یک نقطه در بازه زمانی کم، با استفاده از ابزار پیشنهادی مبتنی بر صفحه مجازی از مزایای استفاده از این ابزار است. همچنین تحلیل نقش عوامل مختلف بر کیفیت و کمیت پوشش چگونگی رابطه میان زاویه دید دوربین، نحوه نصب آن و نیز ارتفاع و سرعت پرنده با میزان پوشش را نشان داد.

گرچه در صفحه مجازی ارائه‌شده این پارامترهای کمی و کیفی به‌صورت گرافیکی به نمایش درآمده است، لیکن می‌توان این نتایج گرافیکی را به راحتی به‌صورت درصد پوشش یک منطقه در طول زمان یا احتمال یافتن عوامل مهاجم تبدیل کرد.

اما پارامترهای کمی را می‌توان از طریق محاسبات نیز به دست آورد. همچنین از روی نتایج عددی و یا از روی نتایج گرافیکی می‌توان مشکلات و نقاط قوت و ضعف سناریوی حرکت و همکاری را به دست آورد.

با توجه به اینکه می‌توان برای مناطق مهم و حساس‌تر تدابیر خاصی همچون کاهش زمان بازدید مجدد، افزایش درصد پوشش و یا کاهش سرعت پهپاد در این مناطق در جهت پوشش بهتر آن و تنظیم اختلاف فاز پرواز جهت تقویت بخشی از منطقه در نظر گرفت در کارهای آینده