

بهینه‌سازی و حل مسأله تخصیص و زمانبندی سنسور-سلاح/تهدید بصورت یکپارچه

رضا قربانی صابر^۱، محمد رنجبر^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع گرایش بهینه‌سازی سیستم‌ها، دانشگاه فردوسی مشهد؛ reza.ghorbani@mail.um.ac.ir

^۲عضو هیئت علمی گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد؛ m_ranjbar@um.ac.ir

چکیده

امروزه در جنگ‌ها استفاده از سیستم‌های هوشمند بسیار متداول شده است. در همین راستا سلاح‌های هوشمند کاربرد فراوانی پیدا کرده‌اند که عمدتاً وابسته به سنسور هستند. تطابق دادن سنسور با سلاح و تهدید یا به اختصار تخصیص سنسور-سلاح/تهدید یکی از چالش‌های صحنه نبرد و در زمره‌ی مسائل بهینه‌سازی تخصیص منابع پیچیده است به گونه‌ای که نتیجه نبردهای پیشرفته امروزه تا حد زیادی وابسته به استفاده هوشمندانه از سنسورها و سلاح‌های موجود برای افزایش تأثیرشان است. در این تحقیق مسأله سنسور-سلاح/تهدید به صورت یکپارچه مدل‌سازی شده است. مدل ارائه شده به دنبال حداکثر نمودن تخریب تهدیدها در یک افق زمانی مشخص با استفاده از سنسورها و سلاح‌های موجود و رعایت محدودیت‌های عملیاتی می‌باشد. برای حل مدل از نرم‌افزار CPLEX استفاده شده است و در پایان نتایج پیاده‌سازی بر روی نمونه مسائل ساخته شده گزارش شده است.

کلمات کلیدی

بهینه‌سازی نبرد، تخصیص، زمان‌بندی، تخصیص و زمان‌بندی سنسور-سلاح/تهدید

Modelling and solving of dependent sensor-weapon/threat assignment and scheduling problem

Reza Ghorbani Saber, Mohammad Ranjbar

MSc Student of Industrial Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Department of Industrial Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

ABSTRACT

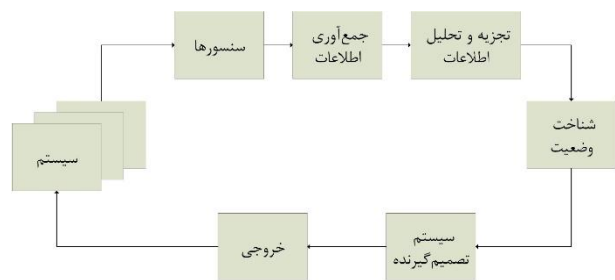
Nowadays, using smart systems in combat management systems is common. So, smart weapons have a lot of applications and they usually depend on sensors. Matching sensors with weapons and threats or in short, sensor-weapon/threat assignment is a major challenge in modern wars. Thus, result of modern wars highly depends on effective using of sensors and weapons. In this paper, the sensor-weapon/threat assignment and scheduling problem is formulated. The object of this model is using sensors and weapons to maximize destruction of threats in a time horizon with regarding to operational constraints. This model has been solved by using CPLEX and extensive computational results are reported.

KEYWORDS

War optimization, Assignment, Scheduling, Assignment and scheduling sensor-weapon/threat

۱- مقدمه

در جنگ‌های مدرن، سیستم‌های هوشمند مدیریت نبرد دارای کاربردهای فراوانی هستند. این سیستم‌ها با توجه به اطلاعات ورودی وظیفه برنامه‌ریزی و کنترل نیروها و فرآیندها برای مقابله با تهدیدها را بر عهده دارند. ورود اطلاعات مرتبط با میدان نبرد در این سیستم‌ها از طریق سنسورها انجام می‌شوند. سپس اطلاعات دریافت شده، پردازش شده و با توجه به منابع در اختیار سیستم، درباره اقدامات لازم، تصمیم‌گیری می‌شود. شکل (۱) نشان دهنده معماری سیستم مدیریت نبرد می‌باشد. در بخش تصمیم‌گیری ممکن است مسائل مختلفی برای بهینه‌سازی مد نظر باشد یک دسته از این مسائل مسأله تخصیص و زمانبندی سنسور-سلاح/تهدید می‌باشد [۱].



