

مدل سازی و حل مسئله تخصیص و زمان بندی آتش پایگاه های توزیع شده

محبوبه پیمان کار^۱، محمد رنجبر^{۲*}، احمد ایزدی پور^۳، سعید بلوچیان^۴

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، ۳- استادیار دانشگاه امام رضا (ع)، ۴- دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد
(دریافت: ۹۶/۰۴/۳۱، پذیرش: ۹۶/۱۱/۱۹)

چکیده

با توجه به نقش و اهمیت نحوه تخصیص و زمان بندی تسلیحات موجود به تهدیدهای مهاجم در یک نبرد، استفاده از مدل های ریاضی و بهینه سازی در این گونه مسائل ضروری است. در این مقاله یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح خطی برای مسئله "تخصیص و زمان بندی سلاح های آن ها به اهداف" با هدف بیشینه کردن متوسط میزان تخریب اهداف و میزان محافظت از مناطق حساس و استفاده کارا از سلاح های موجود و با در نظر گرفتن محدودیت های عملیاتی نحوه تخصیص و زمان بندی سلاح ها ارائه می شود. از آنجایی که حل دقیق مدل ارائه شده با استفاده از نرم افزارهای موجود تحقیق در عملیات در ابعاد نه چندان بزرگ امکان پذیر نیست، الگوریتم ژنتیک و روش تجمع ذرات آشوبی برای این مسئله طراحی شده است. نتایج به دست آمده از این روش ها با جواب دقیق حاصل از مدل سازی مقایسه شده و مشخص می شود، روش تجمع ذرات آشوبی پیشنهادی در صورت وجود محدودیت زمان حل کارایی مناسبی دارد.

کلیدواژه ها: تخصیص، زمان بندی، برنامه ریزی عدد صحیح، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تجمع ذرات آشوبی

Modeling and Solution of Fire Allocation and Scheduling Problem of Distributed Sites

M. Peymankar, M. Ranjbar*, A. Izadipour, S. Balouchian

Ferdowsi University of Mashhad
(Received: 22/07/2017; Accepted: 08/02/2018)

Abstract

In the combat management systems, mathematical and optimization models have significant impact to find good solutions for fire allocation and scheduling problems. In this paper, a linear integer programming model has been developed for a fire allocation and scheduling problems the aim of which was to maximize the expected value of the target destruction and strategic realms protection and efficient use of weapons by considering the operational constraints for weapon allocation. Since the available operation research solvers can not find the optimal solution of this problem in the large scale sizes, two metaheuristics based on genetic algorithm and chaotic particle swarm optimization was developed. Finally, based on randomly generated test instances and extensive computation results, the performance of the developed algorithms was evaluated. The computational experiments reveal that the developed chaotic particle swarm optimization algorithm is more efficient especially in the limited and short CPU run time.

Keywords: Allocation, Scheduling, Integer Programming, Genetic Algorithm, Chaotic Particle Swarm Optimization

۱. مقدمه

دفاع از حریم مرزهای کشورها از دیرباز دارای اهمیت بسیاری بوده است چرا که همواره کشورهای قدرت‌طلب به دنبال تسخیر دیگر کشورها و استفاده از منابع آن‌ها بوده‌اند. مرزهای آبی نیز از این قاعده کلی مستثنا نیستند به‌علاوه وجود شرایط خاص برای درگیری در آب، کار دفاع از این مرزها را مشکل‌تر می‌سازد. در کشور ما وسعت مرزهای آبی کشور و تهدیدهایی که از این ناحیه می‌توانند مطرح باشند، مزید بر علت گردیده است. از این رو تقویت قوای دریایی و آمادگی همیشگی آن‌ها برای حفظ اقتدار و عزت کشور الزامی است. کارهای انجام‌شده در حوزه این عملیات را از نقطه نظر تابع هدف می‌توان در سه دسته کمینه کردن احتمال سالم ماندن اهداف مهاجم، کمینه کردن آسیب وارده بر تجهیزات دفاعی و بیشینه کردن احتمال نجات تجهیزات دفاعی تقسیم‌بندی کرد [۱].

در پیشینه مسئله تخصیص سلاح، دو مفهوم کلی ایستا و پویا توسط حسین [۲] مطرح شده است. در حالت ایستا، این مسئله در یک دوره زمانی بررسی می‌شود. این در حالی است که در حالت پویا، مسئله در چندین دوره تعریف می‌شود و در هر دوره، از مجموعه‌ای از سلاح‌ها و اطلاعات به‌دست‌آمده از دوره‌های زمانی قبلی استفاده می‌شود [۳]. اثبات‌شده است که مسئله تخصیص سلاح به اهداف از نظر پیچیدگی در رده مسائل NP-Complete است [۴]. بنابراین فراهم کردن یک الگوریتم سریع برای به دست آوردن جواب نزدیک به بهینه اهمیت زیادی دارد. مسئله زمان‌بندی شلیک سلاح‌ها با هدف کمینه کردن میزان تهدید از جانب اهداف (دشمن) توسط چا و کیم [۵] مدل‌سازی شده است. لوتر [۶] به بررسی مسئله تخصیص سلاح با رویکرد دو هدفه پرداخت که شامل کمینه کردن احتمال سالم بودن اهداف و کمینه کردن هزینه شلیک هستند.

تحقیقات بر روی روش‌های حل مسائل تخصیص سلاح به اهداف، بسیار ضروری است. روش‌های حل دقیق برای حل مسئله تخصیص سلاح به اهداف در حالت‌های خاصی مورد مطالعه قرار گرفته است. آهوچا [۱] برای حل دقیق این مسئله یک روش شاخه و کران پیشنهاد داده است. کاراساکال [۷]، مسائل مربوط به تخصیص موشک در یک نبرد دریایی به‌منظور دفاع هوایی را مورد بررسی قرار داد. در همین حوزه پس از وی، گولز و همکارانش [۸] با فرض احتمال اصابت متغیر با زمان به توسعه مسئله، در دفاع هوایی پرداختند. چو [۹] به بررسی مدل تخصیص سلاح با هدف کمینه کردن میزان ضرر مورد انتظار تجهیزات خودی پرداخت. وی مسئله تخصیص سلاح را به‌صورت غیرخطی و در حالت خودی مبنا و ایستا مدل‌سازی کرده و برای

حل آن از ترکیب یک الگوریتم جستجوی حریصانه برای ایجاد جواب اولیه مطلوب و یک روش ابتکاری برای جستجوی فضای حل استفاده کرده است. توران [۱۰] در پایان‌نامه خود به مدل‌سازی مسائل ایستای تخصیص سلاح به اهداف در دو حالت هدف‌مبنا و خودی‌مبنا پرداخته است. بعد از ارائه دو مدل، الگوریتم‌های متنوعی برای حل این مسئله استفاده کرده است.

یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط عدد صحیح برای مسئله چیدمان پایگاه‌های آتش و تخصیص سلاح‌های آن‌ها به اهداف با هدف وارد کردن بیشترین تخریب به اهداف مهاجم ارائه شده است [۱۱]. سپس روش‌های جستجوی محلی و جستجوی ممنوعه به‌منظور دستیابی به جواب‌های نزدیک به جواب بهینه برای این مسئله طراحی شده است. هم‌چنین در این پژوهش، یک روش ابتکاری و روش شاخه و کران برای مسئله تخصیص سلاح توسعه داده شده است که به‌عنوان رویه‌ای در روش‌های جستجوی محلی و ممنوعه مورد استفاده قرار گرفته است.

مسئله زمان‌بندی سلاح در سیستم دفاعی ناو دریایی توسط تقوی [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته و یک مدل ساده با اعمال برخی محدودیت‌های ساده توسط وی ارائه شده است. این مدل به زمان‌بندی یک سلاح پدافند موشکی در مقابل حملات دشمن می‌پردازد و هدف آن بیشینه‌سازی احتمال نجات رزم‌ناو در هنگام حملات هوایی است. هم‌چنین مسئله تخصیص سلاح به اهداف بدین شکل مطرح شده است که شلیک‌های پی در پی از سلاح‌های مشابه به‌منظور تابودی هدف انجام شود و در این مسئله این موضوع مورد بحث قرار می‌گیرد که با توجه به بازخورد شلیک انجام شده آیا شلیک به یک هدف خاص متوقف شود و یا ادامه یابد و بدین منظور سیاست‌هایی را مورد بررسی قرار می‌دهند و سیاست بهینه را به‌عنوان جواب بهینه معرفی می‌کنند [۱۳]. علاوه بر این پژوهش، مسئله تخصیص سلاح به اهداف با رویکرد پویا و با استفاده از پنجره زمانی انجام شده است [۱۴].

چانگ و همکارانش [۱۵] به بررسی مسئله تخصیص سلاح به اهداف در یک نبرد هوایی پرداخته است و از یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر تجمع ماهی‌ها و جستجوی هماهنگ بهبود داده شده استفاده کرده است. لی و همکارانش [۱۶] به بررسی این مسئله با دو هدف افزایش متوسط تخریب اهداف و کاهش هزینه موشک‌ها پرداختند و از بهینه‌سازی کلونی مورچگان اصلاح شده برای دستیابی به نقاط پارتو استفاده کردند. در جدول (۱) کارهای انجام شده و ویژگی‌های آن‌ها به‌صورت خلاصه آورده شده است.

جدول ۱. خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در این موضوع و ویژگی‌های آن‌ها

مرجع	تابع هدف	روش حل	ویژگی‌ها
[۱]	بیشینه‌سازی میزان تخریب مورد انتظار	- شاخه و کران - ابتکاری - مدل‌های شبکه - همسایگی خیلی بزرگ	
[۲]	کمینه‌سازی احتمال سالم ماندن اهداف	برنامه‌ریزی پویا	
[۵]	کمینه کردن میزان تهدید از جانب دشمن	شاخه و کران	امکان شلیک چند سلاح به یک هدف
[۶]	کمینه کردن میزان احتمال سالم بودن اهداف و کمینه کردن هزینه شلیک‌ها	NSGA II	- مدل‌سازی دو هدفه - استفاده از روش دلفی و Post-it برای انتخاب دو هدف با استفاده از نظر مدیران
[۷]	بیشینه‌سازی میزان تخریب مورد انتظار	رهاسازی لاگرانژ	- استفاده از سیاست SLS - ثابت در نظر گرفتن کشتی‌ها
[۸]	بیشینه‌سازی میزان تخریب مورد انتظار	- خطی‌سازی مدل - ابتکاری	وزن‌دهی تسهیلات
[۹]	کمینه‌سازی ضرر مورد انتظار برای تجهیزات خودی	ترکیب جستجوی حریصانه و روش پارتیشن‌های تو در تو	استفاده از سیاست SLS
[۱۰]	-بیشینه‌سازی بقای خودی -کمینه کردن میزان سالم ماندن اهداف	- بیشترین بازگشت حاشیه سود - الگوریتم‌های تصادفی - گراف دوبخشی	
[۱۱]	بیشینه‌سازی میزان تخریب اهداف	- جستجوی محلی - جستجوی محلی - شاخه و کران - ابتکاری	- متحرک در نظر گرفتن اهداف - در نظر گرفتن مکان‌های بالقوه برای خودی‌ها
[۱۲]	بیشینه‌سازی احتمال نجات رزم‌ناو	شاخه و کران	- زمان‌بندی شلیک به اهداف - در نظر گرفتن احتمال اصابت - در نظر گرفتن زمان پرواز و لانچ کردن - استفاده از سیاست SLS
[۱۳]	بیشینه‌سازی متوسط ارزش تخصیص سلاح به اهداف	الگوریتم ابتکاری	- وجود سلاح‌های مشابه - گرفتن بازخورد از هر شلیک - معرفی سیاست‌ها برای حل مسئله
[۱۴]	بیشینه‌سازی متوسط تخریب	الگوریتم ابتکاری	- استفاده از پنجره زمانی
[۱۵]	بیشینه‌سازی متوسط تخریب	الگوریتم ترکیبی مبتنی بر تجمع ماهی‌ها و جستجوی هماهنگ	- نبرد هوایی
[۱۶]	هدف افزایش متوسط تخریب اهداف و کاهش هزینه موشک‌ها	بهینه‌سازی کلونی مورچگان اصلاح شده برای دستیابی به نقاط پارتو	

محدودیت‌هایی برای محافظت از مناطق خودی، امکان استفاده از سلاح‌های هدایت‌شونده، در نظر گرفتن شلیک‌های رگباری و همچنین زمان مانور برای اهداف- که در این مقاله بررسی شده است در هیچ یک از پژوهش‌های انجام شده تاکنون بررسی نشده است. در این مقاله ابتدا در بخش ۲ روش تحقیق شامل تعریف مسئله، مدل‌سازی و روش حل پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس در بخش ۳ بحث و نتیجه در مورد کارایی روش‌های حل پیشنهادی در سناریوهای عملیاتی بررسی می‌شود و در نهایت در بخش ۴ نتیجه‌گیری مورد بحث قرار می‌گیرد.

