

## تخصیص سلاح به هدف پویا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

علی جعفری<sup>۱</sup>، ابوالفضل اصغری<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹

### چکیده

در نبردهای نوین، ارزیابی هوشمندانه شرایط میدان نبرد و اتخاذ تصمیمات بهینه در لحظه، از ارکان حیاتی فرماندهی و کنترل ( $C^2$ ) محسوب می‌شود. یکی از چالش‌های اساسی در این حوزه، مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا (DWTA)<sup>۳</sup> است. نوآوری محوری این پژوهش، تدوین و ارائه یک سناریو عملیاتی جامع و واقع‌گرایانه است که بر خلاف مدل‌های کلاسیک، علاوه بر پلتفرم سلاح و تهدیدات، نقش کلیدی دارایی‌های استراتژیک<sup>۴</sup> را در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ نموده است. این سناریو به منظور پوشش شکاف موجود بین مدل‌های ریاضی و واقعیت‌های صحنه نبرد طراحی شده است. جهت حل مسئله در چارچوب سناریو پیشنهادی، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)<sup>۵</sup> استفاده شده است که با سازوکارهای اصلاحی، بر چالش گیر افتادن در بهینه‌های محلی غلبه می‌کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در قالب دو سناریوی متفاوت، نشان‌دهنده توانمندی روش پیشنهادی در حل موثر مسئله تخصیص سلاح با در نظر گرفتن محدودیت‌های واقعی و حفاظت از دارایی‌های خودی در مقایسه با سایر روش‌ها است.

**واژگان کلیدی:** الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، بهینه محلی، تخصیص سلاح به هدف پویا، دارایی، فرماندهی و کنترل.

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار گروه علمی هوش مصنوعی، مجتمع دانشگاهی برق و رایانه، دانشگاه صنعتی مالک اشتر iustuser@mut.ac.ir

<sup>۲</sup> پژوهشگر مجتمع دانشگاهی برق و رایانه، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

<sup>۳</sup> Dynamic Weapon Target Assignment

<sup>۴</sup> Assets

<sup>۵</sup> Particle swarm optimization

## ۱. کلیات

در نبردهای نوین، حفظ دارایی‌های استراتژیک و نیروهای خودی در برابر تهدیدات چند لایه و پویا، یکی از چالش‌های اصلی فرماندهان است. با توجه به حساس بودن نبردها، وجود فرماندهان با تجربه و با درایت در موفقیت این نبردها بسیار مهم است. امروزه اغلب کشورهای دنیا رو به سمت سامانه‌های کنترلی خودکار در صنایع نظامی آورده‌اند. جهت کنترل این ادوات نظامی و استفاده بهینه از آنها در میدان نبرد نیاز به روشی است که بتواند این کار را به طور هوشمندانه ای انجام دهد.

بنابراین باید روشی در نظر گرفته شود. که بتواند سلاح‌هایی که در اختیار یگان نظامی خودی است به طور بهینه‌ای به تهدیدات اختصاص داده شود به طوریکه بیشترین آسیب به تهدیدات وارد گردد و کمترین آسیب به سلاح‌های خودی وارد شود. در مسئله تخصیص سلاح به هدف (WTA) [۱]، هدف تخصیص بهینه سلاح به تهدیدات است به گونه‌ای که بیشترین خسارت و آسیب به دشمن وارد شود و در مقابل میزان آسیب به نیروهای خودی حداقل گردد.

سوال اصلی در این مقاله این است که چگونه با استفاده از روش تخصیص سلاح به هدف بهینه‌ترین حالت تخصیص سلاح به تهدیدات انجام می‌شود؟

در این مقاله فرض شده است که یگان نظامی خودی شامل تعدادی پلتفرم سلاح است. که این پلتفرم‌های سلاح وظیفه دارند علاوه بر دفاع از خود و دارایی‌ها به تهدیدات نیز آسیب وارد کنند و آن‌ها را از بین ببرند. در این مسئله تهدیدات در چند موج حمله اقدامات خصمانه انجام خواهند داد که نتیجه هر موج حمله به مرحله بعدی وابسته است. به عبارتی مدل بر اساس نتایج موج حمله قبل برای موج حمله بعدی برنامه ریزی می‌کند که چگونه عمل تخصیص سلاح به هدف را انجام دهد.

همچنین در این روش وضعیت درگیری می‌تواند به صورت همزمان باشد، در واقع هنگامی که یک پلتفرم سلاح می‌خواهد علیه یک تهدید اقدام کند، همان تهدید علیه همان پلتفرم سلاح اقدام می‌کند. به این ترتیب در سناریو مبارزه فرض بر این است که چند نوع تهدید داریم. که تعداد تهدیدات را در مجموع  $N$  می‌باشد. این تهدیدات در چند موج حمله (به عنوان مثال در ۳

موج حمله) علیه دارایی‌ها و سلاح‌ها به مبارزه و درگیری می‌پردازند و هدف آنها (تهدیدات) این است که بیشترین خسارت را به پلتفرم‌های سلاح خودی و دارایی‌ها خودی وارد کنند. در مقابل یگان نظامی خودی به دنبال این است که به گونه‌ای سلاح‌ها را به تهدیدات تخصیص دهد که بیشترین خسارت را به دشمن وارد کرده و کمترین آسیب را متحمل بشود. به این ترتیب فرضیات، سناریو مبارزه و آنچه که به عنوان اطلاعات از این مسئله خواهیم داشت به صورت زیر است.

## تهدیدات

منظور از تهدیدات همان دشمنان هستند که قصد نابودی دارایی‌ها و سلاح‌ها را دارند.

- در ابتدای موج حمله اول  $N^1$  تهدید وجود دارند.  $N^1$  معلوم است. انواع تهدید نیز مشخص است. یعنی می‌دانیم چند تهدید از نوع اول است و هم‌نیطور از نوع دوم و سوم.
- در ابتدای موج حمله دوم  $N^2$  تهدید وجود دارند.  $N^2$  معلوم است. انواع تهدید نیز مشخص است. یعنی می‌دانیم چند تهدید از نوع اول است و هم‌نیطور از نوع دوم و سوم.
- در ابتدای موج حمله سوم  $N^3$  تهدید وجود دارند.  $N^3$  معلوم است. انواع تهدید نیز مشخص است. یعنی می‌دانیم چند تهدید از نوع اول است و هم‌نیطور از نوع دوم و سوم.

هدف هر تهدید مشخص است. یعنی می‌دانیم که هر تهدید قصد نابودی کدام دارایی خودی را دارد. این اطلاعات به صورت یک ماتریس باینری می‌باشد.

## پلتفرم‌های سلاح خودی

تعدادی پلتفرم سلاح در اختیار نیروهای خودی وجود دارد که تهدیدات را نابود می‌کنند. هر پلتفرم سلاح دارای مهمات است که معلوم است و برای همه ثابت است. یعنی همه پلتفرم‌ها دارای مثلاً ۳ یا ۵ موشک هستند.

- احتمال نابودی هر پلتفرم سلاح به تهدید مشخص است و به صورت یک ماتریس در نظر گرفته شده است.

- همه سلاح‌ها قابلیت حمله علیه همه تهدیدات را دارند. فقط احتمال نابودی متفاوت است.

#### دارایی‌های خودی

- تعدادی دارایی خودی وجود دارد که دشمن به دنبال انهدام آنها است و هر دارایی نیز ارزشی دارد.
- پلتفرم‌های سلاح خود نیز جزء دارایی‌ها هستند و هر پلتفرم سلاح ارزشی دارد.
- احتمال نابودی کامل یک دارایی توسط یک تهدید هم مشخص است (عددی بین صفر و یک). در صورت مورد اصابت قرار گرفتن دارایی توسط تهدید خسارتی به دارایی وارد می‌شود. در این سناریو مبارزه تعداد، نوع و ارزش تهدیداتی که در هر مرحله قرار است بر علیه دارایی‌ها حمله کند معلوم است. در این سناریو دارایی‌های داریم، که ارزش آنها نیز مشخص است و همچنین مشخص می‌شود چه تهدیداتی چه دارایی‌هایی را مورد حمله قرار می‌دهند، خود سلاح‌ها نیز به نوعی دارایی حساب می‌شوند و دارای ارزش می‌باشند (استراتژی حمله در هر مرحله مشخص می‌شود).

- در این سناریو مبارزه تمام پلتفرم‌های سلاح قابلیت حمله و مبارزه علیه همه تهدیدات را دارند و هر پلتفرم سلاح دارای  $\frac{\text{تعداد کل تهدیدات} \times 2}{\text{تعداد کل سلاح‌ها}}$  موشک است.

- در این سناریو احتمال نابودی تهدید و دارایی را داریم.
- در این سناریو احتمال نابودی تهدید و سلاح را داریم.

- در هر مرحله از سناریو هر تهدید تنها یک موشک می‌تواند شلیک کند و هر سلاح نیز تنها یک موشک می‌تواند به تهدید شلیک کند.

- اگر خسارت حتی کوچکی هم از طرف تهدید به پلتفرم سلاح وارد شود فرض می‌شود که کل سلاح از کار افتاده است و در مراحل بعدی توانایی شلیک ندارد ولی جزء دارایی‌های ما تا مرحله آخر خواهد بود.

در این سناریو مبارزه بر اساس آنچه بیان شد هر پلتفرم سلاح تعداد و ارزشی دارد. هر دارایی هم ارزشی دارد. این موارد برای تهدیدات نیز هست یعنی هر تهدید تعداد و ارزشی دارد. همچنین هنگامی که تهدید علیه سلاح یا دارایی اقدام می‌کند و به مبارزه می‌پردازد. شلیکی که علیه آن دارایی و یا پلتفرم سلاح انجام می‌دهد با احتمالی باعث وارد کردن خسارت به آن دارایی یا پلتفرم سلاح خواهد شد. این مورد بر عکس نیز هست یعنی اگر الگوریتم تخصیص سلاح به هدف یک پلتفرم سلاح مشخص را به تهدیدی اختصاص دهد موشکی که آن پلتفرم سلاح به تهدید شلیک می‌کند با احتمالی به تهدید برخورد خواهد کرد با این تفاوت که در صورت برخورد، تهدید نابود خواهد شد اما وقتی که تهدیدی موشکی به پلتفرم سلاح یا دارایی شلیک می‌کند خسارتی به پلتفرم سلاح وارد یا دارایی وارد می‌شود یعنی با برخورد موشک شلیک شده تهدید به دارایی یا پلتفرم سلاح، الزاماً پلتفرم سلاح یا دارایی به طور کاملاً نابود نخواهد شد. خسارتی که به پلتفرم سلاح و یا دارایی وارد می‌شود درصدی از ارزش آن پلتفرم سلاح یا دارایی خواهد بود. که مقدار آن در اطلاعات ورودی مسئله مشخص می‌شود.

