

## ارزیابی اثر تغییر رفتار عامل مهاجم بر پوشش مکانی - زمانی مناطق مرزی

محمد علی انصاری<sup>۱</sup>، سید محمد مهدی دهقان<sup>۲</sup>

۱ همکار پژوهشی، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲ استادیار، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، smmd@mut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۰۷

### چکیده

این مقاله به افزایش دقت محاسبه میزان پوشش مکانی - زمانی به عنوان معیاری برای ارزیابی توانایی یک سیستم نظارت هوایی در مأموریت پوشش مناطق مرزی در طول زمان می‌پردازد. محاسبه پوشش مکانی - زمانی و به عبارت دیگر تعیین احتمال رویت اهداف متحرک مستلزم در نظر گرفتن سرعت مؤثر عامل مهاجم؛ یعنی اندازه سرعت لحظه‌ای در راستای عمود بر مرز می‌باشد. در مقالات قبلی، این معیار براساس حداکثر مقدار متوسط سرعت عامل مهاجم محاسبه شده و توانایی ارزیابی اثر تغییرات رفتار عامل مهاجم را نداشت. این مقاله برای ارزیابی دقیق‌تر پوشش مکانی - زمانی، تغییر رفتار عامل مهاجم به دلیل اطلاع از وجود سیستم هوایی حفاظت از مرز را به کمک تابع چگالی احتمال انتخاب سرعت‌های مختلف و زمان‌های خاص تردد مدل نموده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که محاسبه پوشش مکانی - زمانی با این روش نشان‌دهنده موفقیت بیشتر سیستم نظارت هوایی نسبت به استفاده از روش معمول محاسبه پوشش می‌باشد.

### واژگان کلیدی

پهپاد، حفاظت از مناطق مرزی، نظارت هوایی، پوشش مکانی - زمانی، عامل مهاجم، تابع توزیع احتمال

### ۱. مقدمه

شده و نیاز به بهره‌گیری از روش‌های نوین دو چندان می‌شود [۱]. در این بین، اهمیت و ضرورت استفاده از پهپاد در مأموریت حفاظت از مرز در پژوهش‌ها و پروژه‌های عملیاتی بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهش وینسنت و رایین (۲۰۰۴) از جمله نخستین فعالیت‌های انجام‌شده در زمینه جستجوی هوایی با استفاده از گروهی از وسائل پروازی بدون سرنشین است. در روش ارائه‌شده در این پژوهش، حرکت پهپادها برای پیدا کردن عامل

چون بستر بسیاری از تهدیدهای امنیتی هر کشور، در خارج از محدوده مرزی آن قرار دارد، حفاظت از مرز در برابر تروریست‌ها و قاچاقچیان سلاح و مهمات، مواد مخدر و نیز کالاهای غیرقانونی، که در این مقاله از آنها به عنوان عامل مهاجم یاد می‌شود، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. از آنجایی که امکان پوشش تمامی نقاط حد فاصل دو پست حفاظت از مرز در زمان توسط روش‌های رایج وجود ندارد، اهمیت حل مسئله نظارت و پوشش مرزی مشخص

مقاله با تحلیل رفتارهای احتمالی عامل‌های مهاجم و احتمال انتخاب سرعت‌های مختلف و همچنین تابع توزیع احتمال انتخاب زمان‌های خاص برای تردد، سعی دارد ارزیابی دقیق‌تری از میزان پوشش منطقه مرزی در طول زمان ارائه کند. محاسبه پوشش مکانی - زمانی با این روش نشان‌دهنده موفقیت بیشتر سیستم نظارت هوایی نسبت به استفاده از روش معمول محاسبه پوشش است. در ادامه نخست پوشش مکانی - زمانی به همراه مدل ریاضی آن معرفی می‌شود. در گام بعد، معیار جدیدی که نشان‌دهنده موفقیت واقعی سیستم نظارت است ارائه می‌شود. در قسمت بعد تأثیر رفتار عامل نفوذی روی معیار موفقیت سیستم مورد تحلیل قرار می‌گیرد و در پایان با شبیه‌سازی، اعتبار نتایج تحلیلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

## ۲. محاسبه میزان پوشش مکانی - زمانی برحسب سرعت عامل مهاجم

هدف از این مقاله بیان میزان موفقیت سیستم نظارت در یک منطقه مرزی است. به دلیل عدم شناخت از موفقیت عامل مهاجم، احتمال حضور عامل مهاجم برای همه نقاط مرزی یکسان است، پس تابع توزیع این عوامل در نقشه به صورت تابع توزیع یکنواخت دوبعدی است. نتیجه چنین بررسی به ارائه مدل صفحه مکانی - زمانی عامل مهاجم منجر شد [۱۸-۱۹]. پارامترهایی که در این مقاله برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند در جدول ۱ معرفی می‌شوند.