تمرکز اصلی و نوآوری این مقاله بر روی چگونگی مدل‌سازی تخصیص و زمان‌بندی پایگاه‌های آتش خودی در وضعیت شبکه محور و تنوع سلاح‌ها در سایت‌های مختلف با اعمال توابع هدف و محدودیت‌های عملیاتی است. سپس روش‌هایی برای حل دقیق و ابتکاری برای مسئله مطرح شده ارائه می‌گردد. نوع تابع هدف- به‌صورت در نظر گرفتن همزمان تخریب وارده بر اهداف، حفاظت از مناطق حساس و استفاده از سلاح‌ها به‌صورت کارآمد- و انواع محدودیت‌های عملیاتی- نظیر در نظر گرفتن تخریب وارده به اهداف برای جلوگیری از شلیک‌های غیر مؤثر، در نظر گرفتن شرایط برای استفاده از مدل در چندین دوره نبرد، اعمال

۲. روش تحقیق

مقاله، تخصیص سلاح‌ها وابسته به موقعیت پایگاه‌های آتش خودی هست. تخصیص سلاح بیشترین تأثیر را بر افزایش شانس نابودی اهداف دارد.

پس از تخصیص سلاح‌ها، در مرحله بعد لازم است که شلیک انجام شود. با توجه به محدود بودن تعداد سلاح‌های هر پایگاه آتش خودی، لازم است زمان‌بندی مناسبی جهت شلیک هر سلاح انجام گیرد؛ بنابراین هدف این مرحله، نحوه زمان‌بندی سلاح‌ها جهت شلیک به اهداف است. زمان‌بندی هنگامی پیچیده‌تر می‌شود که چندین سلاح از یک یا چند پایگاه خودی باید به سمت یک هدف شلیک کنند؛ بنابراین امکان درگیری چند حامل خودی با یک هدف و همچنین امکان درگیری یک حامل خودی با چند هدف وجود دارد.

۲-۱. مدل‌سازی

پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی این مسئله در جدول (۲) ارائه شده است. در واقع برای دستیابی به پارامترهای مسئله باید از سیستم ارزیابی هدف و تخصیص سلاح، یک سیستم دفاعی که اطلاعات لازم در مورد اهداف را در یک نبرد تعیین می‌کند، استفاده کرد. عملیات موجود در این سیستم به چهار مرحله عملیات تشخیص، مدیریت هدف، ارزیابی هدف و در انتها تخصیص سلاح به اهداف تقسیم‌بندی می‌شود. در واقع پارامترهای مورد نیاز مسئله مورد بررسی خروجی مرحله ارزیابی هدف است و به عبارت دیگر در این مرحله به استخراج پارامترهای مورد نیاز می‌پردازد.

در یک صحنه نبرد دریایی، مجموعه‌ای از پایگاه‌های آتش خودی و پایگاه‌های دشمن که بعد از این اهداف نامیده می‌شوند، وجود دارد که هر یک بر اساس سلاح‌هایی که به همراه دارند، از اهمیت و ویژگی خاصی برخوردار هستند. در این صحنه نبرد، هر یک از طرفین با توجه به مکان قرارگیری در تلاش است به تخصیص بهتر سلاح‌هایی که در اختیار دارد و زمان‌بندی مناسب برای شلیک این سلاح‌ها، بر طرف مقابل غلبه کند. با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از اهداف و بر اساس میزان خطری که هر هدف برای هر پایگاه خودی دارد، لازم است هر یک از پایگاه‌های آتش خودی با توجه به محل استقرارش در فضای دوبعدی صحنه نبرد، به تخصیص سلاح‌های در دسترس بپردازد. در این مقاله، مکان قرارگیری پایگاه‌های آتش خودی ثابت است ولیکن هر یک از اهداف می‌توانند ساکن یا متحرک (با سرعت ثابت) باشند؛ بنابراین موقعیت اهداف به‌صورت پویا است و بر اساس تغییراتی که در صحنه نبرد رخ می‌دهد (مانند تغییر محل استقرار یا نابودی برخی اهداف و یا نابودی برخی از خودی‌ها) تغییر می‌کند. همچنین در صحنه نبرد، مناطق حفاظت‌شده خودی در نظر گرفته شده است که یکی از اهداف برای نحوه تخصیص سلاح به اهداف مهاجم، علاوه بر نابودی اهداف، حفاظت هر چه بیشتر این مناطق حساس است. باید توجه داشت که بر روی هر پایگاه آتش، می‌تواند چندین نوع سلاح قرار داشته باشد که انتخاب در نحوه تخصیص سلاح را پیچیده‌تر می‌کند. در مدل ارائه‌شده در این

متغیرهای تصمیم استفاده‌شده در مدل به شرح زیر است.

$$Z_{ikjt} = \begin{cases} 1; & \text{اگر سلاح } k \text{ از پایگاه آتش } i \text{ در لحظه } t \text{ به هدف } j \text{ شلیک کند} \\ 0; & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$V_{pjt} = \begin{cases} 1; & \text{اگر منطقه حفاظتی } p \text{ در لحظه } t \text{ در تیررس هدف } j \text{ باشد} \\ 0; & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$W_{ikpjt} = Z_{ikjt} \times V_{pjt} = \begin{cases} 1; & \text{اگر سلاح } k \text{ از پایگاه آتش } i \text{ در لحظه } t \text{ به هدف } j \text{ شلیک کند درحالی که منطقه حفاظتی } p \text{ در این لحظه در تیررس} \\ 0; & \text{هدف } j \text{ باشد} \\ & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$A_{jt} = \text{میزان تخریب ایجادشده برای هدف } j \text{ در لحظه } t$$

$$TS_j^{\min} = \text{زمان رسیدن اولین شلیک به هدف } j$$

$$TS_j^{\max} = \text{زمان رسیدن آخرین شلیک به هدف } j$$

$$TS_i^f = \text{زمان اولین شلیک از پایگاه آتش } i$$

$$TS_i^l = \text{زمان آخرین شلیک از پایگاه آتش } i$$

جدول ۲. پارامترهای مسئله

پارامتر	تعریف
$N = \{1, \dots, n\}$	مجموعه پایگاه‌های آتش خودی با اندیس i
$ N $	تعداد پایگاه‌های آتش
$M = \{1, \dots, m\}$	مجموعه اهداف با اندیس j
$ M $	تعداد اهداف
T	مجموعه زمان‌های در نظر گرفته شده برای نبرد با اندیس t و به اندازه $ T $
$K_i = \{1, \dots, k_i\}$	مجموعه سلاح‌های پایگاه آتش i با اندیس k
$ K_i $	تعداد سلاح‌های پایگاه آتش i
$P = \{(\pi_1, \rho_1), \dots, (\pi_{ P }, \rho_{ P })\}$	مجموعه نقاط حساس جهت حفاظت با اندیس p
$L = \{(\gamma_1, \theta_1), \dots, (\gamma_{ L }, \theta_{ L })\}$	مجموعه نقاط کاندیدا جهت قرارگرفته پایگاه‌های آتش با اندیس l
η_{il}	اگر مکان پیشنهادی l برای پایگاه i مجاز باشد، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرد.
δ_{ij}	ضریب خطر هدف j برای پایگاه آتش i
b_j	ضریب اهمیت هدف j
w'_{pj}	ضریب خطر(اهمیت) هدف j برای منطقه حساس p با توجه به اهمیت منطقه
s	زمان آماده‌سازی سلاح برای شلیک برحسب ساعت
fl_{ik}	سرعت پرواز سلاح k از پایگاه آتش i برحسب ساعت
mt_j	زمان مانور هدف j برحسب ساعت
ut	زمان شناسایی مکان یک شلیک برحسب ساعت
v_i	سرعت حرکت پایگاه آتش i برحسب کیلومتر بر ساعت
x_{it}	طول جغرافیایی پایگاه آتش i در لحظه t
y_{it}	عرض جغرافیایی پایگاه آتش i در لحظه t
χ_{jt}	طول جغرافیایی هدف j در لحظه t
ψ_{jt}	عرض جغرافیایی هدف j در لحظه t
v_j	سرعت حرکت هدف j برحسب کیلومتر بر ساعت
β_j	زاویه حرکت هدف j
dis_{ijt}	فاصله پایگاه آتش i از هدف j در لحظه t برحسب کیلومتر
r_{ik}	برد سلاح k از پایگاه آتش i برحسب کیلومتر
r_{ik}^{min}	کمینه برد قابل شلیک برای سلاح k از پایگاه آتش i برحسب کیلومتر
r'_j	بیشینه برد هدف j برحسب کیلومتر
Φ_{ik}	برابر با یک است اگر سلاح k از پایگاه آتش i هدایت‌شونده باشد و در غیر این صورت برابر با صفر است.
ξ_{ijt}	برابر با یک است اگر مسیر خط مستقیم شلیک از پایگاه آتش i به هدف j از روی کمینه یک منطقه ممنوع عبور کند و در غیر این صورت برابر با صفر است.
d_{ikj}	متوسط میزان تخریب هدف j اگر توسط سلاح k از پایگاه آتش i مورد اصابت قرار گیرد (بر اساس یک شناور ۳۵۰۰ تن)
h_j	وزن تقریبی هدف j برحسب تن
e_j	میزان نابودی هدف j
a_{ik}	میزان دقت سلاح k از پایگاه آتش j جهت تخریب اهداف (دقت هر سلاح تابعی خطی از فاصله هست به‌طوری‌که برای هدفی در بیشینه برد سلاح، ۸۰ درصد دقت سلاح در نظر گرفته می‌شود).
R	شعاع کره زمین که تقریباً برابر است با ۶۳۷۱ کیلومتر
G	عددی بسیار بزرگ

در ادامه آمده است. مقدار متغیر dis_{ijt} از رابطه (۲-۱) محاسبه می‌شود.

مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی برای مسئله زمان‌بندی و تخصیص سلاح‌ها با توجه به مشخص بودن مکان استقرار پایگاه‌ها

$$dis_{ijt} = R \times \arccos \left(\sin \left(\frac{\pi}{180} x_{it} \right) \times \sin \left(\frac{\pi}{180} \left(\chi_{jt} + \frac{360 \psi_j t \sin \left(\frac{\pi \beta_j}{180} \right)}{2\pi R} \right) \right) + \cos \left(\frac{\pi}{180} x_{it} \right) \times \cos \left(\frac{\pi}{180} \left(\chi_{jt} + \frac{360 \psi_j t \sin \left(\frac{\pi \beta_j}{180} \right)}{2\pi R} \right) \right) \times \cos \left(\frac{\pi}{180} \left(y_{it} - \left(\psi_{jt} + \frac{360 \psi_j t \cos \left(\frac{\pi \beta_j}{180} \right)}{2\pi R} \right) \right) \right) \right) \quad (2-1)$$

ρ_p استفاده می‌کنیم. در ادامه به بررسی مدل‌سازی تخصیص سلاح و زمان‌بندی شلیک می‌پردازیم.

