Industrial Management Perspective

Print ISSN: 2251-9874, Online ISSN: 2645-4165
Volume 11, Serial Number 44, Winter 2022, Pages 167-195 (Original Article)
DOI: 10.52547/JIMP.11.4.167

Developing a Vehicle Routing Model Considering Effective Criteria for Supporting of Military Units

Reza Tavakkoli Moghaddam*, Massoud Mossadeghkhah, Hosseinali Hassanpour*****

Abstract

In this research, a mathematical model of the vehicle routing problem to support military units is presented and solved. To present this model, first, various criteria extracted from the literature review of vehicle routing issues in the field of military, war and crisis are investigated. Then, the criteria that are important for supporting the military units under study are introduced and the mathematical model of the problem based on these criteria is presented. One of the salient features of the current research compared to similar researches is the simultaneous consideration of five effective criteria in supporting the units of this organization, which include "time window for delivery of goods to units", "ability to pick-up and deliver goods on the road transport route", "the heterogeneity of the fleet of road vehicles", "the need to send goods from multi-depot" and "the need to transport several types of goods". Since this is one of the optimization problems in the family of NP-hard problems, GA, PSO and SA algorithms were used to solve the model. In order to validate, the results of these algorithms have been compared with the exact solution results with GAMS software, which shows the proper performance of the proposed genetic algorithm.

Keywords: Vehicle Routing Problem; Supporting of Military Units; Genetic Algorithm; Time Window; Pickup and Delivery.

Received: Feb. 02, 2021; Accepted: Agu. 11, 2021.
* Professor, University of Tehran.
** Associate Professor, Imam Hossein University.
*** Assistant Professor, Imam Hussein University (Corresponding Author).
Email: hahassan@ihu.ac.ir

چشم‌انداز مدیریت صنعتی
شاپای چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپای الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵
سال یازدهم، شماره ۴۴، زمستان ۱۴۰۰، ص‌ص ۱۶۷ – ۱۹۵ (**نوع مقاله: پژوهشی**)
DOI: 10.52547/JIMP.11.4.167

توسعه مدل مسیریابی وسایل نقلیه با ملاحظه معیارهای مؤثر در پشتیبانی از یگان‌های نظامی

رضا توکلی‌مقدم*، مسعود مصدق‌خواه، حسینعلی حسن‌پور*****

چکیده

در این پژوهش، مدل ریاضی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه برای پشتیبانی از یگان‌های نظامی، ارائه و حل می‌شود. برای ارائه این مدل، ابتدا معیارهای مختلف از پیشینه پژوهش مسائل مسیریابی وسایل نقلیه در حوزه نظامی، جنگ و بحران بررسی خواهد شد؛ سپس معیارهایی که برای پشتیبانی از یگان‌های نظامی مورد مطالعه مهم هستند، معرفی و مدل ریاضی مسئله بر پایه این معیارها ارائه می‌شود. از ویژگی‌های برجسته پژوهش جاری نسبت به پژوهش‌های مشابه، ملاحظه همزمان پنج معیار مؤثر در پشتیبانی از یگان‌های این سازمان است که شامل «پنجره زمانی تحویل کالا به یگان‌ها، قابلیت برداشت و تحویل کالا در مسیر حمل‌ونقل جاده‌ای، ناهمگن‌بودن ناوگان وسایل نقلیه جاده‌ای، ضرورت ارسال کالا از چندین قرارگاه پشتیبانی و ضرورت حمل چند نوع کالا» است. ازآنجاکه این مسئله جزو مسائل بهینه‌سازی در خانوادهٔ مسائل NP-hard محسوب می‌شود، برای حل مدل از الگوریتم‌های GA، PSO و SA استفاده شد. به‌منظور اعتبارسنجی نیز نتایج این الگوریتم‌ها با نتایج حل دقیق با نرم‌افزار گمز مقایسه شدند که با مقایسه جواب‌ها و زمان حل، عملکرد مناسب الگوریتم ژنتیک پیشنهادی نشان داده شد؛ همچنین با تحلیل حساسیت پارامتر هزینه حمل‌ونقل و پارامتر تقاضای یگان‌ها میزان تأثیر آن‌ها در جواب نهایی بررسی شد.

کلیدواژه‌ها: مسئله مسیریابی وسایل نقلیه؛ پشتیبانی یگان‌های نظامی؛ الگوریتم ژنتیک، پنجره زمانی، برداشت و تحویل.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۶، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۰.

* استاد، دانشگاه تهران.
** دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع).
*** استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع) (*نویسنده مسئول).
Email: hahassan@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

در مبانی نظری موضوع مسئله مسیریابی، تاکنون بسیاری از مسائل نظامی از جمله برنامه‌ریزی توزیع اقلام، تجهیزات و تسلیحات نظامی تا برنامه‌ریزی و پایش مأموریت‌ها بررسی شده است. در سازمان‌های نظامی نیز مثل سایر سازمان‌ها، افزایش بهره‌وری و استفاده بهینه از ظرفیت منابع برای تحقق اهداف سازمانی، امری اجتناب‌ناپذیر است. از طرفی در بیشتر مسائل، معیارهای پشتیبانی و حمل‌ونقل در سازمان‌های نظامی با سازمان‌های تجاری متفاوت است. برای مثال، محدودیت تحویل کالا در زمان معین به رده‌های متقاضی یا ملاحظه امنیت مسیر در مسائل نظامی نسبت به مسائل تجاری مهم‌تر است.

معیارهای بسیاری در مسئله مسیریابی وسایل نقلیه[1] (VRP) دخیل هستند که این امر موجب شده است انواع مختلفی از این مسئله ارائه شود. روند انتخاب معیارهایی که مدل ریاضی این پژوهش بر اساس آن شکل گرفته، بدین صورت بوده است. ابتدا معیارهای مختلف ملاحظه‌شده در پیشینه پژوهش VRP در حوزه دفاعی، جنگ و بحران بررسی و دسته‌بندی شده و سپس با استفاده از نظر خبرگان ترابری یک سازمان نظامی، اهمیت این معیارها تعیین شده‌است. پنج مورد از این معیارهای مهم که مدل ریاضی بر اساس آن‌ها شکل گرفته است شامل «ضرورت رعایت پنجره زمانی تحویل کالا به یگان‌ها، امکان برداشت و تحویل کالا در مسیر حرکت وسایل نقلیه، ناهمگن‌بودن ناوگان وسایل نقلیه، ضرورت ارسال کالا از چندین قرارگاه پشتیبانی و ضرورت حمل چند نوع کالا» است. در این پژوهش، پس از مرور مبانی نظری موضوع، تعریف مسئله و تشریح مفروضات مسئله مطالعه‌شده در سازمان نظامی، مدل ریاضی متأثر از معیارهای مهم در پشتیبانی یگان‌های این سازمان ارائه می‌شود؛ سپس مدل ریاضی پیشنهادی با الگوریتم‌های ژنتیک، ذرات پرندگان و پرش قورباغه حل خواهد شد. در ادامه اعتبار نتایج الگوریتم‌ها با نتایج حل روش دقیق بررسی و تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مهم مسئله انجام و سپس نتایج الگوریتم‌ها به ازای معیارهای مختلف تحلیل می‌شود و در آخر نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی ارائه خواهد شد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در مبانی نظری موضوع VRP، اخیراً پژوهش‌های جدیدی انجام شده است که به مسائل دنیای واقعی نزدیک‌تر هستند و نیازهای متعددی را مرتفع می‌سازند. هر یک از این پژوهش‌ها معیارهایی را مدنظر قرار داده‌اند که تعدادی از آن‌ها در این بخش بررسی می‌شود. یکی از پژوهش‌های حوزه نظامی در موضوع VRP، پژوهش لی[2] و همکاران (۲۰۱۲) است که مسئله

1. Vehicle Routing Problem
2. Li

مسیریابی را در زمان جنگ بررسی کرده‌اند و دو عامل مهم پنجره زمانی و امکان بارگیری با مواد مختلف در پـژوهش بررسـی شـده اسـت [۱۱]. آن‌هـا بـرای حـل مـدل پیشـنهادی از الگـوریتم NSGA-II استفاده کرده‌اند. یکی دیگر از مسائل مسیریابی در حوزه دفـاعی و نظـامی، پـژوهش کراینو[1] و همکاران (۲۰۰۴) است که در آن به حل مسـئله مسـیریابی و زمان‌بنـدی وسـایل نقلیـه برای توزیع در صحنه عملیات پرداخته شده است. معیارهای مهمی که در این پژوهش موردتوجـه قرار گرفته‌اند، شامل پنجره زمانی و ناهمگن‌بودن ناوگان وسایل نقلیه است. آن‌ها معماری مسـئله خود را به سه سطح تقسیم کردند: سطح نخست شامل انبارهـا و محـور[2]هـایی اسـت کـه بایـد از انبارهای دیگر خدمت دریافت کنند؛ سطح میانی شامل محورهایی می‌شود که بایـد بـه مشـتریان خدمت بدهند و سطح آخر شامل مشتریان نهـایی اسـت. در ایـن پـژوهش بـرای حـل مسـئله از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع استفاده شده است [۴]. در پژوهش عدبالحفیظ[3] و همکـاران (۲۰۱۰)، مسئله مسیریابی چندهدفه برای برنامه‌ریزی مأموریت وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین، بررسـی شده است. در بخشی از این پژوهش، نمونه‌های VRP که در مأموریت‌های نظامی کـاربرد دارنـد، ارائه شده است که عبارت‌اند از: VRP بـا پنجـره زمـانی؛ VRP چنـدقرارگاهی؛ VRP احتمـالی؛ VRP با تقسیم تحویل تقاضا و VRP که همراه با تحویـل و برداشـت اسـت [۱]. زیمپکـیس[4] و همکاران (۲۰۱۵) در کتاب «لجستیک نظامی: روندهای آتی و پیشرفت‌های تحقیـق[5]»، بـه ابعـاد مختلفی از لجستیک نظامی پرداختند. در فصل هشتم این کتـاب، VRP در زمینـه نظـامی بحـث شده است. در مطالعه موردی این مسئله، دو معیار پنجره زمانی و حمل بار در بازگشـت، ملاحظـه شده است. این فصل از کتاب، یک الگوریتم فرابتکاری را برای حل ایـن مسـئله ارائـه مـی‌دهـد. هدف اول مسئله در این پژوهش، حداقل‌سازی تعداد وسایل نقلیه موردنیاز اسـت و هـدف بعـدی، بهینه‌سازی هزینه کل سفرها است [۲۰]. یانچنگ[6] و همکاران (۲۰۱۰)، مسئله زمان‌بندی وسـایل نقلیه برای توزیع در لجستیک نظامی را بررسی کردند. معیار اصـلی در ایـن پـژوهش، محـدودیت پنجره زمانی بود؛ بنابراین خدمت‌دهی به مشتریان باید در زمان معین انجـام شـود. هـدف اصـلی این پژوهش، حداقل‌کردن مسافت طی‌شده توسط وسایل نقلیه و خدمت‌دهی به‌موقع به مشـتریان بود. مسئله موردنظر با الگوریتم بهبودیافته کلونی مورچگان حل شد. موارد مهمی که پژوهشـگران در نظر گرفتند، عبارت‌اند از: سرعت وسایل نقلیه نظامی ثابت است؛ زمان تخلیه بار در نقاط تقاضا ثابت و مشخص است؛ تنها یک نوع از وسایل نقلیه در مرکز توزیع موجود است؛ هر نقطـه تقاضـا تنها توسط یک وسیله نقلیه خدمت‌دهی می‌شود. در مدل این پژوهش، پنجره زمـانی از نـوع نـرم

1. Crino
2. Hub
3. Adbelhafiz
4. Zeimpekis
5 Military Logistics: Research Advances and Future Trends
6. Yancheng

در نظر گرفته شده است و جریمه دیرکرد و زودکرد ملاقات مشتریان در تابع هدف که از نوع کمینه‌سازی است، در نظر گرفته شده است [۱۹].