جدول ۱. معرفی پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی

پارامتر	تعریف
$v_1$	سرعت عامل مهاجم
$v_u$	سرعت پهپاد
$P_C$	احتمال پوشش توسط پهپاد در یک مساحت مشخص
$t_H$	مدت زمانی که طول می‌کشد پهپاد عرض دروازه را طی کند
$N_f$	تابع توزیع عامل‌های مهاجم که برحسب سرعت آنها بیان می‌شود

سناریوی جستجو به گونه‌ای است که پهپاد روی دروازه تخصیص داده به خود در نوار مرزی به صورت رفت‌وبرگشت پرواز دارد. توزیع یکنواخت عوامل مهاجم برای همه نقاط و زمان‌ها، سبب تشکیل تصویری مجازی از دید ناظر بیرونی می‌شود که با سرعت  $v_1$  به صورت پیوسته در زمان در حال حرکت به داخل مرز است. حال اگر مسیر حرکت پهپاد در بالای این صفحه مکانی -

مهاجم به صورت گروهی و با رفت‌وبرگشت روی خطوط موازی انجام می‌گیرد [۲]. در پژوهش آتشلور و همکاران (۲۰۰۵) نیز برای کاهش احتمال فرار هدف و عدم ورود آن به منطقه امن، حرکت گروهی در خطوط موازی شیب‌دار نسبت به مرز منطقه پیشنهاد شده است [۳]. از جمله بزرگترین پروژه‌های ملی برای پوشش مناطق مرزی، پروژه SBInet است [۴]. در این پروژه و از سال ۲۰۰۶ م به منظور پوشش ۶۰۰۰ مایل از مرزهای آمریکا، روش‌های گوناگونی چون استفاده از حسگرها، برج مراقبت و مراکز حفاظت از مرز مجهز به سیستم موقعیت یاب جهانی و پهپاد مطرح شد. در ژانویه ۲۰۱۱ کارایی پایین و هزینه اجرایی بیش از مقدار پیش‌بینی شده سبب شد اجزا و روش‌های متنوع به کار رفته در این پروژه به‌بخش پهپادها لغو شود [۵]. نتیجه این پروژه مشخص کرد که استفاده از پهپادها یک روش مناسب برای حفاظت از مرز است [۶-۷]. در سال ۲۰۱۱ م، فلچر در تحقیقات خود از یک تیم پهپاد برای امنیت مرزها استفاده نمود و روی الگوی جستجوی آن تحقیق نمود [۵]. وی همچنین به بحث درباره انتخاب پهپاد مناسب برای مأموریت حفاظت مرز با در نظر گرفتن مسائل هزینه‌ای پرداخت. از دیگر کارهای صورت‌پذیرفته در این زمینه می‌توان به کنترل یک مجموعه پهپاد در مأموریت حفاظت از مرز [۳]، پایش رودخانه [۸]، مدل‌سازی حفاظت از برخی مرزهای آمریکا توسط پهپاد [۹]، حفاظت از یک محدوده توسط پهپادهایی مجهز به دوربین که به وسیله خلبان از راه دور کنترل می‌شوند [۱۰]، همکاری پهپادها به منظور پوشش یک منطقه وسیع [۱۱-۱۵] و پیشنهاد الگو جهت پایش و حفاظت منطقه و مرز [۱۶] اشاره نمود.

کالیانام و همکاران (۲۰۱۲) نیز الگوریتمی برای طراحی مسیر ربات‌های پرندۀ خودگردان که به منظور مرزبانی یک منطقه به کار گرفته می‌شوند، ارائه نمودند [۱۷]. در مقاله پیشین نویسندگان این مقاله [۱۸-۱۹]، کیفیت پوشش نقاط مرزی در قالب معیارهایی چون به حداقل رساندن زمان بازدید مجدد، درصد پوشش مکانی و میزان یکنواختی توزیع پوشش بیان گردید. این چارچوب مبتنی بر ابزاری با عنوان صفحه مجازی مکانی - زمانی است که امکان بررسی حرکت نسبی پهپادها و عوامل متجاوز در بررسی سناریوی پوشش را فراهم می‌نماید. معیارهای ارائه‌شده در مقالات [۱۸-۱۹] برای مقایسه الگوها و الگوریتم‌های پوشش، نمی‌تواند منعکس‌کننده دیدگاه عامل مهاجم در احتمال دیده‌شدن باشد. این

$$x_t = \bar{v}_t \times t_H \quad (2)$$

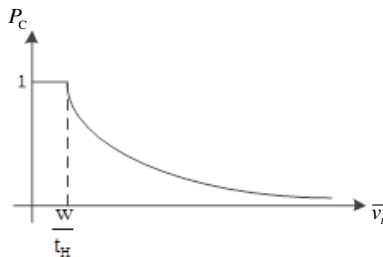
بنابراین احتمال مشاهده عامل مهاجم توسط پهپاد برابر است با مساحت پوشش داده شده توسط پهپاد تقسیم بر کل مساحت صفحه مکانی-زمانی.

$$P_C = \frac{wH}{x_t H} = \frac{w}{x_t} \quad (3)$$

که در اینجا  $w$  برابر عرض حسگر نصب شده روی پهپاد است. چون سرعت پهپاد ثابت است، پس زمان طی کردن دروازه نظارت توسط پهپاد مقداری ثابت است. با توجه به معادلات ۲ و ۳ میزان پوشش پهپاد تابعی از سرعت متوسط عامل مهاجم خواهد بود.

$$P_C = \frac{w}{x_t} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \bar{v}_t \leq \frac{w}{t_H} \\ \frac{w}{\bar{v}_t t_H} & \bar{v}_t > \frac{w}{t_H} \end{cases} \quad (4)$$

در صورت رسم این مقدار در سرعت‌های مختلف شکل ۲ حاصل می‌شود. در سرعت‌های پایین  $\bar{v}_t \leq w/t_H$  چون سرعت حرکت صفحه مکانی-زمانی نسبت به سرعت پهپاد بسیار ناچیز است، بنابراین روی مسیر پوشش خود همپوشانی دارد. در این نقاط میزان پوشش ۱۰۰ درصد خواهد بود که معادل با احتمال موفقیت یک است.