لازم به ذکر است که نحوه محاسبه dis_{ijt} مشابه dis_{ijt} است با این تفاوت که در آن، به جای x_{it} از π_p و به جای y_{it} از

$$MaxF = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 - (1 - \alpha_1 - \alpha_2) F_3$$

$$F_1 = \frac{\sum_{j \in M} b_j \sum_{t \in T} A_{jt}}{\sum_{j \in M} b_j}, F_2 = \frac{\sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{j \in M} w'_{pj} W_{ikpjt}}{\sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{j \in M} w'_{pj}}, F_3 = \frac{\sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i} \sum_{j \in M} \sum_{t \in T} (r_{ik} - dis_{ijt})^+ Z_{ikjt}}{\sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i} \sum_{j \in M} \sum_{t \in T} (r_{ik} - dis_{ijt} + \varepsilon)^+} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{t \in T} A_{jt} \leq \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i} a_{ik} \left(1 - \frac{0.2 \times (dis_{ijt} - r_{ik}^{\min})}{(r_{ik} - r_{ik}^{\min})} \right) \frac{3500}{h_j} d_{ikj} Z_{ikjt} \quad ; \forall j \in M \quad (2)$$

$$\sum_{t \in T} A_{jt} \leq (1 - e_j) \quad ; \forall j \in M \quad (3)$$

$$\sum_{j \in M} \sum_{t \in T} Z_{ikjt} \leq 1 \quad ; \forall i \in N, k \in K_i \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{t \in T} Z_{ikjt} \leq 1 \quad ; \forall i \in N, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K_i} \sum_{j \in M} \sum_{t'=i+1}^{t+s} Z_{ikjt'} \leq G \left(1 - \sum_{k \in K_i} \sum_{j \in M} Z_{ikjt} \right) \quad \forall i \in N, \forall t = 1, \dots, |T| - s \quad (6)$$

$$r_{ik} - dis_{ijt} \geq G(Z_{ikjt} - 1) \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (7)$$

$$dis_{ijt} - r_{ik}^{\min} \geq G(Z_{ikjt} - 1) \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (8)$$

$$V_{pjt} > (r'_j - dis_{pjt}) / G \quad ; \forall p \in P, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (9)$$

$$V_{pjt} \leq 1 + (r'_j - dis_{pjt}) / G \quad ; \forall p \in P, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i} W_{ikpj} \leq G V_{pjt} \quad ; \forall p \in P, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{p \in P} W_{ikpj} \leq G Z_{ikjt} \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (12)$$

$$W_{ikpj} \geq Z_{ikjt} + V_{pjt} - 1 \quad ; \forall p \in P, \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (13)$$

$$Z_{ikjt} \leq G(1 - \xi_{ijt}) + G \varphi_{ik} \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (14)$$

$$Z_{i'k'j'} < \frac{(1 - e_j) - \sum_{t \in T} \sum_{i' \in N} \sum_{k' \in K_{i'}} a_{i'k'} \left(1 - \frac{0.2 \times (dis_{ijt} - r_{i'k'}^{\min})}{(r_{i'k'} - r_{i'k'}^{\min})} \right) \frac{3500}{h_j} d_{i'k'j'}}{G} \quad ; \forall i' \in N, \forall k' \in K_{i'}, \forall j \in M, \forall t' \in T \quad (15)$$

$$TS_j^{\min} \leq \left(t + \frac{dis_{ijt}}{f_{ik}} \right) Z_{ikjt} + G(1 - Z_{ikjt}) \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (16)$$

$$TS_j^{\max} \geq \left(t + \frac{dis_{ijt}}{f_{ik}} \right) Z_{ikjt} \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (17)$$

$$TS_j^{\max} - TS_j^{\min} \leq m t_j \quad ; \forall j \in M \quad (18)$$

$$TS_i^f \leq tZ_{ikjt} + G(1 - Z_{ikjt}) \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (19)$$

$$TS_i^l \geq tZ_{ikjt} \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (20)$$

$$TS_i^l - TS_i^f \leq ut \quad ; \forall i \in N \quad (21)$$

$$V_{pjt}, Z_{ikjt}, W_{ikpjt} \in \{0,1\} \quad ; \forall i \in N, \forall k \in K_i, p \in P, \forall j \in M, \forall t \in T \quad (22)$$

$$A_{jt} \geq 0 \quad ; \forall j \in M, \forall t \in T \quad (23)$$

$$TS_j^{\min}, TS_j^{\max} \in Z^+ \quad ; \forall j \in M \quad (24)$$

$$TS_i^f, TS_i^l \in Z^+ \quad ; \forall i \in N \quad (25)$$

شلیک کند. محدودیت شماره (۶) نیز نشان دهنده فاصله زمانی بین شلیک‌های یک پایگاه آتش با توجه به فاصله زمانی لازم جهت آماده‌سازی پایگاه آتش جهت شلیک بعدی است. طبق محدودیت (۷) از یک سلاح خاص از یک پایگاه آتش فقط زمانی به هدفی شلیک می‌شود که آن هدف در تیررس این سلاح باشد. محدودیت (۸) به این دلیل آمده است که در صورتی می‌توان شلیکی را از سلاحی تخصیص داد که فاصله $dis_{ijt} \geq r_{ik}^{\min}$ باشد.

محدودیت‌های (۹) و (۱۰) به منظور تعریف متغیر V_{pjt} طراحی شده‌اند. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) جهت تعیین ارتباط بین متغیر W_{ikpjt} با متغیرهای Z_{ikjt} و V_{pjt} ارائه شده‌اند. مفهوم محدودیت (۱۳) این است که اگر در راستای افزایش میزان تخریب اهداف (تابع F_1) به هدفی مانند j شلیک شود و از طرفی منطقه حفاظت شده‌ای مانند p در تیررس این هدف باشد، در واقع این شلیک می‌تواند به منزله دفاع از منطقه p نیز باشد (تابع F_2). محدودیت (۱۴) بیانگر استفاده یا عدم استفاده از موشک‌های هدایت‌شونده به عنوان سلاح است. محدودیت (۱۵) از تخصیص بیش از حد موشک‌ها به اهداف در صورت نابودی جلوگیری می‌کند. دو محدودیت (۱۶) و (۱۷) به ترتیب مشخص‌کننده زمان رسیدن اولین و آخرین شلیک به هدف j هستند. به منظور اعمال بیشترین تخریب به اهداف و جلوگیری از مانور آن‌ها، باید شلیک‌های مختلف به سمت یک هدف j به صورت پشت سر هم باشد و حداکثر از mt_j واحد زمانی بیشتر نشود که این موضوع در محدودیت (۱۸) نشان داده شده است.

دو محدودیت (۱۹) و (۲۰) به ترتیب مشخص‌کننده اولین و آخرین شلیک انجام شده از پایگاه آتش i هستند. چون مکان یک پایگاه آتش پس از اولین شلیک، در مدت کوتاهی مانند ut توسط اهداف موجود در صحنه نبرد شناسایی می‌شود، فاصله بین اولین و آخرین شلیک از این مکان نباید بیشتر از ut واحد زمانی باشد که محدودیت (۲۱) نیز این موضوع را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۲۲) تا (۲۵) نیز نوع متغیرهای مورد استفاده در این مدل را بیان می‌کنند که در آن‌ها Z^+ نشان دهنده مجموعه اعداد صحیح و مثبت است.

در این مدل مکان هر پایگاه آتش i در موقعیت X_i و Y_i ثابت است. تابع هدف مورد بحث در این مقاله به صورت $Max F = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 - (1 - \alpha_1 - \alpha_2) F_3$ هست در تابع هدف F_1 که در آن $b_j = \max\{\delta_{ij}\}$ است، $\sum_{j \in M} b_j \sum_{t \in T} A_{jt}$ بیانگر متوسط میزان تخریب وارد شده به تمامی اهداف هست. همچنین در تابع هدف F_2 $\sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{j \in M} w'_{pj} W_{ikpjt}$ نشان دهنده متوسط میزان محافظت از مناطق حساس از طریق هدف قرار دادن اهدافی است که امکان مورد اصابت قرار دادن این مناطق را دارند. تابع هدف سوم نشان دهنده استفاده کارآمد از سلاح‌های هر پایگاه است. این تابع هدف اجازه تخصیص سلاح‌هایی را به اهداف می‌دهد که فاصله اهداف تا پایگاه به برد سلاح نزدیک باشد و این موجب می‌شود که تا جایی که امکان دارد از سلاح‌ها به نحو احسن استفاده شود و از سلاح‌های دوربرد برای شلیک به اهداف نزدیک استفاده نشود. هر سه تابع هدف نرمال‌سازی شده و مقادیر آن‌ها بین صفر و یک است و قابل جمع شدن با یکدیگر هستند. محدودیت (۲) میزان تخریب وارده به هر هدف در کل دوره زمان برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. در این رابطه، دقت سلاح k از پایگاه آتش i وقتی هدف j در فاصله r_{ik}^{\min} کیلومتری این سلاح است برابر با a_{ik} و وقتی در بیشینه فاصله ممکن از این سلاح یعنی r_{ik} است برابر با $0.8a_{ik}$ است. همچنین میزان تخریب بر اساس رابطه $\frac{3500}{h_j} d_{ikj}$ محاسبه می‌شود زیرا پارامتر d_{ikj} برابر با متوسط میزان تخریب وارده به یک هدف ۳۵۰۰ تنی است و به نسبت افزایش وزن هدف، متوسط میزان تخریب کاهش می‌یابد. محدودیت (۳) میزان تخریب وارده که در محدودیت (۲) تعیین می‌شود را محدود به مقدار $1 - e_j$ یعنی میزان درصد سلامت هدف j می‌کند زیرا تخصیص سلاح بیشتر، بی‌فایده است و باعث افزایش غیر مؤثر هزینه‌ها می‌شود.

محدودیت شماره (۴) بیانگر این است که هر سلاح از هر پایگاه آتش قادر است فقط یک بار شلیک کند زیرا فقط حامل یک موشک است و محدودیت شماره (۵) بدین منظور آمده است که هر پایگاه در هر لحظه زمانی بیشینه می‌تواند به یک هدف

۳-۲. روش حل

با توجه به پیچیدگی زیاد مسئله و نیاز به زمان نسبتاً طولانی برای حل مدل ارائه شده در ابعاد نه چندان بزرگ با استفاده از نرم افزارهای موجود تحقیق در عملیات، توسعه الگوریتم های فرا ابتکاری در ابعاد بزرگ مسئله امری ضروری است؛ بنابراین به منظور حل مسئله، ابتدا با توجه به مکان استقرار پایگاه ها، برای

تخصیص و زمان بندی سلاح ها به اهداف در زمان های مختلف، با توجه به ماهیت مسئله، دو الگوریتم مبتنی بر جمعیت ارائه شده است. در ادامه، الگوریتم ژنتیک و تجمع ذرات آشوبی برای مسئله تخصیص و زمان بندی سلاح ها به اهداف توسعه داده شده است. در جدول (۳) نمادهای استفاده شده در روش های حل آورده شده است.

