فصلنامه علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال چهارم، شماره سه، پاییز 1399

هماهنگ سازی، تخصیص بهینه و فرماندهی پویا در سیستم پدافندی ابعاد وسیع واکنش سریع

(عنوان می تواند دو خطی باشد)

دکتر احمد افشار[1]، روح اله سبحانی[2]*

تاریخ دریافت: 1399/02/15 **تاریخ پذیرش:** 1399/09/16

چکیده

مساله هماهنگ سازی لایه های دفاعی در برابر تهاجم هوایی از طریق تخصیص بهینه منابع دفاعی و پوشش قطاعی مناطق از موضوعات به روز و چالشی در حوزه پدافند هوایی می باشد. سیستم پدافند هوایی مورد نظر در این تحقیق شامل سکوهای متحرک بدون سرنشین هستند که هر یک دارای تجهیزات و تسلیحات غیرهمگون با ویژگیهای مشخص می باشند. در این مقاله ابتدا توزیع استاتیک مدافعین در پهنه منطقه پدافندی صورت می‌گیرد، به نحوی که فضای مورد دفاع، پوششی بهینه و با ضریب همپوشانی مناسب داشته باشد و از سوی دیگر به منظور جبران خسارت با از بین رفتن تعداد مشخصی منبع دفاعی، امکان حفظ پوشش با ضریب تدافع مشخص، فراهم باشد. سپس دو مساله حیاتی تخصیص قطاع پوشش (SCP[2]) به همراه مساله تخصیص تجهیزات دفاعی غیرهمگون(DAAP[3]) فرموله و با روش پیشنهادی در سه حالت مختلف تحلیل شده است. DAAP به واسطه ذات حیاتی خود نیازمند حل بلادرنگ است که باید زمان در حل مساله بهینه، وارد معادلات گردد. در نهایت وابستگی بین این دو مساله با در نظر گرفتن مدل تعاملات زیرسیستمها بررسی شده است. دستاورد این روشها کاهش منبع دفاعی مورد نیاز با حفظ بهینگی لازم می باشد.

واژگان کلیدی: پدافند هوایی بلادرنگ ، تخصیص بهینه منابع، کنترل فرماندهی، هماهنگ سازی.

[*,۱] دانشیار دانشکده برق دانشگاه امیر کبیر (نویسنده مسوول) aafshar@aut.ac.ir

[۲] دانشجوی دکتری مهندسی برق- کنترل، دانشگاه امیر کبیر nimas@aut.ac.ir

[2] Sector Coverage Problem

[3] Defense Asset Allocation Problem

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-05-20]

1. مقدمه عنوان اول)

پدافند هوایی یکی از مسایل بسیار مهم در حوزه دفاعی هر کشور می باشد، لذابه لحاظ اهمیت موضوع همواره کوشیده شده تا توسعه و به روز رسانی پیوسته ای در این خصوص در جریان باشد.

سیستم پدافند هوایی مورد نظر این مقاله به صورت گروهانهای محلی، در مکانهای مشخصی از پهنه جغرافیایی کشور مستقر شده اند که به آنها زیرسیستمهای دفاعی اطلاق می شود. هر کدام از این گروهانهای محلی مشتمل بر تسلیحات دفاعی غیرهمگونی هستند که بر روی سکوهای متحرک بدون سرنشین نصب گردیده اند تا بتوانند در زمان بروز عیب یا تغییر سناریوی دفاع با جابجایی محاسبه شده، تغییر پوشش دفاعی را برای نقاطی که مدافع خود را از دست داده اند ایجاد کنند. در خصوص مهاجمین هم باید خاطر نشان ساخت که یا به صورت یکباره یا متوالی وارد منطقه تحت حفاظت گروهانها می شوند و هدف انها تخریب مناطق تحت حفاظت می باشد، لذا در نقطه مقابل هدف مدافعین به حداکثر رساندن نسبت تخریب مهاجمین در بازه زمان درگیری است. این هدف با تخصیص بهینه هر سکو و تسلیحات آن به مقابله با هر مهاجم در مدت زمان محدود بستگی دارد. در این تخصیص پارامترهایی چون فاصله مهاجم تا هدف، سرعت و قدرت مانور آن، محدودیتهای و قابلیتهای مدافع و تراژکتوریهای تسلیحات هر دو تاثیرگذار است.

در حل مساله پدافند هوایی چند موضوع مهم وجود دارد که شامل مواردی چون تشخیص مهاجم، رهگیری کامل، تخصیص مدافع به هر مهاجم وارد شده، درگیری نهایی با آن و سپس ارزیابی پویا از وضعیت صحنه نبرد می‌باشد. مقاله حاضر صرفاً به تخصیص بلادرنگ مدافع مناسب برای مقابله با مهاجمین تشخیص داده شده توسط سیستمهای دیگر پرداخته و در آن پارامترهای اساسی همانند سرعت و زاویه ورود مهاجمین، تراژکتوری پروازی و مدل مهاجمین و تسلیحات همراه آنها برای تهاجم، قابلیت جابجایی مدافعین برای تغییر صحنه نبرد و محدودیت زمان اجرای تخصیص و درگیری مورد نظر قرار می گیرد.

