فصلنامه مدیریت و پژوهش‌های دفاعی

ارائه یک الگوی پایدار برای ناوگان حمل‌ونقل نیروی هوایی در عملیات نظامی با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار

پژمان صالحی[۱] | مهران خلج[۲] | داود جعفری[۳]

۹۹

سال بیست و دوم
بهار ۱۴۰۲

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۵/۳۱
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۲/۰۳
صص: ۱۹۹-۱۷۳

شاپا چاپی: ۶۱۲۱-۲۰۰۸
الکترونیکی: ۵۲۱۸-۲۶۴۵

چکیده

در چارچوب جنگ‌های مدرن امروزی، نیروهای مسلح با چالش‌ها و موانع عدیده‌ای مواجه هستند که می‌تواند قدرت پیش‌بینی‌های رزم‌ها را در عملیات نظامی به‌شدت 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 برنامه‌ریزی‌شده و نیز تسهیلات ضروری و مطلوب حمل‌ونقل برای جابه‌جایی نفرات و ادوات جنگی نیازمند است. ازاین‌رو طراحی یک مدل ریاضی که بتواند برنامه‌ریزی حمل‌ونقل نظامی را مشخص سازد، اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. در مدل‌های حمل‌ونقل نظامی، برآورده‌ساختن تقاضاهای مقصد برای ترابری تجهیزات و نیروهای نظامی باتوجه‌به محدودیت‌های ظرفیت در نقاط گوشه عملیاتی (منطقه موجه جواب) به مقاصد جنگی، در واقع ناظر بر فن تصمیم‌گیری برای یافتن بهترین گزینه‌ها باتوجه‌به محدودیت‌های زمانی، مسیریابی و ظرفیت در حمل‌ونقل ادوات به منطقه جنگی است. حال باتوجه‌به آنکه مدل‌های ریاضی حمل‌ونقل تجهیزات نظامی غالباً دومرحله‌ای، غیرخطی و نام حزب هستند ازاین‌رو در تحقیق حاضر برای فرموله سازی و طراحی مدل از روش خطی سازی و یک مرحله ای سازی ورود نمونه‌ها با استفاده از الگوریتم های فرا ابتکاری در فضای حالت نزدیک به محیط واقعی به توسعه رویکردهای اکتشافی برای یافتن گزینه های بهینه پرداخته شده است. همچنین در این مطالعه لحاظ نمودن اهداف بعضاً متضاد در فضای ابهام و عدم‌قطعیت که در آن گزینه ها برای کسب منابع در رقابت هستند، بهره گیری از رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه را برای محققان به‌منظور یافتن مجموعه جواب موجه به این رقابت ها در شرایط رویارویی با عدم‌اطمینان و ابهام موجود در محیط‌های عملیاتی به‌منظور طرح‌ریزی و سازماندهی ناوگان حمل‌ونقل ضروری نموده است. بنابراین در این مطالعه پس از تعیین مفروضات، متغیرها و پارامترهای مدل تصمیم‌گیری به بررسی و ارزیابی میزان استواری مدل حمل‌ونقل ناوگان نظامی در برابر ریسک‌های محتمل و محدودیت‌های موجود در سناریوهای مختلف از طریق الگوریتم ژنتیک پرداخته گردید. نتایج آزمون های محاسباتی نشان داد که الگوریتم های اکتشافی در مقایسه نمونه های کوچکتر یک حل‌کننده مطلوب برای رسیدن به راه‌حل‌های بهینه محسوب می‌شوند.

کلیدواژه‌ها: روش استواری، ناوگان حمل‌ونقل نظامی، عملیات جنگی، نیروی هوایی، الگوریتم ژنتیک

DOR: 20.1001.1.20086121.1402.22.99.8.8

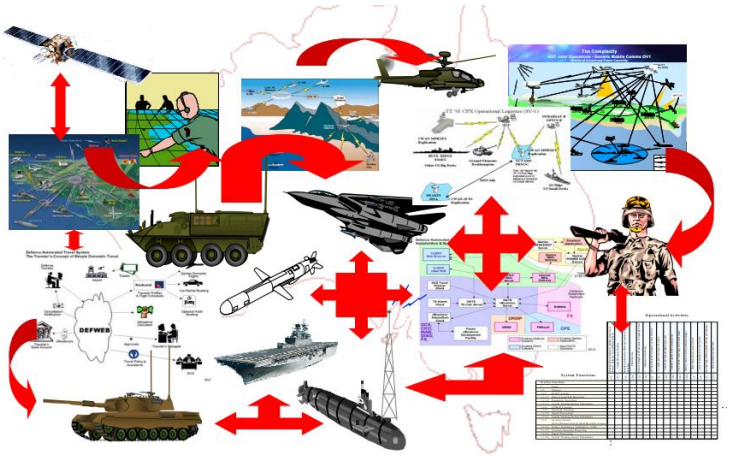
۱. نویسنده مسئول: دکتری تخصصی، گروه مهندسی صنایع آموزشی دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه آزاد واحد پرند، تهران، ایران
pejmansalehi.metro@gmail.com
۲. دانشیار ، دانشیار گروه آموزشی مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، تهران، ایران
۳. دکترای تخصصی دانشیار، دانشیار گروه آموزشی مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، تهران، ایران