جدول ۳. نمادهای مورد استفاده در روش های حل

نماد	تعریف
c, c', c'', c'''	شمارنده
$count$	تعداد جواب های مجاز
$R_{g \times count}$	ماتریس نمایش دهنده جواب های شدنی ممکن که سطرهای آن به ترتیب نشان دهنده شماره پایگاه، شماره سلاح، شماره هدف، زمان شلیک، ضریب تخریب هدف با توجه به اهمیت آن، ضریب حفاظت ایجاد شده با توجه به شلیک، ضریب مربوط به کارایی شلیک با توجه به برد سلاح، زمان رسیدن سلاح به هدف و ضریب تجمعی و نرمال شده تخریب، حفاظت تابع هدف و کارایی شلیک با عناصر R
$R'_{g \times 1}$	ماتریس نمایش دهنده یک جواب شدنی انتخاب شده با عناصر R'
$Sol_{4 \times \sum_{i \in N} K_i }$	ماتریس جواب که سطرهای آن به ترتیب نشان دهنده شماره پایگاه، شماره سلاح، شماره هدف و زمان شلیک است
f_j	میزان تخریب به روز شده مورد انتظار هدف j بعد از تخصیص هر شلیک
Pop	مجموعه شامل جمعیت ایجاد شده
$ Pop $	تعداد جمعیت ایجاد شده برای الگوریتم ژنتیک
Δcp	فاصله بین دو نقطه تقاطع
cp_1	اولین نقطه تقاطع
cp_2	دومین نقطه تقاطع
$Elite$	درصد نخبه گزینی
prt	تعداد ذرات ایجاد شده
v_{max}	بیشینه سرعت در نظر گرفته شده
c_1	مقدار ثابت بیان کننده شتاب به سمت بهترین جواب همسایگی در هر تکرار
c_2	مقدار ثابت بیان کننده شتاب به سمت بهترین جواب همسایگی شناخته شده
r_1	مقدار تصادفی برای تعدیل میزان شتاب در حرکت به سمت بهترین جواب همسایگی در هر تکرار
r_2	مقدار تصادفی برای تعدیل میزان شتاب در حرکت به سمت بهترین جواب همسایگی شناخته شده
$Nobest$	درصد ذرات با بهترین تابع هدف
$bestprt_{Nobest \times prt}$	$Nobest \times prt$ تا از ذرات با بهترین تابع هدف
we^{\min}	کمینه ضریب برای سرعت ذرات
we^{\max}	بیشینه ضریب برای سرعت ذرات
we^c_{prt}	ضریب سرعت ذره prt در تکرار c'
$Noimp$	تعداد تکرارهای بدون بهبود مجاز
$Time_{ijk}$	مجموعه زمان هایی که هدف j در تیررس سلاح k از پایگاه i است.
$ Time_{ijk} $	تعداد اعضای مجموعه $Time_{ijk}$
$asv^c_{c'}$	سرعت مربوط به شلیک انتخابی از ستون c'' از ماتریس R در تکرار c'
$ASV^c_{count}(c)$	ماتریس سرعت ذره c در تکرار c' دارای یک سطر و $count$ ستون با اعضای $asv^c_{c'}$
$ASpbest^c_{4 \times \sum_{i \in N} K_i }$	ماتریس $ N $ بعدی نشان دهنده بهترین جواب مسئله تخصیص و زمان بندی در تکرار c'
$ASgbest^c_{4 \times \sum_{i \in N} K_i }$	ماتریس $ N $ بعدی نشان دهنده بهترین جواب مسئله تخصیص و زمان بندی تاکنون
$PSOSol^c_{4 \times \sum_{i \in N} K_i }(c)$	ماتریس جواب ذره c که سطرهای آن به ترتیب نشان دهنده شماره پایگاه، شماره سلاح، شماره هدف و زمان شلیک است

۳-۱-۲. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های تکاملی است که با توجه به مفاهیم وراثت و جهش در زیست‌شناسی اولین بار توسط هولاند [۱۷] ارائه شد. در واقع این الگوریتم با ایجاد نسل به بهبود جواب‌ها و به دست آوردن جواب‌های نزدیک به بهینه کمک می‌کند. برای ایجاد جواب اولیه لازم است ابتدا برای هر سلاح موجود بر روی هر پایگاه آتش، زمان‌های در تیررس بودن هدف J توسط آن سلاح را تعیین کرده و سپس مجموعه جواب‌های شدنی را در ماتریس R قرار دهیم. اولین گام برای پر کردن این ماتریس در تیررس بودن اهداف توسط سلاح‌ها است و دومین موردی که برای شدنی بودن جواب باید بررسی کرد این است که اگر سلاحی هدایت‌شونده نباشد و مسیر مستقیم آن سلاح از مناطق خودی عبور می‌کند، مجاز به شلیک کردن نیست. بعد از تشکیل ماتریس R که هر سطر آن به ترتیب بیان‌کننده شماره پایگاه، شماره سلاح، شماره هدف، زمان شلیک (که شامل مجموعه $Time_{ikj}$ می‌شود)، ضریب تخریب هدف با توجه به اهمیت آن، ضریب حفاظت ایجادشده با توجه به شلیک، ضریب مربوط به کارایی شلیک با توجه به برد سلاح، زمان رسیدن پرتابه یا موشک به هدف و ضریب تجمعی و نرمال شده تخریب و حفاظت تابع هدف است، با استفاده از چرخ رولت یک شلیک از این ماتریس انتخاب کرده و در ماتریس $Sol_{4 \times \sum_{i \in N} |K_i|}$ قرار می‌دهیم. برای نمایش جواب که حاصل تخصیص سلاح‌های هر پایگاه به اهداف در زمان‌های مختلف است ابتدا ماتریس $Sol_{4 \times \sum_{i \in N} |K_i|}$ را بدین شکل تشکیل می‌دهیم که هر سطر آن به ترتیب نشان‌دهنده شماره پایگاه، شماره سلاح، شماره هدف و زمان شلیک است. تعداد ستون‌های این ماتریس در واقع مجموع سلاح‌های موجود بر روی تمامی پایگاه‌های آتش و یا $\sum_{i \in N} |K_i|$ است. به منظور آماده‌سازی این ماتریس، ابتدا دو سطر اول را با توجه به شماره پایگاه‌ها و سلاح‌های موجود بر آن‌ها پر کرده و سپس مقادیر دو سطر آخر را ۱- قرار می‌دهیم. بعد از انتخاب هر شلیک از ماتریس R در ستونی که بیان‌کننده شماره پایگاه و سلاح انتخابی است شماره هدف مورد نظر و زمان شلیک را جایگزین ۱- کرده و در نهایت ستون‌هایی که دو سطر آخر آن‌ها مخالف ۱- است بیان‌کننده زمان‌بندی و برنامه‌ریزی شلیک‌هایی است که باید در آن دوره انجام پذیرد. روند گام‌به‌گام ایجاد جواب اولیه و به‌روزرسانی ماتریس R در ادامه آمده است.

گام ۱: ابتدا به‌ازای هر $k \in K_i, i \in N$ و $j \in M$ مقدار $Time_{ikj} = \{t \in T \mid r_{ik}^{\min} \leq dis_{ijt} \leq r_{ik}^{\max}, \varphi_{ik} + (1 - \zeta_{ijt}) \geq 1\}$

محاسبه می‌کنیم. $count = 0$ قرار داده، بنابراین در این گام ماتریس R هیچ عضوی ندارد. دو سطر اول ماتریس Sol را به ترتیب برابر با شماره پایگاه‌ها و شماره سلاح آن‌ها قرار می‌دهیم و به ازای دو سطر آخر $\sum_{i \in N} |K_i|$ ستون ایجادشده این ماتریس مقدار ۱- می‌گیرد (۱- به معنی عدم تخصیص سلاح‌های موجود در هر پایگاه است). به‌ازای هر $j \in M, f_j = 0$ می‌شود.

گام ۲: به‌ازای هر $k \in K_i, i \in N$ و $j \in M$ $|Time_{ikj}|$ ستون به ماتریس R بدین صورت اضافه می‌کنیم که هشت سطر اول این ستون‌ها به ترتیب نشان‌دهنده شماره پایگاه، شماره سلاح، شماره هدف، زمان شلیک (که شامل مجموعه $Time_{ikj}$ می‌شود)، ضریب تخریب هدف با توجه به اهمیت آن، ضریب حفاظت ایجادشده با فرض انتخاب این شلیک، ضریب کارایی شلیک و زمان رسیدن پرتابه یا موشک به هدف است. قرار می‌دهیم:

$$count = count + \Delta t_{ijt}$$

گام ۳: بعد از کامل شدن ستون‌های ماتریس R ، سطر آخر آن را با توجه به ضرایب اهمیت سه تابع هدف (α_1, α_2) و $(1 - \alpha_1 - \alpha_2)$ به صورت تجمعی جمع کرده و بر عدد حاصله از این تجمیع در ستون آخر یا به عبارتی ستون $count$ تقسیم می‌کنیم. بدین صورت اعداد موجود در این سطر نرمال‌سازی (بین صفر و یک) می‌شوند.

گام ۴: یک عدد تصادفی در بازه $[Q, r_{9, count}]$ ایجاد می‌کنیم و سطر آخر ماتریس R را بررسی می‌کنیم، اولین ستونی که عدد انتخاب‌شده در آن قرار گرفت را پیدا کرده ($count^*$) و هدف و زمان شلیک را در ستون متناظر با سلاح در ماتریس Sol قرار می‌دهیم و $f_j = f_j + r_{5, count^*}$ را به‌روز می‌کنیم ($r_{5, count^*}$ عنصر موجود در سطر ۵ و ستون $count^*$ ماتریس R و یا به عبارت دیگر میزان تخریب مورد انتظار هدف J ام با توجه به این شلیک است). ستون $count^*$ را از ماتریس R حذف کرده و در $R'_{9,1}$ قرار می‌دهیم و $count = count - 1$ می‌شود.

گام ۵: اگر $f_j > 1$ بود، تمام ستون‌های ماتریس R را که مرتبط به شلیک به هدف J است را حذف کرده و $count$ را به‌روز کنید (این نکته بدین معنی است که آن هدف به‌طور کامل نابود شده و نیازی به تخصیص مجدد سلاح ندارد).

گام ۶: به‌ازای هر $c \in \{1, \dots, count\}$ اگر $r'_{1,c} = r_{1,c}$ و $r'_{2,c} = r_{2,c}$ باشد، ستون C را حذف کرده و $count$ را به‌روز کنید. به عبارت دیگر ستون‌هایی از ماتریس R که مرتبط به شلیک از سلاح انتخاب‌شده به اهداف دیگر و یا در زمان‌های دیگر

می شود را باید حذف کرد.

رسیدنشان به هدف انتخابی بیشتر از $mt_{r_{3,1}}$ است را باید حذف کرد.

گام ۷: به ازای هر $c \in \{1, \dots, count\}$ اگر $r'_{4,1} = r_{4,c}$ و $|r'_{4,1} - r_{4,c}| > ut$ باشد، ستون C را حذف کرده و $count$ را به روز کنید. به عبارت دیگر ستون هایی را که از آن پایگاه آتش هستند و تفاضل زمان شلیک با شلیک انتخاب شده بیشتر از ut است را باید حذف کرد.

گام ۹: اگر $count > 0$ باشد، به گام ۴ بروید و در غیر این صورت متوقف شوید.