ویسی و همکاران (۱۳۹۸)، یک مدل تصمیم‌گیری در مسائل لجستیک نظامی ارائه کردند. در این پژوهش، مسئله مکان‌یابی و موجودی برای یگان‌های پشتیبانی در قالب برنامه‌ریزی ریاضی سه‌سطحی بررسی شده است. پشتیبانی مناطق به‌عنوان سطح اول، پشتیبانی یگان‌ها (مراکز توزیع) به‌عنوان سطح دوم و یگان‌ها به‌عنوان سطح سوم در نظر گرفته شده‌اند. مسئله پژوهش، تعیین تعداد و مکان استقرار مکان‌های پشتیبانی (قرارگاه‌ها) و سطح موجودی آن‌ها و تخصیص یگان‌ها برای تأمین کالاهای موردنیاز است. مدل ارائه‌شده، چندکالایی و چنددوره‌ای تحت شرایط عدم‌قطعیت در میزان تقاضا و هزینه‌ها است. در ادامه، مدل پیشنهادی با رویکرد فازی و نرم‌افزار گمز حل شده است [۱۷]. حسن‌پور و همکاران (۱۳۸۸)، مسئله VRP را در یک محیط نظامی بررسی کردند. معیارهای اصلی آن‌ها شامل چندقرارگاهی‌بودن مسئله و احتمالی‌بودن دسترسی به مسیرها بود؛ به‌گونه‌ای که جاده متصل‌کننده دو یگان، ممکن است به دلایل مختلفی (بحران یا جنگ) دردسترس نباشد و یا احتمال دسترسی به جاده کم باشد که به همین علت، این عامل را احتمالی در نظر گرفتند. آن‌ها به‌دلیل پیچیدگی محاسباتی حل مسئله از روش فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید که با دو عملگر ژنتیک ترکیب شده است، استفاده کردند. برای نشان‌دادن کارایی الگوریتم، تعدادی مسئله در ابعاد مختلف حل شده و نتایج به‌دست‌آمده با حل دقیق مسئله در ابعاد کوچک مقایسه شد [۹].

رشیدی و گرگانی (۱۳۹۵)، جنبه چندقرارگاهی‌بودن مسئله را در کنار جنبه پوشش مشتریان در مسئله VRP مدنظر قرار دادند. در این پژوهش که در زمینه مسئله امداد و نجات در شرایط بحران بود، توزیع کالاهای موردنیاز برای آسیب‌زدگان از چند قرارگاه مرکزی شروع می‌شود. ازآنجاکه در عمل، امکان ارسال کالاها به‌صورت مستقیم به تک‌تک آسیب‌دیدگان وجود ندارد، فرض شده است که امکان ارسال کالا به قرارگاه‌های میانی و تحویل غیرمستقیم به آسیب‌دیدگان وجود دارد. در این پژوهش، مسئله موردنظر توسط برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مدل شده و توسط نرم‌افزار گمز حل شده است [۱۴]. در پژوهش توکلی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۱)، معیار پنجره زمانی در مسئله حمل‌ونقل مواد خطرناک بررسی شده است. برای حمل‌ونقل مواد منفجره، اشتعال‌پذیر، سمی و اکسیدکننده که دارای پیچیدگی‌های مخصوص به خود هستند، باید به معیارهای مختلفی توجه شود. علاوه بر معیار هزینه، معیارهای مهم دیگر در این مسائل، ملاحظه ریسک حمل‌ونقل مواد در مسیرها و زمان تحویل است. اصلی‌ترین هدف این نوع مسیریابی، حداقل‌کردن هزینه و رسیدن به یک زمان‌بندی مناسب با کمترین ریسک برای حمل مواد خطرناک است. در این پژوهش برای هر مشتری یک بازه زمانی خاص تعریف می‌شود که خدمت‌دهی باید در آن بازه انجام شود. برای زودکرد و دیرکرد، جریمه در نظر گرفته شده و

پنجره زمانی از جنس نرم است و میزان جریمه نیز به‌عنوان یکی از توابع هدف مدنظر قرار گرفته است. مدلی که در این پژوهش ارائه شده است، مدل چندهدفی است و ازآنجاکه جزو مسائل پیچیده و سخت محسوب می‌شود از روش فرا ابتکاری NSGA-II استفاده شده که روشی مناسب برای حل مسائل چندهدفه است[۱۵].

توکلی‌مقدم و کهفی (۱۳۹۴)، معیار چندقرارگاهی بودن و کاهش ریسک مسیر را در مسئله VRP مدنظر قرار دادند و مدل مسئله را توسط الگوریتم خفاش چندهدفه حل کردند [۱۶]. در پژوهش مشابهی در این زمینه، دو[1] و همکاران (۲۰۱۷)، معیار چندقرارگاهی‌بودن و حمل مواد خطرناک را در مسئله VRP بررسی کردند. در این بررسی، عمده مواد خطرناک شامل گازهای سمی، مواد قابل‌انفجار، مایعات قابل‌اشتعال و مواد رادیواکتیو و خورنده است. معمولاً مواد خطرناک در محل تولیدشان مصرف نمی‌شوند. نقاط تقاضای این مواد، اغلب در نقاط دور نسبت به محل تولید قرار دارند. تصادفات حمل‌ونقل مواد خطرناک باعث خسارات بسیار زیاد به اقتصاد ملّی، تهدید برای زندگی مردم و خسارات جبران‌ناپذیر به محیط‌زیست می‌شود. مسئله VRP برای حمل مواد خطرناک به دنبال انجام مأموریت‌های مسیریابی با کمترین ریسک است. ریسک جاده‌ای در این پژوهش این‌گونه در نظر گرفته شده است: احتمال وقوع تصادف در جاده و همچنین تعداد افرادی که در معرض خطر هستند. برای حل مسئله از برنامه‌ریزی دوسطحی فازی استفاده شده است [۵]. بیگی و حسین‌زاده (۱۳۹۸)، مدل ریاضی مسئله مکان‌یابی ـ مسیریابی را برای شرایط بحرانی (بلایای طبیعی و غیرطبیعی) با درنظرگرفتن امنیت مسیر ارائه کردند. مدل آن‌ها برای تعیین بهترین مکان اردوگاه (اسکان افراد) و مسیر حرکت وسایل امدادی بین نقاط آسیب‌دیده و محل‌های اسکان افراد ارائه شد. در این پژوهش، زمان‌های حمل‌ونقل، مقدار تقاضای نقاط حادثه‌دیده (تعداد جابه‌جایی افراد درخطر)، زمان خدمت‌دهی و پنجره زمانی حمل‌ونقل افراد، به‌صورت عدم‌قطعیت فازی در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، کمینه‌سازی هزینه آسیب واردشده به افراد و وسایل نقلیه، با توجه به امنیت هر یک از مسیرها، هدف‌گذاری شده است [۳]. فرح‌بخش و همکاران (۱۳۹۶)، یک مدل ریاضی چندهدفه برای مسئله VRP با ناوگان ناهمگن تحت شرایط بحران، توسعه دادند. مدل ریاضی مسئله، کمینه‌کردن زمان و هزینه دسترسی به مراکز بحران را هدف‌گذاری کرده است. این پژوهش جنبه‌هایی چون چندقرارگاهی‌بودن، چندمسیری‌بودن، چندسناریوبودن، تحویل انشعابی، چندمحصولی، ناهمگن‌بودن وسایل نقلیه و پنجره زمانی را به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته است [۸]. نوروزی و همکاران (۱۳۹۹)، مسئله VRP را با ملاحظه معیارهای نظامی و انتظامی در مأموریت‌های ترابری یک سازمان لجستیک دفاعی بررسی کردند. آن‌ها از یک رویکرد دومرحله‌ای برای حل مسئله بهره گرفتند. در مرحله نخست،

1. Du

با استفاده از الگوریتم ابتکاری صرفه‌جویی، متقاضیان حمل بار را دسته‌بندی کردند و در مرحله دوم، با استفاده از مباحث تصمیم‌گیری چندمعیاره، اولویت تحویل کالا به یگان‌های متقاضی بار (در هر دسته) را تعیین کردند. معیارهای بررسی‌شده در این پژوهش شامل «درجه امنیتی‌بودن محل استقرار یگان، ضرورت تحویل نیاز یگان، میزان صعب‌العبوربودن جاده (منتهی به یگان)، میزان دورافتادگی یگان (مستقر در منطقه محروم)، کمبود امکانات سوخت‌گیری (پیرامون یگان) و بدی شرایط جوی (اطراف یگان)» بود [۱۳].

جو[1] و همکاران (۲۰۲۱)، یک مسئله VRP را برای حرکت یک دسته نظامی، مبتنی بر هماهنگی واحد شناسایی و واحد ترابری (مسئول انتقال) ارائه کردند. هدف مسئله، حداقل‌کردن زمان انتقال و نیز صدمات دشمن بود. مدل ریاضی پیشنهادی، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) بود که با الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان حل شد؛ همچنین تحلیل حساسیت تغییر تعداد وسایل نقلیه «انتقال و شناسایی» انجام شده و اثرات هر نوع وسیله در حرکت دسته نظامی تحلیل شد [۱۰].

اهن و کیم[2] (۲۰۲۰)، مسئله مسیریابی تردد وسایل نقلیه نظامی برای انجام عملیات نظامی در صحنه نبرد را بررسی کردند. پژوهش آن‌ها مبتنی بر به‌کارگیری فناوری‌های پیشرفته در این نوع وسایل برای نبردهای رزمی آینده بود. به عقیده آن‌ها کلیات مدل‌سازی در فضای نظامی و تجاری یکسان است؛ ولی ممکن است در جزئیات متفاوت باشند. برای مثال، ممکن است در تابع هدف، به‌جای حداقل‌سازی هزینه از حداقل‌سازی فاصله استفاده شود تا مأموریت نظامی به‌موقع و اثربخش انجام شود. در این پژوهش از یک روش ابتکاری برای به‌دست‌آوردن کوتاه‌ترین مسیر استفاده شده است [۲]. ژائو[3] و همکاران (۲۰۱۸)، مسئله برنامه‌ریزی مسیر حرکت وسایل نقلیه نظامی در شبکه جاده برای محیط غیرقطعی صحنه نبرد را بررسی کردند. این پژوهش، عدم‌قطعیت شبکه جاده را با مجموعه‌ای از سناریوهای گسسته مدل می‌کند. مدل ریاضی پیشنهادی، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است؛ همچنین از روش کوتاه‌ترین مسیر و یک روش تقریبی برای حل آن استفاده می‌کند [۲۲].