مقدمه

در فرایندهای نظامی یکی از مهم‌ترین چالش‌های فراروی فرماندهان و طراحان عملیات برای برنامه‌ریزی؛ ابهام، اطلاعات ناقص و عدم‌قطعیت در محیط‌های جنگی است که گاهی عدم‌اطمینان موجود در فرایندهای آن همسان سایر پدیده‌های حساس، تصمیم‌سازان دفاعی را متأثر می‌سازد (ژائو[1] و همکاران، ۲۰۲۱). در فرایند تجزیه‌وتحلیل و طراحی سامانه‌های نظامی؛ نیازهای جنگی، وظایف کارکردی، نقاط قوت، ضعف‌ها، تهدیدها و فرصت‌های پنهان در محیط‌های عملیاتی، غالباً ماهیتی غیرقابل‌پیش‌بینی داشته و وجوه آن میان موجودیت‌های مختلف در جریان است (امرسون[2]، ۲۰۰۳). دراین‌بین یکی از چالش‌های عمده ی فراروی برنامه‌ریزی راهبردی، مواجهه‌ی با طیف گسترده‌ی عدم‌قطعیت در ابعاد مختلف عملیات جنگی است (لاوچ و وسولکوفسکی[3]، 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[4]، ۲۰۱۳). ازاین‌رو به‌منظور رویارویی با چالش‌های فراروی فرماندهی لازم است منشأهای بروز عدم‌اطمینان و ابهام‌های محیطی شناسایی‌شده و ضمن محاسبه میزان عدم‌قطعیت، گزینه‌های مؤثر و پایدار برای بهینه‌سازی حمل‌ونقل نظامی در شرایط غیرقابل‌پیش‌بینی محیط جنگی و فرصت‌های برآمده از آن، مورد ارزیابی قرار گیرد (تیلور و لین[5]، ۲۰۱۴). از سوی دیگر باتوجه‌به اهداف متعدد و رقابت میان آن‌ها برای کسب منابع و تمایز ویژه محیط‌های نظامی از سایر محیط‌ها، نمی‌توان یک راه‌حل بهینه ی منحصربه‌فرد از مجموعه موجه جواب ارائه نمود. ازاین‌رو لازم است گوشه بهینه‌ای ارائه گردد که بتواند به چالش‌های نوظهور محیط‌های نظامی تحت شرایط ریسک و عدم‌قطعیت پاسخ دهد (یانگ[6] و همکاران، ۲۰۱۶). به‌منظور ارتقای سطح قابلیت اطمینان برای استقرار مؤثر نیروها و ادوات نظامی، تصمیم سازان 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

حمل‌ونقل را از طریق مدرن‌سازی سیستم‌ها در چارچوب متدولوژی‌های مدیریت پروژه و خط‌مشی های فرماندهی از طریق برنامه‌های انعطاف‌پذیر پیاده‌سازی نمایند (لی و اپورئانو[1]، ۲۰۲۰). ناوگان حمل‌ونقل تسهیلات نیروهای مسلح از وسایل نقلیه جاده‌ای و ریلی، آبی، انواع بالگردها و هواپیماهای حمل نیروهای نظامی یا تجهیزات باری تشکیل‌شده که لحاظ آن در طراحی و پیاده‌سازی تصمیمات نظامی به‌عنوان یک عامل کلیدی موفقیت لحاظ می‌شود (براوان و کلاین[2]، ۲۰۲۱). ناوگان حمل‌ونقل نظامی در عملیات جنگی هنگامی کارا و مؤثر است که بتواند از پتانسیل های موجود برای حداکثرسازی هدف‌هایی نظیر جابه‌جایی تجهیزات با ارزش بالا در جنگ نظیر تانک و نفربر وغیره... بهترین استفاده را نماید (آپادیا و سرینیواسان[3]، ۲۰۱۵). تصویر شماره (۱) فعالیت های مرتبط با سناریونویسی و معماری یک عملیات نظامی را با لحاظ ناوگان حمل‌ونقل و نیروهای نظامی بر اساس جریان اطلاعات و ادوات نشان می‌دهد.



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

بااین‌حال مطالعه پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که بازنشسته نمودن ناوگان حمل‌ونقل فرسوده و نیز ارتقا و مدرن‌سازی آن از منظر مالی در طبقه‌بندی ردیف بودجه‌های پرهزینه برای نیروهای مسلح به شمار می‌آید (هلیر[4]، ۲۰۲۰). ناوگان حمل‌ونقل نیروهای مسلح به طور عمده از دو عامل

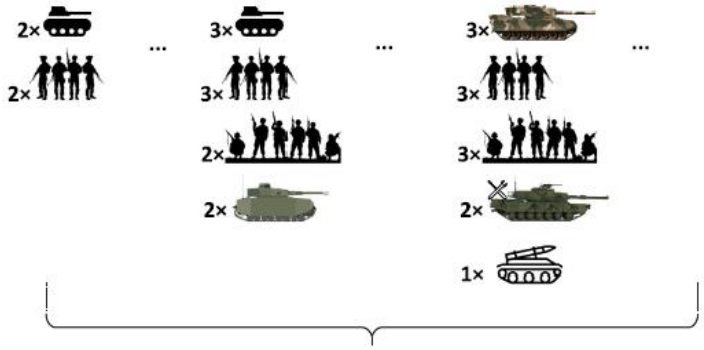
1. Li &Epureanu
2. Brown & Kline
3. Upadhya & Srinivasan
4. Hellyer

پایه‌ای تشکیل‌شده 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 درمجموع می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر عملکرد ناوگان حمل‌ونقل نیروهای مسلح داشته باشند (ووتاشک و وسولکوفسکی[1]، ۲۰۱۷). مطالعه انجام‌شده توسط دنگ[2] و همکاران (۲۰۲۱) در خصوص افزایش بهره‌وری ناوگان حمل‌ونقل در هنگ‌های نظامی نشان می‌دهد که در کشورهایی نظیر استرالیا، اندونزی و ژاپن، هزینه‌های مترتب بر عملیات به‌روزرسانی، توسعه و بهبود ناوگان حمل‌ونقل نظامیِ 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 باتوجه‌به 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 تجزیه‌وتحلیل‌ها مؤلفه‌های مختلف آن‌ها در ناوگان حمل‌ونقل نیروهای مسلح ضرورت می‌یابد (جولیِو و همکاران[3]، ۲۰۲۱). از طرفی به دلیل وجود تنوع فراوان در زمینه‌هایی که ناوگان حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل نظامی با مسائل متعددی به‌ویژه در محیط‌های تاکتیکی مواجه است که گاه به علت پیچیدگی‌های محیطی و عدم‌قطعیت داده‌ها، حل آن‌ها و یافتن مجموعه موجه جواب را دشوار می‌نماید (اوسیلی[4]، ۲۰۲۰). ازاین‌رو کارکرد رویکردهای چندهدفه برای زمان‌بندی ناوگان حمل‌ونقل 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 به‌صورت فزاینده‌ای روبه‌رشد است (بایکاس اوغلو[5] 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