در سناریو مبارزه فرضاً در موج حمله اول تعدادی تهدید قصد حمله دارند. با مشخص شدن اینکه چه تهدیداتی قصد حمله دارند. استراتژی حمله آنها نیز مشخص خواهد شد یعنی مشخص خواهد شد که چه تهدیدی قصد حمله به چه دارایی یا پلتفرم سلاحی را دارد. به این ترتیب در موج حمله اول عمل تخصیص سلاح به تهدیدات انجام خواهد شد. در موج حمله اول تهدیدات بر اساس استراتژی که از قبل مشخص شده است سلاح‌ها و یا دارایی‌هایی را مورد شلیک قرار خواهند داد. اگر این شلیک باعث بروز اصابت به پلتفرم سلاح و یا دارایی شد مقداری خسارت به آن پلتفرم سلاح و یا دارایی وارد خواهد شد. که اگر خسارتی به پلتفرم سلاح وارد شود هرچند ناچیز، آن پلتفرم سلاح تا موج حمله آخر غیر عملیاتی خواهد بود. به عبارتی آن پلتفرم سلاح دیگر توانایی درگیری و دفاع نخواهد داشت. اما جز دارایی‌های تسلیحاتی خواهد بود و تهدیدات می‌توانند مجدداً در موج‌های حمله بعدی آن پلتفرم سلاح را مورد هدف قرار دهند.

میدان نبرد واقعی نزدیک تر است این روش بیشتر مورد توجه محققین بوده است.

در اغلب تحقیقاتی که صورت گرفته دارای های خودی در میدان نبرد در نظر گرفته نشده است. در روشی که در این مقاله بیان شده است دارای های خودی مانند؛ پالایشگاه، فرودگاه، سد و ... را در نظر گرفته ایم. این روش سعی دارد تا از این دارای های خودی در مقابل تهدیدات دفاع کند. همچنین در نبردهای نوین امروزی، دشمن در چند موج حمله علیه سلاح ها و دارای ها اقدام انجام می دهد، و این موضوعی است که در اکثر کارها به آن توجه نشده است. به این ترتیب وظیفه مدل تخصیص سلاح به هدف این است که بتواند درانتهای نبرد(بعد چند موج حمله) بیشترین آسیب را به دشمن وارد کرده و کمترین خسارت متوجه نیروهای خودی بشود.

در این مقاله مدل تخصیص سلاح به هدف پویا را با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) [۸-۶] بیان کرده ایم. الگوریتم PSO یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر هوش جمعی است که بر اساس رفتار گروهی در طبیعت مانند دسته های حشرات، پرندگان و ... می باشد. این الگوریتم بهترین راه حل را از تعامل ذرات بدست می آورد، و در فضای جستوجو با ابعاد بالا، به سرعت به سمت بهینه ی جهانی همگرا می شود.

روش بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) [۸]، یک الگوریتم جستوجوی مبتنی بر جمعیت می باشد که رفتار دسته جمعی دسته پرندگان را شبیه سازی می کند. در PSO موجودات ذره نامیده می شوند، که در فضای چند بعدی جستوجو حرکت می کنند. تغییر در موقعیت ذرات در فضای جستوجو مبتنی بر رفتار اجتماعی موجودات در تقلید از موفقیت سایر موجودات است. تغییرات یک ذره در ازدحام، تحت تاثیر تجربیات خود و یا دانش همسایگانش می باشد. بنابراین رفتار جستوجوی یک ذره تحت تاثیر سایر ذرات در ازدحام است (نوعی رفتار همکاری همزیستی). با توجه به رفتار تقلید گونه ای که هر ذره در مقابل یک یا چند ذره دیگر دارد، الگوریتم PSO یک روش تقلید-محور محسوب می شود. بنابراین با شبیه سازی مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا به شرایط الگوریتم ازدحام ذرات، به دنبال بهینه ترین حالت تخصیص سلاح به اهداف هستیم.

در نقطه مقابل اگر پلتفرم سلاحی تهدیدی را مورد هدف قرار داد یعنی الگوریتم تخصیص سلاح به هدف، پلتفرم سلاحی را به تهدیدی اختصاص داد. آن پلتفرم سلاح موشکی علیه آن تهدید شلیک خواهد کرد که اگر آن تهدید مورد اصابت قرار گرفت. یک موشک از موشک های آن پلتفرم سلاح کم خواهد شد. و تهدید نابود خواهد شد و تعداد تهدیدات یکی کم خواهد شد. اما اگر مورد اصابت قرار نگیرد. آن تهدید سالم است و تعداد موشک های آن پلتفرم سلاح یکی کم خواهد شد.

در موج حمله بعدی بعد از آنکه مشخص شد چه تهدیداتی قصد حمله دارند و استراتژی حمله آنها چیست. الگوریتم تخصیص سلاح به هدف سلاح های را تخصیص می دهد. که عملیاتی هستند. یعنی مهمات دارند و آسیبی ندیده اند. به این ترتیب هدف این است که درانتهای موج حمله آخر آسیب بیشتری به تهدیدات وارد شود و خسارت کم تری به پلتفرم های سلاح و دارای ها تحمیل شود.

به طور کلی مسئله تخصیص سلاح به هدف یکی از مهم ترین مسائل در فرماندهی و کنترل است که در سال های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مسئله تخصیص سلاح به هدف یک مسئله NP کامل است و وابسته به پارامترهای مختلفی است. بنابراین هر چه تعداد پارامترهای مسئله بیشتر شود. مسئله تخصیص سلاح به هدف پیچیده تر خواهد شد و حل آن نیز دشوار تر خواهد بود [۲، ۳].

دو نسخه از مسئله تخصیص سلاح به هدف وجود دارد، مسئله تخصیص سلاح به هدف ایستا (SWTA) [۴] و مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا (DWTa) [۵]، در مسئله تخصیص سلاح به هدف ایستا، سلاح ها همزمان علیه تهدیدات اقدام می کنند و به مبارزه می پردازند. به عبارتی در این روش در یک مرتبه عمل تخصیص سلاح به هدف انجام خواهد شد. اما در روش تخصیص سلاح به هدف پویا، در چند موج حمله عمل تخصیص سلاح به هدف انجام خواهد شد و عمل تخصیص سلاح به هدف در موج حمله بعدی وابسته به نتایج تخصیص سلاح به هدف در موج های حمله ی قبلی است. به این ترتیب از آنجایی که مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا به شرایط

به این ترتیب الگوریتم معرفی شده در این مقاله را با تخصیص سلاح به هدف تصادفی و روش DPSO [۹] که نسبت به روش های دیگر شباهت بیشتری به سناریو معرفی شده در این تحقیق دارد را مورد مقایسه و بررسی قرار داده ایم.

عمل تخصیص سلاح به هدف را بر روی دو سناریو مختلف که اطلاعات آنها در بخش ۲ قرار داده شده است. در ۱۰ بار تکرار انجام داده ایم. به عبارت دیگر هر الگوریتم را بر روی هر سناریو ۱۰ بار اجرا کرده و میزان خسارت وارد شده به نیروهای خودی و دشمن را محاسبه کرده و نمایش داده ایم. به این ترتیب نتیجه تخصیص سلاح به هدف و میزان خسارت وارده شده از طرف تهدیدات به پلتفرم های سلاح و دارایی همچنین از طرف پلتفرم های سلاح به تهدیدات مورد بررسی قرار گرفته شده است.

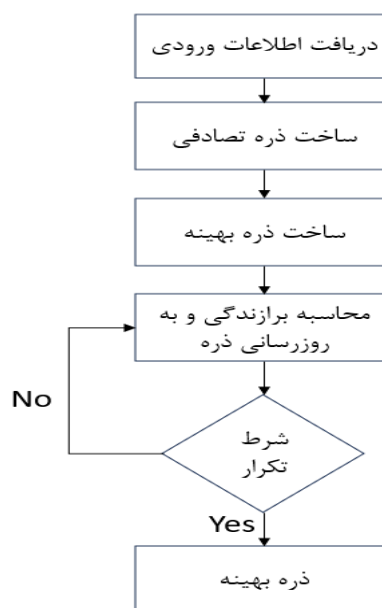
در ادامه این مقاله به موارد زیر پرداخته ایم.

- کارهایی که اخیرا در حل مسئله تخصیص سلاح به هدف انجام شده است.
- روابط ریاضی مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات
- بیان روش پیشنهادی
- انجام آزمایشات و نتیجه گیری

### ۱.۱. مقدمه و هدف

برای پاسخ به سوالی که دربخش قبل مطرح شد از روش الگوریتم PSO برای حل مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا استفاده کرده ایم. در این مقاله هدف این است که سناریو تعریف شده در بخش قبل را که تعریفی از یک مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا نزدیک به واقعیت می باشد را با استفاده از الگوریتم PSO حل کنیم. به گونه ای که شرایط مسئله رعایت شود. به عبارتی در پایان حملات بیشترین آسیب به دشمن و کمترین خسارت به نیروهای خودی وارد شود. سناریویی که در این تحقیق طرح شده، سناریو خاصی است و طبق مطالعات انجام شده کاری که بتواند تمام ابعاد سناریو طرح شده در این مقاله را در بر گیرد وجود ندارد.

در شکل ۱ چارچوب کلی که برای حل مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا در نظر گرفته ایم را نشان داده ایم.



شکل ۱. چارچوب کلی روش تخصیص سلاح به هدف پویا در این مقاله.

فلوچارت شکل ۱ برای هر موج حمله در نظر گرفته شده است. به عبارتی برای هر موج حمله رویه فلوچارت شکل ۱ را خواهیم داشت. تفاوتی که وجود دارد این است در انتهای هر موج حمله تغییراتی در داده های مسئله ایجاد خواهد شد. تغییراتی مانند؛ تعداد موشک های هر پلتفرم سلاح، غیر عملیاتی شدن پلتفرم سلاح، از بین رفتن بعضی از تهدیدات و ... که بر اساس این تغییرات موج حمله بعدی بر اساس فلوچارت شکل ۱ عمل تخصیص سلاح به هدف را انجام می دهد. به این ترتیب از آنجایی که مسئله در چند موج حمله تعریف شده است شکل ۱ برای چند موج حمله در نظر گرفته شده است یعنی در هر موج حمله فلوچارت شکل ۱ را خواهیم داشت.

سناریو و صحنه نبردی که در این تحقیق بیان شده است. بسیار به شرایط میدان نبرد واقعی نزدیک است و بر اساس مطالعاتی که انجام شده اکثر کارها میدان نبرد و سناریو ساده ای را برای حل مسئله تخصیص سلاح به هدف در نظر گرفته اند. بنابراین روش دیگری که بتوان با استفاده از آن سناریو معرفی شده در این مقاله را حل کرد وجود ندارد با مطالعه و تحقیقات روشی که شباهتی بیشتری به این سناریو دارد را انتخاب کردیم.

در پژوهش های پیشین بر مسئله تخصیص سلاح به هدف ایستا، سناریوها اغلب ساده سازی شده و تنها بر تعامل مستقیم بین پلتفرم های سلاح و تهدیدات تمرکز داشته اند، بدون در نظر گرفتن دارایی های غیر تسلیحاتی یا اثرات پویای میدان نبرد. برای مثال در [۱۰] الگوریتم غیر خطی مبتنی بر شاخه و مرز معرفی<sup>۶</sup> شده است. که طبق ادعا این مقاله عملکرد بهتری نسبت به روش های ابتکاری مشابه دارد.