گام ۸: به ازای هر $c \in \{1, \dots, count\}$ اگر $r'_{3,1} = r_{3,c}$ و $|r'_{7,1} - r_{7,c}| > mt_{r_{3,1}}$ باشد، ستون C را حذف کرده و $count$ را به روز کنید. عبارت دیگر تمام ستون هایی که تفاضل زمان

به عنوان مثال فرض کنید که ۳ پایگاه آتش داریم که پایگاه اول، پایگاه اصلی است و هیچ سلاحی بر روی آن وجود ندارد و بر روی هر یک از دو پایگاه دیگر ۴ سلاح قرار گرفته است و ۵ هدف نیز شناسایی شده است. ماتریس اولیه R و ذخیره کردن آن در R' دارای 10×33 ستون است که خلاصه آن در ادامه آمده است.

$$R = \begin{bmatrix} 2 & \dots & 2 & 2 & \dots & 2 & \dots & 3 & \dots & 3 & \dots & 3 & \dots & 3 \\ 1 & \dots & 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & \dots & 4 & \dots & 4 \\ 1 & \dots & 1 & 2 & \dots & 2 & \dots & 1 & \dots & 2 & \dots & 5 & \dots & 5 \\ 1 & \dots & 25 & 1 & \dots & 24 & \dots & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & \dots & 52 \\ 0.1371 & \dots & 0.1192 & 0.1404 & \dots & 0.1230 & \dots & 0.1327 & \dots & 0.1355 & \dots & 0.2114 & \dots & 0.1822 \\ 0.0000 & \dots & 0.0000 & 0.0000 & \dots & 0.0000 & \dots & 0.0000 & \dots & 0.0000 & \dots & 0.0000 & \dots & 0.0000 \\ 0.0012 & \dots & 0.0000 & 0.0012 & \dots & 0.0000 & \dots & 0.0009 & \dots & 0.0009 & \dots & 0.0013 & \dots & 0.0000 \\ 2.9419 & \dots & 31.3481 & 3.0127 & \dots & 30.1981 & \dots & 4.0333 & \dots & 4.1986 & \dots & 2.5928 & \dots & 58.3203 \\ 0.0003 & \dots & 0.0083 & 0.0086 & \dots & 0.0165 & \dots & 0.2079 & \dots & 0.2157 & \dots & 0.3731 & \dots & 0.4000 \end{bmatrix}$$

$$Sol = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

ابتدا یک عدد تصادفی برای استفاده از تکنیک چرخ رولت انتخاب کرده و اولین شلیک را انتخاب می کنیم. عدد انتخاب شده ۰،۰۰۱ است بنابراین، اولین شلیک، شلیک سلاح ۱ از پایگاه ۲ به هدف ۱ در زمان ۱ است؛ بنابراین اولین شلیک را به شکل زیر در ماتریس Sol وارد می کنیم و میزان تخریب هدف ۱، $f_1 = 0.73$ خواهد شد.

بعد از به روز کردن ماتریس R' و حذف مواردی که منجر به غیرموجه شدن جواب با توجه به شلیک موجود می شوند، ماتریس R' با 52×4 ستون به صورت زیر خواهد شد و همانند قبل می توان شلیک جدید را با استفاده از تکنیک چرخ رولت استخراج کرد.

$$R' = \begin{bmatrix} 2 & \dots & 2 & 2 & \dots & 2 & \dots & 3 & \dots & 3 & \dots & 3 & \dots & 3 \\ 2 & \dots & 2 & 2 & \dots & 2 & \dots & 1 & \dots & 1 & \dots & 4 & \dots & 4 \\ 1 & \dots & 1 & 2 & \dots & 2 & \dots & 1 & \dots & 1 & \dots & 5 & \dots & 5 \\ 4 & \dots & 9 & 4 & \dots & 10 & \dots & 1 & \dots & 8 & \dots & 1 & \dots & 52 \\ 0.140 & \dots & 0.137 & 0.143 & \dots & 0.140 & \dots & 0.133 & \dots & 0.129 & \dots & 0.211 & \dots & 0.182 \\ 0.000 & \dots & 0.000 & 0.000 & \dots & 0.000 & \dots & 0.000 & \dots & 0.000 & \dots & 0.000 & \dots & 0.000 \\ 0.002 & \dots & 0.002 & 0.002 & \dots & 0.002 & \dots & 0.001 & \dots & 0.001 & \dots & 0.001 & \dots & 0.000 \\ 6.467 & \dots & 12.370 & 6.520 & \dots & 13.589 & \dots & 4.033 & \dots & 11.914 & \dots & 2.593 & \dots & 58.320 \\ 0.000 & \dots & 0.003 & 0.003 & \dots & 0.006 & \dots & 0.062 & \dots & 0.066 & \dots & 0.347 & \dots & 0.400 \end{bmatrix}$$

تابع هدف شد را به همراه آن عضو به عنوان والد انتخاب می کنیم. به صورت تصادفی یکی از والد ها را به عنوان پدر و دیگری را به عنوان مادر انتخاب می کنیم و با عملگر تقاطع دو نقطه ای نسل جدید ایجاد می شود. عملگر تقاطع بدین صورت اعمال می گردد که بعد از انتخاب نقاط تقاطع، کروموزوم های موجود در مابین دو نقطه تقاطع از مادر و مابقی کروموزوم ها از پدر انتخاب شده و

به کارگیری الگوریتم ژنتیک برای این مسئله بدین صورت است که ابتدا جمعیت pop تایی از جواب های اولیه (sol) ایجاد کرده و به هر یک از ستون های موجود در جواب یک کروموزوم گفته می شود. سپس، برای ایجاد نسل بعدی باید به ازای هر یک از اعضای نسل قبل، دو عضو دیگر به صورت تصادفی از آن نسل انتخاب کرده و آن جوابی که دارای بهترین

فرض کنید $cp_1=1$ و $cp_2=6$ باشد؛ بنابراین جواب حاصل به شکل زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 5 & -1 & -1 & 5 & 2 & -1 & -1 \\ 1 & 33 & -1 & -1 & 38 & 42 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

با بررسی جواب فوق و اصلاح آن به‌منظور موجه بودن جواب زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 5 & 2 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 38 & 42 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

دلیل حذف شدن شلیک مربوط به سلاح دوم از پایگاه دوم این است که برای جلوگیری از شناسایی مکان پایگاه‌ها، بعد از زمان اولین شلیک و شلیک‌های بعدی باید در کمتر از ut واحد زمانی انجام شوند؛ زیرا بعد از گذشت ut واحد زمانی، مکان استقرار کنونی، مکان امنی نبوده و باید پایگاه تغییر مکان دهد. از آنجایی که ut در این مثال ۱۰ واحد زمانی در نظر گرفته شده است، بنابراین شلیک از سلاح دوم به دلیل گذشت زمان بیشتر از ut مجاز نیست.

از آنجایی که برای جواب فوق شلیک‌های مجاز موجود است، بنابراین می‌توان با استفاده از چرخ رولت شلیک‌های موجه را اضافه کرد و جواب فوق به‌صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 4 & 3 & -1 & 5 & 2 & -1 & 5 \\ 1 & 5 & 8 & -1 & 38 & 42 & -1 & 44 \end{bmatrix}$$

تابع هدف مربوط به جواب فوق ۰/۳۹ خواهد شد.

۲-۳-۲. الگوریتم تجمع ذرات آشوبی

الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (PSO) یک روش مبتنی بر جمعیت است که با الهام گرفتن از حرکت پرندگان و ماهی‌ها توسط کندی و ابرهارد [۱۸ و ۱۹] برای مسائل گسسته معرفی شده است. این الگوریتم شامل مجموعه‌ای از ذرات می‌شود که هر کدام از این ذرات نشان‌دهنده یک جواب شدنی برای مسئله مورد نظر هست. ذرات در طی این روش با توجه به شرایط فعلی خود و همسایگانش (ذرات دیگر موجود در همان تکرار) در فضای شدنی تغییر مکان داده و جواب‌های شدنی دیگری را ایجاد می‌کنند.

برای ایجاد ذرات لازم است ابتدا برای هر سلاح موجود بر روی هر پایگاه آتش، زمان‌های در تیررس بودن هدف J توسط آن سلاح را تعیین کرده و سپس مجموعه جواب‌های شدنی را در ماتریس R مشابه الگوریتم ژنتیک قرار دهیم. سپس ماتریس

بدین ترتیب جواب دیگری ایجاد می‌شود. باید در نظر داشت که جواب ایجادشده از این طریق لزوماً شدنی نیست.

برای انتخاب نقاط تقاطع، ابتدا فاصله بین دو نقطه تقاطع Δcp را به‌صورت تصادفی از بازه $\left[\frac{1}{4} \sum_{i \in N} |K_i|, \frac{3}{4} \sum_{i \in N} |K_i| \right]$ انتخاب کرده و سپس نقطه اولیه تقاطع cp_1 را به‌صورت تصادفی از بازه $\left[\frac{1}{4} \sum_{i \in N} |K_i| - \Delta cp, \frac{3}{4} \sum_{i \in N} |K_i| \right]$ انتخاب می‌شود و درنهایت دومین نقطه تقاطع به‌صورت $cp_2 = cp_1 + \Delta cp$ محاسبه می‌شود.

برای اصلاح نسل جدید و تبدیل آن به نسل شدنی لازم است که هر یک از جواب‌های ایجادشده بازسازی شوند. بازسازی بدین شکل انجام می‌شود که به ازای هر جواب باید ماتریس R را تشکیل داد و از ستون اولیه جواب ایجادشده، شلیک‌ها را بررسی کرده و ماتریس R را به‌روز می‌کنیم. بدین شکل که با توجه به هر شلیک موارد غیرمجازی که منجر به جواب‌های نشدنی می‌شود را از این ماتریس حذف می‌کنیم. همچنین اگر شلیک‌های بعدی موجود در جواب ایجادشده قبلاً از ماتریس R حذف شده بودند را باید از جواب ایجادشده حذف کرد. بدین ترتیب شلیک‌های غیرمجاز را از مجموعه جواب‌های ایجادشده حذف می‌کنیم. بعد از بررسی تمام ستون‌های جواب ایجادشده، اگر هنوز در ماتریس R اعضایی وجود داشت، می‌توان با استفاده از چرخ رولت، شلیک‌های مجاز با توجه به جواب ایجادشده را به جواب اضافه کرد. بدین ترتیب نسل بعدی ایجادشده دارای جواب‌های شدنی هستند و جهش در آن‌ها اتفاق افتاده است.

باید توجه داشت که در این الگوریتم در هر نسل به تعداد $Elite \times |Pop|$ از بهترین‌ها بدون تغییر وارد نسل آینده می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر از نخبه‌های هر نسل فرزند ایجاد نمی‌کنیم ولی می‌توانیم از آن‌ها به‌عنوان والد برای اعضای دیگر استفاده کرد.

در مثال قبل، فرض کنید دو جوابی که می‌خواهیم در ایجاد نسل جدید شرکت داشته باشند به شرح زیر باشد و به‌صورت تصادفی جواب اول در نقش مادر و جواب دوم در نقش پدر ظاهر شوند. تابع هدف مربوط به جواب اول ۰,۲۵ و جواب دوم ۰,۲۰ است.

$$Sol_1 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 5 & -1 & 3 & -1 & 5 & -1 & -1 \\ 1 & 6 & -1 & 10 & -1 & 26 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$Sol_2 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ -1 & 5 & -1 & -1 & 5 & 2 & -1 & -1 \\ -1 & 33 & -1 & -1 & 38 & 42 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