حمل‌ونقل در سازمان‌های نظامی برخی کشورها ازجمله نیروی دریایی ایالات متحده، وزارت دفاع کانادا، نیروی زمینی چین و نیروی هوائی روسیه دیده می‌شود (براون و کلاین[1]، ۲۰۲۱). بررسی چارچوب‌های مفهومی مرتبط با پشتیبانی نیروهای مسلح و محاسبات ناوگان حمل‌ونقل نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری‌های راهبردی در خصوص نحوهٔ تخصیص و انتساب موجودیت‌های نظامی به‌منظور 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 مجموعهٔ جواب‌های موجه به‌منظور برآورده نمودن نیازها و تحقق مقاصد عملیاتی به‌طوری‌که 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 شیوهٔ مواجهه با مسائل مرتبط با محاسبات ناوگان حمل‌ونقل نظامی است؛ اما پیاده‌سازی تکنیک‌های شبیه‌سازی به طور قابل‌ملاحظه‌ای در الگوهای بهینه‌سازی، خروجی‌های مدل را به واقعیت نزدیک می‌سازد (همان منبع، ۱۴۰۰). در ارزیابی روابط ریاضی ناوگان حمل‌ونقل، عمدتاً الگوی «مبتنی بر سناریو» به‌منظور برآورد راندمان بخشی از ناوگان که برای انجام‌وظیفه یا برآوردن نیازی خاص در قالب آرایش نظامی از قبل طراحی‌شده، مورداستفاده قرار می‌گیرد (شهلائی و همکاران، ۱۳۹۵). استفاده از رهیافت‌های شبیه‌سازی معمولاً برای ارزیابی کارایی ناوگان حمل‌ونقل نظامی انجام می‌شود درحالی‌که 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). هرچند مدل‌سازی چنین طرح‌هایی از نظر محاسباتی به نظر قدری دشوار و دور از دسترس می‌نماید؛ اما بااین‌حال اهمیت حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی یک کشور لزوم توسعه شیوه‌های محاسباتی را برای طراحی آلترناتیوهای مواجهه با مسائل عدم‌قطعیت در فضای حالت جنگ‌های کلاسیک مشخص می‌سازد (ووتاشک و وسولکوفسکی، ۲۰۱۷). تصویر شماره (۲) نشان می‌دهد که چگونه هر یک از ابعاد مسئله ترکیبی حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل متناسب با نیروهای نظامی و جنبه‌های مختلف عملیات جنگی (منبع: وسولکوفسکی و همکاران، ۲۰۱۹)

بنابراین مسئله اصلی تحقیق حاضر ارزیابی ناوگان حمل‌ونقل نظامی و بررسی میزان استواری آن به‌منظور 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 کاندیدهای ناوگان برای یافتن نقطه بهینه است. ازاین‌رو در مطالعه حاضر کوشیده می‌شود علل عدم‌قطعیت در محیط‌های جنگی و شیوه‌های مواجهه با آن از طریق تکنیک‌های محاسباتی مبتنی بر سناریو در مطالعه موردی ناوگان حمل‌ونقل نیروی هوایی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. روش مورداستفاده 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 حمل‌ونقل 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 به‌دست‌آمده از تکرارهای قبلی برای یافتن راه‌حل (یانگ[1] و همکاران، ۲۰۱۹). رایج‌ترین رویکردهای فراابتکاری برای حل مسائل حمل‌ونقل نظامی عبارت‌اند از الگوریتم جستجوی ممنوعه، الگوریتم‌های ژنتیک، الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی‌شده 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 مورداستفاده قرار گرفته است (بیشت[2]، 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؛ **نخست:** 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 حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل» (رمپل[3]، ۲۰۱۵). جداول زمان‌بندی حداکثرسازی استفاده از ظرفیت‌های ناوگان حمل‌ونقل نظامی مشخص می‌سازند که چگونه ناوگان حمل‌ونقل نظامی در طول دوره مأموریت‌های عملیاتی به‌منظور تحقق اهداف تعیین‌شده و با لحاظ پارامترهای مدل تصمیم‌گیری و محدودیت‌های بودجه و منابع، برنامه‌ریزی می‌شود و درنهایت آنکه چگونه هر یک از ابعاد مسئله ترکیبی ناوگان برحسب نوع داده‌های ورودی و خروجی‌های مورد انتظار، به طور مستقل و یا ترکیبی مورداستفاده تحلیل و بررسی می‌گیرد (قربانی و رنجبر، ۱۳۹۷). در تحقیقی که توسط بایکاس اوغلو و همکاران (۲۰۱۹) صورت‌گرفته است، محققان به شناسایی و تحلیل عوامل حیاتی موفقیت برای بینه سازی ناوگان حمل‌ونقل نظامی و عوامل تأثیرگذار بر آن نظیر عدم‌قطعیت، داده‌های مبهم محیطی، مسیریابی صحیح و چندهدفه بودن به‌منظور 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 حمل‌ونقل نظامی، احتمالاً با نوعی عدم‌قطعیت کارکردی، ریسک و ابهام در نتایج قابل‌انتظار از عملکرد ناوگان حمل‌ونقل نظامی باتوجه‌به درجه برخورداری دشمن از فناوری‌های مدرن در میدان رزم، میزان صحیح و دقیق بودن فرایند جابه‌جایی ادوات موردنیاز 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[1] و همکاران (۲۰۱۴) و بیوونا و مونتماگیوره[2] (۲۰۱۵) به‌منظور بررسی نتایج بلندمدت و کوتاه‌مدت نگهداری و تعمیرات در مدیریت ناوگان حمل‌ونقل نظامی از طریق مدل شبیه‌سازی الگوریتم محاسباتی انجام‌شده، محققان نشان داده‌اند که نت برنامه‌ریزی‌شده می‌تواند، توان و پتانسیل ناوگان حمل‌ونقل نظامی را ارتقا داده و احتمال مسیریابی بهینه را ممکن نماید. در مطالعه دیگری که توسط بیکر[3] (۲۰۰۲) انجام‌شده، محقق از رویکرد برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای ارتقای شرایط ناوگان هوانیروز و بهینه‌سازی زمان‌بندی آن برای حمل‌ونقل کالا و بارهای نظامی در مأموریت‌های جنگی بهره گرفته است. در مطالعه یادشده محقق به زیر مسئله‌های مسیریابی و زمان‌بندی باتوجه‌به محدودیت‌هایی نظیر دردسترس‌بودن 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 حمل‌ونقل نظامی موفق بوده؛ اما بااین‌حال 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، ازاین‌رو 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 می‌توانند 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 توسعه‌یافته 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 حمل‌ونقل از طریق الگوریتم ژنتیک باتوجه‌به راهبردهای استواری و سیاست‌های ارتقای فن آوری و به‌روزرسانی ناوگان حمل‌ونقل 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 به‌صورت 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 بااین‌حال 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 حمل‌ونقل نیروی دریایی و تجزیه‌وتحلیل تبعات مرتبط با تصمیمات کوتاه‌مدت و بلندمدت با لحاظ دردسترس‌بودن منابع و تناسب آن با نتایج الگوریتم‌های بهبود ناوگان دریایی برای یافتن استراتژی‌های بهینهٔ 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 حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل نظامی و برنامه‌ریزی‌های زمان‌بندی مربوطه با استفاده از رهیافت‌های بهینه‌سازی چندهدفه صورت‌گرفته که از آن جمله می‌توان به مطالعه براون[1] و همکاران (۲۰۲۲) اشاره نمود که در آن مسئله زمان‌بندی ناوگان بالگردهای نظامی با استفاده از