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه ملاحظه هم‌زمان معیارهای مختلف در مسئله VRP انجام شده است. از پژوهش‌های خارجی مرتبط می‌توان به پژوهش ژانگ[4] و همکاران (۲۰۲۰)، اشاره کرد که مبتنی بر پژوهش وانگ[5] و همکاران (۲۰۱۵)، از مسئله VRP با برداشت و تحویل بار و محدودیت پنجره زمانی برای «توسعه مسئله جمع‌آوری پسماند خشک در پکن» الگوبرداری کردند [۱۸]. آن‌ها معیارهای «بار کامل کامیون، تقاضا و سفرهای چندگانه» را

1. Ju
2. Ahn & Kim.
3. Zhao
4. Zhang
5. Wang

در توسعه پژوهش خود مدنظر قرار دادند و با استفاده از روش شبیه‌سازی تبرید موازی، مسئله موردنظر را حل کردند [۲۱]. از پژوهش‌های داخلی می‌توان به پژوهش نیکجو و جوادیان (۱۳۹۷)، اشاره کرد که یک مدل لجستیک چندهدفه برای مسئله مکان‌یابی ـ مسیریابی، چندسطحی ـ چندمحصولی برای زمان بحران (زلزله) ارائه کردند. این پژوهش به دنبال یافتن مکان بهینه برای استقرار تسهیلات (تخصیص بهینه کالاهای امدادی به تسهیلات و تخصیص مصدومان به بیمارستان‌ها) و نیز یافتن مسیرهای بهینه برای رساندن نیروی انسانی به مناطق آسیب‌دیده بود. به‌دلیل عدم‌قطعیت موجود در شدت زلزله، مدل ریاضی مسئله از طریق بهینه‌سازی استوار حل شد؛ همچنین تحلیل حساسیت روی تعداد آمبولانس‌ها و نیز ظرفیت انبارهای موقت صورت گرفت [۱۲]. فرح‌بخش و بهنامیان (۱۳۹۸)، یک مسئله VRP با معیارهای فاصله و تقاضای مشتریان را به یک مسئله کوله‌پشتی تقلیل دادند و برای حل آن، یک روش ابتکاری مبتنی بر کلاسه‌بندی حریصانه[1] ارائه کردند [۷]. اسلامی‌نیا و عظیمی (۱۳۹۸)، یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی را با درنظرگرفتن محدودیت حجم بار خودرو ارائه دادند و با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید حل کردند [۶].

یک دسته‌بندی از پیشینه پژوهش VRP با تمرکز بر پشتیبانی از یگان‌های نظامی در جدول ۱، ارائه شده است؛ همچنین پژوهش جاری با پژوهش‌های مشابه مقایسه شده است که در بخش بعد جزئیات بیشتری از مطالعه موردی پژوهش حاضر ارائه می‌شود.

جدول ۱. دسته‌بندی پیشینه پژوهش VRP با تمرکز بر پشتیبانی یگان‌های نظامی

پژوهشگر (سال)	مضمون پژوهش	معیارهای مدنظر	روش حل
لی و همکاران، (۲۰۱۲) [۱۱]	مدل‌سازی و شبیه‌سازی VRP در زمان جنگ	پنجره زمانی و چندکالایی	NSGA-II
کراینو و همکاران، (۲۰۰۴) [۴]	مسئله مسیریابی و زمان‌بندی وسایل نقلیه برای توزیع در صحنه نبرد	پنجره زمانی و ناوگان ناهمگن	جست‌وجوی ممنوع گروهی
عدبالحفیظ و همکاران، (۲۰۱۰) [۱]	نمونه مسائل VRP: مأموریت وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین	پنجره زمانی، چندقرارگاهی، تقسیم تحویل تقاضا، تقاضای احتمالی، تحویل و دریافت	یک روش فراابتکاری جدید
زیمپکیس و همکاران، (۲۰۱۵) [۲۰]	لجستیک نظامی: روندها و پیشرفت‌های پژوهش	پنجره زمانی و حمل بار در بازگشت	فراابتکاری بازسازی
یانچنگ و همکاران، (۲۰۱۰) [۱۹]	مسائل توزیع در لجستیک نظامی	پنجره زمانی	کلونی مورچگان
ویسی و همکاران،	الگوی توزیع و پشتیبانی در	چندقرارگاهی، چنددوره‌ای	رویکرد فازی، گمز

1. Greedy

پژوهشگر (سال)	مضمون پژوهش	معیارهای مدنظر	روش حل
(۱۳۹۸) [۱۷]	زنجیره تأمین سامانه آماد و پشتیبانی	تحت شرایط عدم‌قطعیت در میزان تقاضا و هزینه‌ها	
حسن‌پور و همکاران، (۱۳۸۸) [۹]	VRP در حالت چندهدفی، چندقرارگاهی و احتمالی (در شرایط جنگی)	چندقرارگاهی و احتمالی‌بودن دسترسی به مسیرها در شرایط جنگ	شبیه‌سازی تبرید تلفیقی با عملگرهای ژنتیک
رشیدی و گرگانی، (۱۳۹۵) [۱۴]	مسیریابی وسایل نقلیه در شرایط بحرانی	چندقرارگاهی و وجود پوشش در مسئله	گمز
توکلی‌مقدم و همکاران، (۱۳۹۱) [۱۵]	VRP با درنظرگرفتن ایمنی در حمل‌ونقل مواد خطرناک	پنجره زمانی و ایمنی در حمل مواد خطرناک	NSGA-II و محدودیت اپسیلون
توکلی‌مقدم و کهفی، (۱۳۹۴) [۱۶]	مدل VRP چندقرارگاهی مبتنی بر کاهش ریسک	ریسک مسیر و چندقرارگاهی‌بودن	الگوریتم خفاش چندهدفه
دو و همکاران، (۲۰۱۷) [۵]	VRP چندقرارگاهی برای حمل مواد خطرناک	ایمنی در حمل مواد خطرناک	برنامه‌ریزی چندسطحی‌فازی
بیگی و حسین‌زاده، (۱۳۹۸) [۳]	مکان‌یابی ـ مسیریابی در شرایط بحرانی با ملاحظه امنیت مسیر	عدم‌قطعیت فازی زمان حمل، تقاضا، زمان خدمت‌دهی و پنجره زمانی	گمز
فرح‌بخش و همکاران، (۱۳۹۶) [۸]	مدل ریاضی چندهدفه VRP ناهمگن تحت شرایط بحران	چندقرارگاهی، چندمسیری، چندسناریو، تحویل انشعابی، چندمحصولی، ناهمگن و پنجره زمانی	الگوریتم ژنتیک و جست‌وجوی هارمونی چندهدفه
نوروزی و همکاران، (۱۳۹۹) [۱۳]	VRP با ملاحظه معیارهای نظامی ـ انتظامی	امنیتی‌بودن رده، ضرورت تحویل، صعب‌العبوربودن جاده، دورافتادگی، کمبود سوخت و شرایط جوی	روش ابتکاری صرفه‌جویی، AHP و TOPSIS
جو و کیم، (۲۰۲۱) [۱۰]	مسیریابی برای حرکت دسته نظامی با هماهنگی واحد شناسایی	حداقل‌کردن زمان انتقال و نیز صدمات دشمن (ریسک مسیر)	بهینه‌سازی کلونی مورچگان
اهن و کیم، (۲۰۲۰) [۲]	مسیریابی تردد وسایل نقلیه نظامی	حداقل‌کردن زمان تردد در وضعیت جنگی	الگوریتم ابتکاری برای حداقل‌کردن فاصله
ژائو و همکاران، (۲۰۱۸) [۲۲]	برنامه‌ریزی مسیر تردد وسایل نقلیه نظامی	ملاحظه عدم‌قطعیت مسیر در محیط غیرقطعی صحنه نبرد	روش حل تقریبی برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر
وانگ و همکاران، (۲۰۱۵، ۲۰۲۰) [۱۸، ۲۱]	VRP با دریافت و برداشت هم‌زمان و پنجره زمانی	پنجره زمانی و برداشت و تحویل	شبیه‌سازی تبرید موازی
نیکجو و جوادیان، (۱۳۹۷) [۱۲]	مدل لجستیک چندهدفه مسئله مکان‌یابی– مسیریابی،	کاهش زمان رسیدن نیروهای امدادی به مناطق	بهینه‌سازی استوار (بخاطر عدم‌قطعیت

پژوهشگر (سال)	مضمون پژوهش	معیارهای مدنظر	روش حل
	چندسطحی و چندمحصولی در شرایط بحران زلزله	آسیب‌دیده، کاهش هزینه و توزیع عادلانه کالا و امداد پزشکی در مناطق	حادثه)
فرح‌بخش و بهنامیان، (۱۳۹۸) [۷]	مسیریابی با محدودیت ظرفیت و تقلیل آن به مسئله کوله‌پشتی	حداقل‌کردن فاصله و حداکثرکردن تقاضای مشتریان	روش ابتکاری مبتنی بر کلاس‌بندی حریصانه
اسلامی‌نیا و عظیمی، (۱۳۹۸) [۶]	مسیریابی وسیله نقلیه الکتریکی با محدودیت ظرفیت بار خودرو	ملاحظه محدودیت حجم بار خودرو و برنامه‌ریزی توزیع	الگوریتم شبیه‌سازی تبرید
پژوهش حاضر، (۱۴۰۰)	طراحی و حل مدل VRP برای پشتیبانی یگان‌های نظامی	پنجره زمانی، برداشت و تحویل، ناهمگن، چندقرارگاهی و چندکالایی	الگوریتم ژنتیک و گمز

۳. روش‌شناسی پژوهش

تشریح مسئله. مطالعه موردی پژوهش حاضر از یک سازمان نظامی انتخاب شده است. این سازمان برای تحویل اقلام به یگان‌های متقاضی بار مستقر در استان‌های غرب و شمال غرب کشور از یک ناوگان ترابری جاده‌ای و داخل سازمانی استفاده می‌کند؛ البته برای انتقال برخی اقلام عمومی از ظرفیت سازمان‌های حمل‌ونقل کشور استفاده می‌شود. انتخاب مسیر بهینه با ملاحظه نیازهای سازمان و مأموریت‌های آن، امر مهمی در این سازمان نظامی است. برای انجام این پژوهش از ادبیات موضوع VRP با تمرکز بر پشتیبانی یگان‌های نظامی، معیارهای مؤثر در این حوزه شناسایی شدند (همان‌گونه که در جدول ۱، گزارش شده است). در پژوهش میدانی مجزا، با استفاده از ابزار پرسشنامه و نظرخواهی از خبرگان حوزه ترابری سازمان نظامی، این معیارها اولویت‌بندی شدند و پنج معیار با اولویت بالا برای تحقق مأموریت‌های سازمان معرفی شد. معیارهای مدنظر عبارت است از: ضرورت رعایت پنجره زمانی تحویل کالا به یگان‌ها؛ امکان برداشت و تحویل کالا در مسیر حرکت وسایل نقلیه جاده‌ای؛ ناهمگن‌بودن ناوگان وسایل نقلیه جاده‌ای؛ ضرورت ارسال کالا از چندین قرارگاه پشتیبانی و ضرورت حمل چند نوع کالا. در پژوهش حاضر، مدل ریاضی مسئله بر اساس این پنج معیار مهم ارائه شده است که توسعه‌ای از مدل پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۱۵) است. توسعه‌های مدل ریاضی پژوهش حاضر نسبت به پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۱۵)، شامل موارد زیر است: چندقرارگاهی نسبت به تک‌قرارگاهی؛ ناوگان ناهمگن نسبت به ناوگان همگن؛ چندمحصولی نسبت به تک‌محصولی؛ پنجره زمانی نرم نسبت به پنجره زمانی سخت. در ضمن در هر دو پژوهش عامل برداشت و تحویل هم‌زمان اقلام مدنظر قرار گرفته شده است؛ همچنین روش حل در پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۱۵)، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید است؛ ولی روش حل در این پژوهش، الگوریتم ژنتیک است.