روشهای تخصیص منابع دفاعی و توزیع وظایف بهینه در سناریوهای مختلف دفاع در برابر حملات هوایی، از مهمترین موضوعات پدافند هوایی است که مطالعات و تحقیقات قابل توجهی بر روی آن انجام شده است. این تهدیدات هوایی شامل هواپیماهای مهاجم با توان حمله متفاوت،موشکهای بالستیک و کروز می باشند که هریک ویژگیهای منحصر به فرد خود را برای مدل سازی دارند. لذا دکترین دفاع هوایی در برابر هر یک از این تهدیدات متفاوت بوده و از اهمیت به سزایی برخوردار است. در شکل (1) نمونه ای از سامانه پدافندی با عناصر دفاعی متنوع نشان داده شده است.

شکل 1. نمونه ای از سامانه پدافندی

مساله اصلی نحوه رسیدن به بهترین مقابله از طریق تخصیص مدافعین به هر مهاجم هوایی در زمان حمله از یک سو و تخصیص سلاح هر مدافع در این سناریو می باشد. در مساله تخصیص باید از هر دو منظر مدافع و مهاجم به موضوع نگاه نموده و تلاش نمود نسبت هزینه تخریب مهاجم به تخریب مدافعین بیشینه گردد. در سال Panel 1997 مساله پدافند هوایی رابه عنوان یکی از موارد تحقیقاتی مهم در حوزه رزم مطرح نموده و تعاویف مربوطه را توسعه داد[1]. در سال 2000 Bertsekas و همکارانش یک روش حل با استفاده از برنامه ریزی دینامیک عصبی (NDP) برای حل مساله تخصیص منابع دفاعی بزرگ را ارئه نمودند که از روشهای یادگیری مبتنی بر شبکه عصبی و توابع cost-to-go برای حل مسایل پیچیده برنامه ریزی دینامیک استفاده می‌کرد[2]

در سال Wacholder 2005 روشی برای حل تعداد تخصیص زیاد را از طریق تلفیق شبکه عصبی با روش ضرب دیفراسیلی

فصلنامهٔ علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال چهارم، شمارهٔ سه، پاییز 1399

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-05-20]

لاگرانژ ارائه نمود[3]. در سال 2007 نیز Jaiswal همان روش را با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی پیشنهاد نمود[4]. در سال 2007 Bakhouya و همکارش روشی مبتنی بر الگوریتم بهنیه سازی تخصیص دفاعی بر مبنای ایمنی بدن انسان را ارائه نمودند[5].

در سال 2012 Golany و همکارش با به بررسی نحوه تخصیص سناریوهای مقابله با اقدامات متخاصمانه پرداخته و روش خود را توسعه دادند[6]. در سال 2017 Afshan Naseem و همکاران با استفاده از الگوریتم 3 D SMA- (تزویج پایدار) و با حضور خبره در حلقه، مساله تخصیص دینامیک تسلیحات را انجام داده و بهبود 31% را بدست آوردند[7].

در این مقاله مدافعین مستقر در منطقه تحت حفاظت، در قالب گروهانی از سکوهای بدون سرنشین با قابلیت حرکتی با 2 درجه آزادی(x,y) محوری و2 درجه آزادی چرخشی ,Yaw) (Pitch فرض می‌شوند که در حال ارتباط با یکدیگر. ضمن اینکه هر گروهان از مدافعین، به عنوان زیرسیستمی از یک سیستم ابعاد وسیع تلقی می‌گردد که با مقر فرماندهی به عنوان لایه هماهنگ سازی در ارتباط دو سویه است و فرامین تعاملاتی و کنترلی لازم را دریافت کرده و بازخوردهای مورد نظر از وضعیت خود را ارسال می نمایند.

به دلیل تعدد زیرسیستمهای دفاعی در قالب گروهانهای مختلف از یک سو و توزیع و گستردگی آنها در پهنه جغرافیایی وسیع و از همه مهمتر حجم داده های فوق العاده زیاد مبادله شده میان آنها، سیستم پدافندی یک سیستم ابعاد وسیع در نظر گرفته شده است.

نکته دیگر در این مقاله آن است که در رویکردهای متداول، سامانه دفاعی در یک محل مشخص و ثابت از پیش تعیین شده قرار می گیرد ولی در این مقاله و با توجه به نیاز بازآرایی در زمان بروز عیب، هر سکوی پدافندی به صورت متحرک و با قابلیت عملیات مستقل در نظر گرفته شده است. از نوآوریهای دیگر دراین مقاله، وارد نمودن مساله زمان در روابط و فرمولهای بهینه سازی به عنوان تهدید انباشته با زمان می‌باشد .