شکل (۱): شماتیک سیستم مدیریت نبرد

مسأله تخصیص سنسور-سلاح/تهدید یکی از چالش‌های صحنه نبرد و در مجموعه مسائل بهینه‌سازی تخصیص منابع پیچیده است به گونه‌ای که نتیجه نبردهای پیشرفته امروزه تا حد زیادی وابسته به استفاده هوشمندانه از سنسورها و سلاح‌های موجود برای افزایش تأثیرشان است [۲]. مسأله تخصیص سنسور-سلاح/تهدید در دو دسته وابسته و غیر وابسته است. در صورتی که در یک تخصیص انجام شده با ثابت ماندن سلاح و تهدید، سنسور تغییر کند و در نتیجه بهره‌ی بدست آمده از تخصیص تغییر یابد، آنگاه مسأله تخصیص سلاح به تهدید به تخصیص سنسور به تهدید وابسته می‌شود و در غیر اینصورت مسأله تخصیص سنسور-سلاح/تهدید به صورت غیر وابسته می‌باشد. بنابراین در وضعیت تخصیص سنسور-سلاح/تهدید وابسته حل مسأله تخصیص سلاح به تهدیدها بدون توجه به تخصیص سنسور به تهدید کارایی کمتری خواهد داشت [۲].

در پژوهش‌های گذشته از مسأله تخصیص سنسور-سلاح/تهدید غیر وابسته به عنوان تخصیص سلاح به هدف نام برده شده است و تحقیقات زیادی روی آن تا به امروز انجام شده است اما مسأله تخصیص سنسور-سلاح/تهدید وابسته که شکل کلی‌تر مسأله است و در آن میزان بهره تخصیص سلاح به تهدید وابسته به تخصیص سنسور به تهدید

می‌باشد، عمری کمی در پژوهش‌های نظامی دارد [۳].

در ادامه این مقاله، در بخش اول به بررسی سوابق پژوهشی موضوع مورد بحث می‌پردازیم، سپس شکاف تحقیقاتی بین پژوهش‌های گذشته و تحقیق حاضر، بیان خواهد شد. در بخش دوم جزئیات مدل ریاضی و شرح آن ارائه می‌شود، در بخش سوم به بررسی نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل بر روی نمونه مسائل ساخته شده، می‌پردازیم و در بخش پایانی نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری خواهیم پرداخت..

۲- مرور ادبیات

سابقه پژوهش در این زمینه به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش اول مربوط به مسأله تخصیص سنسور-سلاح/تهدید غیر وابسته یا همان مسأله تخصیص سلاح به تهدید می‌باشد اما در بخش دوم سنسور نیز به مسأله تخصیص اضافه شده است و مسأله تخصیص سنسور، سلاح و تهدید به صورت وابسته در نظر گرفته شده است. در این مقاله به علت نزدیکی بیشتر به موضوع، فقط به بررسی بخش دوم سوابق پژوهشی پرداخته می‌شود.

Bogdanowicz و Coleman در سال ۲۰۰۷ مسأله را، به عنوان یک مسأله تخصیص در نظر گرفتند و با هدف بهینه‌سازی اثربخشی تخصیص با استفاده از الگوریتم حراج^۳ به حل آن پرداختند [۴]. در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۰۸ توسط همین افراد صورت گرفت مسأله تخصیص سنسور-سلاح/تهدید را به صورت یکپارچه فرموله نمودند. از فرضیات این پژوهش این بود متحرک بودن سنسورها و تهدیدها می‌باشد. همچنین سود حاصل از تخصیص یک سه تایی سنسور-سلاح-تهدید به صورت یکپارچه وابسته به هر سه عامل در نظر گرفته شد [۲]. در سال ۲۰۰۹ نیز Bogdanowicz مدل ارائه شده در تحقیقات قبلی را بهبود داد و مجدداً با استفاده از الگوریتم حراج به حل مسأله پرداخت [۳]. در سال ۲۰۱۱ Zi-fen و همکارانش مسأله را با بهبود دادن الگوریتم معرفی شده توسط Bogdanowicz، بر مبنای الگوریتم حراج حل نمودند [۵]. Chen و همکاران در سال ۲۰۱۲ مسأله تخصیص سنسور-سلاح-تهدید را بر مبنای حداکثرسازی سود حاصل از تخصیص سنسور به سلاح و تهدید مدل‌سازی نمودند و آن را با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات حل نمودند [۶]. در سال ۲۰۱۶ در تحقیقی که توسط Li و همکاران صورت گرفت برای طراحی یک سیستم کنترل در میدان جنگ مسأله تخصیص سلاح به تهدیدها با در نظر گرفتن سنسورها به عنوان عامل‌های ردیابی تهدیدها، در نظر گرفته شد و حل مسأله با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد [۱]. Ezra و همکاران در سال ۲۰۱۶ تحقیقی در زمینه فرموله کردن مسأله تخصیص سنسور-سلاح/تهدید به صورت یکپارچه انجام دادند. در این پژوهش ابتدا ویژگی‌های دو زیر مسأله تخصیص سلاح به تهدید و