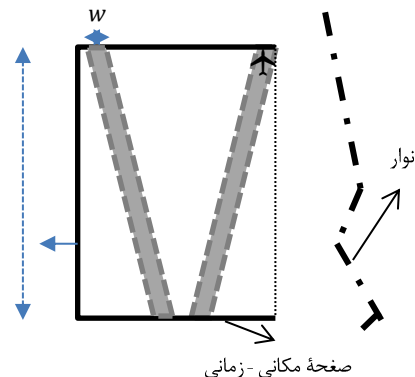
شکل ۲. نمودار میزان پوشش پهپاد بر حسب سرعت مؤثر عامل مهاجم

### ۳. ارزیابی میزان موفقیت سیستم نظارت

برای یک منطقه مورد جستجو، مستقل از ترس و ویژگی عامل مهاجم، در حالت نخست اگر این عامل برای یک لحظه در محدوده دید حسگر پهپاد قرار گیرد، فرض می‌شود که مأموریت پوشش منطقه مرزی با موفقیت انجام شده و یا به عبارت دیگر شانس موفقیت در ورود به مرز برای آن صفر است. در حالت دوم، اگر به دلیل اطلاع از وجود سیستم نظارت، عامل مهاجم از تصمیم خود منصرف شود و به مرز نفوذ نکند، در این صورت شانس موفقیت آن صفر و شانس موفقیت سیستم نظارت یک است. در حالت دوم عامل مهاجم حرکت نداشته و وارد مرز نشده بنابراین

زمانی متحرک، عمود بر جهت حرکت صفحه مکانی-زمانی و به صورت رفت و برگشت در یک عرض ثابت صورت گیرد، الگوهای مشابه شکل ۱ از نگاه ناظر ایجاد می‌شود. در این الگو صفحات مکانی-زمانی با سرعت ثابت  $v_t$  که همان سرعت متوسط عامل مهاجم است، به داخل مرز در حرکت است. نوارهای تیره در شکل ۱ تصویر منطقه پوشش حاصل از حرکت رفت و برگشت پهپاد روی این صفحه مکانی-زمانی است. انجام مانورهای عرضی یا تغییر سرعت عامل مهاجم نیز منجر به کاهش مؤلفه سرعت در راستای عمود بر مرز می‌گردد.

در پیوست ثابت می‌شود که مؤلفه سرعت عامل مهاجم در راستای مرز تأثیری بر درصد پوشش نخواهد داشت و تنها با دانستن مقدار متوسط مؤلفه عمود بر راستای مرز می‌توان احتمال پوشش توسط پهپاد را محاسبه کرد. با فرض ثابت بودن سرعت پهپاد ثابت می‌شود که میزان پوشش وابسته به سرعت عامل مهاجم است. هرچه سرعت این عامل کمتر باشد، سرعت حرکت صفحه مکانی-زمانی نیز کوچکتر و این سرعت پایین باعث جاروب شدن مساحت بیشتری از صفحه عامل مهاجم توسط پهپاد می‌شود. در ادامه روابط ریاضی برای محاسبه تغییرات میزان پوشش ارائه می‌شود.



شکل ۱. اثر حرکت پهپاد و عامل نفوذی در صفحه مکانی-زمانی

با استفاده از شکل ۱ و پارامترهای تعریف شده در این شکل مدت زمانی که طول می‌کشد پهپاد طول دروازه نظارت را طی کند با رابطه ۱ بیان می‌شود.

$$t_H = \frac{H}{v_u} \quad (1)$$

در این رابطه  $H$  طول دروازه و  $v_u$  سرعت پهپاد است. مسافتی را که عامل مهاجم در این زمان با سرعت متوسط  $\bar{v}_t$  به منطقه نفوذ می‌کند با رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

این مقدار در روش پیشین برای محاسبه میزان پوشش در نظر گرفته نمی‌شد. پس معیار پوشش موفقیت سیستم نظارت در ایجاد ترس در عامل مهاجم و انصراف آن را نمایندگی نمی‌کند. برای رفع این نقیصه با تعریف معیار جدید میزان موفقیت سیستم نظارت در شکل جامع‌تری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. گفتنی است حالت یادشده یک حالت حدی است و بیشتر به‌منظور تشریح مبانی ارتقائی که در معیار پوشش به‌کار رفته، ارائه گردید. در فرم کلی‌تر، معیار پوشش باید توانایی ملحوظ ساختن تغییرات رفتار عامل به‌دلیل وجود سیستم نظارت را داشته باشد. آنچه از آگاهی عامل مهاجم روی معیار موفقیت سیستم تأثیر می‌گذارد، تغییر در رفتار عامل مهاجم است و می‌تواند روی مدل و عدد ارزیابی تأثیرگذار باشد. به‌عنوان مثال اینکه تعدادی از عوامل مهاجم از تصمیم خود صرف‌نظر می‌کنند و وارد مرز نمی‌شوند، این می‌بایست به‌عنوان موفقیت سیستم نظارت به حساب آید. عدم موفقیت از دیدگاه عامل مهاجم را می‌توان به‌صورت احتمال اجتماع دو مجموعه نوشت: مجموعه‌ای از عوامل که تصمیم بر عدم عبور دارند (A) و مجموعه عواملی که توسط سیستم نظارت مشاهده می‌شوند (B).