به دلیل پیچیدگی محاسبات مساله تخصیص پدافندی، چند روش اقتضایی مختلف پیشنهاد شده است که مطابق بررسیهای انجام شده، در کلیه این مقالات، سناریوهای حمله مهاجم معین در نظر گرفته شده است. ضمن اینکه در فرمولاسیون مساله، زمان را در روابط خود لحاظ ننموده اند و فقط به مقایسه زمان اجرای پردازش بسنده نموده‌اند. مدل مهاجمین و پروفایل پروازی موشکهای شلیک شده از آنها و میزان صحت داده ها در خصوص مهاجمین نیز در روابط لحاظ گردیده است.

در بخش 2 تعریف مساله و فرمولاسیون آن انجام گرفته و معادلات مدافعین، مهاجمین و پارامترهای محیطی آورده شده است. در بخش 3 تخصیص بهینه قطاع پوششی منطقه توسط مدافعین آمده و در بخش 4 تخصیص بلادرنگ منابع دفاعی به مهاجمین صورت پذیرفته است. در بخش 5 نیز شبیه سازیهای انجام شده ارائه گردیده و پس از جمع بندی، مراجع کار آمده است.

2. تعریف مساله

در ابتدای تعریف مساله لازم است یادآوری شود که در حالت کلی دو مدل دفاعی در مساله، مورد نظر قرار گرفته است:

2-1. دفاع در برابر تعداد مهاجم شناخته شده

در این مدل از دفاع، تعداد و اندازه حمله مشخص بوده و تهاجم به صورت همزمان و یکباره رخ می دهد. در این مدل قابلیت درگیری ثابت و فاصله بین درگیریها معین فرض می شود. احتمال اصابت با یکبار شلیک در فاصله بین درگیریها نیز به دلایل مختلف از جمله فاصله درگیری متغیر خواهد بود. در این مدل هدف کمینه کردن میزان تخریب اهداف زمینی است.

2-2. دفاع در برابر تعداد مهاجم نامشخص و حمله متوالی

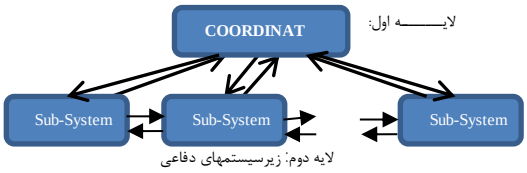
در این مدل از دفاع، تعداد و اندازه حمله مشخصن بوده و تهاجم در توالی های زمانی پی در پی رخ می دهد. در این مدل قابلیت درگیری متغیر بوده و فاصله بین درگیریها معین فرض می شود. احتمال اصابت با یکبار شلیک در فاصله بین

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-05-20]

درگیریها متغیر خواهد بود. در این مدل نیز هدف کمینه کردن میزان تخریب اهداف زمینی و حداکثر نمودن امکان بازیابی توان دفاعی تا حد قابل قبول است.

موضوع دیگر آن است که سیستم پدافندهوایی با توجه به سه ویژگی ذکر شده اصلی شامل تعدد زیاد بازیگران و المانها در سطح ملی، توزیع و گستردگی آنها در پهنه جغرافیایی و حجم داده های تبادلی فوق العاده زیاد به عنوان سیستم ابعاد وسیع تعریف می شود.

برای این سیستم ابعاد وسیع، دو لایه در نظر گرفته می شود که لایه اول لایه هماهنگ سازی و لایه دوم گروهانهای محلی پدافندی هستند که به عنوان زیرسیستمهای دفاعی $S_j=1,\ldots,n$ مطرح می باشند که در شکل (2) نمایش داده شده است. یکی از فرضهای مساله در چنین سیستمی این است که گروهانهای غیرهمگون از سکوهای متحرک بدون سرنشین، قابلیتهای دفاعی و تسلیحات متفاوتی دارند. ضمن اینکه با فرض دانستن قابلیتهای مدافعین و مهاجمین از قبیل قدرت تخریب و احتمال اصابت تسلیحات آنها و دقت اطلاعات تبادل شده بین مدافعین و لایه‌ها، سرعت واکنش سیستم دفاعی مناسب باشد.



شکل 2. سیستم پدافندی ابعاد وسیع دو لایه

با توضیحات فوق در حالت کلی فرض شده که تعداد $S_j=\{1,..,N\}$ زیرسیستم دفاعی (گروهان محلی) وجود دارد که هر یک از آنها دارای $m_p=\{1,\ldots,m\}$ سکوی متحرک بدون سرنشین می باشد. هر سکوی مذکور مجهز به $P_l=\{1,\ldots,p\}$ سلاح می‌باشند.