اختیار است. می‌خواهیم بهترین تخصیص سنسور-سلاح-تهدید جهت نابودی تهدیدها را انتخاب کنیم. این تخصیص در یک افق برنامه‌ریزی انجام می‌شود. سنسورها هر یک ممکن است تمامی تهدیدها یا تعدادی از آنها را رصد نمایند بنابراین در حالت کلی با وضعیت تخصیص سنسور-سلاح/تهدید وابسته مواجه هستیم و نکات حائز اهمیت در این مسأله عبارتند از:

- حداکثر نابودی ممکن برای تهدیدهای بدست بیاید.
- هر یک از سلاح‌ها در یک مکان مشخص، ثابت است.
- ممکن است تعدادی از سنسورها و تهدیدها متحرک باشند.
- اگر سلاح تخصیص داده شده به تهدید، هوشمند باشد معمولاً با شلیک رگباری و استفاده از قابلیت‌های سنسورهای خود تا نابودی هدف مورد نظر پیش می‌رود.
- سنسورها در تشخیص اهداف، عدم قطعیت‌های (ضریب دقت‌های) متفاوت دارند.

پارامترهای ورودی مسأله به شرح زیر می‌باشند.
 مجموعه‌ها:

$w \in W$	مجموعه سلاح‌ها
$s \in S$	مجموعه سنسورها
$h \in H$	مجموعه تهدیدها
$t \in T$	مجموعه بازه زمانی
$m \in M_w$	مجموعه موشک‌های سلاح w
	پارامترها:
o_s	حداکثر تعداد تهدیدی که توسط سنسور s بصورت همزمان قابل ردیابی است.
dt_{sh}	مدت زمان لازم جهت تشخیص تهدید h توسط سنسور s
p_{sht}	ضریب دقت سنسور s جهت تشخیص تهدید h در زمان t ($P_{sht} \in [0,1]$)
b_h	ضریب اهمیت تهدید h ($b_h \in [0,1]$)
π_{wm}	ضریب دقت موشک m از سلاح w
d_{wmh}	متوسط میزان تخریب تهدید h اگر با موشک m از سلاح w به آن شلیک شود
st_w	مدت زمان آماده‌سازی سلاح w
ft_w	مدت زمان شلیک سلاح w
x_w	طول جغرافیایی سلاح w
y_w	عرض جغرافیایی سلاح w
χ_{ht}	طول جغرافیایی تهدید h در زمان t

سنسور به تهدید به صورت جداگانه بررسی شدند و سپس مدلی برای در نظر گرفتن دو مسأله به صورت یکپارچه ارائه شد. در مدل‌سازی ارائه شده جزئیات بیشتری نسبت به تحقیقات قبلی در نظر گرفته شده بود [۷]. در سال ۲۰۱۷ در تحقیق صورت گرفته توسط μ و همکاران مسأله تخصیص سنسور-سلاح/تهدید مدل‌سازی و حل شد. در این تحقیق پارامترهایی مانند احتمال ردیابی تهدید برای سنسورها و احتمال نابود کردن تهدید برای سلاح‌ها در نظر گرفته شد و مسأله با یک روش فراابتکاری الهام گرفته شده از فیزیک کوانتوم حل شد [۸]. در اکثر تحقیقات قبلی اگرچه سنسورها و سلاح‌ها به ظاهر به صورت همزمان در مدل‌سازی حضور داشتند، اما در این تحقیقات در واقع هر جفت از سنسورها و سلاح‌ها با هدف بیشینه‌سازی بهره حاصل به یک تهدید تخصیص می‌یابند و به این معناست که از قبل سود حاصل از تخصیص مشخص است و نحوه اثرگذاری سنسورها بر سلاح‌ها برای افزایش میزان دقت آنها از قبل باید توسط تصمیم گیرنده مشخص شود که این موضوع با آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد همخوانی ندارد. در این تحقیق نحوه تأثیرگذاری سنسورها در مدل‌سازی و برای بدست آوردن جواب مسأله در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر از دیدگاه طرح مسأله، نوآوری در مدل‌سازی و حل دو مسأله بهینه‌سازی به ظاهر جداگانه که توسط قیدها به هم مرتبط شده‌اند و هر گونه تغییر در پاسخ مسأله سنسور/تهدید تأثیر در مسأله سلاح/تهدید دارد و برعکس، وجود دارد.