در [۱۱] در این کار برای حل مسئله تخصیص سلاح به هدف از همگذاری<sup>۷</sup> و جهش<sup>۸</sup> الگوریتم ژنتیک در الگوریتم PSO استفاده شده است. این روش ها جزء روش های ترکیبی است که یکی از ضعف های آن سرعت همگرایی پایین است که این مشکل در مسائل با ابعاد و سناریو های پیچیده تر دو چندان خواهد شد.

با این حال، مدل های ایستا به دلیل عدم لحاظ کردن پویایی زمان و وابستگی مراحل به یکدیگر، برای سناریوهای واقعی نبرد که شامل موج های حمله متوالی و تغییرات لحظه ای وضعیت هستند، محدودیت های جدی دارند. در مقابل، مدل های پویا با توجه به این وابستگی ها، رویکرد مناسب تری ارائه می دهند و در سال های اخیر توجه بیشتری دریافت کرده اند.

در پژوهش [۱۲] مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا با استفاده از الگوریتم SSO<sup>۹</sup> که نسخه ای بهبود یافته از PSO است، حل شده است. این روش با تمرکز بر سناریویی ساده شامل پلتفرم های سلاح و تهدیدات، و با بهره گیری از مکانیزم افزایش سرعت همگرایی، عملکرد مناسبی در درمسائل چند مرحله ای نشان داده است، اما دارایی های غیر تسلیحاتی را در نظر نگرفته است. در [۱۳] یک الگوریتم بهینه سازی چند هدفه با بهبودهایی ارائه شده است که به آن "الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چند هدفه بهبود یافته"<sup>۱۰</sup> می گویند. استراتژی های یادگیری مختلف برای راه حل های این الگوریتم به کار گرفته شده اند، به طوری که الگوریتم بتواند به صورت هدفمند یاد بگیرد و تکامل

یابد. به منظور حل مشکل افتادن در مینیمم های محلی، در این مقاله یک استراتژی جستجو بر اساس "همگذاری باینری شبیه سازی شده" (SBX) و "جهش چندجمله ای" (PM) ارائه شده است، که امکان به اشتراک گذاری اطلاعات الیستی بین آرشیو خارجی را فراهم می کند و قابلیت های کاوشی IMOPSO را افزایش می دهد. علاوه بر این، یک استراتژی نگهداری آرشیو پویا به کار گرفته شده است تا تنوع را در راه حل ها بهبود دهد. در این روش سناریو مبارزه شامل پلتفرم های سلاح و تهدیدات است.

به عنوان یک سناریو عملی مانند سناریویی که در این مقاله بیان شده است. مدل ها و حل الگوریتم های تخصیص سلاح به هدف پویا مبتنی بر دارایی (A-DWTA) از چالش های واقعی و مهم در فرماندهی و کنترل است.

در [۱۴] با الهام از اصل "تیراندازی-نگاه کردن-تیراندازی"، مدلی مبتنی بر حلقه "مشاهده-تطبیق-تصمیم گیری-عمل" برای مسئله تخصیص پویا مبتنی بر دارایی A-DWTA ارائه شده است. این پژوهش با استفاده از استراتژی تجزیه روند افقی (A-DWTA/RH) یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر بازده مارجینال آماری (HA-SMR)، رویکردی سلسله مراتبی معکوس از ارزش دارایی به تخصیص سلاح پیشنهاد کرده که به واقعیت عملیاتی نزدیک تر است.

در پژوهش [۱۵] روشی زمان محور برای حل مسئله پویا پیشنهاد شده است. این رویکرد برخلاف مدل های سنتی چند مرحله ای، تصمیم گیری را بر اساس فواصل زمانی نمونه برداری پویا انجام می دهد و به تغییرات لحظه ای میدان نبرد پاسخ بهتری می دهد، که آن را برای سناریوهای واقعی تر مناسب می سازد، هر چند تمرکز اصلی بر سلاح ها و تهدیدات باقی مانده است.

در مطالعه [۱۶]، چارچوبی مبتنی بر یادگیری تقویتی برای حل مسئله بهینه سازی ترکیبی با کاربرد مسئله پویا ارائه شده است. این روش با تمرکز بر تصمیم گیری غیرمتمرکز و چند

<sup>۹</sup> Simplified Swarm Optimization

<sup>۱۰</sup> IMOPSO

<sup>۶</sup> Branch and Bound

<sup>۷</sup> crossover

<sup>۸</sup> mutation

|                  |                                                                                                                                                                                                        |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  | هدف $e$ در مرحله $h$ است.                                                                                                                                                                              |
| $A, a_w$         | $A = [a_1, a_2, \dots, a_w, \dots, a_{Nwpm}]$ بیانگر مقدار مهمات سلاح $w$ است.                                                                                                                         |
| $F^h, f_{w,e}^h$ | $F^h = [f_{w,e}^h]_{Nwpm \times Ntgt}$ بیانگر ماتریس قابلیت درگیری است که اگر در آن $f_{w,e}^h = 1$ به معنای این است که سلاح $w$ به هدف $e$ در مرحله $h$ شلیک کرده است در غیر این صورت مقدار آن ۰ است. |

بر اساس جدول ۱ مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا به صورت زیر روابط زیر فرموله می‌شود.

$$\text{Minimize } D_s(Y^s) \quad (1)$$

$$= \sum_{e=1}^{Ntgt} v_e \left( \prod_{h=s}^{Nstg} \prod_{w=1}^{Nwpm} (1 - p_{w,e}^h y_{w,e}^h) \right)$$

محدودیت‌هایی که در مسئله DWTا و رابطه ۱ وجود دارد و باید به آنها توجه کرد به صورت زیر است:

$$\sum_{e=1}^{Ntgt} y_{w,e}^h \leq n_w, \forall h \in \{s, s+1, s+2, \dots, Nstg\}, \forall w \in \{1, 2, \dots, Nwpm\} \quad (2)$$

$$\sum_{e=1}^{Nwpm} y_{w,e}^h \leq m_{h,e}, \forall h \in \{s, s+1, s+2, \dots, Nstg\}, \forall w \in \{1, 2, \dots, Ntgt\} \quad (3)$$

$$\sum_{h=s}^{Nstg} \sum_{e=1}^{Ntgt} y_{w,e}^h \leq a_w, \forall w \in \{1, 2, \dots, Nwpm\}, y_{w,e}^h < f_{w,e}^h, \forall h \in \{s, s+1, s+2, \dots, Nstg\} \quad (4)$$

$$\forall w \in \{1, 2, \dots, Nwpm\}, \forall e \in \{1, 2, \dots, Ntgt\}, y_{w,e}^h \in \{0, 1\}, \forall h \in \{s, s+1, s+2, \dots, Nstg\} \quad (5)$$

$$\forall w \in \{1, 2, \dots, Nwpm\}, \forall e \in \{1, 2, \dots, Ntgt\} \quad (6)$$

رابطه ۲ محدودیت ظرفیت اسلحه است که تعداد اهدافی که یک سلاح می‌تواند در هر مرحله به آنها حمله کند را محدود

عاملی، عملکرد بالایی در محیط‌های پویا نشان داده و قابلیت تعمیم به سناریوهای پیچیده‌تر را دارد.

بر اساس آنچه که تاکنون مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته شد است. برای حل مسئله تخصیص سلاح به هدف در این مقاله باید از روشی استفاده کرد. که تمام ابعاد سناریو مطرح شده در این مقاله را در بر گیرد و همچنین بر خلاف اکثر کارها دارایی‌ها را نیز در نظر بگیرد.

در ادامه به بیان ریاضیاتی مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا و الگوریتم PSO پرداخته شده است.

## ۲.۱. روش تحقیق یا اصول و تئوری مقاله

همانطور که در بخش‌های قبلی بیان شد مسئله تخصیص سلاح به هدف بر دو نوع است: تخصیص سلاح به هدف ایستا و تخصیص سلاح به هدف پویا. تخصیص سلاح به هدف پویا در چند مرحله انجام می‌شود و نتایج هر مرحله بر مراحل بعدی تاثیر گذار خواهد بود. به این ترتیب مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا بیشتر به شرایط نبرد واقعی نزدیک است. بر اساس مطالعاتی که انجام گرفته شده است [۱۸], [۱۷], [۱۶].

در این بخش به بیان روابط ریاضیاتی حاکم بر این مسئله پرداخته شده است.

جدول ۱. پارامترهای مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا.

| پارامترهای مسئله | شرح پارامترها                                                                                                                                                                                       |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Nwpm^s$         | تعداد سلاح‌های باقی مانده در شروع مرحله $s$                                                                                                                                                         |
| $Ntgt^s$         | تعداد اهداف باقی مانده در شروع مرحله $s$                                                                                                                                                            |
| $Nstg$           | تعداد کل مراحل مسئله                                                                                                                                                                                |
| $T$              | مجموعه اهداف در هر مرحله $s$<br>$T = 1, 2, \dots, Ntgt$                                                                                                                                             |
| $Y^h, Y^h$       | متغیرهای $Y^h = [y_{w,e}^h]$ و $Y^h = [Y^h, Y^{h+1}, \dots, Y^{Nstg}]$ تصمیم‌گیری در مرحله $h$ هستند که اگر $y_{w,e}^h = 1$ سلاح $w$ به هدف $e$ اختصاص داده شده است در غیر این صورت مقدار آن ۰ است. |
| $V, v_e$         | هدف $e$ می‌باشد.<br>$V = [v_1, v_2, \dots, v_e, \dots, v_{Ntgt}]$ که در آن مقدار تهدید                                                                                                              |
| $P^h, p_{w,e}^h$ | $P^h = [P_{w,e}^h]_{Nwpm \times Ntgt}$ که ماتریس احتمال در مرحله $h$ است و $P_{w,e}^h$ احتمال اینکه سلاح $w$ هدف $e$ را در مرحله $h$ تخریب کند.                                                     |
| $N, n_w$         | سلاح $w$ در یک مرحله است.<br>$N = [n_1, n_2, \dots, n_e, \dots, n_{Nwpm}]$ که در آن نرخ آتش                                                                                                         |
| $M, m_{h,e}$     | در آن هزینه سلاح برای                                                                                                                                                                               |

| w1 | w2 | w3 | w4 | w5 |
|----|----|----|----|----|
| 1  | 0  | 2  | 3  | 1  |

شکل ۲. بازنمایی از یک بردار (یک ذره تصادفی در فضای جستجو).

به این ترتیب بر اساس الگوریتم تولید ذره تصادفی ذراتی در فضای مسئله تولید خواهند شد که نحوه تولید ذره بر اساس این الگوریتم در ادامه نشان داده شده است.