1. Brown

مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط[1] (MILP) فرموله شده است. در مطالعه یادشده محققان از رویکرد MILP به‌منظور تعیین زمان‌بندی بهینه برای سیر و حرکت ناوگان نیروی هوایی به سمت مقاصد مأموریت در یک دوره زمانی مشخص باتوجه‌به محدودیت‌هایی نظیر طول عمر مفید هلی‌کوپترها در ناوگان هوایی، بودجه‌بندی نت ناوگان هوایی، مأموریت‌های مورد انتظار در عملیات نامنظم نظامی، سطح فناوری ناوگان هوایی و هزینه‌های مربوط به ساخت و به‌روزرسانی هلی‌کوپترها و غیره... استفاده نموده‌اند.

بررسی ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مسئله بهینه‌سازی ناوگان حمل‌ونقل و ابعاد مختلف آن نظیر محاسبات اندازه ناوگان، ارزیابی سیر و حرکت، مسیریابی و زمان‌بندی تجهیزات نظامی با استفاده از روش‌هایی نظیر هوش محاسباتی[2] (CI)، شیوه‌های مبتنی بر شبیه‌سازی نظیر مدل رویداد گسسته[3] (DES)، دینامیک سیستم‌ها[4] (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 حمل‌ونقل و طبقه‌بندی روش‌های کاربردی در هر جنبه از زیر مسئله‌های مرتبط می‌توان به ساختار اصلی مدل‌ها نظیر تکنیک‌های حل مسئله، شکل‌گیری توابع هدف جدید و کاربردهای هر روش برای شبیه‌سازی‌های نزدیک به محیط واقعی در مأموریت‌های عملیاتی نیروهای مسلح دست‌یافت. در مطالعه‌ای منظور توجیه عملیاتی و اقتصادی تکنیک بهینه‌سازی ناوگان حمل و نقل نظامی به لحاظ زمان و هزینه، برخی پیشنهادها به شرح زیر ارائه‌شده است (بنکز[5]، 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 اولیهٔ الگوریتم ژنتیک برای یافتن جواب بهینهٔ تابع هدف و بررسی قابلیت ارتقای مسئله ترکیبی ناوگان حمل‌ونقل نظامی که در این صورت امتیاز به‌دست‌آمده در یک نمونه معین از ناوگان حمل‌ونقل 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 بیلیارد[1]، ۲۰۱۸).

روش انجام تحقیق

روش انجام این پژوهش مدل‌سازی کمی متغیرهای تصمیم در شرایط عدم‌قطعیت برای محیط‌های نظامی دارای ابهام و توأم با داده‌های ناقص و ضعیف است. عدم‌قطعیت 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 عدم‌قطعیت 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 غیرقابل‌پیش‌بینی و دارای ریسک بالا و عدم‌قطعیت 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 نشئت‌گرفته و جملگی می‌تواند به توسعه مفروضات حل مسئله عدم‌اطمینان در فضای جنگی کمک نماید (عباس[2] و همکاران، ۲۰۱۷). در بسیاری از مطالعات برای حل مسئله عدم‌اطمینان 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[3]، ۲۰۲۲). اگرچه تنوع مسیرهای تکنولوژیک در آیندهٔ مسائل نظامی، تصمیمات برنامه‌ریزان را تا حد زیادی متأثر می‌سازد؛ اما بااین‌حال ارتقای آگاهی متخصصان امور نظامی در تدقیق متغیرهای تصمیم، ضمن تبیین شرایط و پارامترهای مدل، آثار این توسعهٔ فن آورانه را در

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

طرح‌ریزی‌های اولیه تا حد زیادی کاهش می‌دهد (مازورک و وسولکوفسکی[1]، ۲۰۱۲). ازاین‌رو ارائه یک راهکرد مناسب برای مدل‌سازی یکپارچه و استوار می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مطلوب برای مواجهه با عدم‌قطعیت محیط جنگی بکار رفته و امکان ارزیابی ناوگان حمل‌ونقل را در مأموریت‌های جنگی فراهم نماید. برخی از مهم‌ترین منابع عدم‌قطعیت 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. بااین‌وجود منابع عدم‌قطعیت 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. ازاین‌رو 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 دست‌کم یکی از وسایل نقلیه در آن استقراریافته‌اند. همچنین در منطقه عملیاتی مدنظر به‌منظور 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 باتوجه‌به 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 دست‌کم 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

1. Mazurek & Wesolkowski

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.

