


Paper Type: Original Article

Employing Efficient Algorithms to Reduce the Distance Traveled in Location-Routing Problem Considering Travel and Service

Amir Mohammad Golmohammadi^{1,*}, Alireza Goli², Hasan Rasay³

¹ Department of Industrial Engineering, Arak University, Arak, Iran; a-golmohammadi@araku.ac.ir.

² Department of Industrial Engineering and Future Studies, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran; goli.a@eng.ui.ac.ir.

³ Department of Industrial Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran; h.rasay@kut.ac.ir.

Citation:



Golmohammadi, A. M., Goli, A., & Rasay, H. (2022). Employing efficient algorithms to reduce the distance traveled in location-routing problem considering travel and service. *Innovation management and operational strategies*, 3(1), 48-61.

Received: 06/10/2021

Reviewed: 08/11/2021

Revised: 23/02/2022

Accepted: 28/02/2022

Abstract

Purpose: The study aims to present a mathematical model for the reduction of the system costs through the proper location of the required warehouses and the routing of vehicles that carry the products from the warehouses within a time window.

Methodology: With regard to the specific nature of a location-routing problem, the consumption of fuel and the depreciation of vehicles are directly affected by the distance covered. The model proposed in this research seeks to minimize the undue length of the distance that vehicles have to travel. Moreover, for the approximation of the model to real-world conditions as much as possible, the concept of 'time window' is employed to determine the maximum allowable time for the distribution of goods.

Findings: Three metaheuristic algorithms including NSGA-II, PAES and MOICA are used to solve the proposed model. To evaluate the efficiency of the solutions, several problems of different sizes are introduced and solved, and then the results are compared in terms of the SM, MID and QM criteria. The comparative results suggest the superiority of the MOICA algorithm for big-size problems.

Originality/Value: Setting a time window for the reduction of the distance traveled by the vehicles gets the model close to real-world conditions. It also makes it possible to estimate the costs more accurately.

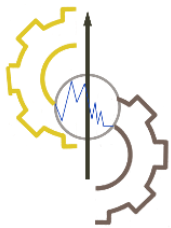
Keywords: Metaheuristic algorithms, Optimization, Location routing problem.

Corresponding Author: a-golmohammadi@araku.ac.ir

 <https://doi.org/10.1001.1.27831345.1401.3.1.4.7>



Licensee. **Innovation Management & Operational Strategies**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



نوع مقاله: پژوهشی

6

به کارگیری الگوریتم‌های کارا برای کاهش اختلاف مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه در یک مسئله مکان‌یابی - مسیریابی با در نظر گرفتن زمان سفر و سرویس دهی

امیرمحمد گل محمدی^{۱*}، علیرضا گلی^۲، حسن رسائی^۳

^۱ گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

^۲ گروه مهندسی صنایع و آینده پژوهی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

^۳ گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

چکیده

هدف: ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی که هدف اصلی آن کاهش هزینه‌های سیستم از طریق مکان‌یابی مناسب انبارهای مورد نیاز و همچنین مسیریابی وسایل نقلیه به منظور حمل کالاهای تولیدی به این انبارها با در نظر گرفتن زمان سفر است.

روش‌شناسی پژوهش: با توجه به ماهیت مسئله مکان‌یابی - مسیریابی میزان سوخت مصرفی و استهلاک وسایل حمل و نقل رابطه مستقیمی با میزان مسافت طی شده توسط آن‌ها دارد. مدل ارائه شده در این مقاله در صدد کمینه کردن عدم توازن مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه می‌باشد. همچنین برای نزدیکی هرچه بیشتر مدل ارائه شده به شرایط دنیای واقعی، با به کارگیری مفهوم پنجره‌ی زمانی حداکثر زمان مجاز برای توزیع محصولات نیز در نظر گرفته شده است.

یافته‌ها: برای حل مدل ارائه شده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری *MOICA*، *NSGA-II* و *PAES* استفاده شده است. برای نشان دادن کارایی روش‌های حل، نمونه مسائل مختلفی در اندازه‌های متفاوت ارائه و از طریق آن‌ها حل شده و نتایج خروجی از آن‌ها بر اساس معیارهای *QM*، *MID* و *SM* مقایسه شده است. نتایج حاصله بیانگر برتری الگوریتم *MOICA* ارائه شده در ابعاد بالاست.

اصالت/ارزش افزوده علمی: توازن در میزان مسافت طی شده توسط وسایل حمل و نقل با توجه به در نظر گرفتن پنجره زمانی می‌تواند باعث نزدیکی مدل به دنیای واقعی شود و تخمین دقیق‌تری از هزینه‌ها را ارائه دهد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم‌های فرا ابتکاری، بهینه‌سازی، مسئله مکان‌یابی - مسیریابی وسایل نقلیه.

۱- مقدمه

مدیریت واحدهای تولیدی و صنعتی می‌کوشند تا با مکان‌یابی مناسب انبارهای توزیع و پیدا کردن مسیرهای بهینه‌ی حمل و نقل، هزینه‌های تولید و توزیع خود را کاهش دهند. نگاه هم‌زمان به هر دو موضوع مسیریابی وسایل نقلیه^۱ و جایابی انبارهای توزیع درون‌شهری می‌تواند جواب بهینه‌ای را برای هر دو مسئله ارائه نماید. در مدل ارائه شده در این مقاله، با در نظر گرفتن هم‌زمان مسیریابی وسایل نقلیه و مکان‌یابی

¹ Vehicle Routing Problem (VRP)

* نویسنده مسئول



انبارهای مورد نیاز برای توزیع محصول، جواب مناسبی برای هر دو مسئله به دست خواهد آمد. این در حالی است که نگاه مجزا به هر کدام از موارد نمی‌تواند جواب قابل قبولی را برای هر دو مسئله حاصل نماید.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