علاوه بر این در تحقیقات قبلی بسیاری از قابلیت‌ها و محدودیت‌هایی که در استفاده از سلاح‌ها و سنسورهای مختلف وجود دارد، در نظر گرفته نشده است که در این تحقیق با استفاده از پارامترهایی نظیر دقت سلاح‌ها، زمان ردیابی سنسورها، برد و زوایای پوشش سنسورها و سلاح‌ها، سعی شده است که مسأله به آنچه در دنیای واقعی اتفاق می‌افتد نزدیک‌تر باشد. همچنین یکی از فرضیات مسأله متحرک بودن تهدیدها می‌باشد که این موضوع سبب می‌شود با توجه به موقعیت تهدیدها در هر لحظه از زمان تخصیص مناسب صورت گیرد. بنابراین برنامه‌ریزی جهت تخصیص سنسور-سلاح/تهدید باید در یک افق زمانی انجام شود. در حقیقت بر خلاف بسیاری از پژوهش‌های گذشته که مسأله را به صورت تک مرحله‌ای در نظر گرفته‌اند، در این تحقیق مدل‌سازی به گونه‌ای انجام شده است که در هر لحظه از زمان با استفاده از اطلاعات بدست آمده تا آن لحظه می‌توان برنامه‌ریزی را تا پایان افق زمانی، انجام داد.

۳- مدل‌سازی عدد صحیح مسأله تخصیص سنسور -

سلاح/تهدید

در این مسأله فرض می‌شود تعدادی سنسور، سلاح و تهدید در

c_s^{max}	بیشینه‌ی میزان پوشش سنسور S	ψ_{ht}	عرض جغرافیایی تهدید h در زمان t
γ_s	زاویه پوشش افقی سنسور S	l_{ost}	طول جغرافیایی سنسور S در زمان t
γ'_s	زاویه پوشش عمودی سنسور S	l_{ast}	عرض جغرافیایی سنسور S در زمان t
λ	حداکثر تعداد سنسوری که می‌توانند هم‌زمان یک تهدید را ردیابی کنند	ϕ_{wm}	زاویه بین تصویر بردار جهت قرارگیری موشک m از سلاح w با محور طول جغرافیایی
l_h	وزن تهدید h	ϕ'_{wm}	زاویه ارتفاع موشک m از سلاح w
e_h	میزان نابودی تهدید h	a_{ht}	ارتفاع حرکت تهدید h در لحظه t
G	یک عدد خیلی بزرگ	θ_s	زاویه بین تصویر بردار حرکت سنسور S با محور طول جغرافیایی
	متغیرهای تصمیم:		
A_{ht}	متوسط میزان تخریب برای تهدید h در زمان t	α_{st}	ارتفاع حرکت سنسور S در لحظه t
$U_{wmhstt'}$	متغیر باینری، برابر با یک اگر موشک m از سلاح w به تهدید h در زمان t' شلیک کند در حالیکه ردیابی این تهدید توسط سنسور S در زمان t' شروع شده باشد و در غیراینصورت برابر با صفر	θ'_s	زاویه ارتفاع بردار حرکت عمودی سنسور S
V_{sht}	متغیر باینری، برابر با یک اگر ردیابی تهدید h در لحظه t توسط سنسور S شروع شود	dis_{wht}	فاصله سلاح w از تهدید h در لحظه t
		δ_{sht}	فاصله سنسور S از تهدید h در لحظه t
		r_{wm}^{min}	کمینه‌ی برد موشک m از سلاح w
		r_{wm}^{max}	بیشینه‌ی برد موشک m از سلاح w
		η_{wm}	زاویه پوشش افقی موشک m از سلاح w
		η'_{wm}	زاویه پوشش عمودی موشک m از سلاح w
		c_s^{min}	کمینه‌ی میزان پوشش سنسور S