سپس، اگر به ازای هر ذره c و $c^m \leq \sum_{i \in N} |K_i|$ ، $ASgbest_{3,c^m}$ را $ASpbest_{3,c^m}$ ، $PSOSol_{3,c^m}$ را lb و $ASgbest_{3,c^m}$ را gb بنامیم، بردار سرعت ذرات به منظور حرکت به سمت بهترین جواب به این صورت به روز می شود که اگر $lb \neq pb$ و $lb, pb > 0$ باشد، یا اگر $lb > 0$ ، $lb \neq pb$ و $pb = -1$ باشد و یا $lb = pb = -1$ باشد، آنگاه داریم:

$$asv_{lb,c^m}^{c'+1} = we_{c^m}^{c'} \cdot asv_{lb,c^m}^{c'} - c_1 r_1$$

و $lb = -1$ و $pb > 0$ باشد و یا $lb = pb > 0$ باشد، آن گاه داریم:

$$asv_{lb,c^m}^{c'+1} = we_{c^m}^{c'} \cdot asv_{lb,c^m}^{c'} + c_1 r_1$$

و $lb \neq gb$ و $lb, gb > 0$ باشد، یا اگر $lb \neq gb$ و $lb > 0$ و $gb = -1$ باشد و یا $lb = gb = -1$ باشد، آنگاه داریم:

$$asv_{lb,c^m}^{c'+1} = we_{c^m}^{c'} \cdot asv_{lb,c^m}^{c'} - c_2 r_2$$

و $lb = -1$ و $gb > 0$ باشد و یا $lb = gb > 0$ باشد، آن گاه داریم:

$$asv_{lb,c^m}^{c'+1} = we_{c^m}^{c'} \cdot asv_{lb,c^m}^{c'} + c_2 r_2$$

در این الگوریتم، $Nobest \times prt$ از ذرات که دارای بهترین تابع هدف هستند در $bestprt$ نگهداری می شود و در هر بار تکرار بهترین ذرات را جایگزین می کنیم. اگر تعداد تکرارهایی که هیچ بهبود در جواب ایجاد نمی کنند بیشتر از $Noimp$ شد، باید آشوبی در جوابها ایجاد کنیم. این تشویش به این صورت اعمال می شود که از عملگر تقاطع دو نقطه ای برای سرعت ذرات موجود در $bestprt$ استفاده می شود. اگر تعداد ستون های ماتریس سرعت را $count$ در نظر بگیریم، برای انتخاب نقاط تقاطع، ابتدا فاصله بین دو نقطه تقاطع Δcp را به صورت تصادفی از بازه $\left[\frac{1}{4} count, \frac{3}{4} count \right]$ انتخاب کرده و سپس نقطه اولیه تقاطع cp_1 را به صورت تصادفی از بازه $[Qcount - \Delta cp]$ انتخاب می شود و در نهایت دومین نقطه تقاطع به صورت $cp_2 = cp_1 + \Delta cp$ محاسبه می شود. با استفاده از چرخ رولت یکی از ذرات دیگر را $bestprt$ انتخاب کرده و عملگر تقاطع فراخوانی می شود و سرعت ذرات بدین شکل دچار آشفتگی می شود و تا شرط خاتمه الگوریتم این روند ادامه می یابد.

۳. نتایج و بحث

کلیه روش های حل ارائه شده در این مقاله، در محیط Microsoft Visual Studio 2012، بر روی رایانه کتابی با مشخصات CPU Core i5، 4GB RAM، Windows 7، که مجهز به سیستم عامل Windows 7 بوده، پیاده سازی و اجرا شده است. سپس روش های پیشنهادی بر روی ۳۰ نمونه مسئله پیاده سازی شده است و کارایی روشها از

$PSOSol(c)$ برای هر ذره c که دو سطر اول آن به ترتیب شماره پایگاه های آتش و سلاح های موجود بر روی آن است را ایجاد کرده و دو سطر آخر این ماتریس نمایانگر شماره هدف و زمان شلیک است که با توجه شلیک انتخابی پر می شود. سپس به ازای هر ذره c (که $c < prt$) یک ماتریس سرعت ($ASV^1(c)$) به صورت تصادفی در بازه $[0, v_{max}]$ ایجاد می شود.

بعد از تشکیل ماتریس سرعت برای هر ذره، ستون c^m ($count < c^m$) را که دارای بیشترین مقدار در $ASV^1(c)$ است را تعیین کرده و تا زمانی که $asv_{c^m} > 0$ است، شلیک متناظر با ستون c^m در ماتریس R را در ماتریس $PSOSol(c)$ قرار می دهیم. بعد از انتخاب هر شلیک باید ماتریس سرعت را به نحوی به روز کرد که شلیک های غیرمجاز امکان انتخاب و حضور در ماتریس $PSOSol(c)$ را نداشته باشند. بدین منظور، سرعت مربوط به ستون c^m و تمام ستون هایی که مرتبط به شلیک از سلاح انتخاب شده می شود را قرینه می کنیم (به عبارت دیگر در -1 ضرب می کنیم). همچنین سرعت مربوطه به ستون هایی را که از آن پایگاه آتش هستند و تفاضل زمان شلیکشان از شلیک انتخاب شده بیشتر از ut است و همچنین تفاضل زمان رسیدنشان به هدف انتخابی بیشتر از mt_j است را قرینه می کنیم. با انتخاب هر شلیک میزان تخریب هر هدف به صورت جمعی در f_j نگهداری می شود. اگر به ازای شلیک انتخابی $f_j > 1$ شود بدین معناست که این هدف به صورت کامل نابود شده است و نیازی به شلیک مجدد به آن هدف بنابراین سرعت تمام ستون های مربوط به شلیک به آن هدف می شود را باید قرینه کرد. برای هر ذره با توجه ماتریس $PSOSol(c)$ میزان تابع هدف را محاسبه کرده، بهترین تابع هدف در آن تکرار را شناسایی کرده و مکان قرارگیری آن را در $ASpbest^{c'}$ ذخیره کرده و بهترین جواب شناسایی شده تاکنون را در $ASgbest$ قرار می دهیم. در این الگوریتم برای به روزرسانی بردارهای سرعت برخلاف الگوریتم تجمع ذرات از ضریب ۱ برای سرعت در تکرار قبل استفاده نمی شود و با توجه به دو ضریب we^{min} و we^{max} را در نظر گرفته شده برای الگوریتم و با توجه به مقدار تابع هدف ذره در این تکرار و میزان متوسط و کمینه توابع هدف به دست آمده تاکنون (f_{avg} و f^{min}) این ضریب از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$we_{prt}^{c'+1} = \begin{cases} we^{min} + \frac{(we^{max} - we^{min})(f^{c'} - f^{min})}{f_{avg} - f^{min}} & ; f^{c'} \leq f_{avg} \\ we^{max} & ; f^{c'} > f_{avg} \end{cases}$$

برای به روزرسانی ماتریس سرعت هر ذره، ابتدا باید تمام ستون های ماتریس سرعت که مقادیر منفی دارند را قرینه کنیم.

آنجایی که شرط خاتمه الگوریتم ژنتیک، زمان‌های ۱، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ ثانیه در نظر گرفته شده است، نیاز است که در هر یک از این زمان‌ها، پارامترهای گفته‌شده تعیین گردد. سه سطح در نظر گرفته‌شده برای درصد نخبه‌گزینی برای هر یک از این زمان‌ها ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جمعیت ایجادشده بوده و جمعیت ایجادشده متناسب با مدت زمان حل افزایش می‌یابد؛ بنابراین طرح عاملی 3^2 برای هر یک از این زمان‌ها در نرم‌افزار Minitab 17 ایجاد شده و درصد نخبه‌گزینی در هر تکرار را تنظیم می‌کنیم. جدول (۵) سطوح مختلف هر پارامتر در هر محدوده زمانی را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر منتخب برای هر پارامتر در جدول (۶) ارائه شده است.

۱-۳. تنظیم پارامترهای الگوریتم تجمع ذرات آشوبی برای مسئله تخصیص و زمان‌بندی: در الگوریتم تجمع ذرات آشوبی برای مسئله تخصیص و زمان‌بندی می‌خواهیم شش پارامتر تعداد ذرات ایجادشده، بیشینه سرعت، میزان شتاب ذرات، درصد نگهداری ذرات با بهترین تابع هدف، تعداد تکرارهای بدون بهبود متوالی مجاز و کمینه و بیشینه وزن در نظر گرفته شده برای به‌روزرسانی سرعت در هر تکرار را تنظیم کنیم. با ارائه تحلیلی مشابه با تحلیل‌های انجام‌شده، می‌توان پارامترهای الگوریتم تجمع ذرات آشوبی را برای محدوده‌های زمانی ۱، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ ثانیه تنظیم نمود. جدول (۷) سطوح مختلف هر پارامتر در هر محدوده زمانی را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر منتخب برای هر پارامتر در جدول (۸) ارائه شده است.

نظر میزان زمان لازم برای حل و میانگین درصد انحرافات هر روش از جواب بهینه در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای اصلی در نظر گرفته شده برای این نمونه مسائل در جدول (۴) آمده است.

جدول ۴. نحوه ایجاد نمونه مسائل

پارامتر	مقادیر تصادفی
تعداد پایگاه‌ها	۳-۴-۵
تعداد اهداف	۴-۵-۹-۱۰
مدت زمان ثابت بودن صحنه نبرد	۲۰-۳۰-۵۰-۶۰
تعداد مناطق حفاظت‌شده	۰-۱-۴-۵-۶

۱-۳. تنظیم پارامترها

برای تنظیم پارامترهای یک الگوریتم، روش‌های آماری مختلفی در طراحی آزمایش‌ها وجود دارد. در این پژوهش از طرح سه سطحی عاملی استفاده شده است که جزئیات نحوه استفاده از آن در ادامه برای هر یک از الگوریتم‌ها آورده شده است. لازم به ذکر است که برای تنظیم پارامترها ۵ نمونه مسئله سخت که هم از نظر درصد انحراف از بهترین جواب شناخته شده و هم از نظر طولانی بودن زمان حل وضعیت مناسبی نداشتند، از بین ۳۰ نمونه مسئله انتخاب‌شده و تنظیم پارامترها بر اساس آن‌ها انجام شده است.

تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک: در الگوریتم ژنتیک برای مسئله تخصیص و زمان‌بندی می‌خواهیم دو پارامتر تعداد جمعیت ایجادشده و درصد نخبه‌گزینی در هر تکرار را تنظیم کنیم. از

جدول ۵. سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم ژنتیک در زمان‌های مختلف

محدودیت زمانی (ثانیه)												پارامترها
۶۰			۳۰			۱۰			۱			
سطوح			سطوح			سطوح			سطوح			
۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	$ Pop $
۵۰	۴۰	۳۰	۴۰	۳۰	۲۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۵	۱۰	۵	<i>Elite</i>
%۳۰	%۲۰	%۱۰	%۳۰	%۲۰	%۱۰	%۳۰	%۲۰	%۱۰	%۳۰	%۲۰	%۱۰	

جدول ۶. مقادیر منتخب هر پارامتر برای الگوریتم ژنتیک در زمان‌های مختلف

محدودیت زمانی (ثانیه)				پارامترها
۶۰	۳۰	۱۰	۱	
۴۰	۳۰	۱۰	۱۰	$ Pop $
%۳۰	%۳۰	%۳۰	%۱۰	<i>Elite</i>

جدول ۷. سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم تجمع ذرات آشوبی در زمان‌های مختلف

محدودیت زمانی (ثانیه)												پارامترها
۶۰			۳۰			۱۰			۱			
سطوح			سطوح			سطوح			سطوح			
۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	
۸۰	۶۰	۴۰	۲۰	۱۵	۱۰	۲۰	۱۵	۱۰	۱۵	۱۰	۵	p_{rt}
۱۵	۱۰	۵	۱۵	۱۰	۵	۱۵	۱۰	۵	۱۵	۱۰	۵	v_{max}
(۲۰، ۱۰)	(۱۰، ۵)	(۴، ۲)	(۲۰، ۱۰)	(۱۰، ۵)	(۴، ۲)	(۲۰، ۱۰)	(۱۰، ۵)	(۴، ۲)	(۲۰، ۱۰)	(۱۰، ۵)	(۴، ۲)	(c_1, c_2)
%۵۰	%۳۳	%۲۰	%۵۰	%۳۳	%۲۰	%۵۰	%۳۳	%۲۰	%۵۰	%۳۳	%۲۰	$Nobest$
۱۵	۱۰	۵	۱۵	۱۰	۵	۱۵	۱۰	۵	۱۵	۱۰	۵	$Noimp$
(۰/۴، ۰/۹)	(۰/۹۵، ۰/۲)	(۱، ۰)	(۰/۹۰، ۰/۴)	(۰/۹۵، ۰/۲)	(۱، ۰)	(۰/۹۰، ۰/۴)	(۰/۹۵، ۰/۲)	(۱، ۰)	(۰/۹۰، ۰/۴)	(۰/۹۵، ۰/۲)	(۱، ۰)	(we^{min}, we^{max})

جدول ۸. مقادیر منتخب پارامترهای الگوریتم تجمع ذرات آشوبی

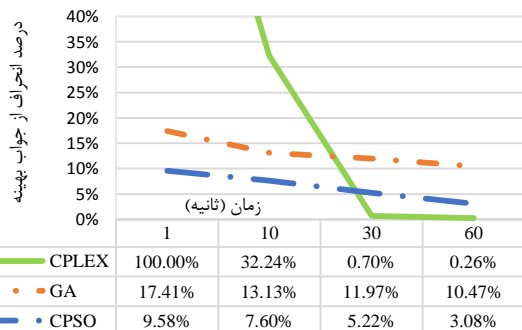
محدودیت زمانی (ثانیه)				پارامترها
۶۰	۳۰	۱۰	۱	
۸۰	۱۰	۱۵	۱۵	p_{rt}
۵	۵	۵	۱۰	v_{max}
(۲، ۴)	(۲، ۴)	(۲، ۴)	(۲، ۴)	(c_1, c_2)
%۳۳	%۲۰	%۳۳	%۲۰	$Nobest$
۵	۵	۵	۵	$Noimp$
(۰/۴، ۰/۹)	(۰، ۱)	(۰/۴، ۰/۹)	(۰/۴، ۰/۹)	(we^{min}, we^{max})

۲-۳. ارزیابی روش‌های پیشنهادی

برای دستیابی به بهترین جواب این مسئله لازم است مدل ریاضی ارائه‌شده را در نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX 12.3 بدون محدودیت زمان اجرا کرد اما به دلیل موجه بودن زمان حل و به دست آوردن جواب با انحراف خیلی کم نسبت به جواب بهینه، محدودیت زمانی را ۱ ساعت قرار می‌دهیم.