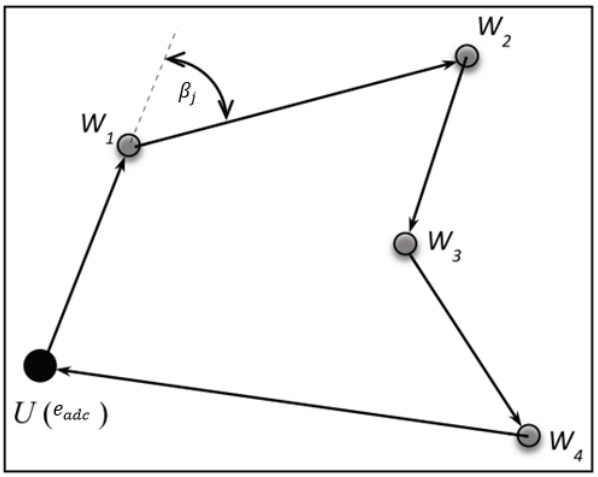
- زمان کل مأموریت انتقال نفر، تجهیزات و شناسایی توسط هواپیماهای نظامی تاحدامکان به حداقل مقدار ممکن کاهش یابد. برای این منظور می‌توان از مفروضات موجود در شیوه‌های فراابتکاری دیگر نظیر الگوریتم کلونی مورچگان بهره گرفت و شیوه حاضر را نیز توسعه داد (لی[1] و همکاران، ۲۰۲۳).

لازم به توضیح است که باتوجه‌به فراابتکاری بودن رویکردها، نمی‌توان نتایج را نقطه بهینه مطلق قلمداد نمود. بااین‌وجود می‌توان اذعان داشت که از طریق شیوه آزمون نمونه‌ها، نقطه به‌دست‌آمده بسیار نزدیک به نقطه بهینه است (لبوچر[2] و همکاران، ۲۰۱۷). ازاین‌رو 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 هواپیمای 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:

$$T_j = e_{adc}.{}^{\beta_j}/_{\pi} \qquad (۱)$$

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. β_j زاویه بین دو ضلع از مسیر پرواز هواپیما در نقطه دلخواه W_i در بازه ۰ تا π است. همچنین اندیس j حداکثر مقداری که به خود می گیرد 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. به‌منظور ارزیابی میزان استواری در یک مسئله مرتبط با ناوگان حمل‌ونقل نظامی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. همچنین برای بهبود کارایی الگوریتم ابتکاری مورداستفاده در تحقیق حاضر و تولید داده‌های همبسته از رویکردهای شبیه‌سازی در نرم‌افزار CPLEX و با استفاده از روال‌های مونت‌کارلو بهره گرفته شده است. بهره‌گیری از رویکرد مونت‌کارلو می‌تواند بستر لازم

برای ایجاد مجموعه‌داده‌های متناسب با نیازهای وظیفه‌ای و زیرساخت‌های نظامی بر اساس تعداد تکرار، طول زمان و ظرفیت موردنیاز برای عملیات پروازی را فراهم نماید (ووتاشک و وسولکوفسکی، ۲۰۱۷). همچنین به‌منظور برآورد اندازه و نیز تعیین ترکیب بهینه ناوگان حمل‌ونقل 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 مونت‌کارلو مجموعه‌داده‌های نمونه‌ای برای ۷۵ زیرساخت عمومی نیروی هوایی به‌گونه‌ای تولید گردیده که در آن هر یک از ناوگان حمل‌ونقل هوایی در سطح الزامات اصلی وظیفه‌ای بتوانند برای حمل و ترابری تسلیحات، ادوات و یا نیروهای نظامی مورداستفاده قرار گرفته و تا چندین کارکرد فرعی را برای سایر حالات ممکن در فضای نمونه و پیشامد، پوشش دهند. جدول شماره یک ناوگان حمل‌ونقل نیروی هوایی را باتوجه‌به 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 مدت‌زمان عملیات پروازی هر هواپیما در هر مأموریت نظامی (اعم از باری و مسافری) مقداری معین است. مدت‌زمانی 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 برنامه‌ریزی‌شده، 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 قابل‌تصور 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 ازاین‌رو تحلیل و ارزیابی میزان استواری هر نقطه ازنظر محاسباتی دشوار به نظر می‌رسد. ازاین‌رو استفاده از یک شبیه‌ساز مونت‌کارلو به‌عنوان یک مکمل برای الگوریتم ژنتیک یکی از فعالیت‌های مهمی است که در مسیر بهینه‌سازی استوار در این مطالعه صورت‌گرفته است؛ بنابراین به‌منظور به‌دست‌آوردن رابطه مونت‌کارلو در تحقیق حاضر فرض می‌گردد که در بازه‌های زمانی متوالی و گسسته t (برحسب ثانیه)، مأموریت‌ها توسط برنامه‌ریزها در سامانه کنترل پرواز هواپیما قابل‌تعریف باشد. همچنین فرض می‌گردد f_i تعداد دفعات مأموریت موردنیاز برای تحصیل هدف جنگی توسط ناوگان هوایی باشد، در این صورت به‌منظور انجام‌وظیفه 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، به طور متوسط در یک سال خاص Y برای یک ناوگان خاص نظامی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (بیوونا و مونتماگیوره (۲۰۱۵؛ وسولکوفسکی و بیلیارد ، ۲۰۱۸):

$$u = \frac{1}{Y}\sum_{j=0}^{Y} u^j \qquad (۲)$$

مثالی از الزامات مرتبط با مأموریت‌های ناوگان نیروی هوایی باتوجه‌به 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 باتوجه‌به نوع محموله (باری – مسافری یا ترکیبی)