مفروضات مدل

ـ وسایل نقلیه ابتدا در پارکینگ‌ها قرار دارند. پارکینگ‌ها به‌عنوان قرارگاه‌ها در نظر گرفته می‌شوند. مکان قرارگاه‌ها (پارکینگ‌ها) و تعداد آن‌ها از قبل مشخص است؛

ـ قرارگاه‌ها (پارکینگ‌ها) خالی از بار هستند و وسیله نقلیه بعد از خروج از پارکینگ، از اولین نقطه، عملیات برداشت (بارگیری) انجام می‌دهد؛

ـ وسیله نقلیه، سفر را بدون بار از پارکینگ شروع می‌کند و بعد از اتمام مأموریت، بدون بار به همان پارکینگ بازمی‌گردد؛

ـ نقاط یگان‌ها و همچنین تقاضای آن‌ها از قبل مشخص است؛

ـ در هر دوره، هر یگان تنها یک‌بار و توسط یک وسیله نقلیه می‌تواند خدمت بگیرد؛

ـ هر یگان باید در یک بازه زمانی (پنجره زمانی) خدمت‌دهی شود. اگر خارج از این بازه باشد، جریمه تعلق می‌گیرد. نوع پنجره زمانی از جنس نرم است (علاوه بر بازه زمانی تحویل تعیین‌شده، یک بازه زمانی دیگر به‌عنوان زودترین و دیرترین زمان تحویل مشخص می‌شود که خارج از آن، خدمت‌دهی مجاز نیست)؛

ـ ناوگان مسئله ناهمگن است (ظرفیت حجمی و وزنی، هزینه ثابت و هزینه متغیر وسایل نقلیه، متفاوت است)؛

ـ میزان بار وسایل نقلیه نباید از ظرفیت وزنی و حجمی آن‌ها تجاوز کند؛

ـ تقاضاها از دو نوع برداشت و تحویل به یگان است (بارگیری و تخلیه در نقاط یگان‌ها، هردو مجاز است)؛

ـ هزینه حمل‌ونقل بین دو یگان به میزان و نوع بار و مسافت پیموده‌شده بستگی دارد؛

ـ مدل چندمحصولی در نظر گرفته شده است و وسیله نقلیه قادر به برداشت و تحویل محصول از انواع متفاوت است؛ ولی محصولات باید متجانس باشند و قابلیت قرارگرفتن کنار هم در یک وسیله نقلیه را داشته باشند.

مجموعه‌ها

N_d: گره قرارگاه‌ها (پارکینگ‌ها) که وسایل نقلیه در آن‌ها قرار دارند

N_c: مجموعه گره یگان‌ها

$N = N_d \cup N_c$: مجموعه کل گره‌ها

K: مجموعه وسایل نقلیه

R: مجموعه کالاها

پارامترها

C_{kr}: هزینه واحد حمل‌ونقل محصول r توسط وسیله نقلیه k

$Distance_{ij}$: فاصله بین دو گره i و j

$time_{ij}$: زمان حمل‌ونقل بین دو گره i و j

$Demand_{ir}$: مقدار تقاضای موردنیاز گره i از کالای r

$Pickup_{ir}$: مقدار برداشت در گره i از کالای r

VF_k: هزینه ثابت استفاده از وسیله نقلیه k

$VCAP_V_k$: ظرفیت حجمی هر وسیله نقلیه k

$VCAP_W_k$: ظرفیت وزنی هر وسیله نقلیه k

$[a_i , b_i]$: بازه زمانی مجاز مربوط به گره i برای خدمت‌دهی (خدمت تا حدی در خارج این بازه نیز مجاز است ولی همراه با جریمه خواهد بود)

s_i: مدت‌زمان خدمت‌دهی در گره i

PE: جریمه زود کرد زمان رسیدن به هر گره

PL: جریمه دیرکرد زمان رسیدن به هر گره

$Volume_r$: حجم هر واحد از محصول r

$Weight_r$: وزن هر واحد از محصول r

M: یک عدد بزرگ

NV_{kd}: پارامتری است که نشان می‌دهد آیا وسیله نقلیه k در پارکینگ d وجود دارد که بتواند سفر خود را از آن پارکینگ آغاز کند یا خیر (اگر مقدار آن ۱ قرار داده شود، وسیله k در پارکینگ d وجود دارد و اگر صفر قرار داده شود، وجود ندارد)

متغیرهای تصمیم

X_{ij}^k: متغیر باینری، اگر گره i به j توسط وسیله نقلیه k پیموده شود، مقدار یک و در غیر این صورت، مقدار صفر می‌گیرد

Z_{id}: متغیر باینری، اگر گره i به قرارگاه d تخصیص داده شود، مقدار یک و در غیر این صورت، مقدار صفر می‌گیرد

T_{ik}: متغیر پیوسته برابر با زمان شروع خدمت‌دهی در گره i توسط وسیله نقلیه k

TE_{ik}: متغیر پیوسته برابر با زمان زودکرد ملاقات گره i توسط وسیله نقلیه k

TL_{ik}: متغیر پیوسته برابر با زمان دیرکرد ملاقات گره i توسط وسیله نقلیه k

U_{ij}^{kr}: متغیر پیوسته برابر با مقدار حمل کالای r از گره i به j توسط وسیله نقلیه k

تابع هدف و محدودیت‌های مدل

$$Min \sum_{i\in N_d}\sum_{j\in N_c}\sum_{k\in K} VF_k * X_{ij}^k \qquad (۱)$$

$$+ \sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R} C_{kr}\, Distance_{ij} U_{ij}^{kr} + \sum_{i\in N_c}\sum_{k\in K} TE_{ik}PE + TL_{ik}PL$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{k\in K} X_{ij}^k = 1 \qquad \forall\, j \in N_c \qquad (۲)$$

$$\sum_{j\in N} X_{ij}^k = \sum_{j\in N} X_{ji}^k \qquad \forall\, i \in N, k \in K \qquad (۳)$$

$$\sum_{k\in K} X_{ij}^k + Z_{id} + \sum_{\substack{f\in N_d \\ f\neq d}} Z_{jf} \le 2 \qquad \forall\, i,j \in N_c\,, i \neq j \;\; \forall\, d \in N_d \qquad (۴)$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{k\in K} U_{ij}^{kr} - \sum_{i\in N}\sum_{k\in K} U_{ji}^{kr} = Demand_{jr} - Pickup_{jr} \qquad \forall\, j \in N_c, r \in R \qquad (۵)$$

$$\sum_{d\in N_d} Z_{id} = 1 \qquad \forall\, i \in N_c \qquad (۶)$$

$$\sum_{k\in K} X_{di}^k \le Z_{id} \qquad \forall\, i \in N_c, \forall\, d \in N_d \qquad (۷)$$

$$\sum_{k\in K} X_{id}^k \le Z_{id} \qquad \forall\, i \in N_c, \forall\, d \in N_d \qquad (۸)$$

$$\sum_{r\in R} U_{ij}^{kr}\, Volume_r \le VCAP_V_k X_{ij}^k \qquad \forall\, i,j \in N_c\,, i \neq j \;\; \forall\, k \in K \qquad (۹)$$

$$\sum_{r\in R} U_{ij}^{kr}\, Weight_r \le VCAP_W_k X_{ij}^k \qquad \forall\, i,j \in N_c\,, i \neq j \;\; \forall\, k \in K \qquad (۱۰)$$

$$U_{ij}^{kr} \le M X_{ij}^k \qquad \forall\, i,j \in N_c\,, i \neq j \;\; \forall\, k \in K, r \in R \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{j\in N}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R} U_{dj}^{kr} = 0 \qquad \forall\, d \in N_d \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{j\in N}\sum_{k\in K}\sum_{r\in R} U_{jd}^{kr} = 0 \qquad \forall\, d \in N_d \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{i\in N_d}\sum_{j\in N_d}\sum_{k\in K} X_{ij}^k = 0 \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{k\in K} X_{ii}^k = 0 \qquad \forall\, i \in N, \forall\, j \in N_c\,, i \neq j \qquad (۱۵)$$

$$T_{ik} - T_{jk} + s_i + time_{ij} \leq M(1 - X_{ij}^k) \qquad \forall\, k \in K \qquad (۱۶)$$

$$TE_{ik} \geq a_i - T_{ik} \qquad \forall\, i \in N_c \,،k \in K \qquad (۱۷)$$

$$TL_{ik} \geq T_{ik} - b_i \qquad \forall\, i \in N_c \,،k \in K \qquad (۱۸)$$

$$LT_i \leq T_{ik} \leq UT_i \qquad \forall\, i \in N_c \,،k \in K \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{j \in N_C} x_{dj}^k \leq NV_{kd} \qquad \forall\, k \in K, d \in N_d \qquad (۲۰)$$