وب^۱ (۱۹۶۸) و کریستفیدز و ایلان^۲ (۱۹۶۹) جزء اولین افرادی بودند که متوجه شدند در نظرگیری هزینه‌های تحویل کالا به صورت حمل‌ونقل مستقیم بین دیپو و مشتری، در مدل‌های مکان‌یابی صحیح نمی‌باشد. به گفته‌ی کاسیرتسون^۳ (۱۹۹۸) در فضای رقابتی فعلی که جلب رضایت مشتریان در گرو کاهش هر چه بیشتر زمان‌های تحویل کالاها و تقاضای آن‌هاست، تصمیم‌گیری در مورد مکان دیپوها و تعیین مسیرهای توزیع، از اهمیت زیادی برخوردار بوده و می‌تواند بر عملکرد کل زنجیره اثر بگذارد. همچنین سلهی و رند^۴ (۱۹۸۹) در مقاله‌ی خود به رابطه‌ی متقابل دو مسئله مکان‌یابی و مسیریابی^۵ و اثرات نادیده گرفتن ملاحظات مسیریابی در تصمیم‌گیری انتخاب مراکز توزیع پرداخته‌اند. مین و همکاران^۶ (۱۹۹۸) تفاوت اصلی بین *LRP* و مسئله مکان‌یابی-تخصیص^۷ کلاسیک را چنین مطرح می‌کنند: در *LRP*، پس از مکان‌یابی تسهیلات، مشتریان از طریق تور ملاقات می‌شوند ولی در *LAP*، سفر شعاعی یا خط مستقیم از تسهیلات برای هر مشتری فرض می‌شود. توکلی مقدم و همکاران^۸ (۲۰۰۵) یک مدل ریاضی برای مسئله‌ی حمل‌ونقل و وسائط نقلیه‌ی بازگشتی^۹ را توسعه دادند که به دلیل پیچیدگی مدل، از الگوریتم متتیک برای حل آن استفاده کردند. بانای و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۹) به بهینه‌سازی مسیریابی سبز با هدف جمع‌آوری زباله‌های شهری و تأثیر فناوری‌های صنعتی بر آگاهی و پایداری زیست محیطی پرداختند. حرکت سریع مردم به سمت شهرها منجر به این واقعیت شد که جمعیت شهری جهان اکنون سالانه حدود ۶۰ میلیون نفر در حال افزایش است. افزایش تعداد جمعیت شهرها تأثیر قابل توجهی بر حجم تولید شده زباله‌های خانگی دارد که باید به موقع جمع‌آوری و بازیافت شود. جمع‌آوری زباله‌های خانگی، به‌ویژه در مناطق مرکز شهر، چالش‌های گسترده‌ای دارد. سیستم جمع‌آوری باید قابل اعتماد، انعطاف‌پذیر، مقرون‌به‌صرفه و سبز باشد. آدلک و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۹) به ارائه یک مدل ریاضی جهت مکان‌یابی سبز برای جمع‌آوری پسماندهای جامد طبقه‌بندی‌شده در مراکز شهری پرجمعیت پرداختند. در مطالعه آن‌ها یک مدل مکان‌یابی برای بهبود مجموعه‌ای از مواد زائد جامد ارائه شده است. این مدل به‌ویژه برای مناطق پرجمعیت و دارای چندین واحد مسکونی مناسب است و همچنین طبقه‌بندی اولیه پسماندها را عرضه می‌کند. ویژگی اساسی این مدل این است که با اختصاص دادن هر مشتری (خانه) به نزدیک‌ترین مرکز، مشتریان را به صورت خوشه‌ای دسته‌بندی می‌کند. هدف مدل ارائه‌شده توسط آن‌ها این است که تعداد کل سایت‌های جمع‌آوری زباله فعال را به حداقل برسانیم، به طوری که کلیه درخواست‌های مشتریان بدون نقض محدودیت ظرفیت هر سایت برآورده شود. یک روش ابتکاری لاگرانژی ساده با حل‌کننده *CPLEX* در بستر *AMPL* برای حل مسئله ارائه‌شده است تا یک راه حل عملی پیدا کند. وانگ و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۰) به مدل‌سازی مسئله مسیریابی-مکان‌یابی سبز با بسته‌های زیست محیطی پرداختند. این مسئله شامل حل یک مسئله مسیریابی دو لایه و گذاشتن و برداشت با پنجره‌های زمانی است. رفیعی مجد و همکاران^{۱۳} (۲۰۱۸) یک زنجیره‌ی تأمین سه سطحی، متشکل از یک تأمین‌کننده، تعدادی از مراکز توزیع و تعدادی از خرده‌فروشان را در قالب یک مسئله‌ی یکپارچه‌ی موجودی-مکان‌یابی-مسیریابی بررسی کردند. آن‌ها برای حل از روش آزادسازی لاگرانژی استفاده کردند و یک الگوریتم ابتکاری را برای امکان‌سنجی پاسخ‌هایی که از طریق روش آزادسازی لاگرانژی پیدا می‌شود، استفاده کردند. باسو و همکاران^{۱۴} (۲۰۲۱) به بهینه‌سازی مسئله مسیریابی و وسایل نقلیه الکتریکی با در نظر گرفتن پنجره زمانی پرداختند. در این مطالعه، مسیریابی در دو سطح انجام می‌شود. در سطح اول بهترین مسیرها شناسایی شده و در بخش دوم با در نظر گرفتن پنجره زمانی، بهترین ترتیب بازدید مشخص می‌شود. از طرفی دیگر، مصرف انرژی به‌عنوان یک رکن مهم در این مسئله، به‌عنوان تابع هدف معرفی شده است. برای حل این مسئله از یادگیری ماشین بی‌زین احتمالی بهره برده شده است. نتایج پیاده‌سازی در گانتبرگ سوئد نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی در این تحقیق توانسته است به میزان قابل توجهی ترافیک را در مسیرهای اصلی شهر کاهش دهد. لی و همکاران^{۱۵} (۲۰۱۹) یک مسئله‌ی مکان‌یابی-مسیریابی ظرفیت دار دوهدفه را برای کالاها فاسدشدنی ارائه دادند و از الگوریتم شاخه‌وکران برای به دست آوردن راه حل بهینه استفاده کردند. جی و همکاران^{۱۶} (۲۰۲۰) برای حل مسئله

¹ Webb

² Christofides and Eilon

³ Cuthbertson

⁴ Salhi and Rand

⁵ Location Routing Problem (LRP)

⁶ Min et al.

⁷ Location Allocation Problem (LAP)

⁸ Tavakkoli-Moghaddam et al.

⁹ Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB)

¹⁰ Bányai et al.

¹¹ Adeleke et al.

¹² Wang et al.

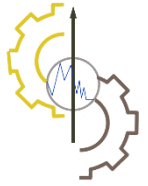
¹³ Rafie-Majd et al.

¹⁴ Basso et al.

¹⁵ Li et al.

¹⁶ Ji et al.





مسیریابی-موجودی محصولات فاسدشدنی با محدودیت‌های پنجره زمانی، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۱ را ارائه دادند تا هزینه‌های کل را به حداقل برسانند و به دلیل عدم اطمینان از تقاضای بازار، رویکرد استوار را برای مسئله خود بکار بردند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل استوار می‌تواند به سطح بالاتری از خدمات لجستیک و توزیع دست یابد. ژائو و همکاران^۲ (۲۰۲۰) بهینه‌سازی مسئله مسیریابی وسایل حمل‌ونقل برای غذای تازه را در شبکه جاده‌ای بررسی کردند. این مقاله با در نظر گرفتن کنترل دما و ایمنی غذا یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه را با مدل پنجره‌ی زمانی ایجاد می‌کند و از الگوریتم کلونی مورچه برای حل مدل استفاده شده است. تی سانگ و همکاران^۳ (۲۰۲۱) یکپارچه‌سازی اینترنت اشیا و برنامه‌ریزی تحویل چند دمایی برای لجستیک مواد غذایی فاسدشدنی را ارائه کردند. مقاله‌ی آن‌ها یک سیستم برنامه‌ریزی تحویل چند دمایی مبتنی بر اینترنت اشیا را پیشنهاد و از یک الگوریتم ژنتیک دو مرحله‌ای برای بهینه‌سازی استفاده می‌کند. شهابی شه‌میری و همکاران^۴ (۲۰۲۱) تحقیقی را تحت عنوان مسئله مسیریابی و زمان‌بندی برای شبکه‌های توزیع محصولات فاسدشدنی با وسایل نقلیه ناهمگن و تحویل جداگانه انجام دادند. این مقاله، یک مدل *MILP* سه منظوره را برای برنامه‌ریزی و مسیریابی وسایل نقلیه ناهمگن در یک سیستم بارانداز چندگانه مورد مطالعه قرار داده است. با توجه به ماهیت چندهدفه مدل پیشنهادی، یک روش ترکیبی دقیق، به‌عنوان یک راه‌حل پیشنهاد شده است. جدول ۱ برخی از مطالعات انجام شده در موضوع تحقیق بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ را به‌صورت خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۱- خلاصه مطالعات انجام شده در حوزه مکان‌یابی-مسیریابی بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱.
Table 1- Summary of the literature review in Location Routing Problem (2017-2021).

ردیف	نویسنده	روش حل دقیق، ابتکاری، فرا ابتکاری	عدم قطعیت	چند محصولی	پنجره زمانی	همگن	ناهگن	برداشتن	تحویل	تک‌هدفه	چند هدفه	نوع مسئله روش حل
۱	رفیعی و همکاران (۲۰۱۸)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	ILRP
۲	لی و همکاران (۲۰۱۹)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	LRP
۳	جی و همکاران (۲۰۲۰)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	IRP
۴	ژائو و همکاران (۲۰۲۰)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	TRP
۵	تی سانگ و همکاران (۲۰۲۱)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	VRP
۶	شهابی شه‌میری و همکاران (۲۰۲۱)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	RSP

با توجه به مقالات بررسی شده می‌توان دریافت که به دلیل اهمیت موضوع در بحث لجستیک نظر پژوهشگران و مدیران صنعت به این موضوع بیش‌ازپیش جلب شده و مدل‌های مربوط به این‌گونه مسائل در حال توسعه و تخصصی سازی برای صنایع مختلف با توجه به محدودیت‌های خاص محصولات آن صنعت می‌باشد. مرور ادبیات صورت گرفته نشان داد که تاکنون تحقیقی در حوزه مسائل مکان‌یابی-مسیریابی به در نظر گرفتن اهداف کمینه‌سازی هزینه کل سیستم و همچنین حداقل کردن عدم توازن بارکاری وسایل نقلیه به‌طور هم‌زمان نپرداخته است. علاوه بر این، در تحقیق حاضر سعی شده ضمن ارائه مدلی مناسب برای اهداف مذکور، روش حل مناسبی برای مسائل نمونه ارائه شود و کارایی آن با استفاده از شاخص‌های ارزیابی مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق به ارائه‌ی یک مدل ریاضی دو هدفه برای حل مسئله مکان‌یابی-مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود پرداخته شده است.

