



## ارائه یک الگوی پایدار برای ناوگان حمل و نقل نیروی هوایی در عملیات نظامی با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار

پژمان صالحی<sup>۱</sup> | مهران خلیج<sup>۲</sup> | داود جعفری<sup>۳</sup>

### چکیده

در چارچوب جنگ‌های مدرن امروزی، نیروهای مسلح با چالش‌ها و موانع عدیده‌ای مواجه هستند که می‌تواند قدرت پیش‌بینی‌های رزم‌ها را در عملیات نظامی به شدت محدود نماید. راهبردهای تدافعی یا تهاجمی در یک عملیات نظامی از طریق استنتاج و در نتیجه پیش‌بینی منابع لازم (نیروی نظامی، تسلیحات و غیره...) برای تأمین اهداف اصلی مأموریت‌های نظامی، به یک پشتیبانی کامل و برنامه‌ریزی شده و نیز تسهیلات ضروری و مطلوب حمل و نقل برای جابه‌جایی نفرات و ادوات جنگی نیازمند است. از این رو طراحی یک مدل ریاضی که بتواند برنامه‌ریزی حمل و نقل نظامی را مشخص سازد، اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. در مدل‌های حمل و نقل نظامی، برآورده ساختن تقاضاهای مقصد برای ترابری تجهیزات و نیروهای نظامی با توجه به محدودیت‌های ظرفیت در نقاط گوشه عملیاتی (منطقه موجه جواب) به مقاصد جنگی، در واقع ناظر بر فن تصمیم‌گیری برای یافتن بهترین گزینه‌ها با توجه به محدودیت‌های زمانی، مسیریابی و ظرفیت در حمل و نقل ادوات به منطقه جنگی است. حال با توجه به آنکه مدل‌های ریاضی حمل و نقل تجهیزات نظامی غالباً دومرحله‌ای، غیرخطی و نام‌حزب هستند از این رو در تحقیق حاضر برای فرموله سازی و طراحی مدل از روش خطی سازی و یک مرحله ای سازی ورود نمونه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری در فضای حالت نزدیک به محیط واقعی به توسعه رویکردهای اکتشافی برای یافتن گزینه‌های بهینه پرداخته شده است. همچنین در این مطالعه لحاظ نمودن اهداف بعضاً متضاد در فضای ابهام و عدم قطعیت که در آن گزینه‌ها برای کسب منابع در رقابت هستند، بهره‌گیری از رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه را برای محققان به منظور یافتن مجموعه جواب موجه به این رقابت‌ها در شرایط رویارویی با عدم اطمینان و ابهام موجود در محیط‌های عملیاتی به منظور طرح‌ریزی و سازماندهی ناوگان حمل و نقل ضروری نموده است. بنابراین در این مطالعه پس از تعیین مفروضات، متغیرها و پارامترهای مدل تصمیم‌گیری به بررسی و ارزیابی میزان استواری مدل حمل و نقل ناوگان نظامی در برابر ریسک‌های محتمل و محدودیت‌های موجود در سناریوهای مختلف از طریق الگوریتم ژنتیک پرداخته گردید. نتایج آزمون‌های محاسباتی نشان داد که الگوریتم‌های اکتشافی در مقایسه نمونه‌های کوچکتر یک حل‌کننده مطلوب برای رسیدن به راه‌حل‌های بهینه محسوب می‌شوند.

**کلیدواژه‌ها:** روش استواری، ناوگان حمل و نقل نظامی، عملیات جنگی، نیروی هوایی، الگوریتم ژنتیک

DOR: 20.1001.1.20086121.1402.22.99.8.8

۱. نویسنده مسئول: دکتری تخصصی، گروه مهندسی صنایع آموزشی دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه آزاد واحد پرنده، تهران، ایران  
pejmansalehi.metro@gmail.com

۲. دانشیار، دانشیار گروه آموزشی مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرنده، تهران، ایران

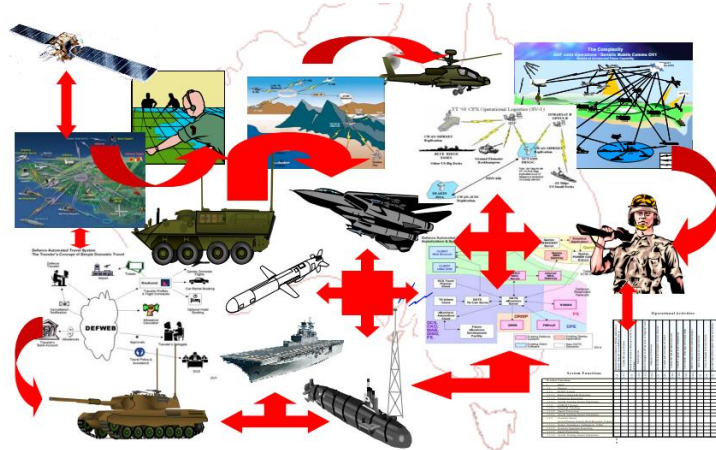
۳. دکترای تخصصی دانشیار، دانشیار گروه آموزشی مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرنده، تهران، ایران

## مقدمه

در فرایندهای نظامی یکی از مهم‌ترین چالش‌های فراروی فرماندهان و طراحان عملیات برای برنامه‌ریزی؛ ابهام، اطلاعات ناقص و عدم قطعیت در محیط‌های جنگی است که گاهی عدم اطمینان موجود در فرایندهای آن همسان سایر پدیده‌های حساس، تصمیم‌سازان دفاعی را متأثر می‌سازد (ژائو و همکاران، ۲۰۲۱). در فرایند تجزیه و تحلیل و طراحی سامانه‌های نظامی؛ نیازهای جنگی، وظایف کارکردی، نقاط قوت، ضعف‌ها، تهدیدها و فرصت‌های پنهان در محیط‌های عملیاتی، غالباً ماهیتی غیرقابل پیش‌بینی داشته و وجوه آن میان موجودیت‌های مختلف در جریان است (امرسون ۲، ۲۰۰۳). در این بین یکی از چالش‌های عمده‌ی فراروی برنامه‌ریزی راهبردی، مواجهه‌ی با طیف گسترده‌ی عدم قطعیت در ابعاد مختلف عملیات جنگی است (لاوچ و وسولکوفسکی ۳، ۲۰۱۸). از طرفی روند روبه‌رشد و نرخ فزاینده‌ی تغییرات فن آورانه، یک فرصت محیطی جدید برای نوسازی و ارتقای نیروهای دفاعی کشور محسوب می‌شود که به طور مشابه در سوی مقابل، دشمنان بالقوه را نیز از نتایج آن برخوردار می‌سازد (بار یام ۴، ۲۰۱۳). از این رو به منظور رویارویی با چالش‌های فراروی فرماندهی لازم است منشأهای بروز عدم اطمینان و ابهام‌های محیطی شناسایی شده و ضمن محاسبه میزان عدم قطعیت، گزینه‌های مؤثر و پایدار برای بهینه‌سازی حمل و نقل نظامی در شرایط غیرقابل پیش‌بینی محیط جنگی و فرصت‌های برآمده از آن، مورد ارزیابی قرار گیرد (تیلور و لین ۵، ۲۰۱۴). از سوی دیگر باتوجه به اهداف متعدد و رقابت میان آن‌ها برای کسب منابع و تمایز ویژه محیط‌های نظامی از سایر محیط‌ها، نمی‌توان یک راه‌حل بهینه‌ی منحصر به فرد از مجموعه موجه جواب ارائه نمود. از این رو لازم است گوشه بهینه‌ای ارائه گردد که بتواند به چالش‌های نوظهور محیط‌های نظامی تحت شرایط ریسک و عدم قطعیت پاسخ دهد (یانگ ۶ و همکاران، ۲۰۱۶). به منظور ارتقای سطح قابلیت اطمینان برای استقرار مؤثر نیروها و ادوات نظامی، تصمیم‌سازان و طراحان نظامی عمدتاً می‌کوشند برنامه‌های مرتبط با بهبود مستمر

1. Zhao
2. Emerson
3. Lausch & Wesolkowski
4. Bar-Yam
5. Taylor & Lane
6. Yang

حمل و نقل را از طریق مدرن‌سازی سیستم‌ها در چارچوب متدولوژی‌های مدیریت پروژه و خط‌مشی‌های فرماندهی از طریق برنامه‌های انعطاف‌پذیر پیاده‌سازی نمایند (لی و اپورتانو<sup>۱</sup>، ۲۰۲۰). ناوگان حمل و نقل تسهیلات نیروهای مسلح از وسایل نقلیه جاده‌ای و ریلی، آبی، انواع بالگردها و هواپیماهای حمل نیروهای نظامی یا تجهیزات باری تشکیل شده که لحاظ آن در طراحی و پیاده‌سازی تصمیمات نظامی به عنوان یک عامل کلیدی موفقیت لحاظ می‌شود (براون و کلاین<sup>۲</sup>، ۲۰۲۱). ناوگان حمل و نقل نظامی در عملیات جنگی هنگامی کارا و مؤثر است که بتواند از پتانسیل‌های موجود برای حداکثرسازی هدف‌هایی نظیر جابه‌جایی تجهیزات با ارزش بالا در جنگ نظیر تانک و نفربر و غیره... بهترین استفاده را نماید (آپادیا و سرینیواسان<sup>۳</sup>، ۲۰۱۵). تصویر شماره (۱) فعالیت‌های مرتبط با سناریونویسی و معماری یک عملیات نظامی را با لحاظ ناوگان حمل و نقل و نیروهای نظامی بر اساس جریان اطلاعات و ادوات نشان می‌دهد.