به‌دلیل استقلال بین این دو مجموعه حاصل احتمال اشتراک آنها برابر حاصل ضرب احتمال هر کدام از آنهاست. بنابراین بازنویسی معادله ۵ برابر است با:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (5)$$

در معادله ۶  $P(A)$  مربوط به عامل‌هایی است که به‌دلیل حضور سیستم نظارت از تصمیم خود منصرف می‌شوند و  $P(B)P(A')$  احتمال گیرافتادن عامل مهاجم توسط سیستم نظارت است. بنابراین این معادله پارامتری جدید؛ یعنی انصراف عوامل را در میزان موفقیت سیستم نظارت موثر می‌داند. به‌عبارت دیگر انصراف عامل مهاجم به‌عنوان موفقیت سیستم نظارت هوایی تلقی می‌گردد.

$$\begin{aligned} P(A \cup B) &= P(A) + P(B) - P(A)P(B) \\ &= P(A) + P(B)(1 - P(A)) \\ &= P(A) + P(B)P(A') \end{aligned} \quad (6)$$

در ارزیابی میزان موفقیت سیستم نظارت هوایی باید به تأثیر عواملی چون پوشش گیاهی، میزان گردوغبار، میزان نور محیط، هوای طوفانی، عوارض زمین و استتار در کاهش احتمال مشاهده عامل مهاجم توجه نمود. به‌عبارت دیگر، این عوامل منجر به تفاوت دو مفهوم پوشش مکانی - زمانی و احتمال مشاهده عامل

#### ۴. تحلیل رفتار عوامل مهاجم

عوامل مهاجم به‌دلیل اطلاع از سیستم نظارت روی منطقه، رفتاری متفاوت از خود نشان می‌دهند. این رفتارها را می‌توان به‌صورت زیر فهرست کرد:

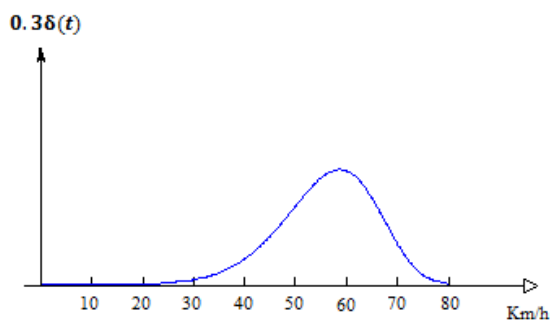
۱. تعدادی از عوامل مهاجم که قبلاً در غیاب سیستم نظارتی وارد منطقه می‌شدند اکنون به‌دلیل ضعف و عدم توانایی گریز، از تصمیم خود مبنی بر نفوذ به داخل مرز منصرف می‌شوند بنابراین در تابع توزیع احتمال انتخاب سرعت‌های مختلف یک مؤلفه ضربه در سرعت صفر وجود خواهد داشت

۲. تعدادی از عوامل مهاجم سیستم‌های خود را سامان داده و با سرعت بیشتری نسبت به حالت قبل وارد مرز می‌شوند

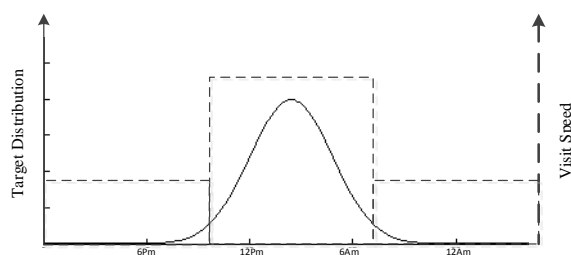
۳. تعدادی دیگر از سیستم نظارتی اطلاع ندارند و با رفتاری معمولی وارد مرز می‌شوند

با بررسی آماری این جامعه بخشی از تغییرات رفتار عوامل مهاجمی در تغییرات سرعت حرکت آنها در مرزهای داخلی مدل می‌شود. عواملی را که از تصمیم خود مبنی بر عبور و نفوذ به مرزهای داخلی منصرف می‌شوند سرعت صفر، و عواملی را که با تجهیزات مختلف و شرایط رفتاری مختلف وارد مرز می‌شوند دارای سرعت متوسط بین صفر تا ۸۰ کیلومتر بر ساعت هستند. این رفتارها به‌صورت یک جامعه آماری که سرعت متوسط متفاوت بین صفر تا ۸۰ کیلومتر بر ساعت را انتخاب می‌کنند در شکل ۳ رسم شده است. گفتنی است این تابع توزیع به‌عنوان یک نمونه ارائه شده است و با تحلیل آماری دقیق‌تر می‌توان به توابع توزیع مناسب‌تری دست یافت. آنچه در این مقاله اهمیت دارد، ارائه مفهوم

پهپاد از منطقه را نشان می‌دهد. محور سمت چپ تابع توزیع نفوذ عامل مهاجم را در ۲۴ ساعت نشان می‌دهد، محور سمت راست و نمودار خطچین میزان پوشش را نشان می‌دهد که متناسب با سرعت بازدید منطقه است. در بازه زمانی که تعداد عامل مهاجم بیشتری وارد منطقه می‌شوند سرعت بازدید (تعداد بازدید) از منطقه بیشتر می‌شود. از این طریق می‌توان پوشش مؤثرتری ایجاد کرد که نتیجه آن بالارفتن احتمال موفقیت با امکانات ثابت است.

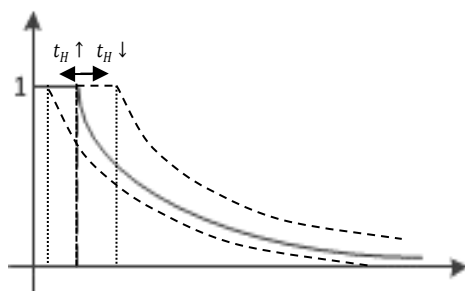


شکل ۳. تابع چگالی احتمال انتخاب سرعت‌های متوسط مختلف توسط عوامل مهاجم



شکل ۴. تابع فرضی توزیع نفوذ عوامل مهاجم و میزان بازدید در طول شبانه‌روز

تغییر در سرعت بازدید موجب کاهش زمان  $t_H$  خواهد شد و باعث تغییر در معادله ۶ تابع پوشش پهپاد می‌شود. تغییرات تابع پوشش متناسب با تغییرات سرعت پهپاد به صورت شکل ۵ است.