$S_j=\{1,\ldots,N\}$: مجموعه گروهانهای محلی

j: اندیس مدافعین

$m_p=\{1,\ldots,m\}$: مجموعه سکوی متحرک بدون سرنشین

$P_l=\{1,\ldots,p\}$: مجموعه تسلیحات مستقر روی هر سکو

$S_i=\{1,\ldots,n\}$: مجموعه مهاجمین تشخیص داده شده

i: اندیس هر مهاجم

V_{sj}: بردار سرعت مهاجم **j** ام

a_{sj}-*max*: حداکثر شتاب قابل تحمل برای مانورهای مهاجم **j** ام

$C_{m\text{-}sj}$: پروفایل پروازی موشکهای شلیک شده از مهاجم **j** ام

C_p: مجموعه پروفایلهای تسلیحات مستقر روی مهاجمین به نحوی که $C_{m\text{-}sj} \varepsilon\, C_p(Cm\text{-}sj\,,\, k)$

ضمنا لازم به ذکر است که چون مساله تخصیص از تشخیص مهاجم متفاوت است، لذا فرض می شود سامانه تشخیص مهاجمین، تعداد n_d مهاجم را تشخیص داده است.

به دلیل تخریب ناشی از حمله مهاجمین به مدافعین و نیز اختلال در داده های تبادلی بین مدافعین و مرکز فرماندهی یا رادارهای هدایتی، تعریفی از توان پدافندی لحظه ای هر زیر سیستم دفاعی بر حسب قابلیتهای مدافعین، قابلیت مهاجمین و تسلیحات آنها و میزان صحت اطلاعات درگیری به صورت زیر قابل ارائه می باشد:

$$T_d(t) = f\left(\sum_{j=1}^{N} E_{DTG\,(i)}\,;\; T_{info};\; \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} E_{Atk(j)}}\right) \qquad (1)$$

که در آن:

T_d: توان کل دفاعی زیر سیستم

E_{DTG} : توان هر مدافع

E_{Atk} : توان مهاجم و موشکهای آن

T_{info}: دقت اطلاعات درگیری

ابتدا مساله توزیع بهینه استاتیک سکوهای متحرک دفاعی در منطقه تحت حفاظت برای ایجاد پوشش کامل و نیز برخورداری از همپوشانی همسایگی مطرح می گردد. در مساله استاتیک، هدف کمینه کردن تعداد مدافعین فعال برای تضمین پوشش قطاع مورد نیاز است که به نام مساله پوشش منطقه

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-05-20]

تحت حفاظت نامیده می‌شود. سپس به تخصیص بلادرنگ مدافعین و تسلیحات آنها به مهاجمین وارده پرداخته می شود.

3. پوشش و تخصیص بهینه قطاع و تسلیحات

مدافعین در صحنه نبرد بر گستره زمینی توزیع شده اند و برای رسیدن به حداکثر پوشش منطقه، باید توزیع بهینه ای داشته باشند. لذا بر مبنای گراف ارتباطی آنها باهم و نیز مدل دینامیکی تحرک آنها، با کمک تقسیم‌بندی ورونوی، توزیع بهینه قابل دستیابی است. مدل دینامیک تمام مدافعین به صورت مدل درجه یک به صورت زیر تعریف می شود:

$$u_i = \dot{x}_i \quad \{i=1,0..,n\} \qquad (2)$$

که در آن u_i برمبنای حالت i امین مدافع و همسایه هایش تعیین می گردد. ضمناً فرض بر این است که هر مدافع حداقل یک همسایه دارد. حداکثر شعاع آشکارسازی هدف توسط هر مدافع برابر r_1 در صفحه xy و r_2 در صفحه xz و شرایط اولیه هر مدافع مقدار تصادفی نرمالایز شده بین [0،0]و[1،1] در نظر گرفته می شود. هدف توزیع مناسب مدافعین در یک فضای مربعی با طول r_{max} با تعداد n مدافع زمینی است، به نحوی که پوشش حداکثری با همپوشانی شعاعی کافی برای این منطقه ایجاد کنند. برای این منظور با استفاده از روش ورنوی [8] ، سیگنال کنترلی مناسب جهت جابجایی مدافعین قابل محاسبه است. قانون کنترلی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [9] :

$$= -K_p(x_i - C.v_i) \qquad (3)$$

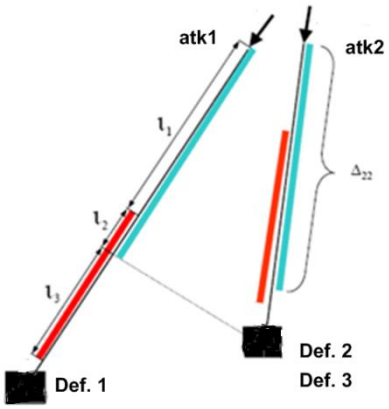
که در آن K_p بهره مثبت حلقه بوده و فرض می‌شود که پارتیشن‌های $V(x)=\{V_1,...,V_n\}$ به صورت پیوسته به روز رسانی می‌شوند.