تصویر (۱) سناریونویسی و معماری یک عملیات نظامی را با لحاظ ناوگان حمل و نقل و نیروهای نظامی بر اساس جریان اطلاعات و ادوات (منبع: آپادیا و سرینیواسان، ۲۰۱۵)

با این حال مطالعه پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که بازنشسته نمودن ناوگان حمل و نقل فرسوده و نیز ارتقا و مدرن‌سازی آن از منظر مالی در طبقه‌بندی ردیف بودجه‌های پرهزینه برای نیروهای مسلح به شمار می‌آید (هلیر<sup>۴</sup>، ۲۰۲۰). ناوگان حمل و نقل نیروهای مسلح به طور عمده از دو عامل

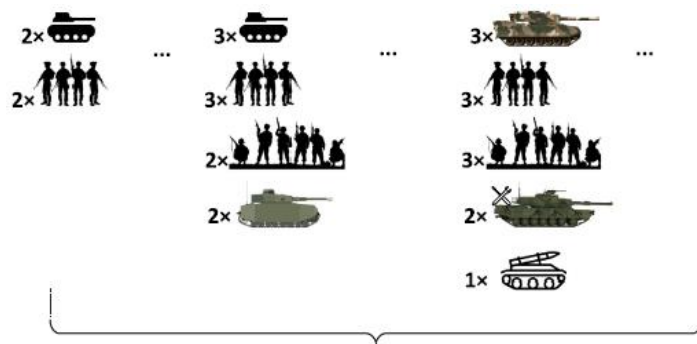
1. Li & Epureanu
2. Brown & Kline
3. Upadhyya & Srinivasan
4. Hellyer

پایه‌ای تشکیل شده است که عبارت‌اند از: نخست الزاماتی که چارچوبی دائمی را برای راهبردها و خط‌مشی‌های فرماندهی و تصمیم‌گیران نظامی فراهم می‌آورد و دوم: عوامل مرتبط با جنبه‌ها و ابعاد برنامه‌ریزی عملیاتی نظیر زمان، مسافت و زیرساخت که در مجموع می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر عملکرد ناوگان حمل و نقل نیروهای مسلح داشته باشند (ووتاشک و وسولکوفسکی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷). مطالعه انجام شده توسط دنک<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۱) در خصوص افزایش بهره‌وری ناوگان حمل و نقل در هنگ‌های نظامی نشان می‌دهد که در کشورهای نظیر استرالیا، اندونزی و ژاپن، هزینه‌های مترتب بر عملیات به‌روزرسانی، توسعه و بهبود ناوگان حمل و نقل نظامی ناکارآمد از منظر نگهداری و تعمیرات، ارتقای ظرفیت و به‌هنگام‌سازی سیستم‌ها و زیرسیستم‌های فنی و غیره... برای نیروهای مسلح این کشورها به طور متوسط تا حدود ۱۴ میلیارد دلار در طی سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ هزینه در برداشته است. بنابراین با توجه به هزینه‌های بالای فرایند نگهداشت و ارتقای تجهیزات نظامی؛ اهمیت مدل‌سازی و استفاده از روش‌های بهینه‌سازی استوار و سایر ابزارهای شبیه‌سازی برای انجام محاسبات دقیق مرتبط با مسائل ترکیبی و تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های مختلف آن‌ها در ناوگان حمل و نقل نیروهای مسلح ضرورت می‌یابد (جولیو و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۲۱). از طرفی به دلیل وجود تنوع فراوان در زمینه‌هایی که ناوگان حمل و نقل نیروهای مسلح در آن فعالیت می‌نماید، نظیر بخش‌های جاده‌ای و ریلی (خودروهای نظامی، تانک و نفربرهای رزمی یا قطارهای نظامی)، شناورهای آبی، بالگردها و هواپیماهای نظامی و غیره... فرماندهی ناوگان حمل و نقل نظامی با مسائل متعددی به‌ویژه در محیط‌های تاکتیکی مواجه است که گاه به علت پیچیدگی‌های محیطی و عدم قطعیت داده‌ها، حل آن‌ها و یافتن مجموعه موجه جواب را دشوار می‌نماید (اوسیلی<sup>۴</sup>، ۲۰۲۰). از این رو کارکرد رویکردهای چندهدفه برای زمان‌بندی ناوگان حمل و نقل در مأموریت‌های نظامی و کاربرد هوش محاسباتی برای کمک به تصمیم‌گیران و توسعه روش‌های تحلیل مسائل ترکیبی مترتب بر آن با لحاظ متغیرهای احتمالی و آینده‌نگری به صورت فزاینده‌ای روبه‌رشد است (بایکاس اوغلو<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). نمونه‌هایی از کاربرد علمی رویکردهای اکتشافی برای حل مسائل ترکیبی ناوگان

1. Wojtaszek & Wesolkowski
2. Deng
3. Guliev
4. Ausseil
5. Baykasoğlu

حمل و نقل در سازمان‌های نظامی برخی کشورها از جمله نیروی دریایی ایالات متحده، وزارت دفاع کانادا، نیروی زمینی چین و نیروی هوایی روسیه دیده می‌شود (براون و کلاین<sup>۱</sup>، ۲۰۲۱). بررسی چارچوب‌های مفهومی مرتبط با پشتیبانی نیروهای مسلح و محاسبات ناوگان حمل و نقل نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری‌های راهبردی در خصوص نحوه تخصیص و انتساب موجودیت‌های نظامی به منظور انجام دقیق یک مأموریت جنگی، بر مواجهه با وضعیت‌های خاص عملیاتی تمرکز دارد (خاندوزی، ۱۳۹۹). پیچیدگی‌های ساختاری برای یافتن بهترین ترکیب و تخصیص ممکن ناوگان از مجموعه جواب‌های موجه به منظور برآورده نمودن نیازها و تحقق مقاصد عملیاتی به طوری که با آرایش رزمی نیروها انطباق داشته باشد، به مقیاس آمیختگی ناوگان در یک مطالعه امکان‌سنجی اولیه و فرموله نمودن روابط بستگی دارد (رجبی مشتاقی، ۱۴۰۰). اگرچه بهینه‌سازی استوار متداول‌ترین شیوه مواجهه با مسائل مرتبط با محاسبات ناوگان حمل و نقل نظامی است؛ اما پیاده‌سازی تکنیک‌های شبیه‌سازی به طور قابل ملاحظه‌ای در الگوهای بهینه‌سازی، خروجی‌های مدل را به واقعیت نزدیک می‌سازد (همان منبع، ۱۴۰۰). در ارزیابی روابط ریاضی ناوگان حمل و نقل، عمدتاً الگوی «مبتنی بر سناریو» به منظور برآورد راندمان بخشی از ناوگان که برای انجام وظیفه یا برآوردن نیازی خاص در قالب آرایش نظامی از قبل طراحی شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد (شهلائی و همکاران، ۱۳۹۵). استفاده از رهیافت‌های شبیه‌سازی معمولاً برای ارزیابی کارایی ناوگان حمل و نقل نظامی انجام می‌شود در حالی که بهینه‌سازی استوار با هدف بهبود و ارتقای اثربخشی ناوگان در نبردهای متقارن صورت می‌گیرد (مددی و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین می‌توان ترکیبی از رهیافت‌ها را به همراه روش‌های شبیه‌سازی به کاربرد (همان منبع، ۱۳۹۷). هر چند مدل‌سازی چنین طرح‌هایی از نظر محاسباتی به نظر قدری دشوار و دور از دسترس می‌نماید؛ اما با این حال اهمیت حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی یک کشور لزوم توسعه شیوه‌های محاسباتی را برای طراحی آلترناتیوهای مواجهه با مسائل عدم قطعیت در فضای حالت جنگ‌های کلاسیک مشخص می‌سازد (ووتاشک و وسولکوفسکی، ۲۰۱۷). تصویر شماره (۲) نشان می‌دهد که چگونه هر یک از ابعاد مسئله ترکیبی حمل و نقل ناوگان نظامی در رهیافت‌های مبتنی بر الگوریتم‌های محاسباتی در دامنه فرایندهای تعاملی با سایر ابعاد نظیر نیروهای مفروض در مسائل نظامی توسعه می‌یابد.

1. Brown & Kline



تصویر (۲) توسعه ناوگان حمل و نقل متناسب با نیروهای نظامی و جنبه‌های مختلف عملیات جنگی (منبع: وسولکوفسکی و همکاران، ۲۰۱۹)

بنابراین مسئله اصلی تحقیق حاضر ارزیابی ناوگان حمل و نقل نظامی و بررسی میزان استواری آن به منظور کاهش محاسبات ناوگان و بهبود زمان‌بندی از طریق شیوه‌های اکتشافی برای یافتن بهترین راه‌حل ممکن از مجموعه موجه جواب با استفاده از رهیافت‌های مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و تکامل کاندیده‌های ناوگان برای یافتن نقطه بهینه است. از این رو در مطالعه حاضر کوشیده می‌شود علل عدم قطعیت در محیط‌های جنگی و شیوه‌های مواجهه با آن از طریق تکنیک‌های محاسباتی مبتنی بر سناریو در مطالعه موردی ناوگان حمل و نقل نیروی هوایی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. روش مورد استفاده در این تحقیق مدل بهینه‌سازی چندهدفه است که از طریق جستجوی راه‌حل کاندید در فضای موجه جواب با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود.

## پیشینه تحقیق

در این قسمت به مرور ادبیات (نظری و عملی) و نیز پیشینه پژوهش‌های مرتبط با استفاده از مدل‌های ریاضی برای بهینه‌سازی استوار حمل و نقل نظامی نظیر الگوریتم‌ها و روش‌های حل محاسباتی پرداخته می‌شود. همچنین شیوه‌های مسیریابی برای سامانه‌های هوایی کلاسیک و بدون سرنشین از طریق برنامه‌ریزی اکتشافی مطالعه شده است. نگاهی به پیشینه پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد مسئله مسیریابی وسایل نقلیه نظامی از دغدغه‌های اصلی پژوهشگران بوده است که محققان برای حل آن غالباً به ارائه الگوریتم‌های دقیق، اکتشافی و فراابتکاری پرداخته‌اند. استفاده از رویکردهای فراابتکاری مترتب بر اصولی است که برخی از آنها عبارت‌اند از: جستجو در فضای

حالت مسئله برای تعداد محدودی از تکرارها، اکتشاف در هر تکرار و استفاده از اطلاعات به دست آمده از تکرارهای قبلی برای یافتن راه حل (یانگ ۱ و همکاران، ۲۰۱۹). رایج ترین رویکردهای فراابتکاری برای حل مسائل حمل و نقل نظامی عبارت‌اند از الگوریتم جستجوی ممنوعه، الگوریتم‌های ژنتیک، الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده و کولنی مورچگان. موارد ذکر شده نمونه‌هایی از روش‌های بهینه‌سازی است که در برخی تحقیق‌ها برای برنامه‌ریزی مسیر وسایل نقلیه نظامی، بهینه‌سازی مسیر حرکت پهپادها با استفاده از برنامه‌ریزی خطی پویا، و کاربرد الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی برای مسیریابی هواپیماهای بدون سرنشین عملیات شناسایی مورد استفاده قرار گرفته است (بیشت ۲، ۲۰۱۴).