### الگوریتم تولید ذره تصادفی

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم تولید ذره تصادفی.

| نام پارامتر | توضیحات                                       |
|-------------|-----------------------------------------------|
| N           | تعداد ذرات تصادفی که الگوریتم باید تولید کند. |
| W           | تعداد پلتفرم های سلاح خودی                    |
| S           | تهدیداتی که در حمله شرکت دارند.               |

به این ترتیب الگوریتم تولید ذره تصادفی به صورت زیر است.

| الگوریتم تولید ذره تصادفی                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>فاز دریافت اطلاعات ورودی:</p> <p>دریافت پارامترهای <math>N, W, S</math></p> <p>فاز تولید ذرات تصادفی:</p> <pre> all_particle = [] # An empty list at the end of the algorithm will contain all the produced particles for i = 1 : N     particle i<sub>1:W</sub> = [0, ..., 0]     for j = 1 : W         t = random-select(S)         w = random-select(W)         if particle i [w] == 0:             particle i [w] = t         j++     continue     all_particle += particle i     i++ Output = all_particle </pre> |

از آنجایی که سناریو مورد نظر در این تحقیق نزدیک به نبرد واقعی است بنابراین تعداد پارامترهای زیاد مسئله سبب کند شدن روند همگرایی الگوریتم خواهد شد. بنابراین استفاده از الگوریتم تولید ذره بهینه به همگرایی سریع تر کمک خواهد

می کند. مقدار  $n_w$  معمولاً به ۱ تنظیم می شود، زیرا بیشتر اسلحه ها تنها قادر به حمله به یک هدف در هر لحظه هستند. یک سلاح ویژه که می تواند همزمان به چند هدف حمله کند، می تواند به عنوان چندین سلاح جداگانه در نظر گرفته شود. رابطه ۳ اطمینان حاصل می کند که مقدار  $m_{h,e}$  سلاح باید متناسب با تخصیص سلاح در مرحله  $h$  به هدف  $e$  باشد. مقدار  $m_{h,e}$  اصولاً بر اساس عملکرد سلاح و استراتژی شلیک تعیین می شود. رابطه ۴ اطمینان حاصل می کند که مقدار مهمات مصرفی توسط یک سلاح خاص  $w$  در تمام مراحل، نمی تواند از مقدار مجاز از پیش تعیین شده آن، یعنی  $a_w$ ، بیشتر شود. رابطه ۵ محدودیت پنجره زمانی است که تأثیرات پنجره های زمانی را بر روی امکان حمله اسلحه ها در نظر می گیرد. این معادله اطمینان حاصل می کند که هر شلیکی که توسط یک سلاح در هر مرحله انجام می شود، باید از نظر امکان حمله، ممکن باشد. در نهایت، تمام متغیرهای تصمیم گیری  $y_{w,e}^h$  ملزم به دودویی بودن هستند.

با توجه به شکل ۱ که بیانگر چارچوب کلی سازوکار حل مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا با استفاده از الگوریتم PSO است. در این تحقیق از الگوریتم ها و روشهای مختلفی استفاده شده است که عبارتند از:

- تولید ذره تصادفی
- تولید ذره بهینه بر اساس [۱۲] که هدف آن سریع تر شدن روند همگرایی عمل تخصیص سلاح به هدف است.
- به روز رسانی ذرات مبتنی بر روش  $UM_f$

در الگوریتم PSO برای رسیدن به بهترین و بهینه ترین تخصیص سلاح به هدف لازم است در ابتدا تعدادی ذره (راه حل) در فضای جستجو داشته باشیم. منظور از ذره (راه حل) برداری به صورت شکل ۲ است. مطابق آنچه که در شکل ۲ مشاهده می شود ذره ای که ساخته می شود یک آرایه ۲ بعدی است با اندازه  $۱ \times ۵$  است که در این شکل به تعداد پلتفرم های سلاح ستون داریم و داخل هر ستون تهدید مورد نظر قرار گرفته است. به این ترتیب در کل فرایند تخصیص سلاح به هدف با ذراتی مانند شکل ۲ روبرو هستیم.

کرد. پارامترهای مورد استفاده در این الگوریتم در جدول ۳ بیان شده است. الگوریتم ذره بهینه در ادامه بیان شده است.

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم تولید ذره بهینه.

| نام پارامتر  | توضیحات                                    |
|--------------|--------------------------------------------|
| W            | تعداد پلتفرم های سلاح                      |
| T            | ماتریس تهدیداتی که در موج حمله شرکت دارند. |
| $V_T$        | ماتریس ارزش تهدیدات                        |
| Prob_of_kill | ماتریس احتمال نابودی تهدید-سلاح            |
| M            | ماتریس تعداد موشک های هر پلتفرم سلاح       |

$n$  تعداد تهدیدات  
 $q_{jk}$  احتمال نابودی دارایی  $k$  توسط تهدید  $j$   
 $m$  تعداد پلتفرم های سلاح  
 $p_{ij}$  احتمال نابودی تهدید  $j$  ام توسط پلتفرم سلاح  $i$  ام  
 $x_{ij}$  ذره (اگر سلاح  $i$  به تهدید  $j$  اختصاص داده شده باشد مقدار آن ۱ وگرنه صفر خواهد بود).  
 به این ترتیب با معرفی الگوریتم ها و تابع برازندگی در ادامه روش مورد استفاده برای حل مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) بیان شده است.

### ۱.۲.۱. الگوریتم تخصیص سلاح به هدف مبتنی بر روش PSO

پارامترهای الگوریتم تخصیص سلاح به هدف پویا مبتنی بر روش PSO که در این بخش معرفی شده است به صورت جدول ۴ می باشد. این الگوریتم مشابه الگوریتم PSO که در بخش ۲ معرفی شد می باشد.

جدول ۴. پارامترهای الگوریتم تخصیص سلاح به هدف پویا مبتنی

بر روش PSO.

| نام پارامتر | توضیحات                          |
|-------------|----------------------------------|
| Iter        | شرط اتمام الگوریتم (تعداد تکرار) |
| particles   | ذراتی که تولید شده اند           |
| attack      | استراتژی حمله                    |
| PBest       | بهینه محلی                       |
| GBest       | بهینه سراسری                     |
| Z           | تعداد ذرات                       |

الگوریتم تخصیص سلاح به هدف ما در این تحقیق به صورت زیر است که در این الگوریتم منظور از  $\text{Fit}()$  تابع برازندگی یا همان رابطه ۷ می باشد و در فاز تکامل این الگوریتم تابع  $\text{update}()$  نشان دهنده به روز رسانی ذره است که در ادامه بررسی شده است.

| الگوریتم تخصیص سلاح به هدف مبتنی بر روش بهینه سازی ازدحام ذرات                                                                                                                                                                                           |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| فاز دریافت اطلاعات ورودی:                                                                                                                                                                                                                                |  |
| دریافت پارامترهای $Iter, particles, attack, z$ :                                                                                                                                                                                                         |  |
| فاز مقدار دهی اولیه:                                                                                                                                                                                                                                     |  |
| $Pbest = particles, \quad Gbest = \text{argmin}(\text{Fit}(particles))$                                                                                                                                                                                  |  |
| فاز تکامل:                                                                                                                                                                                                                                               |  |
| <pre> for i = 1:Iter   for j = 1:z     Rou = Random_select(0, 1)     new_par = update(Rou, attack, par[j])     if Fit(new_par) &lt; Fit(PBest[j])       PBest[j] = new_par       if Fit(PBest[j]) &lt; Fit(GBest)         GBest = PBest           </pre> |  |
| خروجی: GBest                                                                                                                                                                                                                                             |  |

| الگوریتم تولید ذره بهینه                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| فاز دریافت اطلاعات ورودی:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
| دریافت پارامترهای $W, T, V_T, Prob\_of\_kill, M$ :                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |
| فاز تولید ذره بهینه:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |
| <pre> output = [0,...,0] #An empty array that will be filled at the end of the                     algorithm and represents an optimal particle. for i=1:W   t = MAX(<math>V_T</math>) # Find the threat with the highest value   w = MAX(Prob_of_kill[t]) # Find the weapon platform that t is                         most likely to destroy   if output[w] == 0 &amp;&amp; M[w] &gt; 0     output[w] = t     <math>V_T[t] *= Prob\_of\_kill[t, w]</math>     Prob_of_kill[t, w] = 0   else:     i++ output: خروجی الگوریتم           </pre> |  |

### تابع برازندگی

به طور کلی تابع برازندگی تابعی است که راه حل های کاندید را برای یک مسئله را به عنوان ورودی دریافت می کند و یک خروجی که میزان خوب بودن آن راه حل را مشخص می کند ارائه می دهد. به این ترتیب در الگوریتم های بهینه سازی مانند PSO برای آپدیت کردن ذرات و فرایند رسیدن به ذره بهینه نیازمند یک تابع برازش هستیم که برازندگی ذرات را محاسبه کند. در این تحقیق از یک تابع برازندگی پایه مبتنی بر دارایی [۱۴] استفاده کرده ایم که به صورت رابطه ۷ است.

$$F = - \sum_{k=1}^l v_k \prod_{j=1}^n (1 - q_{jk}) \prod_{i=1}^m (1 - p_{ij})^{x_{ij}} \quad (7)$$

که در آن

$l$  تعداد دارایی

$v_k$  ارزش هر دارایی

شده است. اطلاعات سناریو های مبارزه در جدول های ۵-۲۲ بیان شده است.

جدول ۵. اطلاعات پلتفرم های سلاح در سناریو ۱.

| تعداد پلتفرم سلاح | ارزش پلتفرم سلاح | نام پلتفرم سلاح |
|-------------------|------------------|-----------------|
| ۲                 | ۸۷               | S۵۰۰            |
| ۳                 | ۷۸               | S۳۰۰            |

جدول ۶. اطلاعات دارایی های غیر تسلیحاتی در سناریو ۱.

| ارزش دارایی | نام دارایی |
|-------------|------------|
| ۸۸          | Dam        |
| ۷۷          | Refinery   |

جدول ۷. اطلاعات تهدیدات در سناریو ۱.

| تعداد تهدید | ارزش تهدید | نام تهدید |
|-------------|------------|-----------|
| ۲           | ۸۸         | F۳۵       |
| ۲           | ۷۸         | F۱۵       |

جدول ۸. احتمال نابودی تهدید - سلاح در سناریو ۱.

| نام سلاح \ نام تهدید | S۵۰۰ | S۳۰۰ |
|----------------------|------|------|
| F۳۵                  | ۰.۷۶ | ۰.۷۸ |
| F۱۵                  | ۰.۶۷ | ۰.۶۸ |

جدول ۹. احتمال نابودی تهدید - دارایی در سناریو ۱.

| نام دارایی \ نام تهدید | Dam  | Refinery |
|------------------------|------|----------|
| F۳۵                    | ۰.۷۸ | ۰.۸۷     |
| F۱۵                    | ۰.۷۷ | ۰.۷۶     |

جدول ۱۰. احتمال نابودی سلاح - تهدید در سناریو ۱.

| نام سلاح \ نام تهدید | F۳۵  | F۱۵  |
|----------------------|------|------|
| S۵۰۰                 | ۰.۶۷ | ۰.۷۶ |
| S۳۰۰                 | ۰.۵۶ | ۰.۶۵ |

جدول ۱۱. اطلاعات پلتفرم های سلاح در سناریو ۲.

| تعداد پلتفرم سلاح | ارزش پلتفرم سلاح | نام پلتفرم سلاح |
|-------------------|------------------|-----------------|
| ۲                 | ۸۸               | S۵۰۰            |
| ۳                 | ۷۸               | S۳۰۰            |

الگوریتم PSO در مسائل گسسته ضعف دارد. به این ترتب در تابع **update()** که در الگوریتم تخصیص سلاح به هدف پویا به آن اشاره شد سعی شده تا این مشکل حل شود.