$$X_{ij}^k \,، Z_{id} \,، V_k \in \{1\,, 0\} \qquad (۲۱)$$

$$U_{ij}^{kr}، T_{ik}، TE_{ik}، TL_{ik} \geq 0 \qquad (۲۲)$$

تشریح تابع هدف و محدودیت‌های مدل. رابطه ۱، نمایانگر تابع هدف بوده و از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت نخست، حداقل‌کردن هزینه ارسال وسایل نقلیه است که همان هزینه ثابت مربوط به هر وسیله نقلیه است. قسمت دوم، برای حداقل‌کردن هزینه سفرهای وسایل نقلیه است که به میزان و نوع بار و میزان مسافت طی‌شده بستگی دارد. قسمت سوم نیز مربوط به حداقل‌کردن جریمه‌های زودکرد و یا دیرکرد در بازه زمانی تعیین‌شده در محل یگان‌ها است. رابطه ۲، نشان می‌دهد که هر یگان فقط یک‌بار و توسط یک وسیله نقلیه می‌تواند خدمت‌دهی شود. رابطه ۳، معادلات تعادلی در هر گره را نشان می‌دهد؛ یعنی در هر مسیر، مجموع گره‌های ورودی با مجموع گره‌های خروجی برابر است. رابطه ۴ از ایجاد مسیرهای نادرست جلوگیری می‌کند؛ بدین معنا که تمام نقاط یک دور (گشت) به یک قرارگاه تخصیص می‌یابد. رابطه ۵، نشان می‌دهد که مجموع محصول بارگیری‌شده و واردشده به هر یگان برابر با مجموع محصول تخلیه‌شده و خارج‌شده از آن است. رابطه ۶، هر یگان را به یک قرارگاه تخصیص می‌دهد. روابط ۷ و ۸، نشان می‌دهند که وسایل نقلیه از قرارگاه‌ها سفر خود را آغاز می‌کنند و در انتها به همان قرارگاه که از آن خارج‌شده‌اند، بازمی‌گردند. روابط ۹ و ۱۰، نشان می‌دهند میزان باری که وسایل نقلیه حمل می‌کنند نباید از ظرفیت حجمی و وزنی آن‌ها تجاوز کند. رابطه ۱۱ از ایجاد بار روی مسیر پیموده‌نشده جلوگیری می‌کند. روابط ۱۲ و ۱۳، به‌ترتیب نشان می‌دهند که بار خروجی از قرارگاه (پارکینگ) و بار بازگشتی به آن باید صفر باشد. روابط ۱۴ و ۱۵، به‌ترتیب از ارتباط بین قرارگاه‌ها و حرکت از یک یگان به خودش جلوگیری می‌کنند. رعایت پنجره زمانی نرم، یعنی بازه زمانی که خدمت‌دهی باید در آن انجام شود، در روابط ۱۶ تا ۱۹، آمده است. رابطه ۱۶، همچنین شدنی‌بودن زمان‌بندی دورها (گشت‌ها) را تضمین کرده و از ایجاد زیردور نیز جلوگیری می‌کند. رابطه ۲۰، نشان می‌دهد که هر وسیله نقلیه در کدام قرارگاه (پارکینگ) قرار دارد و از کدام

قرارگاه می‌تواند سفر خود را آغاز کند؛ به این معنا که اگر پارامتر NV_{kd} مقدار ۱ قرار داده شود؛ یعنی وسیله نقلیه k در قرارگاه d قرار دارد و می‌تواند سفر خود را از این قرارگاه شروع کند و اگر این پارامتر برابر صفر قرار داده شود، وسیله نقلیه k در قرارگاه d قرار ندارد. روابط ۲۱ و ۲۲، نیز متغیرهای باینری و پیوسته را تعریف می‌کنند.

روش حل پیشنهادی. مسائل VRP که موردبحث این پژوهش است، به‌دلیل پیچیدگی محاسباتی در خانواده مسائل سخت (NP-hard) برای بهینه‌سازی قرار دارند که حل دقیق این مسائل یا ممکن نیست و یا به زمان حل بسیار زیاد نیاز دارد. توانایی روش‌های فراابتکاری در حل این مسائل در زمان کم و کیفیت جواب مناسب (جواب نزدیک به بهینه) و فرار از بهینگی محلی از دلایل به‌کارگیری آن‌ها است. در این پژوهش، الگوریتم‌های تکاملی GA، PSO و SA ارائه خواهد شد و برای اعتبارسنجی آن، نتایج حل این الگوریتم‌ها با نتایج حل روش دقیق (به‌دست‌آمده از نرم‌افزار گمز) مقایسه می‌شود.

الگوریتم ژنتیک. در الگوریتم ژنتیک به جمعیت هر تکرار «نسل» می‌گویند. برخی از پاسخ‌های نسل فعلی که «جمعیت والد» خوانده می‌شود، برای تولید نسل بعدی انتخاب می‌شوند و توسط عملگرهای ژنتیک که غالباً جهش و تقاطع است، برای نسل بعدی تولید فرزند می‌کنند. در این میان فرزندانی که برازندگی بهتری از والدین خود دارند، برای جمعیت نسل بعدی انتخاب می‌شوند که این باعث تکامل جمعیت می‌شود و با هر تکرار، جمعیت شرایط بهتری پیدا می‌کند و کیفیت جواب‌ها بهتر می‌شود.

معرفی کروموزوم و نحوه نمایش جواب. نقاطی که می‌توانند ورودی تابع برازندگی باشند، «افراد» نامیده می‌شوند. درحقیقت هر فرد برابر یک راه‌حل برای مسئله بوده و بهترین فرد، تقریبی از جواب نهایی مسئله است. زمانی که این راه‌حل‌ها به‌صورت رشته‌هایی از ارقام یا حروف کدگذاری می‌شوند، به آن‌ها «کروموزوم یا ژنوم» گفته می‌شود. کروموزوم پیشنهادی در این پژوهش به‌صورت ماتریسی با تعداد سطر و ستون مشخص است. این ماتریس متشکل از اعداد صحیح بوده، تعداد سطرهای آن برابر سه و تعداد ستون‌های آن برابر با تعداد مشتریان است. هر سطر از این ماتریس، مسئولیت نمایش یک ویژگی از جواب را دارد. بخشی از جواب یک مسئله VRP در شکل ۱، نشان داده شده است.

قرارگاه	۵	۵	۴	۴	۳	۳	۲	۲	۱	۱	۱	
مشتریان	۱۰	۱۱	۱۲	۳	۲	۱	۸	۹	۷	۵	۴	۶
وسیله نقلیه	۱	۳	۲	۱	۴	۲	۳	۲	۳	۴	۳	۴

شکل ۱. نحوه نمایش جواب مسئله

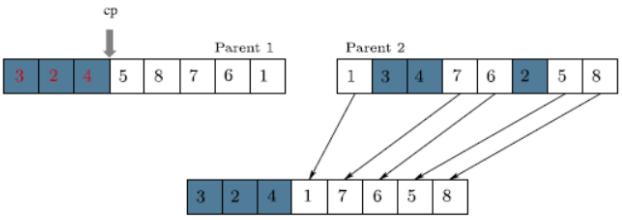
نحوه نمایش جواب در این پژوهش، اطلاعات موردنیاز یک جواب مسئله را در اختیار قرار می‌دهد. در ماتریس موردنظر، سطر اول قرارگاه، سطر دوم مشتریان تخصیص‌داده‌شده به قرارگاه و سطر سوم وسیله نقلیه‌ای است که به آن مشتری خدمت می‌دهد. برای مثال، مشتریان شماره ۶ و ۵ به قرارگاه ۱ تخصیص داده شده و این دو مشتری توسط وسیله نقلیه شماره ۴ از قرارگاه ۱، خدمت‌دهی می‌شوند.

جمعیت اولیه و انتخاب جواب. بعد از تصمیم‌گیری در مورد نحوه کدگذاری کروموزوم‌ها، جمعیت اولیه باید ایجاد شود. این مرحله معمولاً با انتخاب تصادفی مقادیر در محدوده مجاز صورت می‌گیرد. هر نقطه از این محدوده می‌تواند یک جواب برای حل مسئله باشد؛ ولی لزوماً بهترین جواب برای حل مسئله نخواهد بود. در این پژوهش از روش تولید جواب تصادفی برای ایجاد جمعیت اولیه استفاده شده است. در این روش ابتدا یک ترتیب تصادفی از مشتریان در نظر گرفته می‌شود؛ سپس به‌صورت تصادفی، هر یک از این مشتریان به یک قرارگاه و یک وسیله نقلیه از آن قرارگاه تخصیص داده می‌شود. هرگاه فردی در یک نسل انتخاب شود، به این معنا است که این فرد شایستگی تولیدمثل و یا حضور مستقیم در مرحله بعد را خواهد داشت. سیاست انتخاب نسل جدید بر اساس انتخاب بهترین افراد نسل فعلی به تعداد اندازه جمعیت قبلی و بر اساس تابع برازندگی آن‌ها است. در این پژوهش بهترین افراد، یعنی بهترین پاسخ‌های مسئله، بر اساس مقدار هزینه کل انتخاب می‌شود. در این پژوهش از روش چرخ رولت برای انتخاب در فرایند تقاطع استفاده شده است. سیاست انتخاب افراد برای اعمال عملگر جهش که در ادامه توضیح داده می‌شود، به‌صورت انتخاب تصادفی از میان افراد جمعیت است.

عملگرهای ژنتیک

عملگر تقاطع. عملگر اصلی ایجاد نسل جدید در مرحله تکثیر، تقاطع یا همان پیوند است. وقتی‌که افراد یک نسل بر اساس برازندگی خود در مرحله انتخاب، گزینش شوند، این عملگر با ترکیب ژن‌های یک جفت والد برگزیده، کروموزوم فرد جدید را به‌وجود می‌آورد. همانند کروموزوم‌ها در طبیعت، فرزندان حاصل از این عملگر، هر یک بخشی از اطلاعات روی کروموزوم‌های والد را دارند. در این پژوهش از روش تقاطع تک‌نقطه‌ای برای اعمال عملگر تقاطع

روی والدها و ایجاد فرزندان استفاده می‌شود که شکل ۲، نشان‌دهنده عملگر تقاطع موردنظر است.



شکل ۲. عملگر تقاطع

عملگر جهش. در جهش، کروموزوم هر فرد به‌تنهایی و بدون نیاز به ادغام با کروموزوم فرد دیگر بر اساس قوانین احتمال می‌تواند تغییر کند. جهش به‌عنوان یک عملگر اصلی در الگوریتم ژنتیک شناخته می‌شود که مسئول تولید مجدد ژن‌های گم‌شده و جلوگیری از کوچک‌شدن فضای جست‌وجوی الگوریتم ژنتیک (از طریق فراهم‌آوردن افراد تصادفی در همسایگی جمعیت) است. در این پژوهش از سه نوع رویکرد متفاوت برای اعمال جهش استفاده می‌شود که در طی الگوریتم، هر بار یکی از آن‌ها به‌تصادف انتخاب می‌شود. در روش نخست، یگان‌های دو قرارگاه به‌صورت تصادفی با یکدیگر و به‌طور کامل جابه‌جا می‌شوند. در روش دوم، یک قرارگاه حذف شده و یگان‌های آن به قرارگاه دیگر تخصیص داده می‌شوند. در روش سوم نیز تخصیص یگان‌ها به وسایل نقلیه تغییر پیدا می‌کند.

با توجه مطالب ارائه‌شده در بالا، شبه‌کد الگوریتم ژنتیک خاص پژوهش، مطابق شکل ۳، ارائه شده است.

شروع
پارامترهای الگوریتم ژنتیک را فراخوانی کن؛
به تعداد جمعیت نسل (Popsize) جواب اولیه تصادفی ایجاد کن؛
بهترین جواب جمعیت را در BestSol قرار بده؛
به تعداد حداکثر نسل (Maxiter) مراحل زیر را تکرار کن (حلقه اصلی):
به تعداد فرزندان مراحل زیر را تکرار کن (حلقه ۱)
بر اساس الگوریتم چرخ رولت، والدها را انتخاب کن؛
تقاطع محاسباتی را انجام بده و جمعیت فرزندان را ایجاد کن؛
برای جمعیت فرزندان حاصل از تقاطع، تابع برازندگی را محاسبه کن؛
ایجاد جمعیت حاصل از تقاطع را ایجاد کن؛
پایان حلقه ۱.