بسیاری از رهیافت‌های مرتبط با حل مسائل ترکیباتی در بهینه‌سازی ناوگان حمل نقل نظامی بر یکی از سه محور ذکر شده در ادامه تمرکز داشته‌اند؛ **فخست:** طراحی یک طرح زمانی خاص برای ناوگان نظامی بر مبنای زمان‌های توقف و حرکت از طریق رویکردهای محاسباتی، **دوم:** آزمون روایی بخش‌های خاصی از ناوگان حمل و نقل نظامی که در سطح کارکردهای وظیفه‌ای یا سناریوهای عملیاتی از طریق رویکرد حداکثرسازی منافع ناوگان محقق می‌شود و **سوم:** بازه زمانی مدرن‌سازی و به‌روزرسانی فناوری‌های نظامی و یا از بازنشسته نمودن زیرساخت‌های فرسوده از طریق رویکرد «بهینه‌سازی ناوگان حمل و نقل» (رِمپل ۳، ۲۰۱۵). جداول زمان‌بندی حداکثرسازی استفاده از ظرفیت‌های ناوگان حمل و نقل نظامی مشخص می‌سازند که چگونه ناوگان حمل و نقل نظامی در طول دوره مأموریت‌های عملیاتی به منظور تحقق اهداف تعیین شده و با لحاظ پارامترهای مدل تصمیم‌گیری و محدودیت‌های بودجه و منابع، برنامه‌ریزی می‌شود و در نهایت آنکه چگونه هر یک از ابعاد مسئله ترکیبی ناوگان بر حسب نوع داده‌های ورودی و خروجی‌های مورد انتظار، به طور مستقل و یا ترکیبی مورد استفاده تحلیل و بررسی می‌گیرد (قربانی و رنجبر، ۱۳۹۷). در تحقیقی که توسط بایکاس اوغلو و همکاران (۲۰۱۹) صورت گرفته است، محققان به شناسایی و تحلیل عوامل حیاتی موفقیت برای بهینه‌سازی ناوگان حمل و نقل نظامی و عوامل تأثیرگذار بر آن نظیر عدم قطعیت، داده‌های مبهم محیطی، مسیریابی صحیح و چندهدفه بودن به منظور ارزیابی

1. Yang
2. Bisht
3. Rempel

اثربخشی بلندمدت برنامه‌های راهبردی مأموریت‌های نظامی پرداخته‌اند. نتایج مطالعه مزبور نشان می‌دهد که راه‌حل‌های مرتبط با بهینه‌سازی ناوگان حمل و نقل نظامی، احتمالاً با نوعی عدم قطعیت کارکردی، ریسک و ابهام در نتایج قابل انتظار از عملکرد ناوگان حمل و نقل نظامی با توجه به درجه برخورداری دشمن از فناوری‌های مدرن در میدان رزم، میزان صحیح و دقیق بودن فرایند جابه‌جایی ادوات مورد نیاز در مأموریت‌های نظامی و نظایر آن برخوردار است که خود سبب شده مسئله دارای ماهیت برنامه‌ریزی آرمانی چندهدفه بوده و بعضاً از مجموعه‌ای از اهداف تشکیل شود که به طور بالقوه متناقض هستند. در مطالعات مشابه دیگری که توسط آدامیدس<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴) و بیوونا و مونتماگیوره<sup>۲</sup> (۲۰۱۵) به منظور بررسی نتایج بلندمدت و کوتاه‌مدت نگهداری و تعمیرات در مدیریت ناوگان حمل و نقل نظامی از طریق مدل شبیه‌سازی الگوریتم محاسباتی انجام شده، محققان نشان داده‌اند که نت برنامه‌ریزی شده می‌تواند، توان و پتانسیل ناوگان حمل و نقل نظامی را ارتقا داده و احتمال مسیریابی بهینه را ممکن نماید. در مطالعه دیگری که توسط بیکر<sup>۳</sup> (۲۰۰۲) انجام شده، محقق از رویکرد برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای ارتقای شرایط ناوگان هوانیروز و بهینه‌سازی زمان بندی آن برای حمل و نقل کالا و بارهای نظامی در مأموریت‌های جنگی بهره گرفته است. در مطالعه یادشده محقق به زیر مسئله‌های مسیریابی و زمان بندی با توجه به محدودیت‌هایی نظیر در دسترس بودن خدمه پرواز، پدافند هوایی دشمن، ظرفیت هواپیمایی نیروی زمینی و میزان سوخت‌رسانی فرودگاه‌های نظامی در زمان صحیح و موقعیت بحرانی از طریق مدل‌سازی‌های معمول ناوگان هوایی توجه نموده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد اگرچه رویکردهای بهینه‌سازی در بهبود ساختار ناوگان حمل و نقل نظامی موفق بوده؛ اما با این حال در شیوه‌های ترکیباتی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی از طریق لحاظ نمودن تمام پارامترهای فضای واقعی عملیات نظامی، سبب افزایش نمایی زمان محاسبات و پیچیدگی اجرای مدل در فضای راه‌حل‌های مسئله اصلی می‌شود، از این رو محقق در مطالعه خود برای افزایش ضریب اطمینان و توفیق در دستیابی به راهکار بهینه، تکنیک‌های مستقل و مبتنی بر یکی از مدل‌های شبیه‌سازی و یا بهینه‌سازی استوار را برای به حداکثر رساندن منفعت تابع هدف پیشنهاد نموده‌اند که می‌تواند به یافتن

1. Adamides
2. Bivona and Montemaggiore
3. Baker



بازخوردهای بهینه برای کنترل و تنظیم پارامترهای مسیر و افزایش منافع عایدی از پیاده‌سازی مدل بینجامد. نگاهی به مطالعات اخیر نشان می‌دهد که اغلب مطالعات بر رویکردهای تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی استوار تمرکز داشته‌اند. در مطالعه توران و همکاران (۲۰۲۲) یک رویکرد مبتنی بر شبیه‌سازی - بهینه‌سازی توسعه یافته است که در آن محققان از طریق یک مدل شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم (SD) در ترکیب با الگوریتم ژنتیک (GA) برای حل مسئله برنامه‌ریزی نیروی انسانی و تخصیص ناوگان نیروی دریایی برای بهینه‌سازی استراتژی‌های ناوگان حمل و نقل از طریق الگوریتم ژنتیک با توجه به راهبردهای استواری و سیاست‌های ارتقای فن آوری و به‌روزرسانی ناوگان حمل و نقل دریایی به شبیه‌سازی برنامه زمانی خدمه و چرخه حیات شناورهای دریایی برای ارزیابی هزینه کل و یافتن شیوه‌های حداقل‌سازی آن پرداخته‌اند. همچنین نتایج برخی دیگر از مطالعات مشابه نشان می‌دهد که شیوه‌های بهینه‌سازی ترکیباتی در مقایسه با رویکردهای مرسوم بهینه‌سازی که به صورت مستقل و مجزا پیاده‌سازی می‌شوند، هزینه کل کمتری را برای تابع هدف به دست می‌دهد. هرچند در مسائل مرتبط با ناوگان دفاعی در نیروی دریایی به علت دشواری تغییر در معماری فنی، کمتر به‌روزرسانی تسهیلات در استراتژی‌ها لحاظ می‌شود. با این حال در مطالعه توران و همکاران (۲۰۲۲) یک مدل شبیه‌سازی ترکیبی را با استفاده از رویکردهای پویایی سیستم‌ها (SD) و شبیه‌سازی رویداد گسسته (DES) برای حل مسئله بهینه‌سازی ناوگان حمل و نقل نیروی دریایی و تجزیه و تحلیل تبعات مرتبط با تصمیمات کوتاه‌مدت و بلندمدت با لحاظ در دسترس بودن منابع و تناسب آن با نتایج الگوریتم‌های بهبود ناوگان دریایی برای یافتن استراتژی‌های بهینه ارتقای ناوگان دریایی و ارزیابی استراتژی‌های به‌روزرسانی و مسیریابی ناوگان با استفاده از رویکرد جستجوی سطحی هدف‌مند در میان آلترناتیوهای کاندید و ممکن برای اتخاذ تصمیمات بهینه‌سازی ناوگان حمل و نقل نظامی در شرایط مشابه واقعیت به دست داده است. در بسیاری از مطالعات، رویکردهای مبتنی بر بهینه‌سازی در سطح وسیعی برای حل مسائل ترکیبی مرتبط با محاسبات ناوگان حمل و نقل نظامی و برنامه‌ریزی‌های زمان‌بندی مربوطه با استفاده از رهیافت‌های بهینه‌سازی چندهدفه صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به مطالعه براون<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۲) اشاره نمود که در آن مسئله زمان‌بندی ناوگان بالگردهای نظامی با استفاده از

1. Brown

مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط<sup>۱</sup> (MILP) فرموله شده است. در مطالعه یادشده محققان از رویکرد MILP به منظور تعیین زمان بندی بهینه برای سیر و حرکت ناوگان نیروی هوایی به سمت مقاصد مأموریت در یک دوره زمانی مشخص با توجه به محدودیت‌هایی نظیر طول عمر مفید هلی کوپترها در ناوگان هوایی، بودجه بندی نت ناوگان هوایی، مأموریت‌های مورد انتظار در عملیات نامنظم نظامی، سطح فناوری ناوگان هوایی و هزینه‌های مربوط به ساخت و به‌روزرسانی هلی کوپترها و غیره... استفاده نموده‌اند.

بررسی ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مسئله بهینه‌سازی ناوگان حمل و نقل و ابعاد مختلف آن نظیر محاسبات اندازه ناوگان، ارزیابی سیر و حرکت، مسیریابی و زمان بندی تجهیزات نظامی با استفاده از روش‌هایی نظیر هوش محاسباتی<sup>۲</sup> (CI)، شیوه‌های مبتنی بر شبیه‌سازی نظیر مدل رویداد گسسته<sup>۳</sup> (DES)، دینامیک سیستم‌ها<sup>۴</sup> (SD)، و همچنین رویکردهای مبتنی بر بهینه‌سازی نظیر برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی عدد صحیح و رویکردهای ترکیبی در مطالعات فراوانی مورد بررسی قرار گرفته است. با مروری بر مدل‌های حل مسائل بهینه‌سازی ناوگان حمل و نقل و طبقه بندی روش‌های کاربردی در هر جنبه از زیر مسئله‌های مرتبط می‌توان به ساختار اصلی مدل‌ها نظیر تکنیک‌های حل مسئله، شکل گیری توابع هدف جدید و کاربردهای هر روش برای شبیه‌سازی‌های نزدیک به محیط واقعی در مأموریت‌های عملیاتی نیروهای مسلح دست یافت. در مطالعه‌ای منظور توجیه عملیاتی و اقتصادی تکنیک بهینه‌سازی ناوگان حمل و نقل نظامی به لحاظ زمان و هزینه، برخی پیشنهادها به شرح زیر ارائه شده است (بنکیز<sup>۵</sup>، ۲۰۱۲):

➤ استفاده از رویکردهای اکتشافی برای دستیابی به گزینه‌های بهینه‌سازی تابع هدف مسئله

توسعه فضای راه‌حل‌های موجه از نقاط گوشه در مجموعه جواب ممکن با استفاده از رویکردهای اکتشافی و لحاظ نمودن آن در موتور جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک برای یافتن جواب بهینه تابع هدف و بررسی قابلیت ارتقای مسئله ترکیبی ناوگان حمل و نقل نظامی که در این صورت امتیاز به دست آمده در یک نمونه معین از ناوگان حمل و نقل نظامی مشخص می‌نماید تا چه

1. mixed-integer linear program  
2. Computational Intelligence  
3. Discrete event simulation  
4. System dynamic  
5. Bankes

اندازه می‌توان نیازهای عملیاتی هر مأموریت جنگی را بر اساس آرایش هنگ نظامی و با لحاظ محدودیت‌های زمان، اشراف احتمالی دشمن و بودجه‌های مرتبط برآورده نمود (وسولکوفسکی و بیلارد<sup>۱</sup>، ۲۰۱۸).