۳- تعریف مسئله و بیان اهداف تحقیق

هدف این مسئله آن است که به‌طور هم‌زمان تعداد و محل بهینه‌ی انبارهای منتخب، تخصیص بهینه‌ی مشتریان به انبارها، تخصیص بهینه‌ی مشتریان به وسایل حمل و توالی بهینه‌ی خدمت‌دهی به مشتریان را در هر مسیر طوری مشخص کند که هزینه‌ی کل توزیع شامل هزینه‌ی استقرار انبارها و هزینه‌ی حمل‌ونقل وسایل نقلیه با توجه به در نظر گرفتن حداکثر زمان حمل و توزیع، حداقل گردد. همچنین مدل ارائه‌شده درصدد کمینه کردن اختلاف مسافت طی شده توسط وسایل حمل‌ونقل می‌باشد. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای استفاده شده در مدل ریاضی به شرح زیر تعریف می‌شوند.

¹ Mixed Integer Linear Programming (MILP)
² Zhao et al.

³ Tsang et al.
⁴ Shahabi-Shahmiri et al.

مجموعه‌ها.

I : مجموعه همه مراکز توزیع (انبارها).

J : مجموعه همه مشتریان.

K : مجموعه همه وسایل حمل و نقل.

پارامترها.

N : تعداد مشتریان.

D_{ij} : فاصله بین مشتری i و j ، به طوری که $i, j \in IUJ$.

C_{ij} : هزینه واحد مسافت بین مشتری i و j ، به طوری که $i, j \in IUJ$.

t_{ij} : زمان حمل و نقل بین مشتری i و j ، به طوری که $i, j \in IUJ$.

F_i : هزینه ثابت استقرار مرکز توزیع i .

FV_k : هزینه ثابت استفاده از وسیله حمل k .

d_j : تقاضای هر مشتری j .

s_{jk} : زمان سرویس وسیله نقلیه در محل مشتری j توسط وسیله k .

w_{jk} : زمان انتظار وسیله نقلیه در محل مشتری j توسط وسیله k .

Q : ظرفیت ثابت وسایل حمل و نقل.

B : کل زمان سفر سپری شده توسط وسایل نقلیه.

DI : میزان عدم توازن مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه.

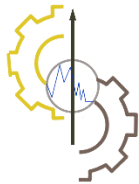
متغیرهای تصمیم.

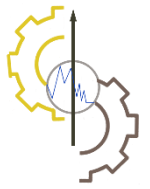
x_{ijk} : برابر یک است اگر گره (مجموع مشتریان و انبارها) i در مسیر k پس از گره j قرار گرفته باشد و در غیر این صورت صفر ($i, j \in IUJ$).

y_i : برابر یک است اگر انبار i استقرار یافته باشد؛ و در غیر این صورت صفر.

z_{ij} : برابر یک است اگر مشتری j به انبار i تخصیص یابد و در غیر این صورت صفر.

U_{lk} : متغیرهای کمکی برای حذف زیرتور در مسیر k .





$$\text{Min TC} = \sum_{i \in I} F_i y_i + \sum_{k \in K} FV_k \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{ij} D_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

$$\text{Min DI} = \text{Max} \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{ij} x_{ijk} \right) - \text{Min} \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{ij} x_{ijk} \right), \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$\text{Subject to:} \quad \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} - \sum_{j \in J} x_{jik} = 0, \quad \forall k \in K, i \in I \cup J \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} d_j \sum_{i \in I} x_{ijk} \leq Q, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$-z_{ij} + \sum_{u \in I \cup J} (x_{iuk} + x_{ujk}) \leq 1, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} t_{ij} x_{ijk} + \sum_{j \in J} (s_{jk} + w_{jk}) \sum_{i \in I} x_{ijk} \leq B, \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$z_{ij} \leq y_i, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (9)$$

$$U_{gk} - U_{jk} + N x_{gjk} \leq N - 1, \quad \forall g, j \in J, k \in K \quad (10)$$

$$x_{ijk}, y_i, z_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in I \cup J, k \in K \quad (11)$$

$$U_{lk} \geq 0, \quad \forall l \in I, k \in K \quad (12)$$

تابع هدف (۱) به دنبال کمینه کردن هزینه حمل و نقل، هزینه ثابت استقرار انبارها و هزینه ثابت استفاده از ماشین‌آلات می‌باشد.

تابع هدف (۲) به دنبال کمینه کردن عدم توازن مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه می‌باشد. به عبارت دیگر این هدف می‌کوشد تا میان مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه بالانس ایجاد کند. در این تابع هدف اختلاف میان ماکزیموم و مینیوم مسافت طی شده، حداقل می‌گردد و حداقل شدن این شکاف موجب توازن مسافت طی شده توسط وسایل حمل و نقل خواهد شد. **رابطه (۳)** هر مشتری را تنها به یک وسیله نقلیه اختصاص می‌دهد. به عبارتی هر مشتری تنها توسط یک مرکز توزیع سرویس داده خواهد شد. **محدودیت (۴)** به معادله‌ی حفظ روند معروف است و برای وسایل نقلیه این الزام را به وجود می‌آورد که وسیله نقلیه به هر گره (مشتری) که وارد شد باید از همان گره نیز خارج شود. **رابطه (۵)** این محدودیت را بیان می‌کند که هر وسیله نقلیه حداکثر یک بار می‌تواند اعزام گردد. **رابطه (۶)** محدودیت ظرفیت را برای مجموعه‌ی وسایل حمل و نقل نشان می‌دهد. **محدودیت (۷)** مشخص می‌کند که تنها زمانی یک مشتری می‌تواند به یک انبار اختصاص یابد که مسیری که مشتری در آن قرار دارد، متعلق به آن انبار باشد. به عبارت دیگر این محدودیت تضمین می‌دهد که اگر یک توزیع‌کننده و تقاضا روی یک مسیر باشند تقاضا متعلق به آن توزیع‌کننده است. **رابطه (۸)** محدودیت حداکثر زمان مجاز جهت توزیع محصولات است و بیان می‌کند که کل زمان سفر توسط وسایل نقلیه از یک مقدار B کمتر است. **محدودیت (۹)** تعیین می‌کند که یک مشتری زمانی می‌تواند به یک انبار تخصیص یابد که آن انبار حتماً استقرار داده شده باشد. **رابطه (۱۰)** محدودیت‌های حذف تورهای فرعی را ایجاد می‌کند. **روابط (۱۱)** و **(۱۲)**، محدودیت‌های مربوط به دامنه‌ی متغیرها می‌باشند.

۴- روش حل پیشنهادی

برای حل مدل پیشنهادی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری رقابت استعماری^۱ و ژنتیک^۲ و استراتژی تکاملی پاره تو^۳ استفاده شده است. در ادامه نحوه‌ی عملکرد الگوریتم رقابت استعماری به تفصیل در ادامه بیان می‌شود.

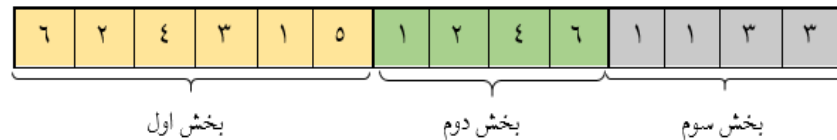
¹ Imperialism Competitive Algorithm (ICA)

² Genetic Algorithm (GA)

³ Pareto Archived Evolution Strategy (PAES)

همان‌گونه که کاملاً مشخص است، کارایی یک الگوریتم و کیفیت جواب‌های خروجی به‌طور کامل وابسته به نحوه نمایش جواب در فضای جواب است. همچنین نمایش جواب باید به‌گونه‌ای باشد که بتوان به‌راحتی و تقریباً وسیع فضای جواب را جستجو کرد. در این تحقیق نمایش جواب به‌صورت یک رشته عددی بیان می‌شود. این نمایش جواب بایستی هم‌زمان مکان انبارها، نحوه تخصیص مشتریان به انبارها و همچنین مسیر بین مشتری‌ها را نیز نمایش دهد.