به تعداد جهش مراحل زیر را تکرار کن (حلقه ۲)
از جمعیت نسل به‌طور تصادفی والد را انتخاب کن؛
جهش یکنواخت را انجام بده و جمعیت جهش‌یافتگان را ایجاد کن؛
برای جمعیت فرزندان حاصل از جهش، تابع برازندگی را محاسبه کن؛
جمعیت حاصل از جهش را ایجاد کن؛
پایان حلقه ۲.

جمعیت را یکپارچه کن (مجموع نسل کنونی و فرزندان حاصل از تقاطع و جهش)؛
نسل را بر اساس برازندگی مرتب کن؛
اگر بهترین جواب این مجموعه از BestSol بهتر است، BestSol را جایگزین کن؛
به تعداد جمعیت، از ابتدای مجموعه مرتب‌شده، برای نسل جدید انتخاب کن؛
BestSol را چاپ کن؛
BestCost را چاپ کن.
پایان حلقه اصلی
نتایج را چاپ کن.
پایان الگوریتم.

شکل ۳. شبه‌کد الگوریتم ژنتیک خاص پژوهش حاضر

الگوریتم بهینه‌سازی ذرات پرندگان (PSO). در الگوریتم PSO تعدادی از موجودات وجود دارند که به آن‌ها ذره گفته می‌شود و در فضای جست‌وجوی تابعی که قرار است مقدار آن کمینه (یا بهینه) شود، پخش شده‌اند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می‌کند؛ سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که در گذشته در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. همه ذرات جهتی برای حرکت انتخاب می‌کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا آنکه جواب موردنظر به‌دست بیاید. درواقع انبوه ذرات که مقدار کمینه یک تابع را جست‌وجو

می‌کنند، همانند دسته‌ای از پرندگان عمل می‌کنند که به دنبال غذا می‌گردند. موقعیت هـر ذره بـا توجه به تجربه شخصی خود و بر مبنای گرایش اجتمـاعی و روان‌شـناختی موفقیـت افـراد دیگـر تغییر می‌کند. یک ازدحام از مجموعه‌ای از ذرات تشکیل شده است و هر ذره یک راه‌حل بـالقوه را نشان می‌دهد.

$x^i[t]$ موقعیت هر ذره است که با اضافه‌کردن یک سرعت به موقعیت فعلی تعریف می‌شود.

$$x^i[t+1] = x^i[t] + v^i[t+1] \qquad (۲۳)$$

بردار سرعت به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v^i[t+1] = wv^i[t] + c_1 r_1 (x^{i.best}[t] - x^i[t] + c_2 r_2 (x^{g.best}[t] - x^i[t] \qquad (۲۴)$$

جایی که $x^{i.best}[t]$ بهترین موقعیت ذره در همسایگی ذرات داده شده است.

$x^{g.best}[t]$ بهترین موقعیت از بهترین عضو ذره در کل ازدحام است.

w وزن اینرسی است، c_1 عامل یادگیری شناختی است، c_2 عامل یادگیری اجتماعی (معمولاً به‌عنوان ثابت تعریف می‌شود) و $r_1, r_2 \in [0,1]$ مقادیر تصادفی هستند.

الگوریتم SA. روش SA برای اینکه در یک جواب بهینه محلی گرفتار نشود، از رویکرد احتمالی استفاده می‌کند و همچنین فرایند جست‌وجوی تبرید یک رویه ایجاد همسایگی را تکرار می‌کند و این فرایند به‌گونه‌ای است که به بهبود تابع هدف منجر می‌شود. اگر در هر تکرار برای هر جواب جاری Z مقدار تابع هدف را با $f(z)$ و مجموعه همسایگی z با $N(z)$ نشان داده شود و جواب به‌عنوان یکی از همسایگی z در نظر گرفته شود، در هر تکرار داخلی مقدار تغییر تابع هدف به‌اندازه $\Delta = f(\acute{z}) - f(z)$ خواهد بود. در مسئله حداقل‌سازی اگر $\Delta<0$ باشد، آنگاه ź به‌عنوان جواب جاری جایگزین می‌شود و همچنین اگر $\Delta>0$ باشد (یعنی مقدار تابع هدف بدتر شده باشد) آنگاه ź با روش‌های احتمالی پذیرفته می‌شود که معمولاً از تابع بولتسمن استفاده می‌شود. مقدار به‌دست‌آمده از محاسبه p با مقدار $y_{random} \in [0,1]$ که به‌صورت تصادفی ایجاد شده است، مقایسه می‌شود. ź هنگامی جایگزین جواب جاری (z) می‌شود که $p \geq y_{random}$ باشد. پارامترهای دخیل در تابع عبارت‌اند از: T و Δ. هرچه مقدار اختلاف بین تابع هدف جواب جدید با جواب جاری (Δ) بیشتر باشد، احتمال پذیرش ź کمتر می‌شود و هرچه میزان T بیشتر باشد، احتمال قبول یک جواب بدتر بیشتر می‌شود. در الگوریتم SA، T از یک عدد به سمت صفر میل می‌کند. سازوکار تبرید (کاهش دما) و مقدار اولیه درجه حرارت در الگوریتم تعبیه می‌شود. یکی از معمول‌ترین سازوکارهای کاهش دما عبارت است از: سازوکار کاهش دمای نمایی در s گام با

شروع از دمای اولیه T و عامل کاهش دمای $0 < \alpha < 1$ انجام می‌شود. در هر گام s تعدادی همسایگی ایجاد و پذیرش و عدم‌پذیرش آن بررسی می‌شود؛ سپس دمای جاری با رابطه $T_s = \alpha^s . T$ کاهش می‌یابد [۷].

تنظیمات پارامترها برای الگوریتم‌های GA، PSO و SA. منظور این است که سطوح پارامترهای الگوریتم‌های GA، PSO و SA به‌عنوان متغیرهای ورودی تعیین شوند تا کیفیت جواب و زمان رسیدن به جواب (متغیرهای پاسخ) توأمان بهینه شود. رویکرد تنظیم پارامترها به این صورت بوده است که نخست مقدار اولیه از مقالات و پژوهش‌های صورت‌گرفته در مرور مبانی نظری انتخاب می‌شود و سپس با روش سعی و خطا بهترین مقدار پارامترها تعیین شده و استفاده می‌شود. پس از به‌دست‌آوردن مقدار اولیه در هر مرحله یک مقدار انتخاب و در دامنه‌های تعیین‌شده تغییرات اعمال می‌شود. با توجه به مطالب بیان‌شده، داده‌های مربوط به پارامترهای کنترلی برای الگوریتم‌های GA، PSO و SA در جدول‌های ۳، ۲ و ۴، نشان داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای کنترلی برای الگوریتم GA

پارامتر	مقدار پارامتر
حداکثر تعداد تکرارها	۲۰۰
اندازه جمعیت	۱۰۰
درصد تقاطع	۰/۹
تعداد تقاطع	۲*Round (۲/تعداد جمعیت* درصد تقاطع)
درصد جهش	طول رشته از کروموزوم/ ۱
تعداد جهش	Round(تعداد جمعیت*درصد جهش)
نرخ جهش	۰/۰۱
اندازه گام‌های جهش	۰/۲*(حداقل متغیر-حداکثر متغیر)
قانون توقف	نسل‌های تولیدشده که معادل ۲۰۰ نسل است.

جدول ۳. پارامترهای کنترل برای الگوریتم PSO

پارامتر	مقدار پارامتر
حداکثر تعداد تکرارها	۲۰۰
محدوده پایین متغیر	۰
محدوده بالای متغیر	۱
اندازه جمعیت	۱۰۰
وزن اینرسی	۰/۳
نرخ نوسانات وزن	۰/۹۹
ضریب یادگیری شخصی	۰/۵
ضریب یادگیری کلی	۱
حداکثر سرعت	0.1*(VarMax-VarMin)
حداقل سرعت	-VelMax

جدول ۴. پارامترهای کنترلی برای الگوریتم SA

پارامتر	مقدار پارامتر
حداکثر تکرار در هر درجه حرارت	۲۰۰
حداکثر تعداد تغییر درجه حرارت	۱۰
دمای اولیه	۱۰
ضریب سردی	۰/۹
تنظیم دمای اولیه	T=T0
NFE	۱۰۰۰

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

به‌منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، نتایج حاصل از حل با الگوریتم‌های ژنتیک، ذرات پرندگان و پرش قورباغه با نتایج حل دقیق که توسط نرم‌افزار گمز به‌دست آمد، مقایسه شد. برای حل مسئله یادشده از دو نرم‌افزار GAMS 23.5 و Matlab R2015a و همچنین رایانه‌ای با پردازنده چهارهسته‌ای Intel Corei 5 و ۴ گیگابایت حافظه استفاده شده است. در ادامه برای اعتبارسنجی مدل، ۷ مسئله در ابعاد مختلف مطرح (جدول ۵) و توسط روش‌های دقیق و فراابتکاری حل شد (جدول ۶) و مقایسه بین نتایج صورت گرفت (جدول ۷). برای مسائل مطرح‌شده از داده‌های آزمون کلاسیک Gaskell67-21x5 موجود در مبانی نظری موضوع بهره‌گیری شد. این داده‌ها شامل مختصات و تقاضای مشتریان و همچنین مختصات مراکز است. در این داده، ۵ مرکز و ۲۱ مشتری وجود دارد. ازآنجاکه برخی از پارامترهای مسئله موردپژوهش در این داده‌ها وجود ندارد، برخی از آن‌ها تصادفی تولید شده و برخی نیز بر اساس اطلاعات پایه محاسبه می‌شوند. به این صورت که تعداد محصولات، سه نوع در نظر گرفته شده است و فرض

بر این است تقاضای برداشتنی و گذاشتنی مشتریان برای هر محصول با هم برابر است. تعداد ۶ وسیله نقلیه با ظرفیت‌های متفاوت برای هر مرکز در نظر گرفته شده است. هزینه حمل‌ونقل بین دو گره و زمان سفر بین آن‌ها بر اساس ضریبی از مسافت بین آن دو گره محاسبه می‌شود. محدودیت وزنی وسایل نقلیه به‌صورت تصادفی بین ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ و محدودیت حجمی آن‌ها به‌صورت تصادفی بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است. هزینه ثابت استفاده از وسایل نقلیه طبق داده آزمون برابر ۵۰ واحد است. حجم محصولات برابر ۵ واحد و وزن آن‌ها برابر ۲ واحد و هزینه ارسال آن‌ها برای هر وسیله نقلیه برابر ۲ واحد در نظر گرفته شده است.