## روش انجام تحقیق

روش انجام این پژوهش مدل‌سازی کمی متغیرهای تصمیم در شرایط عدم قطعیت برای محیط‌های نظامی دارای ابهام و توأم با داده‌های ناقص و ضعیف است. عدم قطعیت را می‌توان با استفاده از رهیافت‌های مختلفی مدل‌سازی نمود که هر رویکرد دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود است. یک رویکرد راهبردی در این زمینه می‌تواند کوشش‌های سیستمی برای یافتن دلایل بروز عدم قطعیت با توجه منابع آن و شیوه مواجهه با آن در شرایط محیط واقعی نظامی باشد. یک تفاوت عمده که در انتخاب چارچوب‌های مدل‌سازی نظامی مطرح می‌شود، قابلیت تبیین جزئیات عملیاتی برای تدقیق مرزهای سیستم با محیط خارجی و داخلی و نیز درجه تأثیر آن بر دقت نتایج شبیه‌سازی است که از ویژگی‌های کلیدی سیستم‌های نظامی نظیر سامانه‌های حساس به حالت اولیه، شرایط خاص بروز عوامل غیرقابل پیش‌بینی و دارای ریسک بالا و عدم قطعیت در عملیات جنگی، تکامل هم‌زمان اجزای سیستم و محیط در منطقه جنگی، امکان‌سنجی اعمال رفتارهای جدید و متناسب با شدت تغییرات محیطی و غیره... است که پویایی محیط‌های نظامی ناشت گرفته و جملگی می‌تواند به توسعه مفروضات حل مسئله عدم اطمینان در فضای جنگی کمک نماید (عباس<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). در بسیاری از مطالعات برای حل مسئله عدم اطمینان در محیط‌های عملیاتی، استفاده از رویکردهای برنامه‌ریزی چندهدفه پیشنهاد شده که به‌خوبی پویایی‌های سیستم (ساختار بازخورد مثبت و منفی) و پیچیدگی‌های مرتبط را به‌صورت همگرا را ترسیم می‌نماید (بلانک و دب<sup>۳</sup>، ۲۰۲۲). اگرچه تنوع مسیرهای تکنولوژیک در آینده مسائل نظامی، تصمیمات برنامه‌ریزان را تا حد زیادی متأثر می‌سازد؛ اما باین حال ارتقای آگاهی متخصصان امور نظامی در تدقیق متغیرهای تصمیم، ضمن تبیین شرایط و پارامترهای مدل، آثار این توسعه فن‌آورانه را در

1. Wesolkowski & Billyard  
2. Abbass  
3. Blank & Deb

طرح‌ریزی‌های اولیه تا حد زیادی کاهش می‌دهد (مازورک و وسولکوفسکی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۲). از این رو ارائه یک راه‌کرد مناسب برای مدل‌سازی یکپارچه و استوار می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مطلوب برای مواجهه با عدم قطعیت محیط جنگی بکار رفته و امکان ارزیابی ناوگان حمل و نقل را در مأموریت‌های جنگی فراهم نماید. برخی از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در قالب تنوع و فراوانی مأموریت‌های نظامی، سخت‌افزارها و تسلیحات جنگی، ابزارها و سامانه‌های پدافندی، جنگ‌افزارها و همچنین عناصر آفندی محیط‌های اجتماعی و اقتصادی مطرح می‌شود که همواره پیش روی فرماندهی، نیروها و استحکامات دفاعی قرار دارد. با این وجود منابع عدم قطعیت تنها به محیط بیرونی محدود نمی‌شود؛ بلکه پتانسیل‌های داخلی و اهداف راهبردی سازمان‌های دفاعی را که باعث حرکت‌پذیری نیروها و ادوات می‌شود، را نیز در برمی‌گیرد.

در این مطالعه برای استفاده از الگوریتم ژنتیک ابتدا مدلی از منطقه نظامی تحت پوشش فرماندهی ساخته می‌شود. از این رو لازم است یک چارچوب اولیه تنظیم گردد. در این روش ابتدا منطقه نظامی در یک فضای مختصات دوبعدی ترسیم می‌گردد که در نتیجه شبکه‌ای ماتریسی با تعداد  $n$  سطر و  $n$  ستون به وجود می‌آید. مکان هر وسیله نقلیه در یک سلول جانمایی می‌شود که می‌توان در حالت «باز وضعیت» به آن یک اپراتور تخصیص داد و در حالت «بسته وضعیت» غیر قابل تخصیص خواهد بود و لذا دست کم یکی از وسایل نقلیه در آن استقرار یافته‌اند. همچنین در منطقه عملیاتی مدنظر به منظور انجام جستجوهای نقطه بهینه عملیاتی می‌توان یک چندضلعی دلخواه را ترسیم نمود که دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- هر منطقه دلخواه از محیط عملیاتی به طور یکسان توسط یک عدد پوشش داده شود که میانگین فاصله آن از توقفگاه‌های بین راه با توجه به الزامات فرماندهی و پارامترهای سامانه‌های هوایی مساوی بوده و مکان هندسی آن را به طور دقیق مشخص نماید.
- منطقه دلخواه تنها هنگامی به‌عنوان مکان تجسس شده در نظر گرفته شود که تمامی ایستگاه‌ها دست کم توسط یک هواپیما مورد بازدید و کاوش قرار گرفته باشد.
- به طور مفروض مدل مسیریابی تمامی عناصر پایگاه هوایی را برنامه‌ریزی نموده و بر اساس معیار بهینگی الگوریتم ژنتیک برای انجام عملیات انتقال نیرو، بار و یا عملیات تجسس و

شناسایی برای ایستگاه‌های مدنظر به روش نزدیک به بهینه رفتار می‌نماید. لازم به ذکر است که معیار بهینگی را می‌توان از میان گزینه‌هایی انتخاب نمود که حداقل مسافت پیموده شده توسط هواپیماهای نظامی را ردیابی نماید.

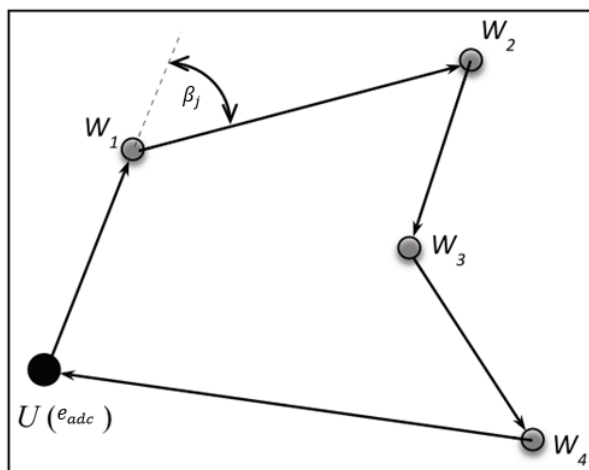
• زمان کل مأموریت انتقال نفر، تجهیزات و شناسایی توسط هواپیماهای نظامی تاحدامکان به حداقل مقدار ممکن کاهش یابد. برای این منظور می‌توان از مفروضات موجود در شیوه‌های فراابتکاری دیگر نظیر الگوریتم کلونی مورچگان بهره گرفت و شیوه حاضر را نیز توسعه داد (لی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۳).

لازم به توضیح است که با توجه به فراابتکاری بودن رویکردها، نمی‌توان نتایج را نقطه بهینه مطلق قلمداد نمود. باین وجود می‌توان اذعان داشت که از طریق شیوه آزمون نمونه‌ها، نقطه به دست آمده بسیار نزدیک به نقطه بهینه است (لبوچر<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). از این رو برخی پارامترهای مدل به شرح زیر است:

- تعداد تجهیزات و عناصر فعال موجود نیروی هوایی برای برنامه‌ریزی در دسترس فرماندهی است.
- موقعیت و وضعیت پارامترهای خاص هر هواپیما نظیر سرعت، شتاب، جرم و غیره... قطعی و معین فرض می‌گردد.
- تعداد مأموریت‌های تعریف شده برای هر هواپیما در یک بخش دلخواه از منطقه عملیاتی در قلمرو چندضلعی مجموعه جواب موجه است.
- میانگین فاصله‌ها بین نقاط هدف برابر میانه مسیر سیر و حرکت هواپیماهای نظامی فرض می‌گردد.

تصویر شماره یک ضریب تأخیر برشی را برای مقاطع هندسی مسیر پرواز هواپیماهای حمل تجهیزات نظامی، نیروها و تجسس و شناسایی را در مجموعه موجه جواب از هر گوشه نشان می‌دهد.

1. Li  
2. Leboucher



تصویر شماره ۱) نمای شماتیک از ضریب تأخیر برشی برای مقاطع هندسی مسیر پرواز هواپیماهای در حال مأموریت در منطقه دلخواه نظامی

چنان‌که در تصویر شماره یک مشاهده می‌شود؛ می‌توان زمان لازم برای یک سیکل چرخش کامل هواپیمای نظامی را از طریق رابطه شماره (۱) محاسبه نمود:

$$T_j = e_{adc} \cdot \beta_j / \pi \quad (1)$$

در رابطه فوق  $T_j$  زمان لازم برای یک سیکل چرخش کامل هواپیمای نظامی در منطقه عملیاتی بر حسب ثانیه است. همچنین  $e_{adc}$  ضریب تأخیر برشی بر حسب ثانیه است.  $\beta_j$  زاویه بین دو ضلع از مسیر پرواز هواپیما در نقطه دلخواه  $W_i$  در بازه  $0$  تا  $\pi$  است. همچنین اندیس  $j$  حداکثر مقداری که به خود می‌گیرد برابر  $N$  است که به صورت  $j = 1, 2, 3, \dots, N$  نشان داده می‌شود.