شکل ۵. اثر تغییرات سرعت بازدید روی تابع پوشش

به منظور افزایش کارایی سیستم اگر در بازه  $w/t_H$  از مرکز تابع توزیع همانند شکل ۴ سرعت بازدیدها  $n$  برابر شود، با فرض اینکه تابع معرفی شده در شکل ۴ توزیع نرمال دارد، با توجه به

و روش عمومی برای محاسبه میزان پوشش مکانی - زمانی براساس تابع توزیع احتمال سرعت هدف و بیان اثر آن بر بهبود میزان پوشش می‌باشد. شکل ۳ یک تابع توزیع تغییر رفتار عامل مهاجم برحسب سرعت متوسط آن است که انتگرال آن برابر یک است. این تابع توزیع به دلیل نوع پراکندگی و تراکم پراکندگی در سرعت‌های بالاتر، با تقریب مناسبی به صورت مجموع دو تابع ضربه و تابع توزیع ویبال<sup>۲</sup> فرض می‌شود. با آگاهی از سیستم نظارت از هر ده عامل مهاجم سه عدد از آنها منصرف می‌شوند و توزیع سایر عامل‌ها به سویی انتخاب سرعت‌های بالاتر گسترش می‌یابد. احتمال به دام افتادن عامل مهاجم در سرعت متوسط  $\bar{v}_i = \bar{v}_i^* > 0$  توسط سیستم پوشش هوایی با رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$P(A^*)P(B)|_{v_i^*} = N_i(v)P_C(v)|_{v_i^*} \quad (7)$$

در این رابطه،  $N_i(v)$  توزیع عامل‌ها برحسب سرعت متوسط و  $P_C(v)$  میزان پوشش است. با توجه به بازه گستره سرعت متوسط عامل مهاجم (شکل ۳)، احتمال پوشش کل به ازای همه عواملی که به داخل مرز نفوذ می‌کنند توسط رابطه ۸ به دست می‌آید.

$$P(A^*)P(B) = \int_{0^+}^{v_{max}} N_i(v)P_C(v)dv \quad (8)$$

با توجه به معادله ۶ و ۸ احتمال موفقیت کل (S) توسط رابطه ۹ بیان می‌شود.

$$S = \int_{0^-}^{0^+} N_i(v)P_C dv + \int_{0^+}^{v_{max}} N_i \times P_C dv \quad (9)$$

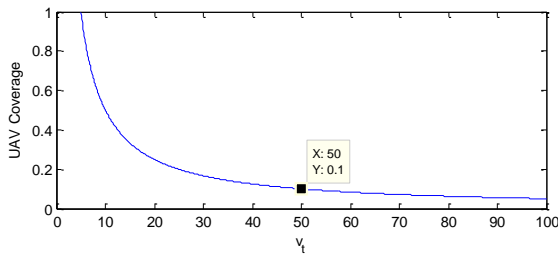
$$= \int_{0^+}^{v_{max}} N_i(v)P_C(v)dv$$

می‌توان با استفاده از معادله ۹ نتایج تحلیلی را به صورت کمی شبیه‌سازی و تحلیل کرد.

## ۵. ارزیابی اثر توزیع نامتوازن در زمان ورود اهداف بر میزان پوشش

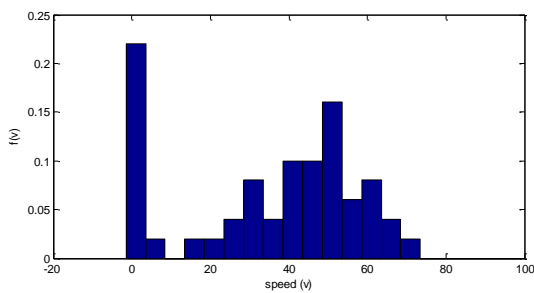
در طول شبانه‌روز به دلیل شرایط فیزیکی آب‌وهوا و روشنایی، عوامل مهاجم زمان‌های خاصی از شبانه‌روز را برای ورود به مرز انتخاب می‌کنند. بنابراین برای این وضعیت نیز باید تابع توزیعی در نظر گرفت که این عدم توازن را شامل شود. بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد تراکم نفوذ عوامل مهاجم به مرز در بازه ۱۲:۰۰ شب تا ۶:۰۰ صبح دارای بیشترین مقدار است. شکل ۴ نمونه تابع توزیع نفوذ عوامل مهاجم را در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز و درصد بازدید

مهاجم در شکل ۷ رسم شده است. پراکندگی نرمالیزه شده عامل‌های مهاجم در شکل ۷ رسم شده است.