11 جزء اول توالی مشتریان را در هر مسیر تعیین می‌کند. قسمت دوم نمایش جواب (m) شماره مشتریانی که بایستی با وسیله حمل‌ونقل سرویس‌دهی شوند بوده و در نهایت قسمت سوم مکان انبارها و اینکه هرکدام از وسایل نقلیه از کدام انبار شروع به حرکت نمایند را نشان می‌دهد.



شکل ۱- یک نمونه نمایش جواب.

Figure 1- General View of the chromosome structure.

۴-۲- تولید امپراطوری‌های اولیه

هر حل در الگوریتم رقابت استعماری به شکل یک ارائه می‌باشد. هر ارائه شامل مقادیر بهینه‌شده متغیر می‌باشد. در واژگان الگوریتم ژنتیک، این ارائه، کروموزوم نامیده می‌شود. در الگوریتم مذکور عنوان کشور برای ارائه استفاده شده است. در یک مسئله بهینه‌سازی N بعدی، یک کشور یک ارائه $1 \times N$ می‌باشد و این ارائه به‌صورت $Country = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_N]$ تعریف می‌شود. هر متغیر در یک کشور به‌عنوان یک مشخصه اجتماعی سیاسی آن کشور مشخص می‌گردد. از این دیدگاه، الگوریتم بهترین کشور را که کشوری است با بهترین ترکیب مشخصه‌های اجتماعی سیاسی مثل فرهنگ، زبان و خط مشی اقتصادی، جستجو می‌کند. پس از تولید کشورها، از تکنیک ناچیرگی و فاصله تراکم برای ایجاد و رتبه‌بندی اعضای هر یک از جبهه‌ها تشریح شده است. برای محاسبه مقدار هزینه یا قدرت هر امپراطوری، مقدار هر تابع هدف برای هر امپراطور به‌دست آمده است. سپس مقدار هزینه هر تابع هدف به‌صورت معادله (۱۳) محاسبه شده است.

$$Cost_{i,n} = \frac{|f_{i,n}^p - f_{i,n}^{p,best}|}{f_{i,total}^{p,max} - f_{i,total}^{p,min}} \quad (13)$$

که $Cost_{i,n}$ مقدار نرمال شده تابع هدف i برای امپراطور n می‌باشد. همچنین $f_{i,n}^{p,best}$ ، $f_{i,total}^{p,max}$ و $f_{i,total}^{p,min}$ به ترتیب بهترین، حداکثر و حداقل مقادیر تابع هدف i در هر تکرار می‌باشد. سرانجام مقدار هزینه نرمال شده هر امپراطور به‌صورت معادله (۱۴) به دست می‌آید.

$$Total Cost_n = \sum_{i=1}^r Cost_{i,n} \quad (14)$$

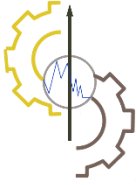
به‌گونه‌ای که r مقدار تابع هدف می‌باشد. قدرت هر امپراطور بعد از هزینه نرمال شده به‌دست آمده به صورت معادله (۱۵) محاسبه می‌گردد و مستعمره‌ها مطابق با قدرت هر امپراطور بین آن‌ها توزیع می‌شوند.

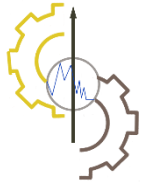
$$p_n = \left\lfloor \frac{Total Cost_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} Total Cost_i} \right\rfloor \quad (15)$$

سپس تعداد اولیه مستعمره‌های یک امپراطور به‌صورت معادله (۱۶) تعیین می‌گردد.

$$NC_n = round\{p_n \cdot N_{col}\} \quad (16)$$

¹ Initial solution





به طوری که NC_n تعداد اولیه مستعمره‌های امپراتور n ام و N_{col} تعداد کل مستعمره‌ها می‌باشد. NC_n از مستعمره‌ها به صورت تصادفی انتخاب و به هر امپراتور داده می‌شوند. امپراتور با قدرت بیشتر نسبت به امپراتور ضعیف‌تر مستعمره‌های بیشتری خواهد داشت.

۴-۳- قدرت کل یک امپراتوری

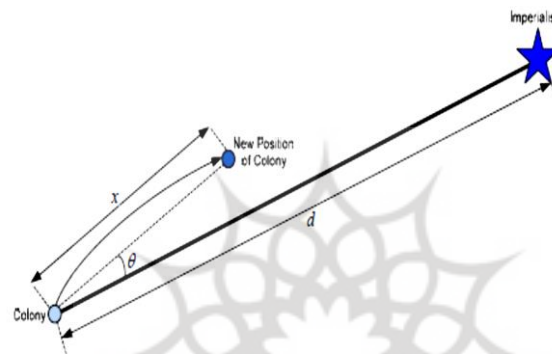
قدرت کل یک امپراتور تحت تأثیر قدرت کشور امپراتور می‌باشد. اگرچه قدرت مستعمره‌های یک امپراتوری نیز بر قدرت کل آن امپراتوری تأثیر دارد؛ بنابراین قدرت کل یک امپراتوری به صورت معادله (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$TP Emp_n = (Total Cost(imperialist_n) + \xi mean\{Total Cost(colonies of empire_n)\}). \quad (17)$$

$TP Emp_n$ قدرت کل امپراتوری n ام می‌باشد و ξ یک عدد مثبت کمتر از یک می‌باشد.

۴-۴- حرکت مستعمره‌های یک امپراتوری به طرف امپراتور

پس از تقسیم مستعمره‌ها به امپراتورها، مستعمره‌ها به طرف امپراتورشان حرکت می‌کنند. این حرکت در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- حرکت مستعمره‌ها به سمت امپراتوری‌ها.

Figure 2- Movement of colony to its new location in ICA.

فاصله بین مستعمره و امپراتور می‌باشد. X یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و $\beta \times d$ می‌باشد و β یک عدد بزرگ‌تر از یک است. مسیر حرکت با زاویه θ نشان داده شده است. نرخ جواب‌هایی که به امپراتور نزدیک می‌شوند را با P_A نشان می‌دهیم.

۴-۵- انتقال اطلاعات بین مستعمره‌ها

جهت انتقال اطلاعات بین مستعمره‌ها از اپراتور تقاطع در الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. برای عملگر تقاطع از انواع تقاطع تک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای استفاده شده است. برای انتخاب مستعمره‌ها از روش انتخاب تورنمنت استفاده شده است. همچنین درصدی از جواب‌ها که تحت عمل تقاطع قرار می‌گیرند را با P_c نشان می‌دهیم.

۴-۶- انقلاب

در هر دوره ده ساله، انقلاب روی برخی مستعمره‌ها رخ می‌دهد. این روش مشابه روش جهش در الگوریتم ژنتیک بوده و برای فرار از جستجوهای محلی صورت می‌گیرد.

۴-۷- مستعمره‌های به روز شده

در هر دوره ده ساله، جمعیت اولیه مستعمره‌ها، جمعیت شبیه‌سازی شده، جمعیت حاصل از انتقال اطلاعات بین مستعمره‌ها، جمعیت حاصل از انقلاب و جمعیت حاصل از بهبود امپراتور، برای هر امپراتوری با یکدیگر ادغام شده که جمعیت ادغام شده نامیده می‌شود. به‌روزرسانی آرشو مطابق با جمعیت ادغام شده انجام می‌گردد و سپس بهترین مستعمره‌ها بر اساس مرتب‌سازی ناچیره برای هر امپراتور انتخاب می‌شود.