## مطالعه موردی

مطالعه موردی تحقیق حاضر نیروی هوایی سپاه پاسداران در یک بازه زمانی معین است. به منظور ارزیابی میزان استواری در یک مسئله مرتبط با ناوگان حمل و نقل نظامی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. همچنین برای بهبود کارایی الگوریتم ابتکاری مورد استفاده در تحقیق حاضر و تولید داده‌های همبسته از رویکردهای شبیه‌سازی در نرم‌افزار CPLEX و با استفاده از روال‌های مونت کارلو بهره گرفته شده است. بهره‌گیری از رویکرد مونت کارلو می‌تواند بستر لازم

برای ایجاد مجموعه داده‌های متناسب با نیازهای وظیفه‌ای و زیرساخت‌های نظامی بر اساس تعداد تکرار، طول زمان و ظرفیت مورد نیاز برای عملیات پروازی را فراهم نماید (ووتاشک و وسولکوفسکی، ۲۰۱۷). همچنین به منظور برآورد اندازه و نیز تعیین ترکیب بهینه ناوگان حمل و نقل نیروی هوایی در مأموریت‌های جنگی، ابتدا لازم است تابع هدف، متغیرهای تصمیم و محدودیت‌های مرتبط با زیرساخت‌های نظامی مشخص شود. از سوی دیگر نوع مأموریت نظامی از قبیل عملیات واکنش سریع به حوادث و بلایای طبیعی، جابه‌جایی و حفاظت از هواپیمای حامل مقامات، عملیات جستجو و نجات، تجسس و شناسایی برای جمع‌آوری اطلاعات، انجام پروازهای رزمی و یا آموزشی، پشتیبانی فرماندهی و غیره... می‌تواند جهت و راستای کلی انجام پژوهش و روند جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها را متأثر سازد (لاوچ و وسولکوفسکی، ۲۰۱۸). در این تحقیق با استفاده از رویکرد مونت کارلو مجموعه داده‌های نمونه‌ای برای ۷۵ زیرساخت عمومی نیروی هوایی به گونه‌ای تولید گردیده که در آن هر یک از ناوگان حمل و نقل هوایی در سطح الزامات اصلی وظیفه‌ای بتوانند برای حمل و ترابری تسلیحات، ادوات و یا نیروهای نظامی مورد استفاده قرار گرفته و تا چندین کارکرد فرعی را برای سایر حالات ممکن در فضای نمونه و پیشامد، پوشش دهند. جدول شماره یک ناوگان حمل و نقل نیروی هوایی را با توجه به زیرساخت‌های انفرادی و ظرفیت هر یک از ناوگان بر اساس نوع محموله و هزینه‌های عملیاتی نشان می‌دهد.

جدول ۱. هزینه‌ها و ظرفیت نمونه‌های هواپیماهای نظامی

هواپیماهای نظامی	ظرفیت نوع مسافری (برحسب نفر)	ظرفیت نوع باری (برحسب تُن)	هزینه (به‌ازای هر واحد مسافری یا هر واحد باری بر حسب واحد پول)
هواپیماهای نظامی نوع اول (A)	۳۲	۶۰۰۰	۱/۹
هواپیماهای نظامی نوع دوم (B)	۱۰	۳۴۰۰۰	۲/۸
هواپیماهای نظامی نوع سوم (C)	۱۲	۱۰۵۰۰۰	۴/۶۳
هواپیماهای نظامی نوع چهارم (D)	۴۳	۳۳۹۱۵	۶/۲۲
هواپیماهای نظامی نوع پنجم (E)	۷۸	۲۲۴۰۵	۳/۴۳

همان گونه که در جدول شماره یک مشاهده می‌شود مدت زمان عملیات پروازی هر هواپیما در هر مأموریت نظامی (اعم از باری و مسافری) مقداری معین است. مدت زمانی که طول می‌کشد

تا یک هواپیمای نظامی بتواند مأموریت خود را به انجام برساند در وهله نخست به مسافتی بستگی دارد که هواپیما باید در زمان برنامه‌ریزی شده، طی نماید. در این مطالعه دوره زمانی «پرواز - نوع هواپیمای نظامی»؛ نشان‌دهنده مسافت‌های پروازی هر هواپیما برحسب نوع هواپیما و ظرفیت آن در مأموریت‌های مقرر پروازی است. تابع هدف در این مسئله استفاده بهینه از ظرفیت؛ و محدودیت‌های مسئله شامل مدت‌زمان هر مأموریت نظامی و نوع هواپیما از منظر قدرت و سرعت است.

## بحث و یافته‌ها

برای هر مأموریت نظامی چندین ترکیب متنوع از هواپیماها قابل تصور است که می‌تواند به مأموریت موردنظر تخصیص یابد؛ بنابراین یک الگوریتم جستجوی ممنوعه، یک مسیر معتبر را به هر مأموریت برمی‌گرداند و لذا با توجه محدود بودن مسیرهای معتبر برای تخصیص بهینه، مجموعه موجه جواب نسبتاً بزرگ خواهد بود و از این رو تحلیل و ارزیابی میزان استواری هر نقطه از نظر محاسباتی دشوار به نظر می‌رسد. از این رو استفاده از یک شبیه‌ساز مونت کارلو به‌عنوان یک مکمل برای الگوریتم ژنتیک یکی از فعالیت‌های مهمی است که در مسیر بهینه‌سازی استوار در این مطالعه صورت گرفته است؛ بنابراین به‌منظور به‌دست آوردن رابطه مونت کارلو در تحقیق حاضر فرض می‌گردد که در بازه‌های زمانی متوالی و گسسته  $t$  (برحسب ثانیه)، مأموریت‌ها توسط برنامه‌ریزها در سامانه کنترل پرواز هواپیما قابل تعریف باشد. همچنین فرض می‌گردد  $f_i$  تعداد دفعات مأموریت موردنیاز برای تحصیل هدف جنگی توسط ناوگان هوایی باشد، در این صورت به‌منظور انجام وظیفه  $i$  در دوره زمانی مأموریت  $d_i$  که از یک تابع توزیع مثلثی تبعیت می‌نماید؛ بنابراین چنانچه زمان آغاز فعالیت نمونه ناوگان،  $t_i$  باشد که به‌صورت تصادفی در بازه  $[0, t]$  قرار دارد در این صورت مقدار دوره زمانی  $u$  برای یک مأموریت نظامی با تکرار تمامی مراحل وظایف محوله در یک الگوریتم معین، به‌طور متوسط در یک سال خاص  $Y$  برای یک ناوگان خاص نظامی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (بیونا و مونتاگیوره ۲۰۱۵؛ وسولکوفسکی و بیلارد، ۲۰۱۸):

$$u = \frac{1}{Y} \sum_{j=0}^Y u^j \quad (2)$$



مثالی از الزامات مرتبط با مأموریت‌های ناوگان نیروی هوایی باتوجه به نوع ناوگان (باری، مسافری، ترکیبی و تجسسی)، دوره زمانی و زیر توابع فعالیت‌های اصلی در جدول شماره ۲ آورده شده است.

جدول ۲. الزامات مرتبط با مأموریت‌های ناوگان نیروی هوایی باتوجه به نوع محموله (باری - مسافری یا ترکیبی)

نوع محموله (باری، مسافری یا ترکیبی)	کارکردهای فرعی ناوگان	دوره زمانی عملیات هر ناوگان هوایی باتوجه به نوع هواپیما برای یک روز				
		هواپیماهای نوع اول (A)	هواپیماهای نوع دوم (B)	هواپیماهای نوع سوم (C)	هواپیماهای نوع چهارم (D)	هواپیماهای نوع پنجم (E)
۲	۲	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۳	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۲	۰	۱۰	۰	۰	۱۳,۲۵
۱	۱	۱۵/۲۴	۱۰	۰	۰	۰

همان گونه که در جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود در هر ردیف از جدول، برای هر مأموریت ذکر شده نوع محموله قابل حمل توسط نیروی هوایی، کارکردهای فرعی ناوگان و نوع هواپیما امکان ایجاد یک ترکیب را در دوره زمانی انجام عملیات برای یک روز کاری از مأموریت نظامی فراهم می‌آورد. از این رو برای حصول اهداف تحقیق با استفاده از الگوریتم ژنتیک یک سناریو برای فعالیت‌های حمل و نقل نیروی هوایی از طریق شیوه‌های شبیه‌سازی تعریف گردیده که بسته به توزیع وظایف مرتبط با مأموریت‌ها و تفاوت‌های زمانی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. این حالت از نظر طیف وسیع وظایف، شباهت زیادی با آنچه غالباً در عالم واقع رخ می‌دهد، دارد. به منظور به دست آوردن بهترین ترکیب ناوگان حمل و نقل از منظر ظرفیت و قابلیت جابه‌جایی باتوجه به محدودیت‌های هزینه و مدت مأموریت از یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه با اعمال الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب استفاده شده که برای انطباق با مسئله ناوگان ترکیبی و طبقه‌بندی آن از یک شیوه تکاملی بهره گرفته شده تا بتوان راه‌حل‌های غیر مغلوب را شناسایی و از طریق عملگرهای انتخاب و تولیدمثل در جمعیت نخستین راه‌حل‌ها، به بهترین انتخاب رسید (یانگ و همکاران، ۲۰۱۶). راه‌حل‌های کاندید جدید (فرزندان) از طریق اعمال عملگر متقاطع برای نمونه‌های انتخاب شده از جمعیت والدین به دست می‌آید و در ادامه فرایند عملگر جهش بر روی فرزندان جدید اعمال می‌شود. گزینه‌های به دست آمده (فرزندان جدید) در فضای راه‌حل، جداول P را ایجاد می‌نمایند که دارای تعداد وظایف مشابه در مدل مسئله بوده و ردیف‌های جداول را تشکیل می‌دهند، همچنین به همان تعداد، ستون‌هایی برای ناوگان لحاظ می‌گردد در نتیجه هر

ردیف نشان‌دهنده یک مأموریت و تعدادی وظیفه پروازی است که به یکی از ناوگان حمل و نقل موجود در ستون برای به دست آوردن نسل تکاملی تخصیص می‌یابد. از این رو با توجه به ساختار غیرمرسوم گزینه‌ها برای حل مدل مسئله، استفاده از عملگرهای متقاطع و جهش بومی‌سازی شده ضروری به نظر می‌رسد. به منظور ایجاد یک گزینه فرزند که  $R_i$  نامیده می‌شود از عملگر متقاطع برای انتخاب والدین در جمعیت اولیه صورت ساختار باینری استفاده می‌شود (بار یام، ۲۰۱۳). در ادامه عملگر جهش بر روی  $R_i$  اعمال می‌گردد که نشان می‌دهد نرخ جهش در نسل‌ها چقدر است. همچنین به صورت تصادفی برای هر وظیفه در مأموریت‌های نظامی بر مبنای نرخ جهش در مورد تخصیص یا عدم تخصیص گزینه حمل و نقل جهش یافته تصمیم‌گیری می‌شود. اگر فرایند تخصیص صورت گیرد در این صورت یک گزینه متفاوت از میان انتساب‌های معتبر ناوگان به فرزند انتساب می‌یابد (لی و اپورتانو، ۲۰۲۰).