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

همان گونه که در جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود در هر ردیف از جدول، برای هر مأموریت ذکرشده نوع محموله قابل‌حمل 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. ازاین‌رو برای حصول اهداف تحقیق با استفاده از الگوریتم ژنتیک یک سناریو برای فعالیت‌های حمل‌ونقل 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 ازنظر طیف وسیع وظایف، شباهت زیادی با آنچه غالباً در عالم واقع رخ می‌دهد، دارد. به‌منظور به‌دست‌آوردن بهترین ترکیب ناوگان حمل‌ونقل از منظر ظرفیت و قابلیت جابه‌جایی باتوجه‌به محدودیت‌های هزینه و مدت مأموریت از یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه با اعمال الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نا مغلوب 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). راه‌حل های کاندید جدید (فرزندان) از طریق اعمال عملگر متقاطع برای نمونه‌های انتخاب‌شده از جمعیت والدین به دست می‌آید و در ادامه فرایند عملگر جهش بر روی فرزندان جدید اعمال می‌شود. گزینه‌های به‌دست‌آمده (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 درنتیجه هر

ردیف نشان‌دهنده یک مأموریت و تعدادی وظیفه پروازی است که به یکی از ناوگان حمل‌ونقل موجود در ستون برای به‌دست‌آوردن نسل تکاملی تخصیص می‌یابد. ازاین‌رو باتوجه‌به ساختار غیرمرسوم گزینه‌ها برای حل مدل مسئله، استفاده از عملگرهای متقاطع و جهش بومی‌سازی شده ضروری به نظر می‌رسد. به‌منظور 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 به‌صورت تصادفی برای هر وظیفه در مأموریت‌های نظامی بر مبنای نرخ جهش در مورد تخصیص یا عدم تخصیص گزینه حمل‌ونقل جهش‌یافته تصمیم‌گیری می‌شود. اگر فرایند تخصیص صورت گیرد در این صورت یک گزینه متفاوت از میان انتساب‌های معتبر ناوگان به فرزند انتساب می‌یابد (لی و اپورئانو، 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 حمل‌ونقل و زمان است که به‌صورت رابطه ۳ شماره نوشته می‌شود:

$$E_M = \sum_{v} \left| \sum_{i} \left(d_i(v).p_i(v) \right) \right| .c(v) \qquad (۳)$$

در رابطه شماره ۳ مؤلفه d بیانگر جدول دوره‌های زمانی ناوگان نظامی در مأموریت‌های محوله است که از متغیرهای $d_i(v)$ تشکیل‌شده است. این متغیرها، زمان موردنیاز برای هر یک از ناوگان حمل‌ونقل 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 نشان‌دهنده‌ی 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 مدت‌زمان مأموریت در مسئله فرموله شده در تحقیق حاضر بر اساس نتایج مطالعهٔ ووتاشک و وسولکوفسکی (۲۰۱۷) به‌صورت رابطه شماره ۴ نوشته می‌شود:

$$E_t = \sum_{v} \sum_{i} \left(d_i(v).p_i(v) \right) \qquad (۴)$$

در رابطه شماره ۳ برای موردکاوی خاص تحقیق، پیکره‌بندی و برپایی ناوگان حمل‌ونقل به‌صورت مجموعهٔ $\{v\}$ و به شکل رابطه $\sum_i(d_i(v).p_i(v))$ نمایش داده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی میزان استفاده از ظرفیت موردنیاز وسیله نقلیه خاص v از ناوگان حمل‌ونقل در تعداد روزهای به‌کارگیری 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 حمل‌ونقل نظامی باشد در این صورت مقدار آن برای کمان های گره‌ی $i \in I$ در مبدأ حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل نظامی در منطقه جنگی باشد در این صورت در این صورت مقدار آن برای کمان های گره‌ی $i \in I$ در مبدأ حمل‌ونقل 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

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

استفاده از رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه در تحقیق حاضر می‌تواند امکان تولید ناوگان بهینه را از طریق یک سناریوی استوار، معین و از پیش طرح‌ریزی‌شده فراهم نماید. هر سناریو می‌تواند باتوجه‌به ساختار و پیکره‌بندی ناوگان حمل‌ونقل نظامی و مدت‌زمان و هزینهٔ مأموریت به شناسایی مجموعه‌ای از ناوگان بهینهٔ بالقوه منتهی شود. در این صورت بسیاری از سناریوهای دارای ناوگان

حمل‌ونقل همسان توسط الگوی تحقیق، قابلیت پیاده‌سازی را دارا است که به نسبت سایر مجموعه‌های تولیدشده از استواری بیشتری برخوردار است؛ ازاین‌رو برای ارزیابی میزان استواری می‌توان مجموعه ناوگان حمل‌ونقل تولیدشده توسط الگوریتم را به‌منظور یافتن مجموعهٔ 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 باتوجه‌به درجه انطباق با موقعیت نداشته باشد؛ لذا برای تعیین میزان سازگاری ناوگان حمل‌ونقل لازم است تعداد ناوگان فعال و غیرفعال محاسبه و به سناریویی اضافه گردد که باتوجه‌به پیکره بنده فعلی خود قادر به تکمیل مأموریت محوله نیست. در ادامه سناریوها باتوجه‌به بودجهٔ تخصیص‌یافته به‌منظور تعیین میزان اثربخشی ناوگان حمل‌ونقل نظامی گروه‌بندی می‌شوند؛ بنابراین برای مشخص نمودن موقعیت راهبردی ناوگان حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل می‌شود. ازاین‌رو هر ناوگان حمل‌ونقل نظامی خاص دارای یک پیکره‌بندی و برپایی منحصربه‌فرد 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؛ ازاین‌رو افزایش میزان داده‌ها و تحلیل نتایج به تصمیم‌سازان کمک می‌نماید که میزان سازگاری ناوگان با سناریوهای آینده را مشخص می‌نماید (جولیو و همکاران، ۲۰۲۱).