در ادامه مدل زمان‌بندی و تخصیص سنسور-سلاح/تهدید به صورت یکپارچه آمده است.

$$Max F = \sum_{h \in H} b_h \sum_{t \in T} A_{ht} \quad (1)$$

$$A_{ht} \leq \quad ; \forall h \in H, t \in T \quad (2)$$

$$\left(\sum_{s \in S} \sum_{t'=0}^{t-dt_{sh}} p_{sht'} \sum_{w \in W} \sum_{m \in M_w} \pi_{wm} d_{wmh} \left(1 - 0.2 \times \left(\frac{dis_{wht} - r_{wm}^{min}}{r_{wm}^{max} - r_{wm}^{min}} \right) \right) \times \frac{3500}{l_h} \times U_{wmhstt'} \right)$$

$$\sum_{t \in T} A_{ht} \leq (1 - e_h) \quad ; \forall h \in H \quad (3)$$

$$\sum_{t''=t'+1}^{t+ft_w} V_{sht''} \leq G(1 - U_{wmhstt'}) \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh} \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{h' \in H \\ h' \neq h}} \sum_{t''=t'}^{t+ft_w} V_{sht''} \leq G(1 - U_{wmhstt'}) + o_s - 1 \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh} \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{s' \in S \\ s' \neq s}} \sum_{t''=t'}^{t+ft_w-1} V_{sht''} \leq G(1 - U_{wmhstt'}) + \lambda - 1 \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh} \quad (6)$$

$$V_{sht'} \leq \sum_{w \in W} \sum_{m \in M_w} \sum_{t \geq t' + dt_{sh}} U_{wmhstt'} \quad \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t' \in T \quad (7)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{m \in M_w} \sum_{t \geq t' + dt_{sh}} U_{wmhstt'} \leq G(V_{sht'}) \quad \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t' \in T \quad (8)$$

$$U_{wmhstt'} = 0 \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' > t - dt_{sh} \quad (9)$$

$$U_{wmhstt'} < 1 + (1 - e_h) - \sum_{t' < t} A_{ht'} \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh} \quad (10)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{t'=0}^{t-dt_{sh}} U_{wmhstt'} \leq 1 \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w \quad (11)$$

$$\sum_{m \in M_w} \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} \sum_{t'=0}^{t-dt_{sh}} U_{wmhstt'} \leq 1 \quad ; \forall w \in W, \forall t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{m \in M_w} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' \neq h}} \sum_{s \in S} \sum_{t''=t+1}^{t+ft_w+st_w} \sum_{t'=0}^{t''-dt_{sh}} U_{wmhst''t'} \leq \quad ; \forall w \in W, \forall t \in \{1, \dots, |T| - ft_w - st_w\}, \forall h \in H \quad (13)$$

$$G(1 - \sum_{m \in M_w} \sum_{s \in S} \sum_{t'=0}^{t-dt_{sh}} U_{wmhstt'}) \quad (14)$$

$$\sum_{m \in M_w} \sum_{s \in S} \sum_{t''=t+1}^{t+ft_w} \sum_{t'=0}^{t''-dt_{sh}} U_{wmhst''t'} \leq G(1 - \quad ; \forall w \in W, \forall t \in \{1, \dots, |T| - ft_w\}, \forall h \in H \quad (14)$$

$$\sum_{m \in M_w} \sum_{s \in S} \sum_{t'=0}^{t-dt_{sh}} U_{wmhstt'}) \quad (15)$$

$$c_s^{max} - \delta_{sht''} \geq G(U_{wmhstt'} - 1) \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}, t'' \in \{t', \dots, t + ft_w\} \quad (15)$$

$$\delta_{sht''} - c_s^{min} \geq G(U_{wmhstt'} - 1) \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}, t'' \in \{t', \dots, t + ft_w\} \quad (16)$$

$$r_{wm}^{max} - dis_{wht} \geq G(U_{wmhstt'} - 1) \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh} \quad (17)$$

$$dis_{wht} - r_{wm}^{min} \geq G(U_{wmhstt'} - 1) \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh} \quad (18)$$

$$\frac{\gamma_s}{2} - |\tan^{-1}(\frac{\psi_{ht''} - \alpha_{st''}}{\chi_{ht''} - \lambda_{st''}}) - \theta_s| \geq G(U_{wmhstt'} - 1) \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}, t'' \in \{t', \dots, t + ft_w\} \quad (19)$$