اما مهم ترین قسمت این الگوریتم که سبب شده برمشکل گسسته بودن مسائل غلبه کند ماژول "آپدیت" آن است که طبق آنچه در [۲۰], [۱۹], [۱۲] ادعا شده است نام این ماژول  $UM_f$  است که عملکرد آن مطابق رابطه زیر است.

$$x_{ij} = \begin{cases} g_j & \text{if } \rho \in [0, c_g) \\ x & \text{if } \rho \in [c_g, c_r) \\ x_{ij}^{t-1} & \text{if } \rho \in [c_r, 1] \end{cases} \quad (8)$$

بر اساس رابطه ۸ و طبق ادعای مقاله مقادیر تصادفی  $c_g = 0.6$ ,  $c_r = 0.86$ ,  $c_p = 0.85$  انتخاب می شوند. همچنین مقدار  $\rho$  به صورت تصادفی برای هر ذره انتخاب می شود و مطابق با رابطه ۸ ذره به روز رسانی می شود. به این ترتیب آپدیت ذره اینگونه خواهد بود که:

- اگر مقدار  $\rho \in [0, c_g)$  باشد آنگاه  $g_j$  (ذره ای که حاصل رابطه ۷ برای آن کمترین مقدار است)
- اگر مقدار  $\rho \in [c_g, c_r)$  باشد آنگاه  $x$  به طور تصادفی و با رعایت محدودیت های مسئله مقداری در نظر گرفته خواهد شد.
- اگر مقدار  $\rho \in [c_r, 1]$  باشد آنگاه ذره قبلی در نظر گرفته خواهد شد.

در این بخش به بررسی و بیان الگوریتم تخصیص سلاح به هدف پرداخته شد. این الگوریتم مسئله تخصیص سلاح به هدف را متناسب با سناریو میدان نبرد واقعی که در بخش ۱ معرفی شد به خوبی حل خواهد کرد. در ادامه به بررسی عملکرد این الگوریتم و مقایسه آن با سایر روش ها پرداخته شده است.

## ۲. یافته ها

در این بخش به بیان و بررسی نتایج حاصل از روش بیان شده در این مقاله خواهیم پرداخت. در این بخش روش های تصادفی، DPSO و روش معرفی شده در این مقاله را بر روی دو سناریو مختلف آزمایش کرده و نتیجه خسارات وارد شده به تهدیدات و نیروی های خودی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته

|      |    |   |
|------|----|---|
| hook | ۷۲ | ۲ |
|------|----|---|

جدول ۱۲. اطلاعات تهدیدات در سناریو ۲.

| تعداد تهدید | ارزش تهدید | نام تهدید |
|-------------|------------|-----------|
| ۲           | ۸۹         | F۲۲       |
| ۳           | ۷۸         | F۱۸       |
| ۱           | ۶۷         | F۱۵       |

جدول ۱۳. اطلاعات دارایی غیر تسلیحاتی در سناریو ۲.

| ارزش دارایی | نام دارایی |
|-------------|------------|
| ۷۷          | dam        |
| ۶۶          | refinery   |

جدول ۱۴. احتمال نابوی سلاح - تهدید در سناریو ۲.

| نام تهدید \ نام سلاح | F۲۲  | F۱۸  | F۱۵  |
|----------------------|------|------|------|
| S۵۰۰                 | ۰.۶۷ | ۰.۷۷ | ۰.۸۸ |
| S۳۰۰                 | ۰.۵۶ | ۰.۶۸ | ۰.۷۷ |
| hook                 | ۰.۴۵ | ۰.۵۵ | ۰.۶۶ |

جدول ۱۵. احتمال نابودی تهدید - سلاح در سناریو ۲.

| نام سلاح \ نام تهدید | S۵۰۰ | S۳۰۰ | Hook |
|----------------------|------|------|------|
| F۲۲                  | ۰.۷۸ | ۰.۸  | ۰.۹  |
| F۱۸                  | ۰.۶  | ۰.۷  | ۰.۸  |
| F۱۵                  | ۰.۳  | ۰.۴  | ۰.۵  |

جدول ۱۶. احتمال نابودی تهدید - دارایی در سناریو ۲.

| نام دارایی \ نام تهدید | dam  | Refinery |
|------------------------|------|----------|
| F۲۲                    | ۰.۷۸ | ۰.۷۸     |
| F۱۸                    | ۰.۶۷ | ۰.۶۷     |
| F۱۵                    | ۰.۵۶ | ۰.۵۶     |

اطلاعات کلی سناریو ۱ و ۲ در جدول های ۵ - ۱۶ بیان شد. در ادامه اطلاعاتی تکمیلی در رابطه با میزان خسارتی که به هر پلتفرم سلاح و دارایی وارد میشود و تعداد و نوع تهدیداتی که در هر موج حمله بر اساس استراتژی خاصی علیه پلتفرم های سلاح و دارایی اقدام میکنند بیان شده است.

جدول ۱۷. در سناریو ۱، میزان خسارتی که اگر تهدید سلاح یا دارایی را مورد هدف قرار دهد به آن سلاح یا تهدید وارد می‌شود.

| نام سلاح و دارایی<br>نام تهدید | S۵۰۰ | S۵۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | Dam | refinery |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|-----|----------|
| F۳۵                            | ۸۸   | ۸۸   | ۷۷   | ۷۷   | ۷۷   | ۸۹  | ۸۹       |
| F۱۵                            | ۸۸   | ۸۸   | ۷۷   | ۷۷   | ۷۷   | ۸۹  | ۸۹       |

جدول ۱۸. در سناریو ۲، میزان خسارتی که اگر تهدید سلاحی یا دارایی را مورد هدف قرار دهد به آن سلاح یا تهدید وارد می‌شود.

| نام سلاح و دارایی<br>نام تهدید | S۵۰۰ | S۵۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | hook | hook | Dam | Refinery |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|----------|
| F۲۲                            | ۳۰   | ۳۰   | ۴۵   | ۴۵   | ۴۵   | ۵۵   | ۵۵   | ۸۰  | ۸۰       |
| F۱۸                            | ۳۰   | ۳۰   | ۴۵   | ۴۵   | ۴۵   | ۵۵   | ۵۵   | ۸۰  | ۸۰       |
| F۱۵                            | ۳۰   | ۳۰   | ۴۵   | ۴۵   | ۴۵   | ۵۵   | ۵۵   | ۸۰  | ۸۰       |

جدول ۱۹. استراتژی موج حمله اول در سناریو ۱.

| نام سلاح و دارایی<br>نام تهدید | S۵۰۰ | S۵۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | dam | refinery |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|-----|----------|
| F۳۵                            | ۱    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۰        |
| F۱۵                            | ۰    | ۰    | ۰    | ۱    | ۰    | ۰   | ۰        |

جدول ۲۰. استراتژی موج حمله دوم در سناریو ۱.

| نام سلاح و دارایی<br>نام تهدید | S۵۰۰ | S۵۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | dam | refinery |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|-----|----------|
| F۱۵                            | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۱   | ۰        |

جدول ۲۱. استراتژی موج حمله اول در سناریو ۲.

| نام سلاح و دارایی<br>نام تهدید | S۵۰۰ | S۵۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | hook | hook | Dam | Refinery |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|----------|
| F۲۲                            | ۱    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۰        |
| F۱۸                            | ۰    | ۰    | ۱    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۰        |
| F۱۵                            | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۱    | ۰    | ۰   | ۰        |

جدول ۲۲. استراتژی موج دوم حمله در سناریو ۲.

| نام سلاح و دارایی<br>نام تهدید | S۵۰۰ | S۵۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | hook | hook | Dam | Refinery |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|----------|
| F۱۸                            | ۰    | ۱    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۰        |
| F۱۸                            | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۱        |

در ادامه نتیجه روش های مختلف بر روی سناریو های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲۳. میزان خسارت وارد شده از طرف تهدیدات به پلنفرم های سلاح و دارایی های خودی بعد از اتمام نبرد در روشی که در این مقاله بیان شده است (سناریو ۱).

|                              | S۵۰۰ | S۵۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | Dam  | Refinery |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| اجرا ۱                       | ۷۶   | ۷۶   | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۲                       | ۷۶   | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۶۰   | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۳                       | ۷۶   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۴                       | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۵                       | ۷۶   | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۶                       | ۷۶   | ۷۶   | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۷                       | ۸۴   | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۸                       | ۰    | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۹                       | ۸۴   | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۰    | ۰        |
| اجرا ۱۰                      | ۸۴   | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۰    | ۰        |
| میانگین<br>خسارت وارد<br>شده | ۶۳.۲ | ۱۵.۲ | ۱۲   | ۴۲   | ۶    | ۶۲.۴ | ۰        |

جدول ۲۴. میزان خسارت وارد شده از طرف تهدیدات به پلنفرم های سلاح و دارایی های خودی بعد از اتمام نبرد در روش DPSO (سناریو ۱).

|                              | S۵۰۰ | S۵۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | Dam  | Refinery |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| اجرا ۱                       | ۷۶   | ۷۶   | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۲                       | ۷۶   | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۶۰   | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۳                       | ۷۶   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۴                       | ۷۶   | ۷۶   | ۰    | ۶۰   | ۶۰   | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۵                       | ۷۶   | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۶                       | ۷۶   | ۷۶   | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۷                       | ۸۴   | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۸                       | ۰    | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۹                       | ۸۴   | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۰    | ۰        |
| اجرا ۱۰                      | ۸۴   | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۰    | ۰        |
| میانگین<br>خسارت وارد<br>شده | ۷۰.۸ | ۲۲.۸ | ۶    | ۴۸   | ۱۲   | ۶۲.۴ | ۰        |

جدول ۲۵. میزان خسارت وارده شده از طرف تهدیدات به پلنفرم های سلاح و دارایی های خودی بعد از اتمام نبرد در روش تصادفی (سناریو ۱).

|                         | S۵۰۰ | S۵۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | Dam  | Refinery |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| اجرا ۱۱                 | ۷۶   | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۲۱                 | ۸۴   | ۷۶   | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۳۱                 | ۷۶   | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۴۱                 | ۰    | ۷۶   | ۰    | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۵۱                 | ۷۶   | ۷۶   | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۶۱                 | ۷۶   | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۷۱                 | ۷۶   | ۷۶   | ۰    | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۸۱                 | ۷۶   | ۰    | ۶۰   | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۹۱                 | ۸۴   | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۷۸   | ۰        |
| اجرا ۱۰۱                | ۷۶   | ۰    | ۰    | ۶۰   | ۰    | ۰    | ۰        |
| میانگین خسارت وارده شده | ۷۰   | ۳۰.۴ | ۱۲   | ۴۲   | ۰    | ۷۰.۲ | ۰        |