4. حل بلادرنگ مساله تخصیص پدافندی

در این بخش با وارد کردن پارامتر زمان در فرآیند مساله، به تخصیص بلادرنگ پرداخته می شود. از آنجا که زمان کل عملیاتی UGV مدافع، شامل زمان تخصیص، زمان جابجایی، زمان استقرار و زمان آماده سازی حاصل می شود لذا:

$$t_{ugv} = t_{aloc+}t_{mov} + t_{stb} + t_{rld} \qquad (4)$$

برای مدل سازی مساله با فرض ورود مهاجمین از چند نقطه تصادفی، مدافعین حاضر در حلقه دفاعی مرتبط، باید به نحو بهینه جهت مقابله با مهاجمین تخصیص یابند. لذا در رابطه با سناریو مقابله متناسب با فاصله و سرعت و قابلیتهای مانور دو طرف، می توان مطابق شکل(3) مساله را تعریف نمود:



شکل 3. نمایی از نحوه مقابله مدافعین با مهاجمین مختلف

E_i : حداکثر تعداد درگیری ممکن علیه مهاجم **i** ام با استفاده از تاکتیک شلیک- بررسی اصابت- شلیک (SLS)[4]

V: مجموعه ترکیبهای معتبر از مدافعین j ام که می توانند با مهاجم i ام درگیر شوند.

$\overrightarrow{V_{at}}$: بردار سرعت تشخیص داده شده از مهاجم **i**ام توسط سامانه راداری

$\overrightarrow{V_{sj}}$: بردار سرعت موشک شلیک شده از مدافع jام

$\underline{r}_j$: حداقل فاصله درگیری مدافع j ام

$\overline{r}_j$: حداکثر برد درگیری مدافع j ام

t_{rld} : ثابت زمانی آمادگی مدافع برای درگیری

[4] Shoot Look Shoot

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-05-20]

d_i : فاصله اولیه مهاجم از منطقه تحت حفاظت در لحظه کشف

pd_i: فاصله لحظه ای مهاجم از مدافع

d_j : تعداد دارایی سلاح مدافع j ام

p_{ij} : احتمال اصابت در یکبار شلیک مدافع $\mathbf{j}$ ام علیه مهاجم i ام

t_i : زمان رسیدن موشک به مهاجم هدف

روابط زیر قابل تعریف می باشند:

$$va_i^* = max_j\{va_i : (i,j) \in V\} \quad (5)$$

$$\bar{r}_i^* = min\left\{f_i\,, max_j\{\bar{r}_j : (i,j) \in V\}\right\} \quad (6)$$

$$\underline{r}_i^* = min_j\{\underline{r}_j : (i,j) \in V\} \quad (7)$$

$$p_i^* = max_j\{p_{ij} : (i,j) \in V\} \quad (8)$$

مساله بهینه‌سازی در این مورد به صورت چند پارامتری زیر تعریف می گردد که در آن سرعت مهاجم و فاصله آن از منطقه تحت دفاع، آمده است.

$$ep_{ij} = w_1\frac{vs_i}{vs_i^*} + w_2.min\left\{\frac{\bar{r}_j}{\bar{r}_i^*}\right\} + w_3\frac{\underline{r}_i^*}{\underline{r}_j} + w_4\frac{p_{ij}}{p_i^*} \quad (9)$$

ep_{ij} پتانسیل دفاعی مدافع i ام برای درگیری با مهاجم j ام است. با شرط زیر، تکرار حلقه بهینه سازی صورت گرفته و تابع هزینه ارزیابی می‌گردد تا جواب بهینه تخصیص حاصل شود:

$$if\ \left(pf_k - va_k.\Delta_c - \left[\frac{pf_k - va_k.\Delta_c}{va_k + vs_j}\right].va_k\right) \geq \bar{r}_l$$

$$else\ \ pf_k = pf_k - va_k.\Delta_c - \left[\frac{pf_k - va_k.\Delta_c}{va_k + vs_j}\right].va_k$$

در مرحله بعد بر روی زمان تخصیص متمرکز شده و نحوه وارد نمودن آن در معادلات مساله بررسی گردیده است. برای این کار تابع تصادفی M که تابعی از زمان همگرایی الگوریتم تخصیص، ارزش مهاجم i ام، نسبت هزینه دفاع به هزینه تهاجم و نیز ارزش دارایی تحت محافظت j ام می باشد تعریف می گردد:

$$M_{ij} = f\left(\Delta\, t_j, T_i\,, \frac{C}{B}\,, VA_j\right) \quad (9)$$
$$,M_{ij} \in [0,1]$$

از آنجا که هدف اصلی در مساله تخصیص ارائه شده،کمینه‌گردن نسبت هزینه دفاعی به هزینه تهاجم است لذا:

$$min\frac{(Defence + Destroyed\ asset)\ cost}{Attack\ cost} = \min\sum_{i=1}\sum_{j=1}\frac{T_{B_j} + C_{D_i}}{T_i.X_{ij}(t).M_{ij}} \quad (10)$$

که در آن $X_{ij}(t)$ درایه تخصیص مدافع j ام به مهاجم i ام در زمان t می باشد و M_{ij} درایه تابع تصادفی تخصیص و T_i ارزش مهاجم i ام و C_{D_i} هزینه دفاع توسط مدافع j ام و T_{B_j} میزان تخریب توسط مهاجم j است.