$$\frac{\gamma'_s}{2} - |\tan^{-1}(\frac{\frac{\alpha_{ht''} - \alpha_{st''}}{R\pi\chi_{ht''}} - \frac{\alpha_{st''}}{R\pi\lambda_{st''}}}{180}) - \theta'_s| \geq G(U_{wmhstt'} - 1) \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}, t'' \in \{t', \dots, t + ft_w\} \quad (20)$$

$$1) \quad \frac{\eta_{wm}}{2} - |\tan^{-1}(\frac{\psi_{ht} - \gamma_w}{\chi_{ht} - \lambda_w}) - \phi_{wm}| \geq G(U_{wmhstt'} - 1) \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh} \quad (21)$$

$$\frac{\eta'_{wm}}{2} - |\tan^{-1}(\frac{\frac{\alpha_{ht} - 0}{R\pi\chi_{ht}} - \frac{0}{R\pi\lambda_w}}{180}) - \phi'_{wm}| \geq G(U_{wmhstt'} - 1) \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh} \quad (22)$$

$$1) \quad U_{wmhstt'} \in \{0,1\} \quad ; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh} \quad (23)$$

$$A_{ht} \geq 0 \quad ; \forall h \in H, \forall t \in T \quad (24)$$

$$V_{sht} \in \{0,1\} \quad , \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T \quad (25)$$

متوسط میزان تخریب به وجود آمده برای تهدید h که وابسته به پارامترهای متوسط میزان تخریب و دقت سلاح‌ها، دقت سنسورها، فاصله و وزن تهدید نسبت به سبک‌ترین تهدیدها (۳۵۰ تن)، می‌باشد.

در این مدل، تابع هدف (۱) بیانگر بیشینه‌سازی متوسط میزان تخریب بدست آمده برای تهدیدها بر اساس میزان اهمیت هر تهدید می‌باشد. در محدودیت (۲) عبارت سمت راست محدودیت، برآوردی از

محدودیت (۳) تضمین می‌کند که مجموع میزان تخریب تهدید h در افق برنامه‌ریزی مورد نظر از میزان بخش‌های نابود نشده‌ی این تهدید بیشتر نشود. محدودیت (۴) بیان می‌کند که یک سنسور در طول زمان ردیابی و تا پایان زمان شلیک به یک تهدید، یک بار به آن تهدید می‌تواند تخصیص یابد. محدودیت (۵) تضمین کننده این موضوع است که در هر لحظه هر سنسور بیشتر از ظرفیت خود مورد استفاده قرار نگیرد. به صورت مشابه محدودیت (۶) نیز باعث می‌شود هر تهدید در هر لحظه حداکثر توسط λ سنسور مورد ردیابی قرار گیرد. محدودیت‌های (۷) و (۸) رابطه بین دو متغیر تصمیم را بیان می‌کند. محدودیت‌های (۹) بیان می‌کند که فاصله زمانی بین شروع ردیابی تا شروع زمان شلیک حداقل باید به اندازه dt_{sh} باشد. محدودیت (۱۰) از تخصیص‌های بهبوده جلوگیری می‌کند. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند که هر موشک حداکثر یک بار می‌تواند شلیک شود. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که در هر لحظه یک سلاح حداکثر یک شلیک می‌تواند انجام دهد. محدودیت (۱۳) مربوط به زمان آماده‌سازی سلاح می‌باشد و بیان می‌کند که در صورتی که سلاح w به تهدید h در زمان t شلیک کند، آن سلاح در بازه زمانی $\{t, \dots, t + ft_w + st_w\}$ نمی‌تواند تهدید دیگری را مورد هدف قرار دهد. همچنین محدودیت (۱۴) نیز به صورت مشابه بیانگر این است که در صورتی که سلاح w به تهدید h در زمان t شلیک کند، در صورتی می‌تواند مجدداً به همان تهدید شلیک کند که به اندازه زمان شلیک سلاح یا همان ft_w از شروع شلیک قبلی گذشته باشد. محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) مربوط به حداقل و حداکثر برد سنسورها در ردیابی تهدیدها هستند و بیان می‌کنند که یک سنسور در صورتی می‌تواند تهدیدی را مورد ردیابی قرار دهد که مقدار فاصله آن تهدید از سنسور از لحظه شروع ردیابی تا پایان آن بین حداقل و حداکثر پوشش

سنسور قرار داشته باشد. محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) نیز به صورت مشابه بیان‌کننده حداقل و حداکثر برد یک سلاح می‌باشند. محدودیت‌های (۱۹) تا (۲۲) مربوط به زوایای پوشش افقی و عمودی سنسورها و سلاح‌ها هستند. محدودیت‌های (۲۳) تا (۲۵) نیز بیان‌کننده نوع متغیرهای تصمیم به کار رفته در مدل را نشان می‌دهند.