جدول ۲۶. میزان خسارت وارده شده از طرف پلنفرم های سلاح به تهدیدات بعد از اتمام نبرد، در روشی که در این مقاله بیان شده است (سناریو ۱).

|                             | F۳۰  | F۳۰  | F۱۰ | F۱۰  |
|-----------------------------|------|------|-----|------|
| اجرا ۱۱                     | ۸۸   | ۸۸   | ۷۸  | ۷۸   |
| اجرا ۲۱                     | ۸۸   | ۸۸   | ۷۸  | ۷۸   |
| اجرا ۳۱                     | ۸۸   | ۸۸   | ۷۸  | ۷۸   |
| اجرا ۴۱                     | ۸۸   | ۰    | ۷۸  | ۰    |
| اجرا ۵۱                     | ۸۸   | ۰    | ۷۸  | ۷۸   |
| اجرا ۶۱                     | ۰    | ۰    | ۷۸  | ۷۸   |
| اجرا ۷۱                     | ۸۸   | ۸۸   | ۷۸  | ۷۸   |
| اجرا ۸۱                     | ۰    | ۰    | ۷۸  | ۷۸   |
| اجرا ۹۱                     | ۸۸   | ۰    | ۷۸  | ۷۸   |
| اجرا ۱۰۱                    | ۸۸   | ۰    | ۷۸  | ۷۸   |
| میانگین خسارت های وارده شده | ۷۰.۴ | ۳۵.۲ | ۷۸  | ۷۰.۲ |

جدول ۲۷. میزان خسارت وارده شده از طرف پلنفرم سلاح به تهدیدات بعد از اتمام نبرد در روش DPSO (سناریو ۱).

|                             | F۳۰  | F۳۰  | F۱۰  | F۱۰  |
|-----------------------------|------|------|------|------|
| اجرا ۱۱                     | ۸۸   | ۸۸   | ۷۸   | ۷۸   |
| اجرا ۲۱                     | ۸۸   | ۸۸   | ۷۸   | ۷۸   |
| اجرا ۳۱                     | ۸۸   | ۸۸   | ۷۸   | ۷۸   |
| اجرا ۴۱                     | ۸۸   | ۰    | ۷۸   | ۰    |
| اجرا ۵۱                     | ۸۸   | ۰    | ۷۸   | ۷۸   |
| اجرا ۶۱                     | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۷۸   |
| اجرا ۷۱                     | ۰    | ۸۸   | ۷۸   | ۷۸   |
| اجرا ۸۱                     | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۷۸   |
| اجرا ۹۱                     | ۸۸   | ۰    | ۷۸   | ۷۸   |
| اجرا ۱۰۱                    | ۸۸   | ۰    | ۰    | ۷۸   |
| میانگین خسارت های وارده شده | ۶۱.۶ | ۳۵.۲ | ۷۰.۲ | ۷۰.۲ |

جدول ۲۸. میزان خسارت وارد شده از طرف پلتفرم سلاح به تهدیدات بعد از اتمام نبرد در روش تصادفی (سناریو ۱).

|                            | F۳۵  | F۳۵  | F۱۵  | F۱۵  |
|----------------------------|------|------|------|------|
| اجرا ۱۱                    | ۸۸   | ۸۸   | ۰    | ۷۸   |
| اجرا ۲۱                    | ۸۸   | ۰    | ۷۸   | ۷۸   |
| اجرا ۳۱                    | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۷۸   |
| اجرا ۴۱                    | ۸۸   | ۰    | ۷۸   | ۷۸   |
| اجرا ۵۱                    | ۸۸   | ۸۸   | ۰    | ۷۸   |
| اجرا ۶۱                    | ۸۸   | ۰    | ۷۸   | ۰    |
| اجرا ۷۱                    | ۸۸   | ۸۸   | ۷۸   | ۷۸   |
| اجرا ۸۱                    | ۰    | ۰    | ۰    | ۷۸   |
| اجرا ۹۱                    | ۸۸   | ۸۸   | ۷۸   | ۰    |
| اجرا ۱۰۱                   | ۸۸   | ۰    | ۷۸   | ۰    |
| میانگین خسارت های وارد شده | ۷۰.۴ | ۳۵.۲ | ۵۴.۶ | ۵۴.۶ |

جدول ۲۹. میزان خسارت وارد شده از طرف تهدیدات به پلتفرم های سلاح و دارایی های خودی بعد از اتمام نبرد در روشی که در مقاله بیان شد (سناریو ۲).

|                            | S۵۰۰ | S۵۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | hook | Hook | Dam | Refinery |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|----------|
| اجرا ۱۱                    | ۲۶   | ۰    | ۰    | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۲۱                    | ۲۶   | ۰    | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۳۹   | ۰    | ۰   | ۰        |
| اجرا ۳۱                    | ۲۶   | ۰    | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۴۱                    | ۲۶   | ۲۶   | ۰    | ۰    | ۰    | ۳۹   | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۵۱                    | ۲۶   | ۲۶   | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۶۱                    | ۲۶   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۳۹   | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۷۱                    | ۰    | ۲۶   | ۳۵   | ۰    | ۳۵   | ۳۹   | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۸۱                    | ۰    | ۲۶   | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۹۱                    | ۲۶   | ۲۶   | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۳۹   | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۱۰۱                   | ۲۶   | ۲۶   | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۳۹   | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| میانگین خسارت های وارد شده | ۲۰.۸ | ۱۵.۶ | ۲۴.۵ | ۳.۵  | ۳.۵  | ۲۳.۴ | ۰    | ۰   | ۴۶.۸     |

جدول ۳۰. میزان خسارت وارده شده از طرف تهدیدات به پلتفرم های سلاح و دارایی های خودی بعد از اتمام نبرد در روش DPSO (سناریو ۲).

|         | S۵۰۰ | S۵۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | hook | hook | dam | Refinery |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|-----|----------|
| اجرا ۱۱ | ۲۶   | ۰    | ۰    | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۲۱ | ۲۶   | ۰    | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۳۹   | ۰    | ۰   | ۰        |
| اجرا ۳۱ | ۲۶   | ۰    | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۴۱ | ۲۶   | ۲۶   | ۰    | ۰    | ۰    | ۳۹   | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۵۱ | ۲۶   | ۲۶   | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۶۱ | ۲۶   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۳۹   | ۰    | ۰   | ۵۲       |

|                                  |      |      |      |    |    |      |   |   |      |
|----------------------------------|------|------|------|----|----|------|---|---|------|
| اجرا ۷                           | ۲۶   | ۲۶   | ۳۵   | ۰  | ۳۵ | ۳۹   | ۰ | ۰ | ۵۲   |
| اجرا ۸                           | ۰    | ۲۶   | ۳۵   | ۰  | ۳۵ | ۰    | ۰ | ۰ | ۵۲   |
| اجرا ۹                           | ۲۶   | ۲۶   | ۳۵   | ۰  | ۰  | ۳۹   | ۰ | ۰ | ۵۲   |
| اجرا ۱۰                          | ۲۶   | ۲۶   | ۳۵   | ۳۵ | ۰  | ۳۹   | ۰ | ۰ | ۵۲   |
| میانگین<br>خسارت های<br>وارد شده | ۲۳.۴ | ۱۵.۶ | ۲۴.۵ | ۷  | ۷  | ۲۳.۴ | ۰ | ۰ | ۴۶.۸ |

جدول ۳۱. میزان خسارت وارد شده از طرف تهدیدات به پلنفرم های سلاح و دارایی های خودی بعد از اتمام نبرد در روش تصادفی (سناریو ۲).

|                                  | S۵۰۰ | S۵۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | S۳۰۰ | hook | hook | dam | Refinery |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|----------|
| اجرا ۱                           | ۲۶   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۲                           | ۲۶   | ۰    | ۵۳   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۳                           | ۲۶   | ۲۶   | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۰        |
| اجرا ۴                           | ۲۶   | ۲۶   | ۳۵   | ۳۵   | ۳۵   | ۵۶   | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۵                           | ۲۶   | ۲۶   | ۰    | ۰    | ۰    | ۳۹   | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۶                           | ۲۶   | ۲۶   | ۳۵   | ۰    | ۳۵   | ۳۹   | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۷                           | ۲۶   | ۲۶   | ۰    | ۰    | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۸                           | ۲۶   | ۰    | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۹                           | ۲۶   | ۲۶   | ۰    | ۰    | ۰    | ۳۹   | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| اجرا ۱۰                          | ۰    | ۲۶   | ۳۵   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۰   | ۵۲       |
| میانگین<br>خسارت های<br>وارد شده | ۲۳.۴ | ۱۸.۲ | ۲۲.۸ | ۳.۵  | ۱۰.۵ | ۱۷.۳ | ۰    | ۰   | ۴۶.۸     |

جدول ۳۲. میزان خسارت وارد شده از پلنفرم های سلاح به تهدیدات بعد از اتمام نبرد در روشی که در مقاله بیان شده است (سناریو ۲).

|                                  | F۲۲  | F۲۲  | F۱۸  | F۱۸  | F۱۸  | F۱۵  |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| اجرا ۱                           | ۰    | ۸۹   | ۷۸   | ۷۸   | ۷۸   | ۰    |
| اجرا ۲                           | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۷۸   | ۷۸   | ۶۷   |
| اجرا ۳                           | ۰    | ۸۹   | ۷۸   | ۷۸   | ۷۸   | ۶۷   |
| اجرا ۴                           | ۸۹   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۶۷   |
| اجرا ۵                           | ۸۹   | ۰    | ۷۸   | ۰    | ۷۸   | ۶۷   |
| اجرا ۶                           | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۷۸   | ۰    | ۶۷   |
| اجرا ۷                           | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۶۷   |
| اجرا ۸                           | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۷۸   | ۷۸   | ۶۷   |
| اجرا ۹                           | ۸۹   | ۰    | ۷۸   | ۷۸   | ۷۸   | ۶۷   |
| اجرا ۱۰                          | ۰    | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۷۸   | ۶۷   |
| میانگین<br>خسارت های<br>وارد شده | ۲۶.۷ | ۱۷.۸ | ۵۴.۶ | ۵۴.۶ | ۶۲.۴ | ۶۰.۳ |

جدول ۳۳. میزان خسارت وارد شده از طرف پلتفرم های سلاح به تهدیدات بعد از اتمام نبرد در روش DPSO (سناریو ۲).