باتوجه‌به آنچه در فوق ذکر گردید و نیز نتایج مطالعه بایکاس اوغلو و همکاران (۲۰۱۹)، الگوریتم تعیین سناریوهایی که یک ناوگان حمل‌ونقل 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 مونت‌کارلو بگیر.

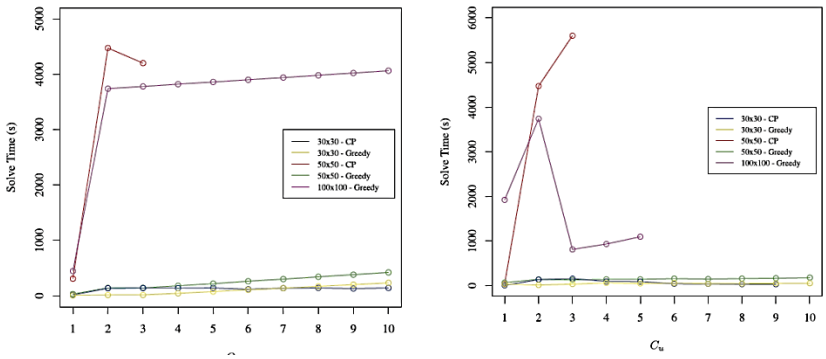
گام دوم: برای هر سناریوی نظامی نخست الگوریتم ژنتیک را برای N وسیله حمل‌ونقل در نسل G اجرا کن؛ دوم نگاشت گزینه‌ها از منظر تخصیص را برای هر یک از سناریوهای ناوگان مشخص کن و سپس ناوگان تکراری را حذف کن.

گام سوم: برای هر سناریوی i=1, …. , Y و هر یک از ناوگان k=1 , … , Y 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 حمل‌ونقل اجرا شود.

گام چهارم: بر اساس درصد سناریوهای قابل‌اجرا توسط ناوگان حمل‌ونقل، امتیازی را به آن تخصیص بده.

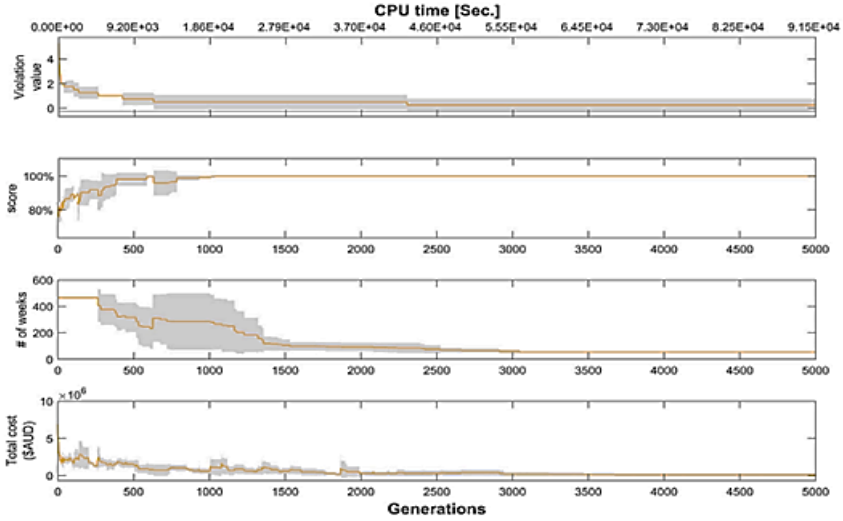
جمعیت نخستین بر اساس الگوریتم ژنتیک ۴۰۰ عضو داشت که پس از بهینه‌سازی به ۵۰ سناریوی (Y=50) محتمل و کم‌ریسک تقلیل یافت. الگوریتم ژنتیک برای نسل G=50 با نرخ جهش ۰/۲۰ پیاده‌سازی گردید و پس از هر بار اجرای الگوریتم، سناریوهای مأموریت‌ها به ناوگان حمل‌ونقل تخصیص داده شد. در ادامه پس از هر بار حذف ناوگان تکراری درنهایت به‌ازای هر سناریو تعداد ۲۵۲۸۵ حالت برای ناوگان حمل‌ونقل نظامی باقی ماند.

بنابراین چنانچه D مجموع کل منابع مورداستفاده توسط واحد حمل‌ونقل نیروهای مسلح باشد و Q نشان‌دهنده حداکثر تعداد یال‌ها (کمان‌ها) به سمت مقاصد عملیاتی باشد و C_u حداکثر تعداد موانع فراروی واحد حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل را برای حالت هایی که D=2%، Q=2 و $C_u = 2$ و هر یک از اشیا موجود در جمعیت نخستین برای پس از اجرای الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد:



تصویر (۳) تصویر سمت راست زمان حل باتوجه‌به ظرفیت جابه‌جایی تجهیزات نظامی از طریق الگوریتم ژنتیک برای حالتی که تعداد موانع فراروی واحد حمل‌ونقل 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.