۴- نتایج عددی

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از حل مدل ارائه شده در بخش قبل بر روی نمونه مسائل ساخته شده، خواهیم پرداخت. جدول (۱) نحوه ساخت نمونه مسائل را نشان می‌دهد.

جدول (۱) - نحوه ساخت نمونه مسائل

پارامتر	مقدارها
سلاح	۶-۸-۱۰
سنسور	۶-۸-۱۰
تهدید	۱۰-۱۲-۱۴
افق زمانی	۳۰-۴۵-۶۰
تعداد موشک‌های هر سلاح	بین ۱ تا ۴
تعداد نمونه در هر دسته	۵

با توجه به جدول (۱) ۸۱ دسته نمونه مسأله ساخته شده که در هر دسته ۵ نمونه مسأله وجود دارد و در کل ۴۰۵ نمونه مسأله ساخته شده است. نمونه مسائل ساخته شده با حد زمانی ۳۶۰۰ ثانیه با استفاده از نرم‌افزار CPLEX حل شد شده است. جدول (۲) نشان‌دهنده میانگین زمان حل هر دسته از نمونه مسائل می‌باشد. جدول (۳) نیز میانگین درصد انحراف از جواب بهینه در هر نمونه مسأله را نشان دهد.

جدول (۲) - میانگین حل زمان نمونه مسائل در هر دسته بر حسب ثانیه

تعداد سلاح‌ها	۶			۸			۱۰			افق زمانی
	۶	۸	۱۰	۶	۸	۱۰	۶	۸	۱۰	
تعداد سنسورها	۱۰	۱۲	۱۴	۱۰	۱۲	۱۴	۱۰	۱۲	۱۴	۳۰
تعداد تهدیدها	۱۰	۱۲	۱۴	۱۰	۱۲	۱۴	۱۰	۱۲	۱۴	
	۱۷,۵۰	۱۹,۳۴	۱۶,۱۲	۴۲,۴۴	۳۱,۷۱	۱۷,۳۲	۱۷,۵۰	۱۹,۳۴	۱۶,۱۲	
	۳۰,۱۵	۲۴,۴۵	۱۷,۱۶	۴۴,۹۸	۳۵,۱۹	۳۲,۴۸	۳۰,۱۵	۲۴,۴۵	۱۷,۱۶	۴۵
	۳۹,۴۹	۲۵,۵۶	۱۸,۰۴	۲۰۰,۴۹	۳۷,۱۷	۳۵,۰۳	۳۹,۴۹	۲۵,۵۶	۱۸,۰۴	
	۶۱,۸۳	۳۰,۳۳	۲۷,۳۳	۶۵,۶۸	۵۰,۴۰	۳۷,۱۸	۶۱,۸۳	۳۰,۳۳	۲۷,۳۳	
	۶۵,۰۷	۵۵,۰۸	۵۳,۸۱	۱۳۰,۱۶	۹۱,۵۹	۷۳,۱۰	۶۵,۰۷	۵۵,۰۸	۵۳,۸۱	۶۰
	۱۳۷,۳۴	۶۳,۴۳	۵۵,۶۱	۳۱۷,۵۵	۱۰۹,۱۰	۵۸,۶۶	۱۳۷,۳۴	۶۳,۴۳	۵۵,۶۱	
	۲۹۴,۵۹	۲۳۸,۴۶	۱۲۲,۷۰	۶۳۸,۶۵	۲۹۹,۸۴	۱۳۲,۱۰	۲۹۴,۵۹	۲۳۸,۴۶	۱۲۲,۷۰	
	۱۸۰,۹۰۸	۹۷۱,۳۱	۱۳۲,۸۸	۲۰۵۹,۱۵۵	۱۳۱۲,۰۶	۲۹۰,۰۱	۱۸۰,۹۰۸	۹۷۱,۳۱	۱۳۲,۸۸	۶۰
	۲۰۲۶,۵۴	۱۸۶۰,۱۴	۸۸۹,۲۹	۲۶۳۸,۶۴	۱۳۷۹,۸۴	۱۰۵۰,۴۴	۲۰۲۶,۵۴	۱۸۶۰,۱۴	۸۸۹,۲۹	
	۲۶۱,۱۲	۱۸۵۱,۶۱	۱۷۲۸,۶۷	۶۸۱,۴۱	۴۲۰,۶۱	۱۶۵,۵۸	۲۶۱,۱۲	۱۸۵۱,۶۱	۱۷۲۸,۶۷	