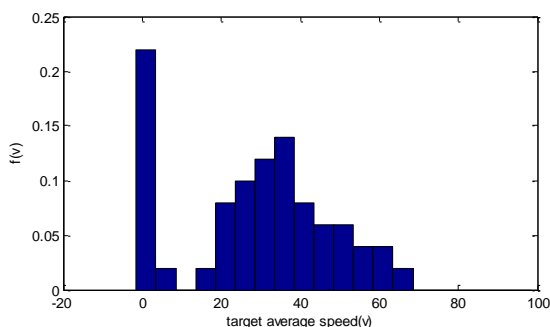


شکل ۶. میزان پوشش پهپاد بر حسب سرعت عامل مهاجم

احتمال عدم موفقیت عامل مهاجم با استفاده از معادله ۹ به صورت حاصل ضرب توزیع در میزان پوشش و انتگرال روی سطح آن به دست می‌آید. برای این مثال تابع توزیع شکل ۷ را در تابع عدم موفقیت هدف شکل ۶ ضرب شده و مجموع آن احتمال عدم موفقیت عامل مهاجم را خواهد داد. برای این مثال احتمال عدم موفقیت برابر ۰/۳۲ است. با در نظر داشتن توزیع عامل‌ها در ورود به منطقه در طول ۲۴ ساعت شبانه روز و افزایش بازدید به دو برابر در ساعات پرتردد، میزان موفقیت سیستم نظارت به ۰/۴۵ افزایش می‌یابد. جدول ۲ نتایج حاصل از بهبود شاخص موفقیت با بهبود مدل‌سازی سیستم را نشان می‌دهد.



شکل ۷. تابع نرمالیزه شده پراکندگی عامل‌های مهاجم



شکل ۸. تابع نرمالیزه شده پراکندگی عامل‌های مهاجم

با تغییر شرایط منطقه به گونه‌ای که روی سرعت متوسط عامل مهاجم تأثیر بگذارد و آن را کاهش دهد، نیز می‌توان

ویژگی تابع توزیع نرمال و استفاده از رابطه ۹، تابع موفقیت سیستم در شرایط جدید با رابطه ۱۰ معرفی می‌شود.

$$S = 0.95 \int N_i P_C dv_i + 0.05 \int N_i P_C dv_i \quad (10)$$

در این رابطه،  $P_C$  و  $P_{C'}$  به ترتیب تابع پوشش پهپاد در زمان‌های پرتردد و زمان‌های کم‌تردد است. با وجود کوچک بودن  $w/t_H$  و تغییرات  $t_H$  و نیز با توجه به تابع توزیع عامل مهاجم، می‌توان از تغییرات نقطه  $w/t_H$  در محاسبات صرف نظر کرد.

$$S = 0.95 \times n \int N_i P_C dv_i + 0.05 \times \frac{24}{4\sigma^2 n} \int N_i P_C dv_i \quad (11)$$

$$= \left( 0.95n + \frac{24}{4\sigma^2 n} 0.05 \right) \int N_i P_C dv_i > \int N_i P_C dv_i$$

به طوری که  $n$  وابسته به واریانس توزیع زمان ورود انتخاب می‌شود، به گونه‌ای که هرچه واریانس کوچکتر باشد مقدار  $n$  می‌تواند بزرگتر انتخاب شود. معادله ۱۱ نشان می‌دهد با فرض اینکه این تابع توزیع احتمال برقرار باشد، می‌توان سناریوی پوشش را با این زمان بندی تطبیق داد و با حفظ متوسط امکانات پهپادی به کار گرفته در یک دوره زمانی مشخص (یک شبانه‌روز)، پوشش را در زمان‌های پرترددتر افزایش داد. در این صورت درصد تشخیص عامل‌های مهاجم افزایش خواهد یافت.

### ۶. شبیه‌سازی

سناریوی به کار رفته در این شبیه‌سازی مطابق شکل ۱ است. سرعت پهپاد ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت و طول دروازه بازدید برای این پهپاد ۴۰ کیلومتر است. اگر بازه دید حسگر روی سطح زمین در ارتفاع مورد نظر به ضلع یک کیلومتر باشد و توزیع عامل‌های مهاجم با بررسی آماری به صورت شکل ۷ باشد، احتمال عدم موفقیت عامل‌های مهاجم در نفوذ به داخل مرز به صورت زیر قابل محاسبه است. شکل ۶ تابع عدم موفقیت هدف را در سرعت‌های مختلف این عامل‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به رابطه ۴ و جایگذاری مقادیر عددی، رابطه میزان پوشش سیستم نظارت به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$P_C = \frac{w}{x_i} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \bar{v}_i \leq 5 \\ \frac{5}{\bar{v}_i} & \bar{v}_i > 5 \end{cases} \quad (12)$$

با رسم رابطه ۱۲ برحسب  $\bar{v}_i$  نمودار ۶ که نشان دهنده میزان عدم موفقیت عامل مهاجم است حاصل می‌شود. این تابع دارای مقدار یک در سرعت نزدیک به صفر و با افزایش سرعت عامل مهاجم مقدار آن کاهش می‌یابد. پراکندگی نرمالیزه شده عامل‌های

گردد. همچنین محاسبه میزان پوشش منطقه از منظر عامل مهاجم می‌تواند ارزیابی دقیق‌تری از عملکرد سیستم ارائه نماید. استخراج مدل دقیقی از رفتار عامل مهاجم و همچنین سناریوهای فرار که می‌تواند توسط او به کار گرفته شود نیز در انتخاب سناریوهای مناسب پوشش مرز کمک شایانی خواهد کرد.