جدول ۵. ابعاد و اطلاعات مسائل طراحی‌شده

شماره مسئله	تعداد قرارگاه‌ها	تعداد مشتریان
۱	۵	۶
۲	۵	۷
۳	۵	۸
۴	۵	۱۰
۵	۵	۱۵
۶	۵	۱۸
۷	۵	۲۱

جدول ۶. نتایج حاصل از حل روش دقیق و الگوریتم‌های فراابتکاری

شماره مسئله	حل دقیق		حل الگوریتم GA		حل الگوریتم SA		حل الگوریتم PSO	
	زمان حل (ثانیه)	تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	تابع هدف
۱	۵۹/۶	۷۱۳	۴/۱	۷۱۳	۴/۶	۷۱۳	۵/۲	۷۱۳
۲	۱۰۵/۶	۷۵۲	۴/۳	۷۵۲	۵/۰	۷۵۲	۵/۷	۷۵۲
۳	۵۱۲/۴	۸۹۰	۵/۲	۸۹۹	۵/۴	۹۰۵	۵/۹	۹۰۳
۴	۱۰۲۴/۳	۱۰۳۱	۵/۶	۱۰۴۲	۵.۹	۱۰۵۱	۶/۴	۱۰۴۸
۵	–	–	۱۹/۵	۱۶۹۱/۴	۲۰/۱	۱۷۰۴/۲	۳۱/۸	۱۷۰۶/۶
۶	–	–	۲۴/۱	۲۰۲۶/۴	۲۷/۱	۲۰۵۴/۵	۳۷/۳	۲۰۵۶/۷
۷	-	-	۳۰/۲	۲۲۹۱/۴	۳۲/۴	۲۳۵۵/۷	۴۵/۹	۲۳۶۷/۲

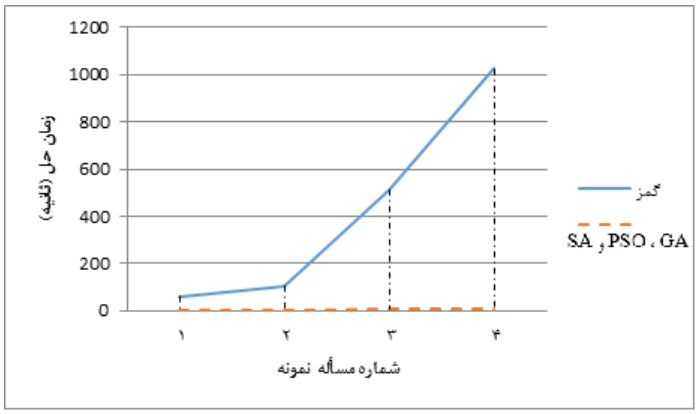
جدول ۷. مقدار انحراف یا اختلاف تابع هدف الگوریتم‌های فراابتکاری نسبت به روش دقیق

شماره مسئله	الگوریتم GA	الگوریتم SA	الگوریتم PSO
۱	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۰
۳	۱/۱	۱/۷	۱/۴
۴	۱	۱/۹	۱/۶
۵	–	–	–
۶	–	–	–
۷	–	–	–
میانگین درصد خطای جواب الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش دقیق (به‌ازای ۴ مسئله اول)	<۱	<۱	<۱

مقادیر تابع هدف در جدول ۴، آمده است. مقدار انحراف یا اختلاف تابع هدف الگوریتم‌های فراابتکاری نسبت به روش دقیق از رابطه ۱، به‌دست می‌آید. میانگین درصد خطای جواب الگوریتم‌های فراابتکاری نسبت به روش دقیق (به‌ازای ۴ مسئله اول) کمتر از سه درصد است و این نشان می‌دهد که الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی یک الگوریتم همگرا به جواب بهینه و کارا است. از طرفی با توجه به نتایج حاصل از الگوریتم‌های تکاملی GA، PSO و SA، در زمان حل و نتایج تابع هدف، نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک پیشنهادی نسبت به دو الگوریتم دیگر عملکرد بهتری دارد.

$$\text{درصد اختلاف جواب} = \left|\frac{\text{جواب روش دقیق} - \text{جواب الگوریتم فراابتکاری}}{\text{جواب روش دقیق}}\right| \times 10 \qquad (۲۵)$$

مقایسه زمان حل مسائل نمونه با روش فراابتکاری و روش دقیق در شکل ۴، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با گسترش ابعاد مسئله، زمان حل دقیق به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد؛ اما این تغییر برای الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی جزئی بوده و روند خطی دارد.



شکل ۴. نمایش مقایسه‌ای زمان حل مسائل نمونه با الگوریتم‌های فراابتکاری و روش دقیق

تحلیل نتایج محاسباتی برای مطالعه موردی. با ارتباط با خبرگان اداره ترابری سازمان نظامی موردمطالعه و بررسی اسناد و مدارک موجود، مسئله‌ای واقعی منطبق بر نیاز سازمان نظامی تعریف و پارامترهای مدل مسئله انتخاب شد. با توجه به اینکه الگوریتم فراابتکاری ژنتیک پیشنهادی کارکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های دیگر فراابتکاری دارد، مسئله موردمطالعه با این الگوریتم حل شده است. پارامترهای کنترلی الگوریتم پیشنهادی نیز مواردی هستند که در قسمت قبل استفاده شد. داده‌های مسئله به شرح زیر است:

ـ تعداد نقاط ۲۰ نقطه است که ۵ نقطه آن قرارگاه (پارکینگ) و ۱۵ نقطه دیگر یگان‌ها هستند؛

ـ فاصله نقاط از یکدیگر به‌صورت تصادفی انتخاب شده است؛

ـ هزینه واحد حمل‌ونقل برای هر وسیله و محصول ۱۰۰۰ واحد است؛

ـ تعداد محصولات ۲ نوع است و مجموع تقاضاها برای این دو نوع محصول، ۹۰۰ واحد است که بین نقاط مختلف پراکنده است؛ به‌گونه‌ای که تقاضاها به‌صورت تصادفی از بازه [۱۰۰، ۵۰۰] انتخاب شده‌اند و میزان تقاضای تحویل‌شدنی و برداشتنی با هم برابر است؛

ـ در هر قرارگاه ۳ وسیله نقلیه وجود دارد؛ بنابراین تعداد وسایل نقلیه در مسئله ۱۵ وسیله است؛

ـ ظرفیت‌های وزنی و حجمی وسایل نقلیه ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و یا ۲۵۰۰ است؛

ـ واحد وزنی و حجمی محصولات برای هر محصول، ۲ واحد در نظر گرفته شده است؛

ـ هزینه ثابت استفاده از وسایل نقلیه ۷۰ واحد است.

بر اساس جواب به‌دست‌آمده، وسیله نقلیه ۷ از قرارگاه ۱، وسیله ۳ از قرارگاه ۳ و وسیله ۹ از قرارگاه ۵ برای خدمت به یگان‌ها اعزام می‌شوند. دور یا گشت‌های تشکیل‌شده توسط این سه وسیله نقلیه، مطابق شکل ۵ است:

قرارگاه ۱	گشت ۱ و ترتیب خدمت‌دهی به یگان‌ها								
خودرو ۷	۱ ⇦	۹ ⇦	۷ ⇦	۱۵ ⇦	۱۶⇦	۱۳⇦	۱۰⇦	۸ ⇦	۱

قرارگاه ۳	گشت ۲ و ترتیب خدمت‌دهی به یگان‌ها							
خودرو ۳	۳ ⇦	۶ ⇦	۱۹⇦	۱۴⇦	۱۲⇦	۱۱ ⇦	۳

قرارگاه ۵	گشت ۳ و ترتیب خدمت‌دهی به یگان‌ها					
خودرو ۹	۵ ⇦	۱۸ ⇦	۱۷⇦	۲۰⇦	۵

شکل ۵. گشت‌های وسایل نقلیه ۷، ۳ و ۹ که به ترتیب از قرارگاه‌های ۱، ۳ و ۵ حرکت کردند

مطابق نتایج بالا، قرارگاه‌های ۱، ۳ و ۵ و نیز وسایل نقلیه ۷ ، ۳ و ۹ مورد استفاده قرار گرفته‌اند و معین شد هر قرارگاه و هر خودرو به چه یگان‌هایی خدمت ارائه می‌کنند. نتایج کلی حاصل از حل مسئله مطالعه موردی با الگوریتم ژنتیک در جدول ۸، ارائه شده است.

جدول ۸. نتایج حاصل از حل مسئله مطالعه موردی با الگوریتم ژنتیک

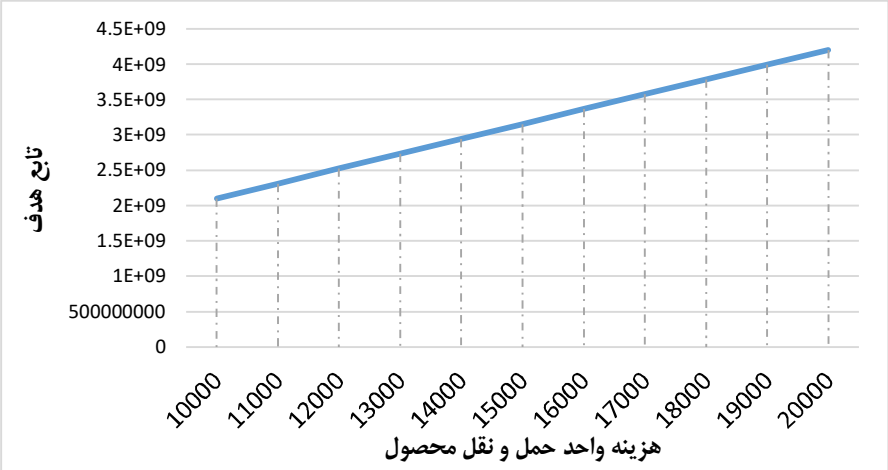
موارد مسئله	الگوریتم ژنتیک
مقدار تابع هدف	۱۳۱۵۰۰۲۱۰
تعداد وسایل نقلیه استفاده شده	۳
تعداد قرارگاه تخصیص داده‌شده	۳
هزینه زودکرد یا دیرکرد ملاقات مشتریان	۰

تحلیل حساسیت برای پارامترهای مهم. در این بخش با تغییر مقادیر پارامترهای موردنظر و ثابت نگاه‌داشتن سایر پارامترها، تأثیرات جواب نهایی بررسی می‌شود. تحلیل حساسیت برای دو پارامتر، یعنی پارامتر هزینه واحد حمل‌ونقل محصول (C_{kr}) و پارامتر تقاضای یگان‌ها موردبررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور مسئله‌ای با دو قرارگاه و چهار مشتری طرح شد و تحلیل حساسیت روی این مسئله صورت گرفت. ابتدا با تغییر پارامتر هزینه واحد حمل‌ونقل محصول، تأثیر آن بر تابع هدف بررسی می‌شود. جدول ۹، تابع هدف را به‌ازای C_{kr} مختلف نمایش می‌دهد.