جدول (۳) - میانگین درصد انحراف از جواب بهینه

۱۰			۸			۶			تعداد سلاحها	
۱۰	۸	۶	۱۰	۸	۶	۱۰	۸	۶	تعداد سنسورها	افق زمانی
									تعداد تهدیدها	
۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۱۰	۳۰
۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۱۲	
۰,۱۷٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۱۴	
۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۱۰	۴۵
۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۱۲	
۲,۸۵٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۱۴	
۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۰,۰۰٪	۱۰	۶۰
۰,۰۰٪	۱,۰۲٪	۰,۲۶٪	۱,۱۱٪	۰,۲۶٪	۰,۰۰٪	۱,۲۳٪	۰,۶۶٪	۰,۰۰٪	۱۲	
۰,۱۹٪	۰,۰۰٪	۲,۹۶٪	۰,۸۹٪	۱,۶۰٪	۰,۶۹٪	۲,۶۶٪	۱,۶۵٪	۰,۴۹٪	۱۴	

با توجه به موارد بیان شده و زمان‌های گزارش شده در جدول (۲) و از آنجا که ضروری است مسأله مورد نظر در مدت زمان بسیار کوتاهی حل شود، به نظر می‌رسد نیاز به توسعه یک روش فراابتکاری به منظور افزایش سرعت در حل مسأله به خصوص در ابعاد بزرگ، وجود داشته باشد که این موضوع می‌تواند در تحقیقات بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

۵- نتیجه و جمع‌بندی

با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که با افزایش افق زمانی و تعداد تهدیدها زمان حل مدل افزایش می‌یابد. همچنین در این ابعاد از مسائل، درصد انحراف از جواب بهینه نیز مطابق با جدول (۳) افزایش می‌یابد.

[۵] L. Zi-fen, L. Xiang-min, D. Jin-jin, C. Jin-zhu, and Z. Feng-xia., "Sensor-weapon-target assignment based on improved SWT-opt algorithm", *Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE), 2011 IEEE 2nd International Conference on*, 2011, pp. 25-28.

[۶] H. Chen, Z. Liu, Y. Sun, and Y. Li., "Particle swarm optimization based on genetic operators for sensor-weapon-target assignment", *Computational Intelligence and Design (ISCID), 2012 Fifth International Symposium on*, 2012, pp. 170-173.

[۷] K. L. Ezra, D. A. DeLaurentis, L. Mockus, and J. F. Pekny., "Developing Mathematical Formulations for the Integrated Problem of Sensors, Weapons, and Targets", *Journal of Aerospace Information Systems*, 2016.

[۸] L. Mu, X. Qu, and P. Wang., "Application of Sensor/Weapon-Target Assignment based on Multi-Scale Quantum Harmonic Oscillator Algorithm" *Image, Vision and Computing (ICIVC), 2017 2nd International Conference on*, 2017, pp. 1147-1151.

۶- مراجع

[۱] N. Li, W. Huai, and S. Wang., "The solution of target assignment problem in command and control decision-making behaviour simulation", *Enterprise Information Systems*, vol. 11, pp. 1059-1077, 2017.

[۲] Z. Bogdanowicz and N. Coleman., "Advanced Algorithm for Optimal Sensor-Target and Weapon-Target Pairings in Dynamic Collaborative Engagement", *Army armament research development and engineering center picatinny arsenal NJ2008*.

[۳] Z. R. Bogdanowicz., "A new efficient algorithm for optimal assignment of smart weapons to targets", *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 58, pp. 1965-1969, 2009.

[۴] Z. Bogdanowicz and N. Coleman., "Sensor-target and weapon-target pairings based on auction algorithm", *Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on APPLIED MATHEMATICS*, 2007, pp. 92-96.

^۱Combat Management System (CMS)

^۲Weapon-Target Assignment (WTA)

^۳Auction algorithm

^۴Elevation angle (زاویه‌ای که یک بردار با افق می‌سازد)