### پیوست: استفاده از سرعت متوسط در محاسبات

اگر سرعت متوسط عامل مهاجم در دست باشد، با فرض توزیع یکنواخت عامل مهاجم در منطقه می‌توان میزان پوشش پهپاد را محاسبه کرد. شکل ۹ دروازه‌ای به طول  $H$  را نشان می‌دهد. اگر سرعت عامل مهاجم در مدت زمان پوشش ثابت باشد، تصویر حسگر روی سطح زمین که میزان پوشش را مشخص می‌کند به صورت شکل ۹ (منطقه سمت راست شکل) خواهد بود. اما در صورتی که عامل مهاجم در طول مسیر سرعت‌های مختلفی را به خود بگیرد، چون توزیع عامل‌ها یکنواخت فرض شده است، پس صفحه فرضی عامل مهاجم نیز با همین سرعت حرکت خواهد داشت. نتیجه این حرکت پوششی است که در شکل ۹ سمت چپ شکل حاصل می‌شود. برای حالت اول منطقه پوشش به صورت یک متوازی‌الاضلاع به عرض  $w$  (عرض حسگر) و ارتفاع  $H$  (طول دروازه مورد پوشش) خواهد بود. مساحت این منطقه برابر حاصل ضرب عرض حسگر در طول  $H$  است. اما در صورتی که سرعت عامل مهاجم متغیر باشد، در این صورت می‌توان منطقه مورد پوشش را به صورت مجموع  $n$  متوازی‌الاضلاع نشان داد. مساحت این ناحیه برابر است با:

$$\sum_n (h_i \times w) = w \times \sum_n h_i \quad (13)$$

مجموع  $h_i$  ها برابر طول دروازه یعنی  $H$  خواهد بود. پس با این توصیف مساحت هر دو ناحیه با هم برابر است. برای محاسبه میزان پوشش مساحت صفحه متحرک عامل مهاجم نیز باید محاسبه گردد. طول این صفحه برابر طول دروازه یعنی  $H$  است. عرض این صفحه از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$C = \sum_n C_i = \sum_n (v_i t_i) \quad (14)$$

در این رابطه  $t_i$  زمان طی کردن طول  $h_i$  توسط پهپاد است،  $C_i$  عمق نفوذ عامل مهاجم در زمان  $t_i$  و با سرعت لحظه‌ای  $v_i$  است. با ضرب صورت و مخرج رابطه ۱۴ در  $\sum_n t_i$  داریم:

$$C = \sum_n (v_i t_i) \times \frac{\sum_n t_i}{\sum_n t_i} = \frac{\sum_n (v_i t_i)}{\sum_n t_i} \times \sum_n t_i \quad (15)$$

عملکرد سیستم نظارت را بالا برد. با قراردادن موانع تابع توزیع سرعت متوسط به صورت شکل ۸ تغییر می‌یابد. نتایج این تغییر در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. مقایسه نتایج میزان موفقیت سیستم نظارت

شرایط مدلسازی مختلف	احتمال موفقیت سیستم نظارت
میزان پوشش (با معیار قبلی)	۰/۱
موفقیت سیستم با مدلسازی جدید	۰/۳۲
موفقیت سیستم با در نظر داشتن توزیع در طول شبانه‌روز	۰/۴۵

جدول ۳. تغییر نتایج با ایجاد موانع و پایین آوردن سرعت عامل نفوذی

شرایط مدلسازی مختلف	احتمال موفقیت سیستم نظارت
تابع توزیع اولیه	۰/۳۲
ایجاد موانع (تابع توزیع شکل ۷)	۰/۳۵

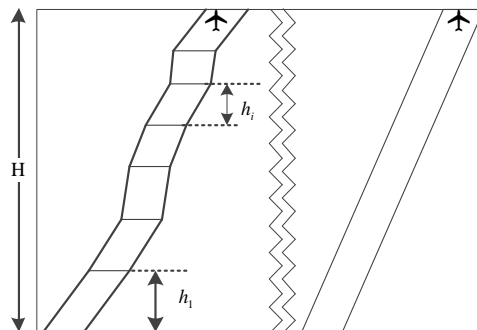
### ۷. نتیجه گیری

پوشش مکانی - زمانی معیار مناسبی برای ارزیابی میزان پوشش یک سیستم حفاظت از مناطق مرزی در طول زمان است. برای افزایش دقت محاسبه این معیار باید تغییر رفتار عامل مهاجم به واسطه اطلاع از وجود سیستم نظارت هوایی را در نظر گرفت. احتمال انتخاب سرعت‌های مختلف توسط عامل مهاجم، انجام مانورهایی که منجر به کاهش سرعت مؤثر عامل مهاجم می‌گردد، انتخاب زمان‌های خاص برای تردد از مرز، عوارض منطقه و ویژگی عوامل مهاجم از جمله عواملی هستند که باید در محاسبه دقیق پوشش مکانی - زمانی مورد توجه قرار گیرند. نتایج نشان می‌دهند که هرچه مدلسازی به مدل واقعی نزدیکتر باشد، با انتخاب سناریوی مناسب نتایج بهتری از به کارگیری سیستم نظارت پهپاد حاصل می‌شود و معیار مناسب‌تری برای ارزیابی روش‌ها و سناریوهای مختلف پوشش و انتخاب گزینه برتر فراهم می‌گردد. به کارگیری نظریه میزان پوشش در کنار احتمال مشاهده شدن می‌تواند به ارزیابی دقیق‌تری از عملکرد سیستم نظارت هوایی منجر گردد. این معیار برای مقایسه پوشش در دو رویکرد منطقه‌ای و خط مرزی و همچنین مقایسه سناریوهای پوشش تصادفی و منظم کارآمد خواهد بود. از مهم‌ترین اقداماتی که باید در ادامه این تحقیق مورد توجه قرار گیرد توسعه معیار پوشش مکانی - زمانی به گونه‌ای است که امکان مقایسه سناریوهای منطقه‌ای و خط مرزی برای پوشش مرزهای کشور قابل مقایسه

با استفاده از معادلات ۱۶ و ۱۷ عرض صفحه متحرک عامل مهاجم به صورت ۱۸ به دست می آید:

$$C = \bar{v} \times t_T = \bar{v} \times \frac{H}{v_u} \quad (18)$$

چون طول دروازه نظارت و سرعت پهپاد ثابت است، پس عرض صفحه متحرک تابعی از سرعت متوسط عامل مهاجم است. رابطه ۱۸ نشان می دهد که اگر عامل مهاجم با سرعتی متغیر وارد مرز شود، با دانستن سرعت متوسط آن در یک بازه زمانی می توان میزان پوشش سیستم را محاسبه کرد.