جدول ۹. مقدار تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف هزینه واحد حمل‌ونقل

پارامتر C_{kr}	تابع هدف
۱۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰۰۱۴۰
۱۱۰۰۰	۲۳۱۰۰۰۰۱۴۰
۱۲۰۰۰	۲۵۲۰۰۰۰۱۴۰
۱۳۰۰۰	۲۷۳۰۰۰۰۱۴۰
۱۴۰۰۰	۲۹۴۰۰۰۰۱۴۰
۱۵۰۰۰	۳۱۵۰۰۰۰۱۴۰
۱۶۰۰۰	۳۳۶۰۰۰۰۱۴۰
۱۷۰۰۰	۳۵۷۰۰۰۰۱۴۰
۱۸۰۰۰	۳۷۸۰۰۰۰۱۴۰
۱۹۰۰۰	۳۹۹۰۰۰۰۱۴۰
۲۰۰۰۰	۴۲۰۰۰۰۰۱۴۰

تغییرات تابع هدف به‌ازای تغییرات مقدار هزینه واحد حمل‌ونقل در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. مقدار تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف هزینه واحد حمل‌ونقل

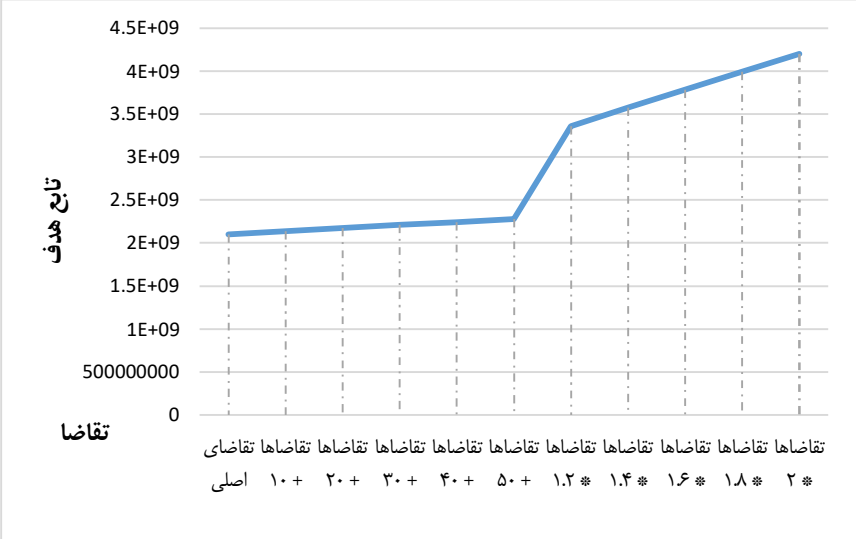
طبق شکل ۶، تابع هدف به‌صورت مستقیم به پارامتر هزینه واحد حمل‌ونقل محصول وابسته است. با افزایش این پارامتر، تابع هدف به‌طور خطی افزایش می‌یابد.

در ادامه، مقادیر تقاضا مطابق سناریوهای جدول ۱۰، تغییر داده می‌شود تا عملکرد تابع هدف مبتنی بر این تغییرات، بررسی شود. تغییرات تابع هدف به‌ازای تغییر مقدار تقاضا در شکل ۷،

نشان داده شده است. با توجه به این شکل، با افزایش میزان تقاضا، مقدار هزینه‌های تابع هدف افزایش می‌یابد؛ درنتیجه رابطه میزان تقاضا با تابع هدف در مدل، مستقیم و دارای روند تغییرات صعودی است.

جدول ۱۰. میزان حساسیت تابع هدف به افزایش مقادیر پارامتر تقاضا

سناریوی افزایش تقاضا	تابع هدف
تقاضاهای اصلی (اولیه)	۲۱۰۰۰۰۰۱۴۰
تقاضاها + ۱۰	۲۱۳۶۰۰۰۱۴۰
تقاضاها + ۲۰	۲۱۷۲۰۰۰۱۴۰
تقاضاها + ۳۰	۲۲۰۸۰۰۰۱۴۰
تقاضاها + ۴۰	۲۲۴۴۰۰۰۱۴۰
تقاضاها + ۵۰	۲۲۸۰۰۰۰۱۴۰
تقاضاها * ۱/۲	۲۵۲۰۰۰۰۱۴۰
تقاضاها * ۱/۴	۲۹۴۰۰۰۰۱۴۰
تقاضاها * ۱/۶	۳۳۶۰۰۰۰۱۴۰
تقاضاها * ۱/۸	۳۷۸۰۰۰۰۱۴۰
تقاضاها * ۲	۴۲۰۰۰۰۰۱۴۰



شکل ۷. مقدار تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف تقاضا در سناریوهای مختلف

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، مدل مسیریابی وسایل نقلیه برای پشتیبانی از یگان‌های نظامی، طراحی و حل شد. در طراحی مدل ریاضی، معیارهای مهم برای تحقق مأموریت‌های نظامی ملاحظه شده است. این معیارها شامل ضرورت تحویل کالا به یگان‌ها در بازه زمانی معین، امکان برداشت و تحویل کالا در مسیر حرکت وسایل نقلیه جاده‌ای، ناهمگن‌بودن ناوگان وسایل نقلیه جاده‌ای، ضرورت ارسال کالا از چندین قرارگاه پشتیبانی و ضرورت حمل چند نوع کالا است. برای حل این مدل ریاضی در ابعاد بزرگ مسئله از الگوریتم‌های فراابتکاری GA، PSO و SA استفاده شد. برای اثبات کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی، چندین مسئله آزمایشی حل و نتایج آن با نتایج حل نرم‌افزار گمز مقایسه شد. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی، همگرا به جواب بهینه و کارا است؛ زیرا جواب‌های آن برای حل مسائل مختلف، اختلافی کمتر از ۳ درصد دارد؛ ولی در عوض با افزایش ابعاد مسئله، زمان رسیدن به جواب بهینه در نرم‌افزار گمز به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. در ادامه پژوهش، یک مسئله واقعی منطبق بر نیاز سازمان نظامی، با توجه به اینکه الگوریتم فراابتکاری ژنتیک پیشنهادی، کارکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم فراابتکاری دیگر دارد، حل شده است. درنهایت تحلیل حساسیت روی دو پارامتر مهم مسئله، یعنی هزینه واحد حمل‌ونقل و مقدار تقاضا، انجام شد.

پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی. موارد زیر برای انجام پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود:

ـ با ملاحظه عدم‌قطعیت پارامترهای مسئله که در دنیای واقعی رخ می‌دهد، می‌توان مسائل بیشتری را بررسی کرد و با رویکردهای فازی، احتمالی یا استوار، مسائل را بهینه کرد؛

ـ اگر مکان قرارگاه‌ها از قبل مشخص نباشد، می‌توان موضوع مکان‌یابی را نیز به مسئله اضافه کرد؛

ـ می‌توان از ترکیب الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسئله استفاده کرد. در این خصوص ترکیب الگوریتم شبیه‌سازی تبرید با الگوریتم ژنتیک یا انبوه ذرات توصیه می‌شود؛

ـ ملاحظه تقسیم تحویل و برداشت تقاضاها برای مواردی که میزان تقاضا از ظرفیت وسایل نقلیه بیشتر است، مورد جذاب دیگری است که برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

منابع

1. Adbelhafiz, M., Mostafa, A. & Girard, A. (2010). Vehicle routing problem instances: Application to multi-uav mission planning. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*.
2. Ahn, N., & Kim, S. (2020). Optimal and heuristic algorithms for the multi-objective vehicle routing problem with drones for military surveillance operations. *Journal of Industrial and Management Optimization*, Article in press.
3. Beigi, S. & Hossein-zadeh, E. (2019). A mathematical model for location-routing problem under crisis considering route security. *Defensive Future Studies, 13,* 89-110.
4. Crino, J., Moore, J.T., Barnes, J.W. & Nanry, W.P. (2004). Solving the theater distribution vehicle routing and scheduling problem using group theoretic tabu search.*Mathematical and Computer Modelling, 39,* 599-616.
5. Du, J., Li, X., Yu., L., Dan, R. & Zhou, J. (2017). Multi-depot vehicle routing problem for hazardous materials transportation: a fuzzy bilevel programming. *Information Sciences, 399,* 201-218.
6. Eslami-nia, A. & Azimi, P. (2020). Solving the Electric Vehicle Routing Problem Considering the Vehicle Volume Limitation using a Simulated Annealing Algorithm. *Journal of Industrial Management Perspective, 36,* 165-188. (In Persian)
7. Farah-Bakhsh, A. & Behnamian, J. (2020). Solving the CVRP with Reduction to knapsak problem and greedy clustring heuristic method. *Journal of Industrial Management Perspective, 36,* 89-106. (In Persian)
8. Farah-Bakhsh, F., Tavakkoli-Moghaddam, R. & Ghazavati, V.R. (2017). Developing a multi-objective mathematical model for hetro-genous vehicle routing problem under crisis situation. *Transportation Engineering, 34,* 169-187.
9. Hassanpour, H.A., Mosadegh-khah, M. & Tavakkoli-moghaddam, R. (2008). Solving a multi-objective, multi-depot and stochastic vehicle routing problem by simmulated annealing. *Journal of Industrial Engering, 43,* 25-36.
10. Ju, B., Kim, M. & Moon, I. (2021). Vehicle routing problem considering reconnaissance and transportation. *Sustainability, 13,* 3188.
11. Li, J., Jing, X. & Tong, C. (2012). Modeling and simulation of VRP in wartime using NSGA II. *Chinese Control and Decision Conference (CCDC).*
12. Nikjoo, N. & Javadian, N. (2019). A multi-objective robust optimization logistics model in time of crisis under uncertainty. *Journal of Industrial Management Perspective, 32*, 121-147. (In Persian)
13. Nowroozi, P., Hassanpour, H.A. & Kafi, F. (2020). Vehicle routing considering military criteria by hybrid approaches of Heuristic-AHP-TOPSIS (Case study: A transportation unit of a military logistic organization). *Logistic Thought Journal, 73,* 49-80. (In Persian)
14. Rashidi-Komaijani, A.R. & Gorani, N. (2015). Vehicle routing problem under crisis. *International Conference of Industrial and Management.*
15. Tavakkoli-Moghaddam, R., Alinaghian, M., Nowroozi, N. & Salamat-Bakhsh, A.R. (2011). Solving a new model for vehicle routing problem considering safety in transportation of hazardous materials. *Transportation Engineering, 2(3),* 223-235.

16. Tavakkoli-Moghaddam, R. & Kahfi, A. (2015). Solving a multi-depot vehicle routing problem under risk reduction by a multi-objective bat algorithm (MOBA). *Transportation Engineering, 6(3),* 507-522.
17. Veisi, O., Heidari, J., Razmi, J. & Sangari, M.S. (2019). Optimization of distribution and supporting model in the supply chain of supporting and procurement system under uncertainy and dynamic situation. *Journal of Military Management, 19(2),* 81-116.
18. Wang, C., Mu, D., Zhao, F. & Sutherland, J.W. (2015). A parallel simulated annealing method for the vehicle routing problem with simultaneous pickup–delivery and time windows. *Computers & Industrial Engineering, 83,* 111-122.
19. Yancheng, G., Ronggui, H., Xirui, Y., Hongxing, S. & Chang, L. (2010). Improved ant colony algorithm for vehicle scheduling problems of military logistics distribution. *International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management.*
20. Zeimpekis, V., Kaimakamis, G. & Daras, N.J. (2015). Military Logistics: *Research Advances and Future Trends/Computer Science Interfaces Series, 56.*
21. Zhang, S., Mu, D. & Whang, C. (2020). A solution for the full-load collection vehicle routing problem with multiple trips and demands: An Application in Beijing. *IEEE ACCESS, 8,*
22. Zhao, T., Huang, J., Shi, J. & Chen, C. (2018). Route planning for military ground vehicles in road networks under uncertain battlefield environment. *Journal of Advanced Transportation*,