برای وارد نمودن پارامتر زمان t در مساله از این منظر به مساله توجه می‌شود که مشابه پدیده دریفت دینامیکی، گذشت زمان منجر به انباشت تهدید و افزایش تخریب برای مدافع و منطقه تحت حفاظت می‌گردد. لذا چنانچه تابع هزینه انباشت تهدید در گذر زمان، بهینه شود پارامتر زمان در مساله تخصیص وارد می‌شود. با میل نمودن زمان به مقدار مطلوب، الگوریتم به سمت حل شبه بلادرنگ میل خواهد نمود.

$$min\ T_B = min\int_0^{t_a}\hat{x}(t).dt = \boldsymbol{min}\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{t_a}}(\boldsymbol{f(x(t))} - \sum_{\boldsymbol{j=0}}^{\boldsymbol{m}}(\prod \boldsymbol{d_s^j}\prod \boldsymbol{d_d^j}\prod \boldsymbol{d_i^j}))\boldsymbol{dt} \quad (11)$$

$$Then\ \ pf_k = \bar{r}_l - \int_0^{t_a}\sum_{j=0}^{m}(t_a - t_j).\prod d_s^j\prod d_d^j\prod d_i^j))dt = \min(d_1.t_a$$

قید زمان t_{B_j} و نیز قید مربوط به حداکثر تسلیحات دفاعی در دسترس برای هر سکوی متحرک $\sum C_{B_j}$ نیز به صورت زیر برای این مساله لحاظ می‌شود:

$$\begin{cases} 0 \leq t_a \leq T \\ t_{B_j\,min} \leq t_{B_j} \leq t_{B_j\,max} \end{cases} \quad (12)$$

$$\sum C_{B_j} \leq C_{B\,max} \quad (13)$$

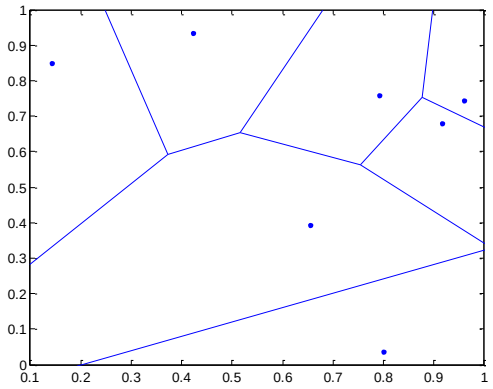
$$t_{B_j} = \frac{a_{B_j}}{C_{B_j}} \quad (14)$$

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-05-20]

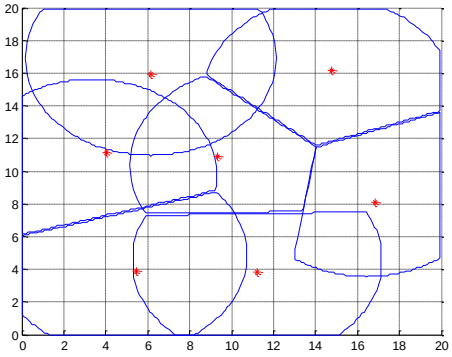
که در آن a_{B_j} ضریب نسبت هزینه دفاع به زمان دفاع است.

5. شبیه سازی

برای بخش پوشش حداکثری، با گین کنترلی K_p =10 برای تعداد n مدافع در حال تعامل، با شعاع سنسوری r_{sen} شکل همگرایی برای پوشش دادن منطقه $q\times L$ به صورت زیر خواهد بود. شرایط استقرار اولیه مدافعین در داخل این منطقه نرمالایز شده، به صورت شکل زیر می باشد.