شکل ۹. مقایسه پوشش مکانی - زمانی پهپاد برای عامل تهاجمی با سرعت ثابت (سمت راست) و عامل تهاجمی با سرعت متغیر (سمت چپ)

عبارت  $\frac{\sum_n (v_{ii} t_i)}{\sum_n t_i}$  در رابطه ۱۵ معرف سرعت متوسط است.

پس عرض صفحه متحرک عامل مهاجم از رابطه ۱۶ محاسبه می شود.

$$C = \frac{\sum_n (v_{ii} t_i)}{\sum_n t_i} \times \sum_n t_i = \bar{v} \times \sum_n t_i \quad (16)$$

زمان به صورتی تابعی از سرعت پهپاد و با استفاده از رابطه ۱۷ محاسبه می شود.

$$t_T = \sum_n t_i = \frac{\sum_n h_i}{v_u} \quad (17)$$

## ۸. مآخذ

- [1] C. Kiekintveld, V. L. Kreinovich, O. Lerma, Optimizing trajectories for unmanned aerial vehicles (UAVs) patrolling the border, *San Francisco, CA*, pp. 23-26, May 2011.
- [2] P. Vincent, I. Rubin, A framework, analysis for cooperative search using UAV swarms, in *Proceedings of the 2004 ACM symposium on Applied computing*, pp. 79-86, 2004.
- [3] Y. Altshuler, V. Yanovsky, I. A. Wagner, A. M. Bruckstein, The cooperative hunters-efficient cooperative search for smart targets using uav swarms, in *Second International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), the First International Workshop on Multi-Agent Robotic Systems (MARS)*, pp. 165-170, 2005.
- [4] M. Chishti, C. Bergeron, *virtual border fence given mixed assessment in first test*, DC: Migration Policy Institute, Washington, 2008.
- [5] D. Flesher, *Border Security: Air Team*, May 2011;
- <https://www.isr.umd.edu/~austin/enes489p/projects2011a/BorderSecurity-Air-Team-FinalReport.pdf> (accessed 31 Jan 2018)
- [6] A. R. Girard, A. S. Howell, J. K. Hedrick, *Border Patrol and surveillance missions using multiple unmanned air vehicles*, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, 14-17 December 2004.
- [7] D. Bein, W. Bein, A. Karki, B. Madan, Optimizing Border Patrol Operations Using Unmanned Aerial Vehicles, In *Information Technology-New Generations (ITNG), 12<sup>th</sup> IEEE International Conference*, pp. 479-484, Apr. 2015.
- [8] M. H. Chen, C. F. Chen, W. S. Wu, *A river monitoring system using UAV and GIS*, Singapore, 5-9 November 2001.
- [9] K. J. Ordonez, *Modeling the U.S. Border Patrol Tucson Sector for the Deployment and Operation of Border Security Forces*, Arizona State: Naval Postgraduate School, March 2006.



- [10] G. Lau, 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, 2014.
- [11] A. Ryan, M. Zennaro, A. Howell, An overview of emerging results in cooperative UAV control, *In Proceedings of 43<sup>rd</sup> IEEE Conference on Decision and Control*, 2004.
- [12] J. Blazakis, *Border Security and Unmanned Aerial Vehicles*, CRS Report for Congress, January 2, 2004.
- [13] J. G. Chad, C. Haddal, *Homeland Security: Unmanned Aerial Vehicles and Border Surveillance*, Congressional Research Service, July 8, 2010.
- [14] E. Gutierrez, J. Juett, C. Kiekintveld, Generating Effective Patrol Strategies to Enhance US Border Security, *Journal of Strategic Security*, Vol. 152, No. 5, pp. 1-6, 2013.
- [15] H. Khandani, S. M. M. Dehghan, H. Moradi, *Ground Moving Target Handover between UAVs accompany with the Most Regional Coverage*, Tabriz journal of electrical engineering, vol. 47, no.3, pp. 989-999, 1396. (in Persian فارسی)
- [16] P. Jones, *Cooperative Area Surveillance Strategies Using Multiple Unmanned System*, Ph.D. dissertation Georgia Institute of Technology, May 2009.
- [17] K. Kalyanam, P. Chandler, M. Pachter, 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.
- [18] M. A. Khesali, S. M. Mehdi Dehghan, S. H. Cheheltani, A new spatiotemporal virtual plane to evaluate the performance of the border coverage scenarios, *2014 Second RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics*, 15-17 Oct. 2014.
- [19] M. A. Khesali, S. M. M. Dehghan, A. H. Tavakoli, *Evaluation and Selection of Proper Aerial Coverage Scenario Using Spatio-Temporal Virtual Plane in Border Patrolling Application*, *Tabriz journal of electrical engineering*, vol. 47, no. 2, pp. 517-525, 1396. (in Persian فارسی)

پی نوشت

- 
1. secure border initiative network
  2. weibull