به منظور مقایسه بهتر روش حل دقیق (حل با نرم‌افزار) با الگوریتم ژنتیک و تجمع ذرات آشوبی، مدل را با دادن محدودیت زمانی ۱، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ ثانیه اجرا کرده و شرط خاتمه الگوریتم‌ها را نیز همین محدودیت زمانی قرار می‌دهیم. از آنجایی که نرم‌افزار از یک الگوی ثابت برای حل مدل داده‌شده به آن استفاده می‌کند، گذاشتن تکرار برای آن به ازای هر نمونه مسئله تغییری در جواب‌های نهایی ایجاد نخواهد کرد؛ اما گذاشتن ۵ تکرار برای هر نمونه مسئله در الگوریتم ژنتیک و تجمع ذرات آشوبی منجر به کاهش اثر تصادفی مربوط به تولید جواب اولیه می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده از روش حل دقیق، ژنتیک و تجمع ذرات آشوبی مسئله تخصیص و زمان‌بندی با در نظر گرفتن محدودیت زمانی به شکل (۱) خواهد بود. باید توجه کرد که نرم‌افزار برای هیچ نمونه مسئله‌ای در زمان ۱ ثانیه و بعضی از نمونه مسائل در زمان ۱۰ و ۳۰ ثانیه نتوانسته است جواب موجهی پیدا کند.



شکل ۱. بررسی انحرافات از جواب بهینه

نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک در شکل (۲) آمده است. همان‌طور که انتظار داریم با گذر زمان، میزان درصد انحراف از بهترین جواب شناخته‌شده کاهش می‌یابد و میانگین درصد انحراف در تکرارهای مختلف در مدت زمان ۶۰ ثانیه‌ای از ۱۷ درصد به ۱۱ درصد می‌رسد که به‌عبارتی می‌توان گفت افزایش زمان منجر به کاهش ۳۷ درصدی انحرافات شده است. اگر محدودیت زمان حل برای این الگوریتم وجود نداشته باشد با توجه به سیر کاهشی انحرافات بهتر است زمان حل را افزایش داده تا نتایج بهتری حاصل شود.

سایر پارامترها، میزان ضریب اهمیت هر هدف به صورت تصادفی نسبت به آخرین مسئله ایجاد شده بین $[-0.1, 0.1]$ درصد تغییر کنند. نتایج حاصل از درصد تغییر تابع هدف نسبت به مسئله اصلی در شکل (۴) آمده است.

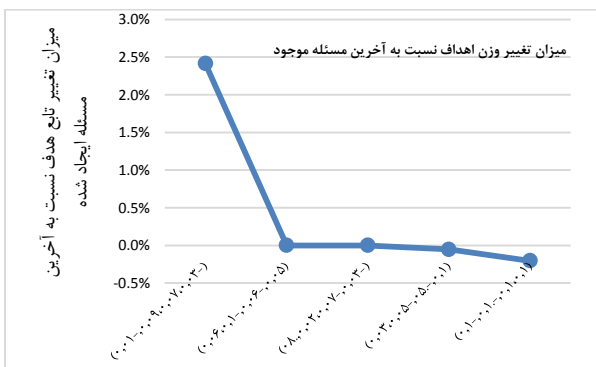


شکل ۴. میزان حساسیت تابع هدف به تغییرات ضریب اهمیت b_j

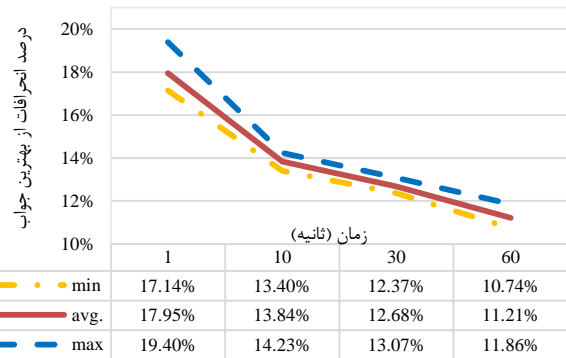
همان‌طور که در شکل (۴) آمده است، تابع هدف نسبت به تغییرات ضریب اهمیت اهداف حساس است. بنابراین برای تعیین این پارامتر باید دقت کافی را داشت.

۳-۳-۲. تحلیل حساسیت h_j

یکی دیگر پارامترهای مهم موجود در مسئله میزان وزن اهداف است. برای تعیین میزان حساسیت تابع هدف نسبت به این پارامتر یک نمونه مسئله با ۴ هدف در نظر گرفته و نمونه مسائل جدید با ثابت بودن سایر پارامترها و تغییر تصادفی وزن اهداف بین $[-0.1, 0.1]$ درصد وزن در آخرین مسئله ایجاد شده تولید می‌شود. نتایج حاصل از درصد تغییر تابع هدف نسبت به مسئله اصلی در شکل (۵) آمده است. با توجه به شکل (۵) واضح است که تغییرات تابع هدف نسبت به این پارامتر آنقدر محسوس نیست.

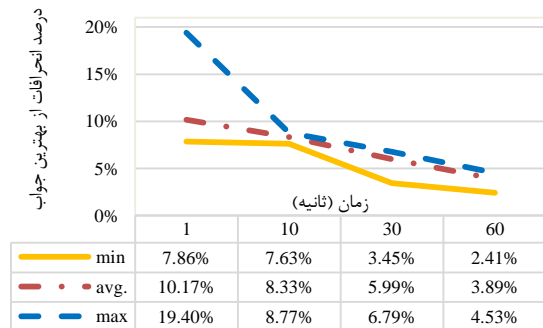


شکل ۵. میزان حساسیت تابع هدف نسبت به تغییرات وزن h_j



شکل ۲. بررسی انحراف از جواب بهینه در الگوریتم ژنتیک با گذر زمان

نتایج به دست آمده از الگوریتم تجمع ذرات در شکل (۳) آمده است. همان‌طور که انتظار داریم با گذر زمان، میزان درصد انحراف از بهترین جواب شناخته شده کاهش می‌یابد و میانگین درصد انحراف در تکرارهای مختلف در مدت زمان ۶۰ ثانیه‌ای از ۱۰ درصد به حدود ۴ درصد می‌رسد که به عبارتی می‌توان گفت افزایش زمان منجر به کاهش ۶۱ درصدی انحرافات شده است. اگر محدودیت زمانی نداشته باشیم بهتر است محدودیت زمانی این الگوریتم را ۶۰ ثانیه قرار داده چراکه جواب‌های بهتری حاصل می‌شود.



شکل ۳. بررسی انحراف از جواب بهینه در الگوریتم تجمع ذرات آشوبی با گذر زمان

۳-۳-۳. تحلیل حساسیت پارامترها

در این زیربخش دو تا از پارامترهای مهم انتخاب شده و هدف تعیین میزان حساسیت آن‌ها بر جواب مسئله است. در واقع در این بخش می‌خواهیم بدانیم که تغییر پارامتر b_j و h_j چقدر بر روی جواب تابع هدف اثرگذار است.

۳-۳-۱. تحلیل حساسیت b_j

به منظور تحلیل حساسیت تابع هدف با تغییر b_j ابتدا نمونه مسئله‌ای با ۴ هدف شناخته شده انتخاب کرده و سپس نمونه مسائل جدید بدین شکل ایجاد می‌شوند که با ثابت نگه داشتن

۴. نتیجه‌گیری

هدف از انجام این مقاله، مدل‌سازی مسئله تخصیص و زمان‌بندی سلاح‌های پایگاه‌های آتش خودی به اهداف مهاجم شناخته‌شده در صحنه نبرد با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در فضای عملیاتی و حفاظت از دارایی‌های خودی است. به این منظور ابتدا مرور جامعی بر روی ادبیات موضوع انجام شده و سپس مدل‌سازی ریاضی مسئله با توجه به فرضیات مختلف بررسی شده است. بدین منظور یک مدل ریاضی برای تخصیص و زمان‌بندی شلیک سلاح‌ها توسعه داده شده است و تلاش شده است که این مدل به صورت خطی بیان شود که بتوان از نرم‌افزارهای موجود تحقیق در عملیات به منظور حل بهینه آن استفاده کرد. سپس الگوریتم ژنتیک و تجمع ذرات آشوبی برای این مسئله ارائه شده است. اگر بخواهیم یک نتیجه‌گیری کلی داشته باشیم، باید گفت در صورت مجاز بودن به استفاده از نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX 12.3 و داشتن فرصت زمانی بیش از ۳۰ ثانیه، بهتر است از این نرم‌افزار در حل مسئله استفاده شود؛ اما در صورت مجاز نبودن به استفاده از این نرم‌افزار و یا داشتن فرصت زمانی محدود، استفاده از الگوریتم تجمع ذرات آشوبی برای حل مدل ارائه‌شده تخصیص و زمان‌بندی توصیه می‌شود.