در یک رقابت امپریالیستی قدرت امپراطور ضعیف‌تر کاهش و قدرت امپراطور قوی‌تر در رقابت امپریالیستی افزایش خواهد یافت. در تمام رقابت امپراطوری‌ها با یکدیگر، ضعیف‌ترین مستعمره‌ی ضعیف‌ترین امپراطوری تصاحب خواهد شد. از سوی دیگر، اولین انتخاب ضعیف‌ترین مستعمره‌های ضعیف‌ترین امپراطوری توسط قوی‌ترین امپراطور یعنی امپراطور برنده از بین تمام امپراطوری‌ها، در رقابت امپریالیستی تصاحب می‌شود. در این رقابت، قوی‌ترین امپراطوری قطعاً این مستعمره‌ها را تصاحب نخواهد کرد، اگرچه این امپراطوری‌ها احتمال بیشتری جهت تصاحب کردن آن‌ها دارند. برای محاسبه احتمال تصاحب هر امپراطوری کل هزینه نرمال شده به صورت معادله (۱۸) بیان می‌شود.

$$NTP Emp_n = \max\{TP Emp_i\} - TP Emp_n. \quad (18)$$

$NTP Emp_n$ قدرت کل نرمال شده امپراطوری n ام و $TP Emp_n$ قدرت کل امپراطوری n ام می‌باشد. با داشتن قدرت کل نرمال شده، احتمال تصاحب هر امپراطوری به صورت معادله (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$P_{p_n} = \left| \frac{NTP Emp_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} TNTP Emp_i} \right|. \quad (19)$$

۹-۴- تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فرا ابتکاری

از آنجایی که کارایی یک الگوریتم به شدت به پارامترهای آن وابسته است به طوری که پارامترهای مختلف ممکن است جواب‌های کاملاً متفاوتی با کیفیت‌های متفاوت تولید کنند، اگر پارامترها به طور صحیح تنظیم نشوند، نمی‌توان به جواب‌های مناسبی دست یافت. جهت تنظیم کردن پارامترهای الگوریتم پیشنهادی در این مطالعه از روش تاگوچی^۱ استفاده شده است.

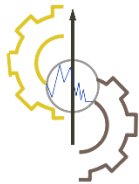
بر اساس ساختار روش تاگوچی ابتدا برای هر یک از پارامترهای الگوریتم *NSGA-II*، سه سطح پیشنهاد می‌شود. مقادیر پیشنهادی به شرح جدول ۲ می‌باشد. سپس به ازاء طرح $L9$ تاگوچی به ازاء حالات زیر الگوریتم *NSGA-II* اجرا شده است. پس از وارد کردن این اطلاعات در نرم‌افزار *MINITAB* و اجرای روش تاگوچی، نمودار S/N به صورت شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس نمودارهای شکل ۳، برای هر پارامتر مقداری مناسب است که کمترین مقدار S/N را داشته باشد. لذا در خصوص الگوریتم *NSGA-II* مقادیر ستون سمت راست در جدول ۲ مقادیر بهینه می‌باشند و مثال‌های عددی با این مقادیر اجرا خواهند شد.

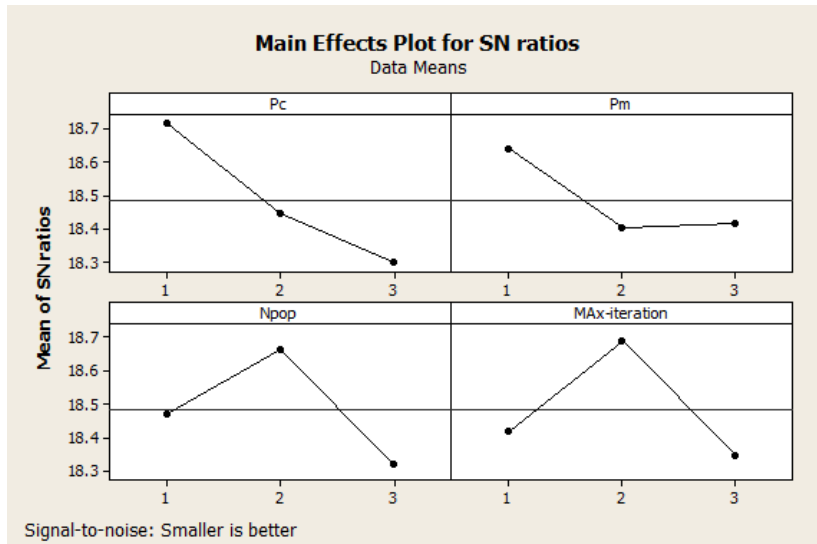
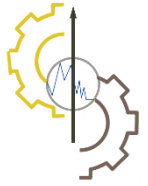
جدول ۲- پارامترها و سطوح مقادیر و مقادیر بهینه‌ی آن‌ها برای الگوریتم *NSGA-II*.

Table 2- Considered levels of parameters of NSGAII.

پارامتر	مقادیر هر سطح			مقدار بهینه انتخاب شده
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	
درصد تقاطع (Pc)	0.7	0.8	0.9	0.8
درصد جهش (Pm)	0.05	0.1	0.15	0.05
اندازه جمعیت (N-pop)	50	100	150	150
تعداد تکرار (Max-iteration)	100	200	300	300

¹ Taguchi





شکل ۳- خروجی روش تاگوچی در الگوریتم NSGA-II.
Table 3- Mean S/N ratios for the proposed NSGAIL.

۴-۱۰- شاخص‌های مقایسه

از آنجایی که برای مقایسه الگوریتم‌ها از شاخص‌های مختلفی استفاده خواهد شد، در این قسمت به شرح مختصری از آن‌ها می‌پردازیم. شاخص یکنواختی فضای^۱ (SM): این شاخص یکنواختی توزیع جواب‌های پاره‌تو در فضای حل را نشان می‌دهد. نحوه محاسبه‌ی این شاخص مطابق رابطه (۲۰) می‌باشد.

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |d_i - d_{i+1}|}{(n-1)d} \quad (20)$$

که در آن d_i برابر با فاصله اقلیدسی بین دو جواب پاره‌توی کناری در فضای حل می‌باشد. همچنین \bar{d} نیز برابر میانگین فواصل d_i ها می‌باشد. هر چه شاخص SM بیشتر باشد، الگوریتم بهتر است.

شاخص کیفیت^۲ (QM): شاخص کیفیت بدین گونه است که کلیه جواب‌های پاره تو به‌دست‌آمده توسط هر یک از الگوریتم‌ها را با هم در نظر گرفته، سپس عملیات ناچیرگی را برای کلیه جواب‌ها انجام می‌دهیم. در نهایت، کیفیت هر الگوریتم برابر با سهم جواب‌های پارتوی جدید مختص به آن الگوریتم است. کیفیت بالاتر به منزله بهتر بودن الگوریتم می‌باشد.

فاصله از نقطه ایده آل^۳ (MID): مقدار این شاخص برابر با فاصله نقاط پاره‌تو الگوریتم مورد بررسی از نقطه ایده آل است. در این مطالعه با توجه به توابع هدف که هر دو کمینه‌سازی است، نقطه ایده آل را برابر با (۰ و ۰) در نظر می‌گیریم. شاخص MID را می‌توان توسط رابطه (۲۱) محاسبه کرد.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{f_{1i} - f_1^{best}}{f_{1,total}^{max} - f_{1,total}^{min}}\right)^2 + \left(\frac{f_{2i} - f_2^{best}}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}}\right)^2}}{n} \quad (21)$$

¹ Spacing Metric (SM)

² Quality Metric (QM)

³ Mean Ideal Distance (MID)

که در آن n برابر تعداد نقاط پاره تو و همچنین $f_{i,total}^{min}$ و $f_{i,total}^{max}$ به ترتیب برابر با بیشینه و کمینه مقدار توابع هدف در میان تمامی توابع هدف الگوریتم های مورد مقایسه است. در فرمول بالا مختصات نقطه ی ایده آل برابر با (f_1^{best}, f_2^{best}) است که در مطالعه حاضر (۰،۰) است. پایین بودن MID به منزله ی بهتر بودن الگوریتم می باشد.