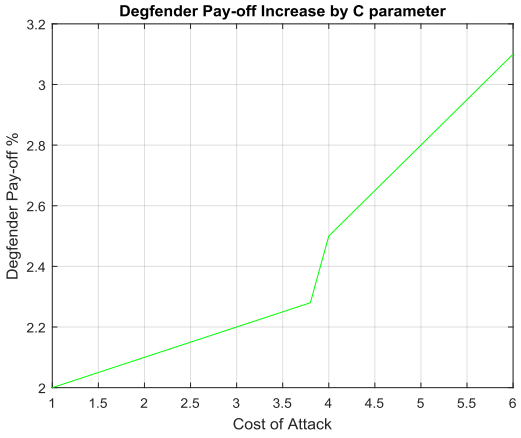


شکل 4. شرایط اولیه قرارگیری مدافعین در منطقه مورد نظر

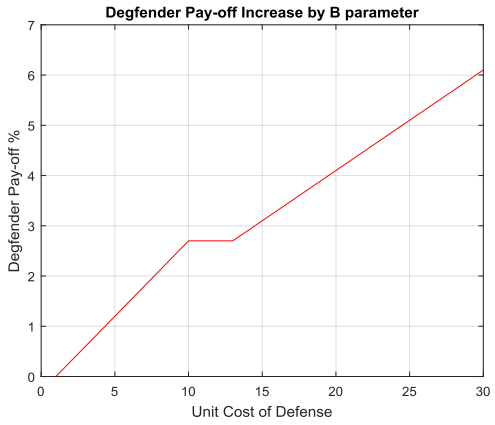


شکل5. وضعیت نهایی قرارگیری مدافعین در منطقه مورد نظر برای پوشش قطاعی بهینه

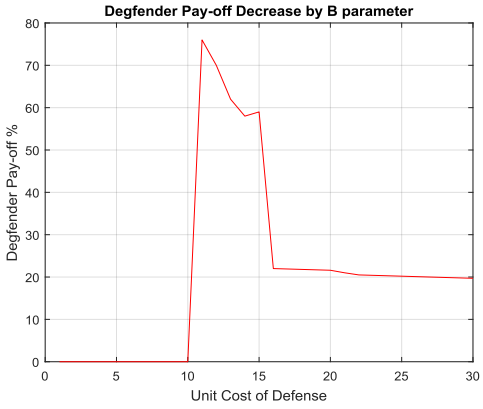
نتایج شبیه‌سازی در رابطه با هزینه های دفاع و حمله و نیز نسبت آنها با تغییرات پارامترها در ادامه و در شکلهای (6-9) آمده است. همانگونه که دیده می‌شود افزایش هزینه تهاجم منجر به افزایش تدریجی هزینه دفاع می گردد و نقطه حاد این افزایش وقتی است که هزینه تهاجم به 4 برابر افزایش یابد. این تغییرات با تاثیر سایر پارامترها نیز مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل6. افزایش هزینه دفاعی با تغییر پارامتر C

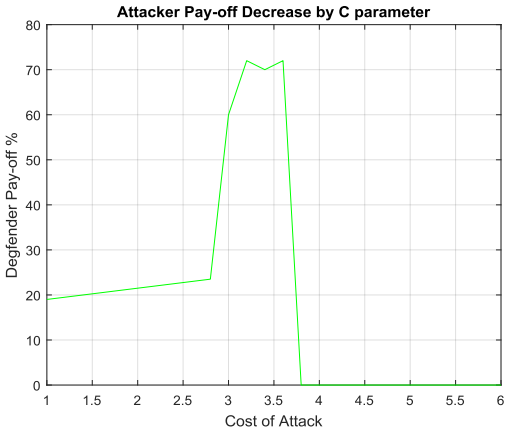


شکل7. افزایش هزینه دفاعی با تغییر پارامتر B



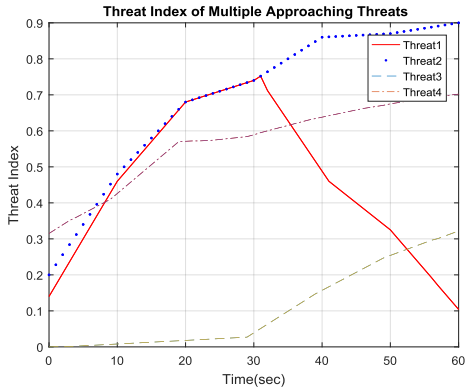
شکل8. کاهش هزینه دفاعی با تغییر پارامتر B

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-05-20]

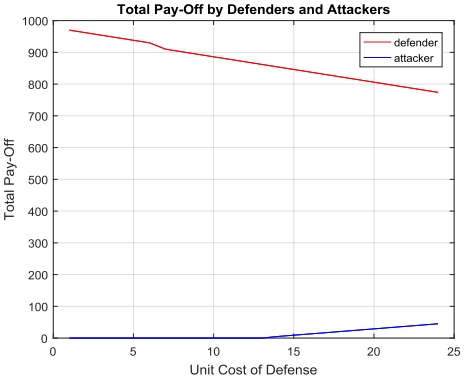


شکل9. کاهش هزینه مهاجمین با تغییر پارامتر C

اندیس تهدید در حالت حمله چند جانبه از سوی مهاجمین با گذشت زمان درگیری در شکلهای (10) و (11) آمده است. دیده می شود که تهدیدات با گذشت زمان انباشته شده ولی با درگیری بهینه صورت گرفته، از ثانیه 30 ام وضعیت به نفع مدافعین برگشته و تهدید مهاجمین تقریبا رو به کاهش یا رسیدن به وضعیت متقارن می باشد.



شکل10. اندیس تهدید در حمله چند جانبه



شکل11. هزینه کل درگیری برای مدافعین و مهاجمین

6. نتیجه‌گیری

در این مقاله به مدل سازی سیستم پدافندی در برابر تهاجم هوایی پرداخته شده و نحوه تخصیص بلادرنگ مدافع مناسب برای مقابله با هر مهاجم را تشریح نموده است. مساله زمان به عنوان تهدید انباشته در روابط نهایی وارد شده و اثر آن در محاسبات لحاظ گردیده است. در این راه هدف کمینه کردن میزان تخریبهای وارده به مدافعین و تاسیسات تحت دفاع در مقابل تخریبهای وارده به مهاجمین بوده است.