۵. مراجع‌ها

- [11] Peymankar, M. "Local Searches and Tabu Search Algorithms for Concurrent Location and Weapons Assignment Problems of Warships"; M.Sc. Diss., Ferdowsi University of Mashhad, 2013 (In Persian).
- [12] Taghavi, N. R. "Scheduling Anti-Air Weapon in Combat System of Warship"; M.Sc. Diss., Ferdowsi University of Mashhad, 2012 (In Persian).
- [13] Kalyanam, K.; Rathinam, S.; Casbeer, D.; Pachter, M. "Optimal Threshold Policy for Sequential Weapon Target Assignment"; IFAC-Papers Online 2016, 49, 7-10.
- [14] Mei, Z.; Peng, Z.; Zhang, X. "Optimal Dynamic Weapon-Target Assignment Based on Receding Horizon Control Heuristic"; Control & Automation 2017, 876-88
- [15] Chang, Y. Z.; Li, Z. W.; Kou, Y. X.; Sun, Q. P.; Yang, H. Y.; Zhao, Z. Y. "A New Approach to Weapon-Target Assignment in Cooperative Air Combat"; Mathematical Problems in Engineering 2017, 1-17.
- [16] Li, Y.; Kou, Y.; Li, Z.; Xu, A.; Chang, Y. "A Modified Pareto Ant Colony Optimization Approach to Solve Biobjective Weapon-Target Assignment Problem"; International Journal of Aerospace Engineering 2017, 1-14.
- [17] Holland, J. H. "Adaptation in Natural and Artificial Systems: an Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence"; MIT Press, 1992.
- [18] Kennedy, J. "Particle Swarm Optimization. in Encyclopedia of Machine Learning"; Springer 2011, 760-766.
- [19] Kennedy, J.; Eberhart, R. C. "A Discrete Binary Version of the Particle Swarm Algorithm"; International Conference on Computational Cybernetics and Simulation, Systems, Man, and Cybernetics 1997, 4104-4108.
- [1] Ahuja, R. K.; Kumar, A.; Jha, K. C.; Orlin, J. B. "Exact and Heuristic Algorithms for The Weapon-Target Assignment Problem"; Oper. Res. 2007, 55, 1136-1146.
- [2] Hosein, P. A.; Walton, J. T.; Athans, M. "Dynamic Weapon-Target Assignment Problems With Vulnerable C2 Nodes"; DTIC Document: 1988.
- [3] Cai, H.; Liu, J.; Chen, Y.; Wang, H. "Survey of the Research on Dynamic Weapon-Target Assignment Problem"; J. Sys. Eng. Electronics 2006, 17, 559-565.
- [4] Lloyd, S. P.; Witsenhausen, H. S. "In Weapons Allocation is NP-Complete"; Proc. Int. Conf 1986 Summer Computer Simulation Conference 1986, 1054-1058.
- [5] Cha, Y. H.; Kim, Y. D. "Fire Scheduling for Planned Artillery Attack Operations Under Time-Dependent Destruction Probabilities"; Omega 2010, 38, 383-392.
- [6] Lötter, D.; Nieuwoudt, I.; Van Vuuren, J. "A Multiobjective Approach Towards Weapon Assignment in A Ground-Based Air Defence Environment"; ORION 2013, 29, 31-54.
- [7] Karasakal, O. "Optimal Air Defense Strategies for Naval Task Group"; Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, 2004.
- [8] Gülez, T. "Weapon-Target Allocation and Scheduling for Air Defense with Time Varying Hit Probabilities"; Ph.D. Thesis., Middle East Technical University, 2007.
- [9] Cho, G. "Hybrid Nested Partitions Method with Intelligent Greedy Search for Solving Weapon-Target Assignment Problem"; Iowa State University, 2009.
- [10] Turan, A. "Algorithms for the Weapon-Target Allocation Problem"; Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, 2012.

پیوست‌ها

در این بخش با ارائه یک مثال موردی به بررسی مسئله و نحوه تخصیص و زمان‌بندی سلاح‌ها پرداخته می‌شود. ورودی‌ها و پارامترهای مورد نیاز به شرح جدول ۹ است. تعداد سلاح‌های موجود بر روی هر لانچر، برد هر سلاح و نوع آن (هدایت‌شونده یا معمولی) در این ورودی به شرح جدول‌های ۱۰ تا ۱۳ است. لازم به ذکر است که در مدل‌سازی انجام شده فرض بر این است که شماره اولین لانچر مربوط به لانچر فرمانده است که هیچ سلاحی ندارد. میزان دقت هر سلاح (A_{ik}) ، ضریب خطر هر هدف برای هر لانچر (δ_{ij}) و متوسط میزان تخریب اهداف با سلاح‌های مختلف برای یک شناور ۳۵۰۰ تنی (d_{ikj}) در جداول (۱۴) تا (۱۶) آورده شده است. میزان نابودی هر تهدید در جدول (۱۷) آمده است. سرعت پرواز هر سلاح از هر لانچر و میزان زمان لازم برای آماده‌سازی لانچر برای شلیک بعدی در جدول‌های (۱۸) و (۱۹) آمده است. بیشترین برد پیش‌بینی شده برای هر هدف در جدول (۱۳) آورده شده است. موقعیت عرض و طول جغرافیایی هر لانچر، هر هدف، هر مکان کاندید، هر مکان حفاظت‌شده به-ترتیب در جداول (۲۰) تا (۲۲) آمده است. سرعت، زاویه حرکت و وزن تقریبی اهداف در جدول (۲۳) آمده است. میزان خطر هر هدف برای هر منطقه حفاظت‌شده در جدول (۲۴) آمده است. با

جدول ۱۱. برد سلاح‌ها r_{ik}^{min} بر حسب کیلومتر

شماره سلاح			شماره لانچر
۳	۲	۱	
	۹۵ (۳۰)	۲۰۰ (۵۰)	۲
	۲۰۰ (۵۰)	۲۰۰ (۵۰)	۳
	۳۰۰ (۶۰)	۳۰۰ (۶۰)	۴

جدول ۱۲. نوع سلاح‌های موجود بر روی لانچر (φ_{ik})

شماره سلاح			شماره لانچر
۳	۲	۱	
	۰	۱	۲
۱	۰	۰	۳
	۱	۱	۴

جدول ۱۳. بیشترین برد هدف به کیلومتر

هدف	۱	۲	۳	۴
بیشترین برد (r_j')	۱۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۵۰۰

جدول ۱۴. دقت هر سلاح (a_{ik})

شماره سلاح			شماره لانچر
۳	۲	۱	
	۰/۸	۰/۸	۲
۰/۸	۰/۸	۰/۸	۳
	۰/۸	۰/۸	۴

جدول ۱۵. ضریب خطر هر هدف برای هر لانچر (δ_{ij})

شماره هدف				شماره لانچر
۴	۳	۲	۱	
۰/۸۶۹۱۳۱	۰/۶۲۵۰۱۶	۰/۸۰۱۲۶۰	۰/۲۰۰۸۷۶	۱
۰/۸۴۸۰۰۳	۰/۳۱۶۳۶۴	۰/۶۹۷۳۵۱	۰/۵۹۴۵۱۰	۲
۰/۵۷۷۵۴۸	۰/۶۶۴۱۳۲	۰/۵۵۹۴۷۴	۰/۳۲۵۳۱۳	۳
۰/۲۹۹۶۳۷	۰/۵۱۵۵۵۲	۰/۴۱۲۷۹۶	۰/۷۶۶۱۱۸	۴

جدول ۱۶. متوسط میزان تخریب اهداف با سلاح‌های مختلف برای یک شناور ۳۵۰۰ تنی (d_{ikj})

شماره سلاح												شماره هدف	شماره لانچر
۳				۲				۱					
۴	۳	۲	۱	۴	۳	۲	۱	۴	۳	۲	۱	۲	۳
				۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸
				۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول ۱۷. میزان نابودی هر هدف

هدف	۱	۲	۳	۴
میزان نابودی (e_j)	۰	۰	۰	۰

حل این مسئله تخصیص و زمان بندی سلاح‌ها به اهداف بدین شکل است که پایگاه آتش ۲ در زمان ۵۹ و ۶۰ با سلاح‌های ۱ و ۲ خود به اهداف ۳ و ۴ شلیک می‌کند. و پایگاه آتش ۳ با سلاح‌های ۱، ۲ و ۳ خود در زمان‌های ۱۷، ۲۱ و ۱۹ به هدف ۲ شلیک می‌کند.

این تخصیص سلاح منجر به تخریب اهداف می‌شود و با توجه به خروجی‌های مدل می‌توان دریافت که شلیک به هدف ۲ از لحظه ۱۷ شروع می‌شود و میزان تخریب هدف ۴۱ درصد است و تا لحظه ۱۹ که شلیک مجدد به آن انجام می‌شود میزان تخریب ثابت مانده و در لحظه ۱۹ به ۷۷ درصد می‌رسد و با شلیک در لحظه ۲۱ این هدف کاملاً نابود شده است (چون با این شلیک میزان تخریب بیشتر مساوی یک می‌شود) و دیگر مجاز به شلیک به این هدف نیست. میزان تخریب هدف سوم در لحظه ۵۹ به اندازه ۶۲ درصد و با شلیک در زمان ۶۰ به هدف چهارم میزان ۶۴ درصد تخریب حاصل می‌شود. همچنین می‌توان دریافت که شلیک‌های انجام شده از پایگاه‌های آتش ۲ و ۳ منجر به حفاظت از مناطق حفاظت شده ۲، ۳ و ۴ شده است.

جدول ۹. پارامترهای ورودی

پارامتر	مقدار
تعداد لانچرها شامل فرمانده و سایرین (N)	۴
تعداد اهداف شناخته شده (M)	۴
مدت زمان در نظر گرفته شده برای نبرد ($ T $) ثانیه	۶۰
تعداد مناطق حفاظت شده ($ P $)	۴
زمان شناسایی مکان شلیک (ut) ثانیه	۱۰
زمان مانور هدف (mt_j) ثانیه	۱۰
میزان اهمیت تابع هدف اول و دوم (α_1 و α_2)	۰/۶ و ۰/۳

جدول ۱۰. تعداد سلاح در هر لانچر ($|K_i|$)

لانچر	۱	۲	۳	۴
تعداد سلاح	۰	۲	۳	۴

جدول ۱۸. سرعت پرواز هر سلاح از روی هر لانچر (fl_{ik}) بر حسب متر بر ثانیه

شماره سلاح				شماره لانچر
۳	۲	۱		
	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۲	
۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۳	
	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۴	

جدول ۱۹. زمان مورد نیاز برای آماده‌سازی بر حسب ثانیه

لانچر				زمان آماده‌سازی (S)
۴	۳	۲	۱	
			۰	
۱	۲	۱		

جدول ۲۰. موقعیت هر پایگاه آتش

۴	۳	۲	۱	پایگاه آتش
۳۰/۰۸۶۵۱۹	۳۰/۰۶۱۴۰۳	۳۰/۰۷۴۷۱۳	۳۰/۰۷۹۰۱۲	عرض جغرافیایی
۴۸/۲۸۵۲۴۲	۴۸/۴۰۳۴۰۴	۴۸/۴۶۶۹۳۸	۴۸/۳۲۴۶۰۴	طول جغرافیایی

جدول ۲۱. موقعیت اولیه هر هدف

۴	۳	۲	۱	هدف
۲۹/۲۴۵۶۷۸	۲۹/۲۳۴۰۳۷	۲۹/۲۱۷۸۶۹	۲۹/۲۱۶۳۱۴	عرض جغرافیایی
۴۸/۶۰۰۷۳۵	۴۸/۵۲۳۵۱۸	۴۸/۵۸۸۷۰۳	۴۸/۶۱۷۹۵۸	طول جغرافیایی

جدول ۲۲. موقعیت مناطق حفاظت شده

۴	۳	۲	۱	مناطق حفاظت شده
۳۰/۰۸۶۹۸۹	۳۰/۰۶۴	۳۰/۰۷۴	۳۰/۰۶۱۴۰۳	عرض جغرافیایی
۴۸/۳۸۶	۴۸/۴۰۷	۴۸/۴۶۶	۴۸/۴۰۳۴۰۴	طول جغرافیایی

جدول ۲۳. سرعت، زاویه حرکت و وزن هر هدف

۴	۳	۲	۱	هدف
۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۱	سرعت بر حسب متر بر ثانیه (U_j)
۳۴	۱۳۱	۱۵	۲۳۵	زاویه حرکت (β_j)
۲۵۰۰	۳۵۰۰	۳۰۰۰	۲۵۰۰	وزن تقریبی به تن (h_j)

جدول ۲۴. ضریب خطر هر هدف برای هر ناحیه حفاظت شده (W'_{pj})

شماره منطقه حفاظت شده				شماره هدف	
۴	۳	۲	۱		
۰/۵۷	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۳۰		۱
۰/۵۰	۰/۶۳	۰/۳۵	۰/۳۲		۲
۰/۹۹	۰/۶۳	۰/۲۰	۰/۳۳	۳	
۰/۹۹	۰/۵۸	۰/۳۵	۰/۳۵	۴	