۵- نتایج محاسباتی

در این بخش تعدادی مسائل نمونه با سایزهای کوچک، متوسط و بزرگ ایجاد شده و توسط الگوریتم های پیشنهادی اجرا می شود تا کارایی آن ها بررسی گردد. برای هر یک از دسته مسائل فوق، تعداد مشخصی مکان بالقوه جهت احداث مرکز توزیع به ازاء تعداد مشخصی مشتری از پیش تعیین شده، در نظر گرفته شده است. به دلیل $NP-Hard$ بودن مسئله، روش حل دقیق محدودیت اپسیلون^۱ قابلیت حل مدل در ابعاد بزرگ را ندارد؛ بنابراین پس از اثبات کارایی الگوریتم $NSGA-II$ مورد استفاده در این تحقیق در اندازه های کوچک و متوسط، از این الگوریتم برای به دست آوردن جواب های پاره توی مسئله در ابعاد بزرگ استفاده می شود. همچنین می توان نتایج حاصل از آن را با نتایج حاصل از الگوریتم های رقابت استعماری و استراتژی تکاملی پاره تو^۲ مقایسه کرد. به منظور ارزیابی خطای نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم $NSGA-II$ ، به ازاء هر تابع هدف، بهترین نتیجه به دست آمده از الگوریتم با بهترین جواب به دست آمده از روش حل دقیق مقایسه شده است. در جدول ۳ نتایج مربوط به حل مسائل کوچک و متوسط نشان داده شده است. در این جدول ستون اول شماره ردیف، ستون دوم مربوط به شماره مسئله است که هر شماره شامل سه بخش است و به ترتیب از چپ به راست نشان دهنده ی تعداد مشتریان، تعداد انبارهای بالقوه و تعداد وسایل حمل و نقل است؛ به عنوان مثال ۱۰/۳/۲ به این معنی است که مسئله شامل ۱۰ مشتری، ۳ مرکز توزیع بالقوه و ۲ وسیله حمل و نقل می باشد. در ستون سوم بهترین جواب به دست آمده برای تابع هدف اول بدون در نظر گرفتن تابع هدف دوم و در ستون چهارم زمان حل این مسئله آمده است. ستون های پنجم و ششم نیز همانند ستون های سوم و چهارم می باشند با این تفاوت که این بار بهترین جواب به دست آمده برای تابع هدف دوم، بدون در نظر گرفتن تابع هدف اول آمده است. به همین ترتیب در ستون های هفتم الی دهم مقادیر مرتبط با روش $NSGA-II$ با ۳۰۰ تکرار نشان داده شده است. در دو ستون انتهایی نیز خطای حاصل از روش $NSGA-II$ در هر یک از توابع هدف گزارش شده است. لازم به ذکر است مقادیر اعلام شده برای توابع هدف و زمان حل میانگین ۱۰ بار اجرای الگوریتم می باشد.

جدول ۳- نتایج محاسباتی برای حل مسئله در ابعاد کوچک و متوسط.

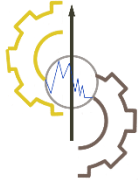
Table 3- Computational results for small and medium scale problems.

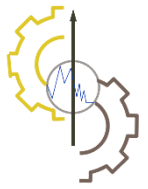
شماره مسئله	روش محدودیت اپسیلون			الگوریتم $NSGA-II$			درصد خطای $NSGA-II$		
	هدف ۱	زمان حل	هدف ۲	هدف ۱	زمان حل	هدف ۲	هدف ۱	زمان حل	هدف ۲
4/2/2	1	6008	40	1	12	6008	0.00	1	0.00
6/2/3	2	6639	56	4	633	6639	0.00	5	0.00
8/2/3	3	6985	72	5	796	6989	0.06	7	1.16
8/3/3	4	9544	94	6	1083	9563	0.19	10	0.00
9/3/4	5	9863	356	14	1318	9980	1.17	19	2.40
10/3/3	6	9759	271	14	1229	9822	0.64	18	1.23
10/3/5	7	10146	1018	27	2477	10358	2.04	34	2.08
12/3/5	8	14215	3293	39	5145	14362	1.02	46	0.90
12/4/4	9	16489	3124	38	5823	16576	0.52	48	0.00
14/4/5	10	17964	5894	63	9857	18356	2.13	71	2.60

بررسی زمان حل مسئله برای الگوریتم $NSGA-II$ و روش محدودیت اپسیلون نشان می دهد با افزایش سایز مسئله، زمان حل با استفاده از روش محدودیت اپسیلون به صورت نمایی افزایش می یابد؛ در حالی که افزایش این زمان برای الگوریتم $NSGA-II$ تقریباً خطی است. به دلیل وابستگی زیاد تعداد محدودیت های مدل به تعداد وسایل نقلیه، افزایش تعداد وسایل نقلیه، افزایش هزینه بیشتری را نسبت به سایر

¹ ϵ -constraint

² Pareto Archived Evolution Strategy (PAES)





پارامترهای مسئله به مدل تحمیل می‌کند. زمان محاسبه مقدار تابع هدف دوم به دلیل وابستگی به تعداد مراکز توزیع، با افزایش تعداد این مراکز، افزایش می‌یابد. درصد خطای توابع هدف در تمامی مسائل ایجاد شده در ابعاد کوچک و متوسط کمتر از ۳٪ می‌باشد که کارایی الگوریتم *NSGA-II* پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۵-۱- نتایج حل عددی

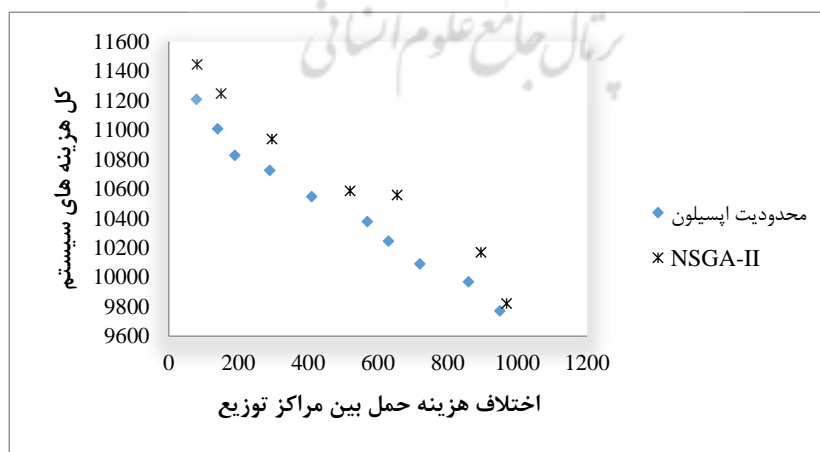
جهت مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی *NSGA-II*، تمامی ۱۰ مسئله‌ی ایجاد شده در ابعاد کوچک و متوسط را توسط الگوریتم *NSGA-II* و روش محدودیت اسیلون حل کرده و نتایج حاصل از آن‌ها را توسط دو شاخص *MID* و *SM*، با یکدیگر مقایسه شده‌است. مقایسه نتایج حل عددی مطابق جدول ۴ می‌باشد. همچنین جدول ۵ نتایج عددی بررسی شاخص‌ها برای حل ابعاد بزرگ مسئله توسط الگوریتم *NSGA-II* را نشان می‌دهد.

جدول ۴- نتایج مقایسه‌ای شاخص‌های *MID* و *SM* برای حل سایز کوچک و متوسط مسائل نمونه.

Table 4- Comparative results of *MID* and *SM* indices for solving small and medium size problems.