یکی از مؤلفه‌های اصلی در طراحی الگوریتم ژنتیک، انتخاب توابع هزینه بهینه است (ووتاشک و وسولکوفسکی، ۲۰۱۷). در مسئله تحقیق حاضر توابع هدف در پی حداقل‌سازی هزینه ناوگان حمل و نقل و زمان است که به صورت رابطه ۳ شماره نوشته می‌شود:

$$E_M = \sum_v \left[ \sum_i (d_i(v) \cdot p_i(v)) \right] \cdot c(v) \quad (3)$$

در رابطه شماره ۳ مؤلفه  $d$  بیانگر جدول دوره‌های زمانی ناوگان نظامی در مأموریت‌های محوله است که از متغیرهای  $d_i(v)$  تشکیل شده است. این متغیرها، زمان مورد نیاز برای هر یک از ناوگان حمل و نقل از نوع  $v$  را در سطح وظایف  $i$  برای انجام مأموریت خود در طول زمان یک سال را نشان می‌دهد. همچنین در این رابطه  $P$  نشان‌دهنده جدول راه‌حل‌ها است که برای انجام وظایف  $i$  از طریق ناوگان  $v$ ، هزینه  $c(v)$  را ایجاد می‌نماید. جدول هزینه در صورت ترکیب با جدول زمانی از طریق روش‌های برنامه‌ریزی خطی می‌تواند برای حصول اهداف، سطوح وظیفه‌ای را برای اعمال پردازشی در سطرهای جدول کد نماید.

همچنین تابع هزینه برای کل مدت زمان مأموریت در مسئله فرموله شده در تحقیق حاضر بر اساس نتایج مطالعه ووتاشک و وسولکوفسکی (۲۰۱۷) به صورت رابطه شماره ۴ نوشته می‌شود:

$$E_t = \sum_{11} \sum_i (d_i(v) \cdot p_i(v)) \quad (4)$$

در رابطه شماره ۳ برای مورد کاوی خاص تحقیق، پیکره‌بندی و برپایی ناوگان حمل و نقل به صورت مجموعه  $\{v\}$  و به شکل رابطه  $(d_i(v), p_i(v))$  نمایش داده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی میزان استفاده از ظرفیت مورد نیاز وسیله نقلیه خاص  $v$  از ناوگان حمل و نقل در تعداد روزهای به کارگیری آن وسیله نقلیه در مأموریت نظامی است. این مهم نشان‌دهنده‌ی طول دوره زمانی و متوسط نرخ تکمیل عملیات در مأموریت نظامی با استفاده از وسیله نقلیه  $v$  در بازه زمانی یک روز است. بنابراین در صورت به حداقل رسیدن مقدار تابع هدف؛ طول مدت عملیات برای تکمیل مأموریت نظامی به کمترین مقدار خود می‌رسد.

با لحاظ آنچه در فوق ذکر گردید چنانچه  $q_{ij}$  یک متغیر صفر و یک برای یک واحد حمل و نقل نظامی باشد در این صورت مقدار آن برای کمان‌های گره‌ی  $i \in I$  در مبدأ حمل و نقل به سمت گره  $j \in J$  در مقصد برابر ۱ و در سایر حالات صفر است و  $u_{ij}$  یک متغیر صفر و یک برای واحد حمل و نقل نظامی در منطقه جنگی باشد در این صورت در این صورت مقدار آن برای کمان‌های گره‌ی  $i \in I$  در مبدأ حمل و نقل به سمت گره  $j \in J$  در مقصد برابر ۱ و در سایر حالات صفر است و لذا چنانچه  $v_{ij}$  یک متغیر صفر و یک برای واحدهای دفاعی باشد در این صورت انتقال تجهیزات برای مسیرهای باز به سمت مناطق عملیاتی با مقدار یک و در حالت بسته بودن مسیرها به سمت منطقه جنگی با صفر نشان داده می‌شود. این امر در جدول شماره (۳) نشان داده شده است.

جدول شماره (۳) رابطه میان متغیرهای صفر و یک در مدل تعاملی ترابری به سمت مناطق جنگی

متغیرهای صفر و یک در مدل بهینه‌سازی	$q_{ij} = 0$	$q_{ij} = 1$
$u_{ij} = 0$	$v_{ij}$ آزاد در علامت و مستقل از باز یا بسته بودن معابر به سمت منطقه عملیاتی	$v_{ij}$ آزاد در علامت و مستقل از باز یا بسته بودن معابر به سمت منطقه عملیاتی
$u_{ij} = 1$	$v_{ij}$ بسته بودن مسیرهای حمل و نقل به سمت منطقه جنگی	$v_{ij}$ آزاد در علامت و مستقل از باز یا بسته بودن معابر به سمت منطقه عملیاتی

استفاده از رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه در تحقیق حاضر می‌تواند امکان تولید ناوگان بهینه را از طریق یک سناریوی استوار، معین و از پیش طرح‌ریزی شده فراهم نماید. هر سناریو می‌تواند با توجه به ساختار و پیکره‌بندی ناوگان حمل و نقل نظامی و مدت زمان و هزینه مأموریت به شناسایی مجموعه‌ای از ناوگان بهینه بالقوه منتهی شود. در این صورت بسیاری از سناریوهای دارای ناوگان

حمل و نقل همسان توسط الگوی تحقیق، قابلیت پیاده‌سازی را دارا است که به نسبت سایر مجموعه‌های تولیدشده از استواری بیشتری برخوردار است؛ از این رو برای ارزیابی میزان استواری می‌توان مجموعه ناوگان حمل و نقل تولیدشده توسط الگوریتم را به منظور یافتن مجموعه استوارتر و بزرگ‌تر از طریق رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه مورد بررسی و ارزیابی قرار داد (اوسیلی، ۲۰۲۰). در این مطالعه چنین فرض می‌شود که ناوگان قابلیت پیاده‌سازی سناریوی تعیین‌شده را با توجه به درجه انطباق با موقعیت نداشته باشد؛ لذا برای تعیین میزان سازگاری ناوگان حمل و نقل لازم است تعداد ناوگان فعال و غیرفعال محاسبه و به سناریوی اضافه گردد که با توجه به پیکره بنده فعلی خود قادر به تکمیل مأموریت محوله نیست. در ادامه سناریوها با توجه به بودجه تخصیص یافته به منظور تعیین میزان اثربخشی ناوگان حمل و نقل نظامی گروه‌بندی می‌شوند؛ بنابراین برای مشخص نمودن موقعیت راهبردی ناوگان حمل و نقل در مأموریت نظامی محوله و نیز تعیین میزان سازگاری آن با سناریوهای آتی و درجه نیل به اثربخشی در سناریوهای مختلف، لازم است منابع مالی کافی تخصیص یابد؛ زیرا عدم وجود منابع مالی کافی مانع از پیاده‌سازی سناریوی نظامی خاص در مأموریت محوله توسط یک ناوگان حمل و نقل می‌شود. از این رو هر ناوگان حمل و نقل نظامی خاص دارای یک پیکره‌بندی و برپایی منحصر به فرد است و برای سناریوهای استوار، سازگار و یا دارای شرایط مخاطره‌آمیز مرتبط برنامه‌ریزی می‌شود. نحوه طبقه‌بندی یک سناریو برای یک ناوگان خاص نظامی به امکان سازگاری ناوگان و میزان تطبیق آن با هزینه‌های مأموریت‌ها بستگی دارد؛ از این رو افزایش میزان داده‌ها و تحلیل نتایج به تصمیم‌سازان کمک می‌نماید که میزان سازگاری ناوگان با سناریوهای آینده را مشخص می‌نماید (جولیو و همکاران، ۲۰۲۱).

با توجه به آنچه در فوق ذکر گردید و نیز نتایج مطالعه بایکاس اوغلو و همکاران (۲۰۱۹)، الگوریتم تعیین سناریوهایی که یک ناوگان حمل و نقل نظامی می‌تواند برای نیل به استواری آن را پیاده‌سازی نموده و در مأموریت‌های نظامی بر اساس هزینه و مدت مأموریت با آن سازگار شود به شرح زیر نوشته می‌شود:

**گام اول:** سناریوهای  $Y$  را بر اساس رویکرد مونت کارلو بگیر.

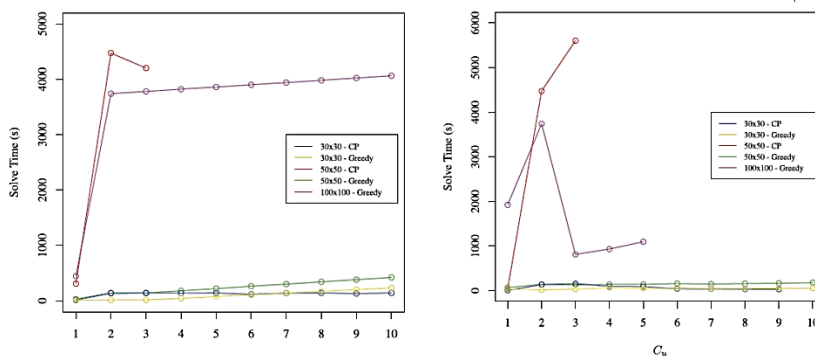
**گام دوم:** برای هر سناریوی نظامی نخست الگوریتم ژنتیک را برای  $N$  وسیله حمل و نقل در نسل  $G$  اجرا کن؛ دوم نگاشت گزینه‌ها از منظر تخصیص را برای هر یک از سناریوهای ناوگان مشخص کن و سپس ناوگان تکراری را حذف کن.

**گام سوم:** برای هر سناریوی  $Y, \dots, i=1$  و هر یک از ناوگان  $Y, \dots, k=1$  سناریوهای هر ناوگان نظامی را با سایر سناریوها مقایسه کن و اگر سناریوی یادشده در طبقه  $k$  ام قرار دارد، سناریوی  $k$  ام توسط ناوگان حمل و نقل اجرا شود.