|                                  | F۲۲  | F۲۲  | F۱۸  | F۱۸  | F۱۸  | F۱۵  |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| اجرا ۱                           | ۰    | ۸۹   | ۷۸   | ۷۸   | ۰    | ۰    |
| اجرا ۲                           | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۷۸   | ۷۸   | ۶۷   |
| اجرا ۳                           | ۰    | ۸۹   | ۷۸   | ۷۸   | ۷۸   | ۶۷   |
| اجرا ۴                           | ۸۹   | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۶۷   |
| اجرا ۵                           | ۸۹   | ۰    | ۷۸   | ۰    | ۷۸   | ۶۷   |
| اجرا ۶                           | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۷۸   | ۰    | ۶۷   |
| اجرا ۷                           | ۰    | ۰    | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۶۷   |
| اجرا ۸                           | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۷۸   | ۷۸   | ۶۷   |
| اجرا ۹                           | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۷۸   | ۷۸   | ۶۷   |
| اجرا ۱۰                          | ۰    | ۰    | ۰    | ۷۸   | ۷۸   | ۶۷   |
| میانگین<br>خسارت های<br>وارد شده | ۱۷.۸ | ۱۷.۸ | ۵۴.۶ | ۵۴.۶ | ۵۴.۶ | ۶۰.۳ |

جدول ۳۴. میزان خسارت وارد شده از طرف پلتفرم سلاح به تهدیدات بعد از اتمام نبرد در روش تصادفی.

|                                  | F۲۲  | F۲۲ | F۱۸ | F۱۸  | F۱۸  | F۱۵ |
|----------------------------------|------|-----|-----|------|------|-----|
| اجرا ۱                           | ۸۹   | ۰   | ۷۸  | ۰    | ۰    | ۶۷  |
| اجرا ۲                           | ۸۹   | ۰   | ۰   | ۷۸   | ۷۸   | ۶۷  |
| اجرا ۳                           | ۸۹   | ۰   | ۷۸  | ۷۸   | ۰    | ۶۷  |
| اجرا ۴                           | ۸۹   | ۰   | ۰   | ۰    | ۰    | ۶۷  |
| اجرا ۵                           | ۸۹   | ۰   | ۷۸  | ۷۸   | ۷۸   | ۶۷  |
| اجرا ۶                           | ۸۹   | ۰   | ۰   | ۷۸   | ۷۸   | ۶۷  |
| اجرا ۷                           | ۰    | ۰   | ۷۸  | ۰    | ۰    | ۶۷  |
| اجرا ۸                           | ۰    | ۰   | ۰   | ۷۸   | ۰    | ۶۷  |
| اجرا ۹                           | ۸۹   | ۰   | ۰   | ۰    | ۷۸   | ۶۷  |
| اجرا ۱۰                          | ۰    | ۰   | ۷۸  | ۷۸   | ۰    | ۶۷  |
| میانگین<br>خسارت های<br>وارد شده | ۶۲.۳ | ۰   | ۳۹  | ۴۶.۸ | ۳۱.۲ | ۶۷  |

جدول ۳۵. محاسبه انحراف معیار و میانگین خسارتها بر اساس جدول های ۲۳، ۲۴ و ۲۵.

| سناریو ۱   | میانگین خسارتهای وارده به خودی | انحراف معیار | وضعیت عملکرد                 |
|------------|--------------------------------|--------------|------------------------------|
| روش مقاله  | ۲۰۰/۸                          | ۶۱/۹۸۰۳      | بهترین عملکرد (کمترین خسارت) |
| روش DPSO   | ۲۲۲                            | ۷۲/۲۷۵       | متوسط                        |
| روش تصادفی | ۲۲۴/۶                          | ۵۰/۲۷۵       | ضعیف                         |

جدول ۳۶. محاسبه انحراف معیار و میانگین خسارتها بر اساس جدول های ۲۶، ۲۷ و ۲۸.

| سناریو ۱   | میانگین خسارتهای وارده به دشمن | انحراف معیار | وضعیت عملکرد                  |
|------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------|
| روش مقاله  | ۲۵۳/۸                          | ۷۱/۸۱        | بهترین عملکرد (بیشترین خسارت) |
| روش DPSO   | ۲۳۷/۲                          | ۷۱           | متوسط                         |
| روش تصادفی | ۲۱۴/۸                          | ۶۸/۵۳        | ضعیف                          |

جدول ۳۷. محاسبه انحراف معیار و میانگین خسارتها بر اساس جدول های ۲۹، ۳۰ و ۳۱.

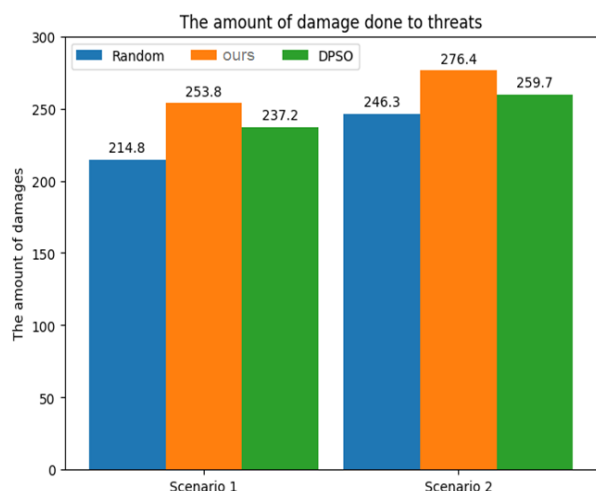
| سناریو ۲   | میانگین خسارتهای وارده به خودی | انحراف معیار | وضعیت عملکرد                 |
|------------|--------------------------------|--------------|------------------------------|
| روش مقاله  | ۱۳۸/۱                          | ۳۰/۶۲۱       | بهترین عملکرد (کمترین خسارت) |
| روش DPSO   | ۱۴۷/۷                          | ۳۸/۹۳۵       | متوسط                        |
| روش تصادفی | ۱۴۲/۵                          | ۵۳/۹۳۷       | ضعیف                         |

جدول ۳۸. محاسبه انحراف معیار و میانگین خسارتها بر اساس جدول های ۳۲، ۳۳ و ۳۴.

| سناریو ۲   | میانگین خسارتهای وارده به دشمن | انحراف معیار | وضعیت عملکرد                  |
|------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------|
| روش مقاله  | ۲۶۶/۴                          | ۸۲/۲۱۵       | بهترین عملکرد (بیشترین خسارت) |
| روش DPSO   | ۲۵۹/۸                          | ۷۱/۸۶۱       | متوسط                         |
| روش تصادفی | ۲۴۶/۳                          | ۷۹/۴۴        | ضعیف                          |

## ۱.۲. بررسی و تحلیل نتایج

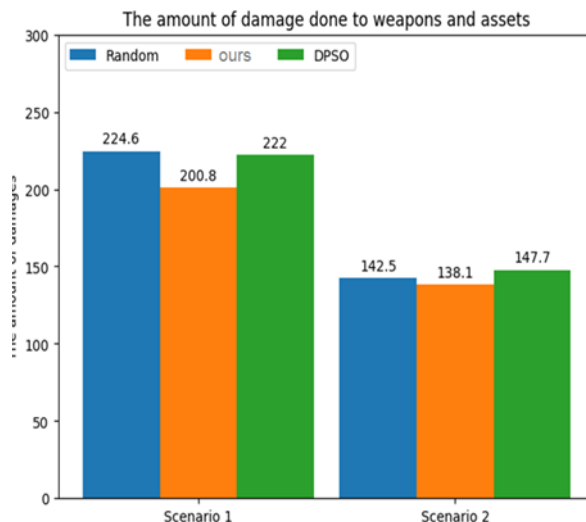
نتایج حاصل از عمل تخصیص سلاح به هدف پویا را در سه روش و بر روی دو سناریو نشان داده شد. در ادامه این بخش به تحلیل و بررسی نتایج حاصل خواهیم پرداخت.



شکل ۴. نمودار میزان خسارت وارد شده از طرف پلتفرم‌های سلاح به تهدیدات.

خسارت‌های وارد شده به تهدیدات است. با توجه به شکل ۴ روش‌های تصادفی و DPSO خسارت کمتری نسبت به روش ما به تهدیدات وارد کرده‌اند. بنابراین بر اساس اطلاعات بدست آمده از نتیجه تخصیص سلاح به هدف و شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان دریافت که روش بیان شده در این مقاله نسبت به روش‌های تصادفی و روش DPSO عملکرد بهتری داشته است و توانسته بعد از اتمام نبرد خسارت بیشتری به تهدیدات وارد کرده و آسیب کمتری متحمل شود.

در ادامه روش‌های مورد بررسی را از دو جنبه قابلیت دفاعی و تهاجمی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته شده است، در این بررسی جمع کل خسارت‌ها را در ۱۰ بار اجرای الگوریتم‌ها محاسبه و میانگین گرفته و نهایتاً انحراف معیار محاسبه شده است. همانطور که در جدول ۳۵ مشاهده می‌شود در بررسی جنبه دفاعی سناریو ۱، روش مقاله (با میانگین خسارت ۲۰۰/۸) عملکردی بهتر از روش DPSO (با میانگین خسارت ۲۲۲) و روش تصادفی (با میانگین خسارت ۲۲۴/۶) دارد. این اختلاف نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی توانسته است با تخصیص هوشمندانه سلاح‌ها، تهدیداتی که ارزش استراتژیک بالاتری برای دارایی‌های خودی داشته‌اند را با اولویت بالاتری دفع کنند. اگرچه انحراف معیار روش تصادفی (۵۰/۲۷۵) کمتر از روش پیشنهادی است. اما این پایداری در تولید نتایج ضعیف است. در مقابل، انحراف معیار روش مقاله (۶۱/۹۸۰۳) ناشی از توانایی الگوریتم در جستجوی فضای مسئله است. به طوری که در



شکل ۳. نمودار میزان خسارت وارد شده از طرف تهدیدات به پلتفرم‌های سلاح و دارایی‌ها.

در شکل ۳ که بر اساس اطلاعات بدست آمده از جدول‌های ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۹، ۳۰ و ۳۱ نمودار میزان خسارت وارده شده به پلتفرم‌های سلاح و دارایی‌های در دو سناریو بر اساس روش‌های تصادفی، روش DPSO و روش بیان شده در این مقاله نشان داده شده است. این مقدار بیانگر جمع میانگین خسارت‌های وارد شده به پلتفرم‌های سلاح و دارایی‌ها است. با توجه به شکل ۳ روش تصادفی و روش DPSO آسیب بیشتری نسبت به روش بیان شده در این مقاله را دارند و این نشان دهنده آن است که روش این مقاله نسبت به دو روش دیگر هوشمندانه‌تر و بهینه‌تر عمل کرده است و توانسته میزان خسارت دریافتی از طرف تهدید را کاهش دهد.

در شکل ۴ بر اساس اطلاعات بدست آمده از جدول‌های ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۳۲، ۳۳ و ۳۴ نمودار میزان خسارت وارده شده به تهدیدات در دو سناریو بر اساس روش‌های تصادفی، روش DPSO و روش بیان شده در مقاله نشان داده شده است. مقادیری که در این نمودار مقایسه شده است بیانگر حاصل جمع میانگین

برخی اجراها موفق به کشف جوابهای بسیار بهینه شده است که میانگین کل را به شدت بهبود بخشیده است. روش **DPSO** با بیشترین انحراف معیار بیشترین نوسان را داشته که نشان دهنده گیر کردن در بهینه های محلی است.