ردیف	شماره مسئله	شاخص <i>MID</i>		شاخص <i>SM</i>	
		<i>NSGA-II</i>	محدودیت اسیلون	<i>NSGA-II</i>	محدودیت اسیلون
1	4/2/2	7.42	7.31	0.82	0.11
2	6/2/3	7.01	6.95	1.12	0.15
3	8/2/3	8.11	7.81	0.89	0.09
4	8/3/3	7.79	7.72	1.65	0.21
5	9/3/4	7.48	7.05	1.38	0.39
6	10/3/3	7.52	7.35	0.79	0.12
7	10/3/5	7.57	7.42	1.21	0.31
8	12/3/5	7.71	7.28	1.53	0.25
9	12/4/4	7.43	7.15	1.15	0.14
10	14/4/5	7.89	7.51	0.84	0.08
	میانگین	7.58	7.36	1.14	0.19

در جدول ۴ همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، شاخص *MID* برای روش محدودیت اسیلون به‌طور متوسط برابر ۷/۳۶ و برای الگوریتم *NSGA-II*، ۷/۵۸ است که این مقادیر نشان‌دهنده‌ی متوسط فاصله‌ی جواب‌های پاره‌تو از آرمان است. به‌عبارت‌دیگر جواب‌های پاره‌توی تشکیل شده توسط الگوریتم ارائه‌شده نسبت به روش محدودیت اسیلون به‌طور متوسط ۲/۹٪ دورتر از جواب آرمان یعنی مبدأ مختصات می‌باشد. همچنین بررسی شاخص *SM* نشان می‌دهد پراکندگی جواب‌ها برای الگوریتم *NSGA-II* برابر ۱/۱۴ و برای روش محدودیت اسیلون ۰/۱۹ می‌باشد. جهت مشاهده‌ی شماتیکی مقایسه الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش محدودیت اسیلون، در شکل ۴ نمودار جواب‌های پاره‌تو هر دو روش به‌صورت هم‌زمان نمایش داده شده‌است.



شکل ۴- مقایسه جواب‌های پاره‌تو الگوریتم *NSGA-II* و محدودیت اسیلون.

Figure 4- Pareto fronts of *NSGA-II* and ϵ -constraint.

با توجه به نتایج و مقایسه صورت گرفته در این بخش می‌توان گفت شاخص‌های مورد بررسی، کارایی الگوریتم *NSGA-II* را نشان می‌دهند. حال با اطمینان از کارایی الگوریتم در ابعاد کوچک، می‌توان جواب‌های پاره‌توی مسئله تحقیق در ابعاد بزرگ را می‌توان به دست آورد.

شاخص‌های مورد استفاده به دلیل اینکه تقریباً مستقل از تغییرات در سایز مسئله می‌باشند، می‌توانند مقایسه‌ی نسبتاً خوبی برای سایزهای مختلف مسئله باشد و ما را از حفظ کارایی الگوریتم در ابعاد بزرگ مسئله اطمینان دهد. به همین منظور ۱۰ مسئله در اندازه‌های بزرگ تولید و با استفاده از الگوریتم NSGA-II حل شده‌است. جواب‌های پاره‌توی حاصل با استفاده از شاخص‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- نتایج عددی برای حل ابعاد بزرگ مسئله توسط الگوریتم NSGA-II.

Table 5- Computational results for large scale problems solving by NSGAIL.

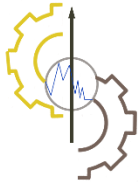
ردیف	شماره مسئله	شاخص MID	شاخص SM	زمان حل (ثانیه)
1	18/5/5	7.23	1.22	104
2	20/5/6	7.44	0.83	351
3	25/5/7	7.67	1.74	1289
4	30/6/7	7.98	0.89	1927
5	40/7/9	8.21	1.27	3745
6	50/8/10	7.24	1.94	4256
7	60/9/11	8.02	1.14	6282
8	70/10/12	7.25	0.71	8065
9	80/11/14	7.17	1.62	10721
10	100/12/15	7.95	0.75	15548
	میانگین	7.61	1.21	

نتایج عددی فوق نشان از حفظ تقریبی کارایی الگوریتم در ابعاد بزرگ مسئله را نشان می‌دهد. در ادامه تعداد ۲۷ مسئله‌ی نمونه در ابعاد مختلف حل شده که نتایج مقایسه‌ای حاصل از آن‌ها در جدول ۶ نشان داده شده‌است. در این جدول از سه شاخص *QM*، *SM* و *MID* برای مقایسه‌ی نتایج سه الگوریتم استفاده شده است. نتایج به دست آمده مبین آن است که الگوریتم رقابت استعماری پیشنهادی، می‌تواند یک انتخاب مناسب جهت حل مسائل مکان‌یابی- مسیریابی باشد.

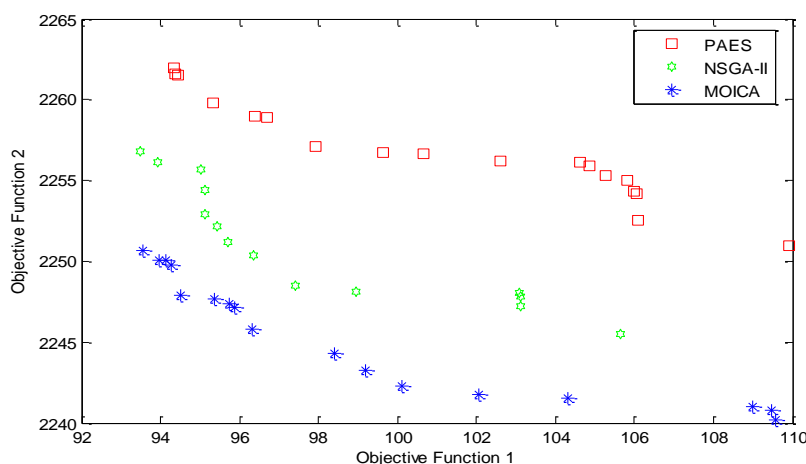
جدول ۶- مقایسه‌ی نتایج حل عددی بین الگوریتم‌های فرا ابتکاری با استفاده از شاخص‌های *QM*، *SM* و *MID*.

Table 6- Comparative results between metaheuristic algorithms by using QM, SM and MID indices.

Problem No.	Quality Metric (QM)			Spacing Metric (SM)			Mean Ideal Distance (MID)		
	NSGA-II	PAES	MOICA	NSGA-II	PAES	MOICA	NSGA-II	PAES	MOICA
10*3	0.235	0	0.765	0.827	0.625	0.741	0.633	0.632	0.518
10*4	0.105	0	0.895	0.661	0.495	0.778	0.704	0.597	0.582
15*3	0.250	0	0.750	0.791	0.788	0.920	0.873	0.608	0.242
15*4	0	0	1	0.693	0.785	0.868	0.712	0.872	0.348
15*5	0	0	1	0.571	1.092	0.634	0.339	0.708	0.230
20*3	0	0	1	1.184	0.999	0.881	0.776	0.694	0.523
20*4	0.235	0	0.765	0.778	1.257	0.973	0.440	0.674	0.399
20*5	0.434	0	0.565	0.560	1.036	0.874	0.518	0.845	0.538
20*6	0.347	0.217	0.434	0.733	1.031	0.924	0.575	0.751	0.621
25*3	0.100	0	0.900	1.207	1.120	1.361	0.601	0.437	0.247
25*4	0.272	0	0.727	1.001	0.878	1.287	0.663	0.762	0.718
25*5	0.292	0	0.708	0.977	1.360	1.220	0.536	0.577	0.511
25*6	0.190	0	0.809	0.940	0.977	1.481	0.482	0.576	0.287
30*3	0.167	0.083	0.750	0.651	1.084	1.116	0.697	0.731	0.632
30*4	0.059	0.294	0.647	1.059	1.322	0.810	0.762	0.547	0.485
30*5	0	0	1	0.942	0.965	0.978	0.781	0.846	0.500
30*6	0	0	1	0.670	0.916	0.980	0.297	0.481	0.379
30*7	0.118	0	0.882	0.986	1.478	1.041	0.479	0.646	0.276
30*8	0	0	1	0.586	0.911	0.642	0.579	0.860	0.554
40*3	0.071	0	0.928	1.302	1.417	1.390	0.707	0.776	0.430
40*4	0.363	0.272	0.364	1.019	1.167	1.267	0.609	0.750	0.452
40*5	0.357	0	0.642	1.628	1.295	1.649	0.554	0.813	0.377
40*6	0.318	0.182	0.500	1.059	1.272	1.321	0.664	0.677	0.408
40*7	0.370	0	0.630	0.984	1.374	1.372	0.731	0.765	0.563
40*8	0.041	0	0.958	1.037	1.296	0.935	0.430	0.767	0.322
40*9	0.240	0	0.760	1.267	1.049	1.410	0.506	0.601	0.431
40*10	0.111	0.111	0.778	0.979	1.422	0.928	0.692	0.823	0.360



در شکل ۵ به صورت شماتیکی نقاط پاره تو مربوط به هر سه الگوریتم را به صورت هم زمان، نشان داده شده است که از روی آن می توان برتری الگوریتم *MOICA* را نسبت به دو الگوریتم *NSGA-II* و *PAES* مشاهده کرد.