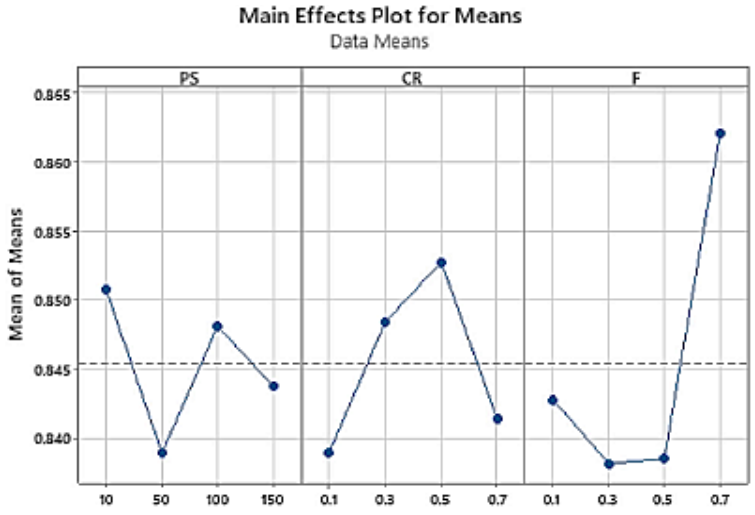
همان گونه که در تصویر شماره (۳) مشاهده می‌شود مقادیر مرتبط با پتانسیل ناوگان حمل‌ونقل (ظرفیت و قابلیت حمل بار و نیروهای نظامی) و هزینه‌های مرتبط با آن پس از اعمال الگوریتم ژنتیک ترسیم‌شده است. براین‌اساس به نظر می‌رسد قابلیت‌های ناوگان با افزایش مقدار بودجه به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. ازاین‌رو با اعمال الگوریتم پیشنهادی بدون افزایش هزینه تا حدود ۴۰۰ ناوگان حمل‌ونقل 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 باتوجه‌به ویژگی‌های خاص سناریوهای مورداستفاده در عملیات نظامی افزایش هزینه باتوجه‌به تعداد دفعات و مدت‌زمان مأموریت قابل‌توجیه 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 به‌سرعت ۳/۱۹ گیگاهرتز برای ۳۰ اجرا با ۵۰۰۰ نسل به‌ازای هر اجرا موردمطالعه قرار گرفت. نتیجه پیاده‌سازی شبیه‌سازی در رایانه نشان داد که استفاده از رویکرد پیشنهادی ازنظر یافتن بهترین نتیجه ممکن با مقیاس‌های (افزایش ظرفیت و کاهش هزینه) برای امکان‌سنجی راه‌حل‌ها در مأموریت‌های نیروی هوایی ارتش در سناریوی پیشنهادی تا حدود قابل‌ملاحظه‌ای 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 برحسب زمان محاسباتی پس از اجرای رویکرد شبیه‌سازی در رایانه

نتیجه‌گیری

برنامه‌ریزی حمل‌ونقل نظامی در محیط های جنگی علاوه بر مواجهه چالش های مرسوم و مسائل مسیریابی با موانع دیگری نیز روبرو است که در منطقه جنگی منحصر به فرد می نماید. علاوه بر محدودیت‌های حمل‌ونقل مرسوم (میزان ظرفیت و تقاضا)، چالش های برنامه ریزی عدد صحیح مختلط را نیز در بر می گیرد که دارای روابط نام حزب و پیچیده است. چنین چالش هایی 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 حل‌کننده های معمول به جواب نمی رسند از طریق تکنیک های تحلیل حساسیت و الگوریتم های فرا ابتکاری برای نیل به بینش های کمی در پشتیبانی از برنامه های حمل‌ونقل نظامی با پیچیدگی های محاسباتی کمتر در مقایسه با حل‌کننده های معمول پیاده سازی 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 مناستری از مجموعه جواب به تصمیم گیرندگان ارائه می‌دهد که می‌تواند علاوه بر حمل تجهیزات و نیروهای نظامی، برنامه های دشمن را نیز مختل نماید. تصویر شماره (۵) امتیاز میزان استواری را براساس الگوریتم ژنتیک برای مؤلفه‌های تحقیق نشان می‌دهد.



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

بنابراین مشاهده می‌شود که راهکردهای متنوعی برای هر بهبود قابلیت‌های ناوگان حمل‌ونقل 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 حمل‌ونقل سازمان‌دهی شود. در این مطالعه نشان داده شد که چگونه می‌توان میزان استواری و سازگاری مجموعه ناوگان حمل‌ونقل نظامی را تعیین نمود. اطلاعات به‌دست‌آمده از این ارزیابی به تعیین موقعیت راهبردی ناوگان حمل‌ونقل نظامی و روابط آن با سایر وسایل نقلیه ناوگان کمک می‌نماید. عوامل کلیدی بروز ریسک در محیط نظامی به طور قابل‌ملاحظه‌ای بر دیدگاه بهره‌گیری از راهکردها در ارتقای ناوگان حمل‌ونقل 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 مورداستفاده توسط محققان دیگر و نیز مدل‌های مشابه ارائه شده نظیر الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) پرداخته شده است. وجه تشابه این سه مدل در سادگی به‌دست‌آوردن 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 حمل‌ونقل 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) وسولکوفسکی و همکاران (۲۰۱۹)	تقاطع یکنواخت وسولکوفسکی و همکاران (۲۰۱۹)	×	✓	الگوریتم ژنتیک استاندارد (GA)
۵	۵۰۰۰	۲۰	DE/best/1 توران و همکاران (۲۰۲۲)	تقاطع نمایی ووتاشک و وسولکوفسکی (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 دونقطه‌ای و عملگر جهش پایین‌ترین سطح در تعداد اجرای ۲۰ بر روی ۵۰۰۰ نسل با اندازه جمعیت ۵ اعمال شده است درحالی‌که 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 اولویت ظرفیت حمل نیروهای دفاعی و تسلیحات نسبت به هزینه بر اساس امتیاز اکتسابی اشاره نمود. بااین‌حال تخصیص بودجه نادرست برای انجام مأموریت‌های نظامی می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد ناوگان حمل‌ونقل نظامی داشته باشد؛ اما بااین‌حال، تخصیص بودجه اشتباه برای عملیات نظامی (به‌عنوان‌مثال، 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 ازجمله 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، صص۳۰۴-۳۲۹.

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 به‌صورت 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–caspian 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 Ménec, 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., Elsawah, 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.

Upadhya, 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.