**گام چهارم:** بر اساس درصد سناریوهای قابل اجرا توسط ناوگان حمل و نقل، امتیازی را به آن تخصیص بده.

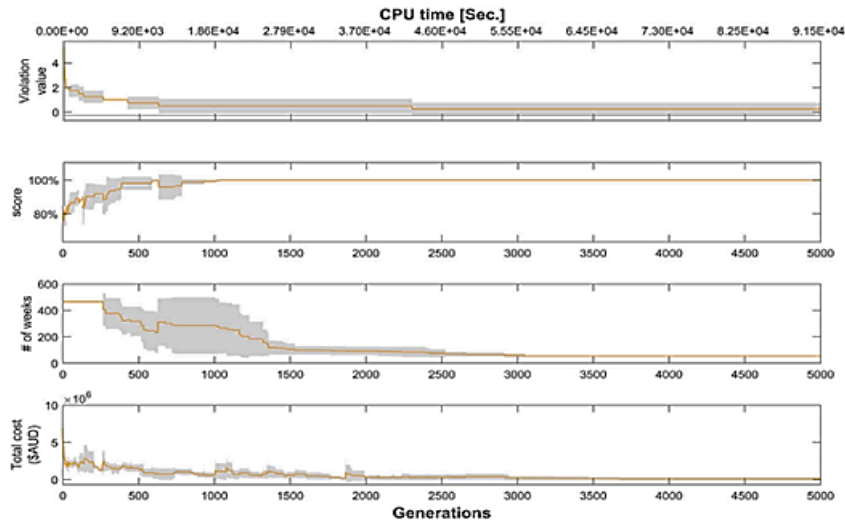
جمعیت نخستین بر اساس الگوریتم ژنتیک ۴۰۰ عضو داشت که پس از بهینه‌سازی به ۵۰ سناریوی ( $Y=50$ ) محتمل و کم‌ریسک تقلیل یافت. الگوریتم ژنتیک برای نسل  $G=50$  با نرخ جهش  $0/20$  پیاده‌سازی گردید و پس از هر بار اجرای الگوریتم، سناریوهای مأموریت‌ها به ناوگان حمل و نقل تخصیص داده شد. در ادامه پس از هر بار حذف ناوگان تکراری درنهایت به‌ازای هر سناریو تعداد ۲۵۲۸۵ حالت برای ناوگان حمل و نقل نظامی باقی ماند.

بنابراین چنانچه  $D$  مجموع کل منابع مورد استفاده توسط واحد حمل و نقل نیروهای مسلح باشد و  $Q$  نشان‌دهنده حداکثر تعداد یال‌ها (کمان‌ها) به سمت مقاصد عملیاتی باشد و  $C_{ij}$  حداکثر تعداد موانع فراروی واحد حمل و نقل در عملیات باشد در این صورت تصویر شماره (۳) اندازه هر یک از مسائل را در برابر زمان و نیز حداکثر زمان مواجهه با موانع حمل و نقل را برای حالت‌هایی که  $D=2\%$ ،  $Q=2$  و  $C_{ij}=2$  و هر یک از اشیا موجود در جمعیت نخستین برای پس از اجرای الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد:



تصویر (۳) تصویر سمت راست زمان حل با توجه به ظرفیت جابه‌جایی تجهیزات نظامی از طریق الگوریتم ژنتیک برای حالتی که تعداد موانع فراروی واحد حمل و نقل نمونه دارای مقدار ۲ و تصویر سمت چپ زمان حل را برای حالتی که تعداد مسیر منتهی به موقعیت جنگی ۲ است را نشان می‌دهد.

همان گونه که در تصویر شماره (۳) مشاهده می‌شود مقادیر مرتبط با پتانسیل ناوگان حمل و نقل (ظرفیت و قابلیت حمل بار و نیروهای نظامی) و هزینه‌های مرتبط با آن پس از اعمال الگوریتم ژنتیک ترسیم شده است. براین اساس به نظر می‌رسد قابلیت‌های ناوگان با افزایش مقدار بودجه به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. از این رو با اعمال الگوریتم پیشنهادی بدون افزایش هزینه تا حدود ۴۰۰ ناوگان حمل و نقل نظامی می‌توانند بیش از ۸۰ درصد سناریوهای مأموریت را اجرا نمایند. دیگر یافته نشان از آن دارد که تنها با افزایش یک درصد در بودجه امکان سازگاری ۸۰ درصد از سناریوها برای حدود از ۸۰۰۰ وسیله نقلیه در ناوگان نظامی و افزایش تنها ۴ درصد در هزینه‌ها امکان‌پذیر می‌شود؛ بنابراین با توجه به ویژگی‌های خاص سناریوهای مورد استفاده در عملیات نظامی افزایش هزینه با توجه به تعداد دفعات و مدت زمان مأموریت قابل توجه است. در این مطالعه پس از یافتن بهترین ترکیب پارامترهای تصمیم‌گیری، فرایند شبیه‌سازی در رویکرد بهینه‌سازی بر روی رایانه شخصی با پردازنده اینتل ۷ هسته‌ای، رم ۱۶ گیگابایت با یک CPU به سرعت ۳/۱۹ گیگاهرتز برای ۳۰ اجرا با ۵۰۰۰ نسل به ازای هر اجرا مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه پیاده‌سازی شبیه‌سازی در رایانه نشان داد که استفاده از رویکرد پیشنهادی از نظر یافتن بهترین نتیجه ممکن با مقیاس‌های (افزایش ظرفیت و کاهش هزینه) برای امکان‌سنجی راه‌حل‌ها در مأموریت‌های نیروی هوایی ارتش در سناریوی پیشنهادی تا حدود قابل ملاحظه‌ای راندمان CPU را افزایش می‌دهد. تصویر شماره (۴) راندمان CPU را پس از پیاده‌سازی فرایند شبیه‌سازی رویکرد پیشنهادی در رایانه نشان می‌دهد.

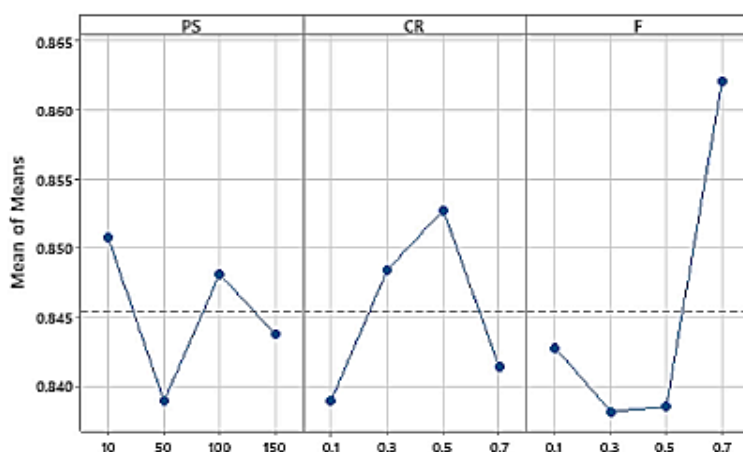


شکل ۴. راندمان CPU در نسل‌ها بر حسب زمان محاسباتی پس از اجرای رویکرد شبیه‌سازی در رایانه

## نتیجه‌گیری

برنامه‌ریزی حمل و نقل نظامی در محیط‌های جنگی علاوه بر مواجهه چالش‌های مرسوم و مسائل مسیریابی با موانع دیگری نیز روبرو است که در منطقه جنگی منحصر به فرد می‌نماید. علاوه بر محدودیت‌های حمل و نقل مرسوم (میزان ظرفیت و تقاضا)، چالش‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را نیز در بر می‌گیرد که دارای روابط نام‌حزب و پیچیده است. چنین چالش‌هایی زمان حل مسائل را در محاسبات مرسوم افزایش می‌دهد. از این رو لازم است در ابتدا مسئله به شکل محدب و خطی تبدیل شود. در این تحقیق برای حل مسائل نمونه با ابعاد دنیای واقعی که در شرایط عادی توسط حل‌کننده‌های معمول به جواب نمی‌رسند از طریق تکنیک‌های تحلیل حساسیت و الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای نیل به بینش‌های کمی در پشتیبانی از برنامه‌های حمل و نقل نظامی با پیچیدگی‌های محاسباتی کمتر در مقایسه با حل‌کننده‌های معمول پیاده‌سازی گردید. نتایج نشان داد که حل کامل مسئله از طریق الگوریتم پیشنهادی کارایی بالاتری دارد. در این روش برای تبدیل متغیرهای اعشاری به متغیرهای عدد صحیح از روش گرد کردن استفاده شد. این تکنیک ضمن ارائه نمایش بهتر، ساز و کارهای کنترلی را دقیق و کارآمد نموده و نمایش مناسبی از مجموعه جواب به تصمیم‌گیرندگان ارائه می‌دهد که می‌تواند علاوه بر حمل تجهیزات و نیروهای نظامی، برنامه‌های دشمن را نیز مختل نماید. تصویر شماره (۵) امتیاز میزان استواری را براساس الگوریتم ژنتیک برای مؤلفه‌های تحقیق نشان می‌دهد.

Main Effects Plot for Means  
Data Means



تصویر (۵) میانگین تعداد وسایل نقلیه پروازی برای داده‌های بامعنی تحقیق

بنابراین مشاهده می‌شود که راهکردهای متنوعی برای هر بهبود قابلیت‌های ناوگان حمل و نقل نظامی وجود دارد که می‌تواند سبب رشد سطح هزینه‌ها گردد. به‌عنوان یک مثال چنانچه تعداد اشیاء ناوگان هوایی ۱۰۰ باشد و هزینه تا ۰/۵ درصد افزایش یابد در این صورت می‌توان با افزودن یک وسیله نقلیه به ناوگان در حال مأموریت، سناریوی بهبود و ارتقا را برای انطباق با هزینه‌های محاسباتی سازگار نمود و هزینه‌های اضافی برای ناوگان حمل و نقل سازمان‌دهی شود. در این مطالعه نشان داده شد که چگونه می‌توان میزان استواری و سازگاری مجموعه ناوگان حمل و نقل نظامی را تعیین نمود. اطلاعات به‌دست آمده از این ارزیابی به تعیین موقعیت راهبردی ناوگان حمل و نقل نظامی و روابط آن با سایر وسایل نقلیه ناوگان کمک می‌نماید. عوامل کلیدی بروز ریسک در محیط نظامی به طور قابل ملاحظه‌ای بر دیدگاه بهره‌گیری از راهکردها در ارتقای ناوگان حمل و نقل نظامی به‌منظور توسعه سناریوهای بهبود عملکرد مأموریت‌های جنگی تأثیر می‌گذارد.

در جدول شماره (۳) به مقایسه میان عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در تحقیق حاضر و سایر چارچوب‌های مشابه در الگوریتم‌های ژنتیک مورد استفاده توسط محققان دیگر و نیز مدل‌های مشابه ارائه شده نظیر الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) پرداخته شده است. وجه تشابه این سه مدل در سادگی به‌دست آوردن تابع برازش و استفاده از عملگرهای متقاطع و جهش است که این امکان را فراهم می‌نماید تا راندمان اجزای جدید افزوده شده، مورد ارزیابی قرار گیرد که از آن جمله می‌توان به بهبود توابع اکتشافی، طراحی عملگرهای متقاطع و توابع مرتب‌سازی اشاره نمود.