در شاخص تهاجمی (جدول ۳۶) روش مقاله (با میانگین  $253/8$  خسارت به دشمن) برتری خود را نسبت به روش های **DPSO** و روش تصادفی اثبات می کند. بالاتر بودن انحراف معیار در روش مقاله در این جا یک نکته مثبت تلقی می شود؛ زیرا نشان دهنده قدرت اکتشاف بالای الگوریتم است. الگوریتم توانسته در چندین اجرا، ترکیب هایی از تخصیص سلاح را پیدا کند که منجر به نابودی حداکثری موج حمله دشمن شده است. در حالی که سایر روش ها در مقادیر متوسط همگرا شده اند.

در بررسی جنبه دفاعی سناریو ۲ (جدول ۳۷) روش مقاله (با میانگین خسارت  $138/1$ ) عملکرد برتر را نشان می دهد و نسبت به روش های دیگر خسارت کمتری به دارایی های خودی وارد کرده است. این برتری ناشی از تخصیص هوشمندانه سلاح ها برای دفع تهدیدات اولویت دار است. انحراف معیار پایین تر روش مقاله پایداری بیشتری نسبت به روش های دیگر دارد، که نشان دهنده اجتناب از بهینه های محلی و تولید نتایج بهینه پایدار است. در مقابل، روش تصادفی نوسان بیشتری دارد و پایداری اش ضعیف است.

در بررسی جنبه تهاجمی سناریو ۲ (جدول ۳۸) روش مقاله (با میانگین خسارت  $267/4$ ) برتری خود را اثبات می کند. و نسبت به روش های **DPSO** و تصادفی آسیب بیشتری به دشمن وارد کرده است. این اختلاف از توانایی الگوریتم در کشف ترکیب های بهینه تخصیص سلاح برای نابودی حداکثر موج حمله ناشی می شود. انحراف معیار بالاتر روش مقاله ( $82/215$ ) نقطه قوت است و قدرت اکتشاف بالای آن را نشان می دهد، در حالی که روش های دیگر در مقادیر متوسط همگرا شده اند و نوسان کمتری دارند، اما به نتایج برتری نمی رسند.

## ۲.۲. نتیجه گیری

در نبردهای نوین، فرماندهان با چالش های پیچیده ای روبرو هستند که نیازمند تصمیم گیری سریع و بهینه بر اساس شرایط

پویای میدان نبرد، محدودیت های منابع، و تهدیدات چند لایه است. پویایی میدان نبرد، از جمله تغییرات لحظه ای موقعیت ها و وابستگی نتایج هر مرحله به مراحل قبلی، تصمیم گیری را دشوار می سازد و می تواند منجر به خطای استراتژیک شود. در چنین شرایطی، سیستم های هوشمند تصمیم گیری، مانند مدل های بهینه سازی مبتنی بر هوش مصنوعی، نقش حیاتی در تسهیل فرایند تصمیم گیری و افزایش احتمال پیروزی ایفا می کنند.

در این پژوهش، روشی نوین برای حل مسئله تخصیص سلاح به هدف پویا (**DWTA**) با بهره گیری از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (**PSO**) ارائه شد. این روش، با تمرکز بر تخصیص بهینه پلتفرم های سلاح به تهدیدات، نه تنها خسارت به دشمن را بیشینه می کند، بلکه از دارایی های غیر تسلیحاتی و پلتفرم های سلاح خودی در برابر آسیب ها محافظت می نماید. سناریوی پیشنهادی، که نزدیک به واقعیت میدان نبرد طراحی شده، شامل موج های حمله چندگانه، در نظر گرفتن دارایی های با ارزش، و احتمال غیرعملیاتی شدن پلتفرم های سلاح حتی با خسارت جزئی است. ارزیابی روش بر روی دو سناریوی متفاوت نشان داد که عملکرد آن در کاهش میانگین خسارات به نیروهای خودی و افزایش خسارات به تهدیدات برتر از روش **DPSO** و تخصیص تصادفی است. نوآوری های کلیدی این کار شامل ادغام دارایی های غیرتسلیحاتی در مدل، حل مسئله در ابعاد بزرگ با **PSO**، شبیه سازی سناریوهای واقع گرایانه است که در پژوهش های پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته اند.

با وجود دستاوردهای فوق، این پژوهش محدودیت هایی نیز دارد. مدل ریاضی پیشنهادی، هرچند کارآمد، ساده سازی هایی مانند؛ عدم در نظر گرفتن حرکت پویای پلتفرم ها و تهدیدات، یا عوامل محیطی مانند لجستیک و ارتباطات، را به همراه دارد که ممکن است در شرایط واقعی میدان نبرد، دقت را کاهش دهد. همچنین، استفاده از **PSO** کلاسیک بدون بهبودهای پیشرفته (مانند ترکیب با تکنیک های یادگیری تقویتی یا کاهش ابعاد جستجو) می تواند در مسائل با پیچیدگی بالا به گیر افتادن در بهینه های محلی منجر شود. برای پژوهش های آتی، پیشنهاد می شود مدل با در نظر گرفتن حرکت دینامیک پلتفرم ها

[۷] T. M. Shami, A. A. El-Saleh, M. Alswaiti, Q. Al-Tashi, M. A. Summakieh, and S. Mirjalili, (۲۰۲۲), "Particle swarm optimization: A comprehensive survey," *IEEE Access*, vol. ۱۰, pp. ۱۰۰۳۱-۱۰۰۶۱.

[۸] R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory, (۱۹۹۵)," in *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, IEEE, pp. ۳۹-۴۳.

[۹] Q. Kang and H. He, (۲۰۱۱), "A novel discrete particle swarm optimization algorithm for meta-task assignment in heterogeneous computing systems," *Microprocess. Microsyst.*, vol. ۳۵, no. ۱, pp. ۱۰-۱۷.

[۱۰] A. G. Kline, D. K. Ahner, and B. J. Lunday, (۲۰۱۹), "Real-time heuristic algorithms for the static weapon target assignment problem," *J. Heuristics*, vol. ۲۵, pp. ۳۷۷-۳۹۷.

[۱۱] Y. Zhou, X. Li, Y. Zhu, and W. Wang, (۲۰۱۶), "A discrete particle swarm optimization algorithm applied in constrained static weapon-target assignment problem," in *12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, IEEE, pp. ۳۱۱۸-۳۱۲۳.

[۱۲] C.-M. Lai and T.-H. Wu, "Simplified swarm optimization with initialization scheme for (۲۰۱۹), dynamic weapon-target assignment problem," *Appl. Soft Comput.*, vol. ۸۲, p. ۱۰۵۵۴۲.

[۱۳] L. Kong, J. Wang, and P. Zhao, (۲۰۲۱), "Solving the dynamic weapon target assignment problem by an improved multiobjective particle swarm optimization algorithm," *Appl. Sci.*, vol. ۱۱, no. ۱۹, p. ۹۲۵۴.

[۱۴] K. Zhang, D. Zhou, Z. Yang, Y. Zhao, and W. Kong, (۲۰۲۰), "Efficient decision approaches for asset-based dynamic weapon target assignment by a receding horizon and marginal return heuristic," *Electronics*, vol. ۹, no. ۹, p. ۱۵۱۱.

[۱۵] C. Liu *et al.*, (۲۰۲۳), "A time-driven dynamic weapon target assignment method," *IEEE Access*, vol. ۱۱, pp. ۱۲۹۶۲۳-۱۲۹۶۳۹.

[۱۶] C. Li, B. Xin, Y. He, D. Wang, and Y. Li, (۲۰۲۳), "Dynamic weapon target assignment based on deep q network," presented at the ۲۰۲۳ ۴۲nd

وتهدیدات گسترش یابد، تا نزدیکی بیشتری به واقعیت میدان نبرد حاصل شود، همانند رویکردهای اخیر در جستجوی اهداف متحرک با استفاده از PSO بهبود یافته. همچنین، ترکیب PSO با الگوریتم فراابتکاری دیگر (مانند الگوریتم ژنتیک یا مورچگان) یا رویکردهای مبتنی بر یادگیری تقویتی (مانند Q-Learning) میتواند کارایی در حل مسائل پویا افزایش دهد، به ویژه با الهام از مدل‌های هیبریدی برای DWTا چند هدفه.

بررسی‌های جنبه Real-Time با استفاده تکنیک‌های پردازش موازی، تحلیل حساسیت پارامترها برای بهینه‌سازی در سناریوهای نظامی واقعی، و مقایسه با روشهای مدرن‌تر مانند الگوریتم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری عمیق برای تخصیص پویا، از جمله پیشنهادهای عملی برای توسعه این حوزه است. این پیشرفت‌ها میتوانند به سوی سیستم‌های فرماندهی و کنترل هوشمندتر و مقاوم‌تر در برابر عدم قطعیت‌ها هدایت شوند.

### ۳. مراجع

[۱] A. S. Manne, (۱۹۵۸), "A target-assignment problem," *Oper. Res.*, vol. ۶, no. ۳, pp. ۳۴۶-۳۵۱.

[۲] E. Sonuc, B. Sen, and S. Bayir, (۲۰۱۷), "A parallel simulated annealing algorithm for weapon-target assignment problem," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. ۸, no. ۴, pp. ۸۷-۹۲.

[۳] Z. R. Bogdanowicz and K. Patel, (۲۰۱۴), "Quick collateral damage estimation based on weapons assigned to targets," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, vol. ۴۵, no. ۵, pp. ۷۶۲-۷۶۹.

[۴] G. G. denBroeder Jr, R. E. Ellison, and L. Emerling, (۱۹۵۹), "On optimum target assignments," *Oper. Res.*, vol. ۷, no. ۳, pp. ۳۲۲-۳۲۶.

[۵] R. M. Soland, (۱۹۸۷), "Optimal terminal defense tactics when several sequential engagements are possible," *Oper. Res.*, vol. ۳۵, no. ۴, pp. ۵۳۷-۵۴۲.

[۶] A. G. Gad, (۲۰۲۲), "Particle swarm optimization algorithm and its applications: a systematic review," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. ۲۹, no. ۵, pp. ۲۵۳۱-۲۵۶۱.

[۱۹] C.-M. Lai, W.-C. Yeh, and Y.-C. Huang, (۲۰۱۷), "Entropic simplified swarm optimization for the task assignment problem," *Appl. Soft Comput.*, vol. ۵۸, pp. ۱۱۵-۱۲۷.

[۲۰] W.-C. Yeh, C.-M. Lai, and K.-H. Chang, (۲۰۱۶), "A novel hybrid clustering approach based on K-harmonic means using robust design," *Neurocomputing*, vol. ۱۷۳, pp. ۱۷۲۰-۱۷۳۲.

Chinese Control Conference (CCC), IEEE, pp. ۱۷۷۳-۱۷۷۸.

[۱۷] X. Li, D. Zhou, Q. Pan, Y. Tang, and J. Huang, (۲۰۱۸), "Weapon-target assignment problem by multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition," *Complexity*.

[۱۸] L. Hu, G. Yi, C. Huang, Y. Nan, and Z. Xu, (۲۰۲۰), "Research on dynamic weapon target assignment based on cross-entropy," *Math. Probl. Eng.*, pp. ۱-۱۳.