دیده می شود که بهینه‌سازی تخصیص بر فرماندهی پویای صحنه نبرد اثر بسیار بسزایی گذاشته و باعث می‌شود پس از گذشت زمان مشخصی از درگیری، نبرد به نفع مدافعین برگشته و هزینه تهاجم برای مهاجمین وارد شده افزایش یابد.

در کارهای آتی می توان روی افزایش بیشترسرعت همگرایی الگوریتمهای بهینه‌سازی و تخصیص در حالت غیر خطی فعالیت نمود.

7. مراجع

[1] Azaiez, N. Bier, V. M. (2016), "Optimal resource allocation for security in reliability systems", European Journal of operational Research, Vol.181, No. 2, PP. 773–786.

[2] Hausken, K. Bier, V. M. Zhuang, J. (2015) "Defending against terrorism, natural disaster, and all hazards". New York: Springer, Combining Reliability and Game Theory, PP 65–97.

[3] Zhuang J, Bier, V. M. (2013) "Balancing terrorism and natural disasters—Defensive strategy with endogenous attack effort", Operations Research, Vol. 55, No. 5, PP. 976–991.

[4] Powell, R. (2007) "Defending against terrorist attacks with limited resources", American Political Science Review, Vol. 10, No. 3, PP. 527–541.

[5] Bakhouya, M and Gaber, J. (2007) "An Immune Inspired-based Optimization Algorithm: Application to the Traveling Salesman Problem", Advanced Modeling and Optimization, Vol. 9, No. 1, PP. 105-116.

[6] Golany, B. Kaplan, E. H. Marmur, A. Rothblum, U. G. (2009) "Nature plays with dice—Terrorists do not: Allocating resources to counter strategic and

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-05-20]

probabilistic risks", European Journal of Operational Research, Vol. 192, No. 1, PP. 198–208.

[7] Naseem, A. Ahmed Khan, S. Malik, A. W. (2017) "A real-time man-in-loop threat evaluation and resource assignment in defense" Journal of the Operational Research Society, Vol. 68, No. 6, PP. 725–738.

[8] Zhuang, J. Bier, V. M. (2010) "Secrecy and deception at equilibrium, with applications to anti-terrorism resource allocation" Defense and Peace Economics, Vol. 22, No. 1, PP. 43-61.

[9] Zhuang, J. Bier, V. M. Alagoz, O. (2012) "Modeling secrecy and deception in a multiple-period attacker–defender signaling game" European Journal of Operational Research, Vol. 203, No. 2, PP.409– 418.

[10] Levitin G, Hausken K. Resource distribution in multiple attacks against a single target. Risk Analysis, 2010; 30(8):1231–1239.

[11] Levitin G. Optimal multilevel protection in series parallel systems. Reliability Engineering & System Safety, 2003; 81(1):93– 102.

[12] Korczak E, Levitin G. Survivability of systems under multiple factor impact. Reliability Engineering & System Safety, 2016;92(2):269–274.

[13] Levitin G, Hausken K. Protection vs. redundancy in homogeneous parallel systems. Reliability Engineering & System Safety, 2008; 93(10):1444–1451.

[14] Avenhaus R, Canty M. Playing for time: A sequential inspection game. European Journal of Operational Research, 2005;167(2):475–492.

[15] Boros E, Fedzhora L, Kantor P, Saeger K, Stroud P. A large-scale linear programming model for finding optimal container inspection strategies. Naval Research Logistics, 2009; 56(5):404–420.

[16] Bier VM, Haphuriwat N. Analytical method to identify the number of containers to inspect at U.S. ports to deter terrorist attacks. Annals of Operations Research, doi:10.1007/s10479-009-0665-6.

[17] McLay LA, Lloyd JD, Niman E. Interdicting nuclear material on cargo containers using knapsack problem models. Annals of Operations Research, doi:10.1007/s10479-009-0667-4.

[18] Konrad KA. The investment problem in terrorism. Economica, 2004; 71(283):449–459. Bier VM, Haphuriwat N, Menoyo J, Zimmerman R, Culpen AM. Optimal resource allocation for defense of targets based on differing measures of attractiveness. Risk Analysis, 2008; 28(3):763–770.

[19] Bier VM, Oliveros S, Samuelson L. Choosing what to protect. Journal of Public Economic Theory, 2007; 9(4):563–587.

Dighe NS, Zhuang J, Bier VM. Secrecy in defensive allocation as strategy for achieving more cost-effective attacker deterrence. International Journal of Perform ability Engineering, 2014; 5(1):31–43.

[20]Zhuang J. Impacts of subsidized security on stability and total social costs of equilibrium solutions in an N-player game with errors. Engineering Economist, 2010; 55(2):131–149.

Skaperdas S. Contest success functions. Economic Theory, 1996; 7(2):283–290.

[Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-05-20]