جدول ۳. مقایسه الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در تحقیق حاضر با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی ناوگان حمل و نقل نظامی

اندازه جمعیت	نسل‌ها	تعداد اجرا	عملگر جهش	عملگر متقاطع	روش اصلاح (بهبود) ابتکاری پیشنهادی	شبیه‌سازی تابع تناسب	الگوریتم‌ها
۵	۵۰۰۰	۲۰	پایین‌ترین سطح	تقاطع دونقطه‌ای	✓	✓	الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در تحقیق حاضر
۵	۵۰۰۰	۲۰	تلنگر (تغییر مقادیر ژن‌ها) و سولکوفسکی و همکاران (۲۰۱۹)	تقاطع یکنواخت و سولکوفسکی و همکاران (۲۰۱۹)	×	✓	الگوریتم ژنتیک استاندارد (GA)
۵	۵۰۰۰	۲۰	DE/best/1 توران و همکاران (۲۰۲۲)	تقاطع نمایی و ووتاشک و سولکوفسکی (۲۰۱۷)	×	✓	الگوریتم تکامل تفاضلی (DE)



همان گونه که در جدول شماره ۳ مشاهده می‌شود تابع تناسب و اصلاح نسل‌ها در الگوریتم پیشنهادی از طریق عملگر تقاطع دو نقطه‌ای و عملگر جهش پایین‌ترین سطح در تعداد اجرای ۲۰ بر روی ۵۰۰۰ نسل با اندازه جمعیت ۵ اعمال شده است در حالی که روش اصلاح در سایر مطالعات دیده نمی‌شود که این خود نقطه قوت روش پیشنهادی در تحقیق حاضر به شمار می‌رود. همچنین در سه الگوریتم نمایش با راه‌حل‌های مشابه از منظر پیکره‌بندی و عملکرد در شرایط مشابه مقایسه شده است.

از نتایج مهم این تحقیق که هم‌راستا با برخی مطالعات نظیر وسولکوفسکی و همکاران (۲۰۱۹) است می‌توان به افزایش سرعت ارزیابی گزینه‌ها با اولویت‌ظرفیت حمل‌نیروهای دفاعی و تسلیحات نسبت به هزینه بر اساس امتیاز اکتسابی اشاره نمود. باین حال تخصیص بودجه نادرست برای انجام مأموریت‌های نظامی می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد ناوگان حمل‌ونقل نظامی داشته باشد؛ اما باین حال، تخصیص بودجه اشتباه برای عملیات نظامی (به‌عنوان مثال، کسب، ارتقا و بازنشستگی) ممکن است تأثیر منفی بر ناوگان حمل‌ونقل هوایی داشته باشد؛ بنابراین به‌عنوان یک پیشنهاد به محققان آتی می‌توان چگونگی بهبود ناوگان حمل‌ونقل نظامی را در شرایط واقعی با استفاده از چارچوب ارائه‌شده در این مطالعه و نیز بررسی و تعیین اوزان هر هدف به‌منظور ایجاد جذابیت در محیط اقتصادی و تعیین میزان تمایل تصمیم‌گیرندگان برای پذیرش ریسک از جمله مواردی است که توصیه می‌شود.

## فهرست منابع

- خاندوزی، راحله. (۱۳۹۹): یک روش جدید برای حل مسئله مکان‌یابی تجهیزات نظامی برای حفاظت سایت‌های استراتژیک با استفاده از الگوریتم فراابتکاری آموزش و یادگیری. دوفصلنامه بازی جنگ، دوره ۳، شماره ۶، صص ۱۵۵ تا صفحه ۱۹۳.
- رجبی مشتاقی، حجت اله. طلوعی اشلقی، عباس. معتدل، محمدرضا. (۱۴۰۰): ارائه یک الگوریتم فراابتکاری جدید: الگوریتم بهینه‌سازی نظامی، شماره ۳، دوره ۶، صص ۳۰۴-۳۲۹.
- شهلائی، ناصر. مرادیان، محسن. لطفی، احمد. هادی‌نژاد، فرهاد. (۱۳۹۵): طراحی مدل ریاضی برای پیش‌بینی مکان بهینه مراکز آمادی در شرایط جنگ‌های آینده. فصلنامه آینده‌پژوهی دفاعی. دوره ۱، شماره ۱، شهریور ۱۳۹۵، صص ۴۵-۶۴.
- قربانی صابر، رضا. رنجبر، محمد. (۱۳۹۷). بهینه‌سازی و حل مسئله تخصیص و زمان‌بندی سنسور - سلاح/تهدید به صورت یکپارچه. چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع و سیستم‌ها مددی، سعید. تومانیان، آرا. اخوان، امیرناصر. (۱۳۹۷): سناریوهای پیش‌روی شاخص‌های راهبردی توسعه فناوری اطلاعات مکانی در حوزه دفاعی با رویکرد پویایی سیستم، فصلنامه آینده‌پژوهی دفاعی، دوره ۳، شماره ۱۱، صص ۱۱۹-۱۴۲.
- Abbass, H. A., Bender, A., Dam, H. H., Baker, S., Whitacre, J., & Sarker, R. (2018). Computational scenario-based capability planning. In Proceedings of the 10th annual conference on Genetic and evolutionary computation (pp. 1437-1444).
- Abbass, H., Bender, A., Baker, S., & Sarker, R. (2017). Anticipating future scenarios for the design of modularised vehicle and trailer fleets. In SimTecT2007, Simulation Conference.
- Adamides, E., Stamboulis, Y., & Varelis, A. 2014. Model-based assessment of military aircraft engine maintenance systems. Journal of the Operational Research Society, 55(9), 957-967.
- AM Grisogono and A Ryan, Designing complex adaptive systems for defence, Proc. SETE Conference, Canberra, Australia, 2003.
- Ausseil, R., Gedik, R., Bednar, A., & Cowan, M. (2020). Identifying sufficient deception in military logistics. Expert Systems with Applications, 141, Article 112974.
- Baker, S. F., Morton, D. P., Rosenthal, R. E., & Williams, L. M. (2002). Optimizing military airlift. Operations Research, 50(4), 582-602.
- Bankes, S. C. (2012). Agent-based modeling: A revolution?. Proceedings of the National Academy of Sciences, 99(suppl\_3), 7199-7200.
- Bar-Yam, Y. (2013). Dynamics of complex systems (Studies in Nonlinearity). Boulder.
- Baykasoğlu, A., Subulan, K., Taşan, A. S., & Dudaklı, N. (2019). A review of fleet planning problems in single and multimodal transportation systems. Transportmetrica A: Transport Science, 15(2), 631-697.
- Bisht, S. 2014. Hybrid genetic-simulated annealing algorithm for optimal weapon allocation in multilayer defence scenario. Defence Science Journal, 54(3), 395.
- Bivona, E., & Montemaggiore, G. B. (2015). Understanding short-and long-term implications of “myopic” fleet maintenance policies: A system dynamics application to a city bus company. System Dynamics Review, 26(3), 195-215.
- Blank, J., & Deb, K. (2022). pysamoo: Surrogate-Assisted Multi-Objective Optimization in Python. arXiv preprint arXiv:2204.05855.

- Brown, G. G., & Kline, J. E. (2021). Optimizing navy mission planning. *Military Operations Research*, 26(2), 39–58.
- Deng, Q., Santos, B. F., & Verhagen, W. J. (2021). A novel decision support system for optimizing aircraft maintenance check schedule and task allocation. *Decision Support Systems*, 146, Article 113545.
- Emerson, D. E. 2003. Simulation models for assessing force generation and logistics support in a combat environment. *Systems Analyses and Modelling in Defence, Development Trends and Issues*.
- Guliev, I., Kerimov, V. Y., Etirmishli, G., Yusubov, N., Mustaev, R., & Huseynova, A. (2021). Modern geodynamic processes and their impact on replenishment of hydrocarbon resources in the black sea–caspien region. *Geotectonics*, 55(3), 393–407.
- Hellyer, M. (2020). The cost of defence 2020–2021. Part 2: ASPI defence budget brief | Australian Strategic Policy Institute | ASPI.
- Lausch, A., & Wesolkowski, S. (2018). Matching air mobility tasks to platforms: Preliminary algorithm and results. DRDC CORA Technical Note.(under review).
- Leboucher, C., Shin, H. S., Le Ménéec, S., Tsourdos, A., Kotenkoff, A., Siarry, P., & Chelouah, R. 2017. Novel evolutionary game based multi-objective optimisation for dynamic weapon target assignment. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 3936-3941.
- Li, J., Ge, B., Jiang, J., Yang, K., & Chen, Y. 2023. High-end weapon equipment portfolio selection based on a heterogeneous network model. *Journal of Global Optimization*, 78, 743-761.
- Li, X., & Epureanu, B. I. (2020). An agent-based approach to optimizing modular vehicle fleet operation. *International Journal of Production Economics*, 228, Article 107733.
- Mazurek, M., & Wesolkowski, S. (2012). Fleet mix computation using evolutionary multiobjective optimization. In 2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) (pp. 46-50). IEEE.
- Rempel, M. (2015). On a second generation strategic decision-making process for the Canadian forces: Technical report, Defence Research and Development Canada Centre for Operational Research and Analysis.
- Taylor, B., & Lane, A. 2014. Development of a novel family of military campaign simulation models. *Journal of the Operational Research Society*, 55(4), 333-339.
- Turan, H. H., Jalalvand, F., Elsayah, S., & Ryan, M. J. (2022). A joint problem of strategic workforce planning and fleet renewal: With an application in defense. *European Journal of Operational Research*.
- Upadhy, K. S., & Srinivasan, N. K. 2015. System simulation for availability of weapon systems under various missions. *Systems engineering*, 8(4), 309-322.
- Wesolkowski, S., & Billyard, A. (2018). The stochastic fleet estimation (SaFE) model. In *Proceedings of the 2008 Spring simulation Multiconference* (pp. 1-5).
- Wesolkowski, S., Mazurek, M., Whitacre, J. M., Abbass, H., & Bender, A. (2019). Robustness and adaptability analysis of future military air transportation fleets.
- Wojtaszek, D., & Wesolkowski, S. (2017). Military fleet mix computation and analysis [application notes]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 7(3), 53–61
- Yang, A., Abbass, H. A., & Sarker, R. (2016). Characterizing warfare in red teaming. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 36(2), 268-285.
- Yang, S., Yang, M., Wang, S., & Huang, K. 2019. Adaptive immune genetic algorithm for weapon system portfolio optimization in military big data environment. *Cluster Computing*, 19, 1359-1372.
- Zhao, X., Yuan, Y., Dong, Y., & Zhao, R. 2021. Optimization approach to the aircraft weight and balance problem with the centre of gravity envelope constraints. *IET Intelligent Transport Systems*, 15(10), 1269–1286.