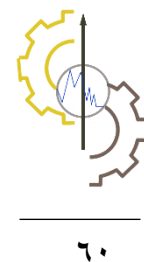
شکل ۵- جواب های پارتو مربوط به هر الگوریتم در سایز ۳۰ با تعداد مرکز توزیع ۶.
Figure 5- Pareto fronts obtained by three algorithms for a problem of 6*30 size.

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات آتی

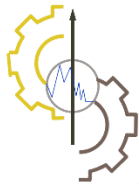
حمل و نقل در سیستم های اقتصادی اعم از خدماتی، تولیدی و توزیع از جایگاه ویژه و پراهمیتی برخوردار می باشد و بخش عمده ای از تولید ناخالص ملی کشورها را به خود اختصاص می دهد. بهبود در سیستم های حمل و نقل به معنای بهبود در مسیرهای طی شده و حذف پیمودن مسافت های غیر ضروری و بهینه سازی مسیرهای طی شده در هر سیستم می باشد. به طور متوسط حدود ۲۰٪ قیمت تمام شده یک محصول صرف هزینه های توزیع آن می شود. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه یکی از مفاهیم کاربردی در حوزه حمل و نقل است که هدف آن طراحی مجموعه ی بهینه ای از مسیرها برای سرویس دهی به مشتریان است. این مسئله در حالت عادی شامل یک انبار، ناوگانی از وسایل نقلیه که در انبار استقرار یافته اند و مجموعه ای از مشتریان می باشد که می بایست سرویس دهی شوند. هدف مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در ساده ترین و معمول ترین حالت حداقل سازی هزینه های کلی طی مسیر بر اساس حداکثر زمان کاری و حداکثر محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه می باشد.

در این تحقیق به ارائه یک مدل ریاضی دو هدفه برای حل مسئله مکان یابی - مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود پرداخته شد. مدل ریاضی ارائه شده به طور هم زمان درصدد حداقل کردن هزینه ها و کمینه کردن عدم توازن میزان مسافت طی شده توسط وسایل حمل و نقل می باشد. برای حل مدل ریاضی، نمونه مسائل گوناگونی در ابعاد مختلف ارائه و از الگوریتم های *MOICA*، *NSGA-II* و *PAES* برای حل آن استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که الگوریتم *MOICA* پیشنهادی، نسبت به الگوریتم های *NSGA-II* و *PAES* توانسته است مرز پارتو کامل تری را ارائه کند و جواب های با کیفیت بالاتری از نظر هر دو هدف ایجاد کند. به منظور توسعه این تحقیق، پیشنهاد می شود که عدم قطعیت در پارامترهای مختلف مدل مورد بررسی قرار گرفته و اهدافی نظیر کاهش آلودگی های زیست محیطی و افزایش مسئولیت اجتماعی به مدل ریاضی اضافه شود. این تحقیق را می توان از جهات مختلفی توسعه داد:

۱. به کارگیری برخی از مفروضات مانند وجود ناوگان حمل غیر همگن، لحاظ کردن مسیرهای یک طرفه، در نظر گرفتن طرح و عامل ترافیک در مسیرها، در نظر گرفتن سهمیه ی مصرف سوخت، لحاظ کردن سطح مهارت و دستمزدهای وابسته برای رانندگان و احتمال رخداد تصادف برای هر راننده می تواند مسئله ی مورد تحقیق را به مسائل دنیای واقعی نزدیک تر کند.
۲. لحاظ نمودن مدل های عدم قطعیت مانند پارامترهای فازی یا احتمالی و ارائه روش های ابتکاری برای حل آن مسائل پیشنهاد می گردد.
۳. لحاظ کردن اهدافی چون بالانس تعداد مشتریان جهت خدمت دهی توسط مراکز توزیع، بالانس زمان کارکرد وسایل نقلیه مختلف و یا مراکز توزیع، حداکثر برآورد سازی تقاضای مشتریان توصیه می شود.



- Adeleke, O. O., Idoko, S., Kolo, S. S., Anwar, A. R., Sijuwola, O. O., & Akinola, O. (2019). Web-based advanced traveller information system for minna metropolis, Nigeria. *Arid Zone journal of engineering, technology and environment*, 15(4), 1026-1037.
- Bányai, T., Tamás, P., Illés, B., Stankevičiūtė, Ž., & Bányai, Á. (2019). Optimization of municipal waste collection routing: Impact of industry 4.0 technologies on environmental awareness and sustainability. *International journal of environmental research and public health*, 16(4), 634. <https://doi.org/10.3390/ijerph16040634>
- Basso, R., Kulcsár, B., & Sanchez-Diaz, I. (2021). Electric vehicle routing problem with machine learning for energy prediction. *Transportation research part B: methodological*, 145, 24-55.
- Christofides, N., & Eilon, S. (1969). An algorithm for the vehicle-dispatching problem. *Journal of the operational research society*, 20(3), 309-318.
- Cuthbertson, R. W. (1998). The Logic of logistics: theory, algorithms and applications for logistics management. *Journal of the operational research society*, 49(9), 1016-1017. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600034>
- Ji, Y., Du, J., Han, X., Wu, X., Huang, R., Wang, S., & Liu, Z. (2020). A mixed integer robust programming model for two-echelon inventory routing problem of perishable products. *Physica a: statistical mechanics and its applications*, 548, 124481. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124481>
- Li, P., Lan, H., & Saldanha-Da-Gama, F. (2019). A bi-objective capacitated location-routing problem for multiple perishable commodities. *IEEE access*, 7, 136729-136742.
- Min, H., Jayaraman, V., & Srivastava, R. (1998). Combined location-routing problems: a synthesis and future research directions. *European journal of operational research*, 108(1), 1-15.
- Rafie-Majd, Z., Pasandideh, S. H. R., & Naderi, B. (2018). Modelling and solving the integrated inventory-location-routing problem in a multi-period and multi-perishable product supply chain with uncertainty: Lagrangian relaxation algorithm. *Computers & chemical engineering*, 109, 9-22.
- Salhi, S., & Rand, G. K. (1989). The effect of ignoring routes when locating depots. *European journal of operational research*, 39(2), 150-156.
- Shahabi-Shahmiri, R., Asian, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mousavi, S. M., & Rajabzadeh, M. (2021). A routing and scheduling problem for cross-docking networks with perishable products, heterogeneous vehicles and split delivery. *Computers & industrial engineering*, 157, 107299. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107299>
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Rabbani, M., Saremi, A., & Safaei, N. (2005). Solving the backhaul vehicle routing problem by genetic algorithms. *35th international conference on computers and industrial engineering* (pp. 1905-1910). Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey. https://www.researchgate.net/profile/Reza-Tavakkoli-Moghaddam/publication/255636808_SOLVING_THE_BACKHAUL_VEHICLE_ROUTING_PROBLEM_BY_GENETIC_ALGORITHMS/links/54a53b9f0cf267bdb90817fc/SOLVING-THE-BACKHAUL-VEHICLE-ROUTING-PROBLEM-BY-GENETIC-ALGORITHMS.pdf
- Tsang, Y. P., Wu, C. H., Lam, H. Y., Choy, K. L., & Ho, G. T. (2021). Integrating internet of things and multi-temperature delivery planning for perishable food E-commerce logistics: a model and application. *International journal of production research*, 59(5), 1534-1556.
- Wang, Y., Yuan, Y., Guan, X., Xu, M., Wang, L., Wang, H., & Liu, Y. (2020). Collaborative two-echelon multicenter vehicle routing optimization based on state-space-time network representation. *Journal of cleaner production*, 258, 120590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120590>
- Webb, M. H. J. (1968). Cost functions in the location of depots for multiple-delivery journeys. *Journal of the operational research society*, 19(3), 311-320.
- Zhao, Z., Li, X., & Zhou, X. (2020). Optimization of transportation routing problem for fresh food in time-varying road network: Considering both food safety reliability and temperature control. *PloS one*, 15(7), e0235950.



¹ Particle Swarm Optimization (PSO)

² Invasive Weed Optimization (IWO)