International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2016)
September 2016, Volume 27, Number 3
pp. 335-358

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

Proposing a New Model for Vehicle Routing Problem with the Aim of Reducing Fuel Consumption and Emissions Rate, With Several Warehouses and Time Window Constraint

Ebrahim Teimoury* & Saeid Omid Hashemi Amiri

Ebrahim Teimoury, *Assistance Professor, Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran*
Seied Omid Hashemi Amiri, *Master of Science in Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran*

Keywords

Vehicle Routing Problem,
Supply chain,
Time windows constraint,
Simulated annealing algorithm,
Tabu search algorithm,
Variable neighborhood search algorithm

ABSTRACT

Vehicle routing problem is one of the most applicable and challenging problem of combinational optimization. Paying much attention to routing problem is due to full utilization of these problems in real world and also in difficulty to solve them. The aim of this article is designing a new model for vehicle routing problem in three- level supply chain, That determines what amount of commodity, in what time, and from which distribution center, to which customer will be sent, so that accompanied by minimizing supply chain costs including costs of inventory holding and transportation, which is often seen in the literature, other important goals under the titles of minimizing fuel consumption rate, and penalties for time windows is considered and eventually maximize customer satisfaction. First for evaluating small dimensions of problem, several numerical examples by GAMS software and proposed meta-heuristic algorithms designed and solved, and compared together to assess the quality results. Subsequently for credit evaluation for large dimensions' problem, a real example has been presented and been solved with proposed Meta-heuristic algorithms. Meta-heuristic algorithms have been coded in MATLAB R2013, and all the tests have been carried out by computer with identification of processor core i5 2.53GHZ and 4GB interior memory.

© 2016 IUST Publication, IJIEPM Vol. 27, No. 3, All Rights Reserved

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۳، جلـــد ۲۷، پاییز ۱۳۹۵
صفحـــه ۳۵۸-۳۳۶

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

ارائه یک مدل جدید برای مساله مسیریابی وسایل نقلیه با هدف کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها، با انبارهای متعدد و محدودیت پنجره زمانی

ابراهیم تیموری* و سید امید هاشمی امیری

کلمات کلیدی

مسیریابی وسایل نقلیه، زنجیره تامین، محدودیت پنجره‌های زمانی، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، الگوریتم جستجوی ممنوع، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

چکیده:

مساله مسیریابی یکی از پرکاربردترین مسائل بهینه‌سازی‌ترکیبی می‌باشد و توجه زیاد به آن نیز بعلت پرکاربرد بودن این مسائل در دنیای واقعی و همچنین دشوار بودن حل این مسائل است. هدف از این مقاله، طراحی مدلی کاربردی برای مساله مسیریابی در یک زنجیره تامین سه‌سطحی می‌باشد، که تعیین می‌کند چه مقدار کالا، در چه زمانی و از کدام مرکز توزیع به کدام مشتری ارسال شود تا در کنار کمینه کردن هزینه‌های زنجیره تأمین از جمله هزینه‌های نگهداری و کمبود موجودی و حمل و نقل کالاها، که غالباً در ادبیات موضوع دیده می‌شود، اهداف مهم دیگری تحت عنوان هزینه‌های جریمه تخلف از محدودیت پنجره زمانی یا هزینه‌های انتظار وسایل‌نقلیه تا شروع خدمت و همچنین تعیین نوع و تعداد وسایل نقلیه‌ی با مصرف سوخت مناسب نیز بصورت توامان در نظر گرفته شوند. مدل ریاضی طراحی شده در نظر دارد که تا حد امکان تاثیر تمامی پارامترها و عوامل موثر در این مساله را بصورت توامان در نظر بگیرد. در واقع سعی شده است تا با همسان‌سازی اهداف مساله و ارائه یک مدل تک هدفه، تحلیل و درک نتایج حاصله از آن، در مقایسه با توابع چندهدفه ساده‌تر و قابل فهم‌تر باشد. برای اعتبارسنجی ابعاد کوچک و بزرگ مساله، به ترتیب چندین مثال عددی و یک نمونه واقعی ارائه شده، و با روش‌های پیشنهادی در مقاله حل گردیده‌اند. نتایج حل نیز برای ارزیابی کیفیت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. الگوریتم‌های پیشنهادی با نرم افزار MATLAB کدنویسی شده‌اند و تمامی تست‌ها توسط رایانه‌ای با مشخصات پردازشگر Core i5 2.53GHz و حافظه داخلی 4GB اجرا شده است.

۱. مقدمه

مسئله در دنیای صنعتی امروز حمل و نقل بدلیل فراهم آوردن امکان مصرف محصولات در محل‌های بسیار دورتر از محل تولیدشان، نقش بسیار مهمی در توسعه اقتصادی کشورها داشته است. ارائه محصول نهایی به یک مشتری مستلزم انتقال مواد اولیه از تامین‌کنندگان به تولیدکنندگان، انتقال محصولات نیمه تمام بین کارخانه‌ها و سرانجام رساندن محصول نهایی به مشتریان و بازارهای مقصد است. به دلیل تعدد فعالیت‌های حمل و نقل، هزینه‌های حمل و نقل درصد بالایی از هزینه‌های لجستیک را در بر می‌گیرند [۱].

بنابراین حمل و نقل کارآمد در تمام طول زنجیره تأمین از اهمیت بالایی برخوردار است. مساله مسیریابی وسایل نقلیه که اولین بار توسط دانتزیگ و رامزر معرفی شد، یکی از مهم‌ترین و چالش برانگیزترین مسائل بهینه‌سازی ترکیبی می‌باشد و یک نام عمومی برای مجموعه‌ای از مسائل بهینه‌سازی است که بوسیله تعدادی وسایل‌نقلیه به تمام مشتریان با تقاضای مشخص خدمت‌رسانی می‌کند. وسایل نقلیه ایستگاه را ترک می‌کنند، به مشتریان شبکه

تاریخ وصول: ۹۲/۰۸/۲۸

تاریخ تصویب: ۹۳/۱۲/۱۱

سید امید هاشمی امیری، کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، Omid.hashemi208@gmail.com

*نویسنده مسئول مقاله: **دکتر ابراهیم تیموری**، استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، Teimoury@iust.ac.ir

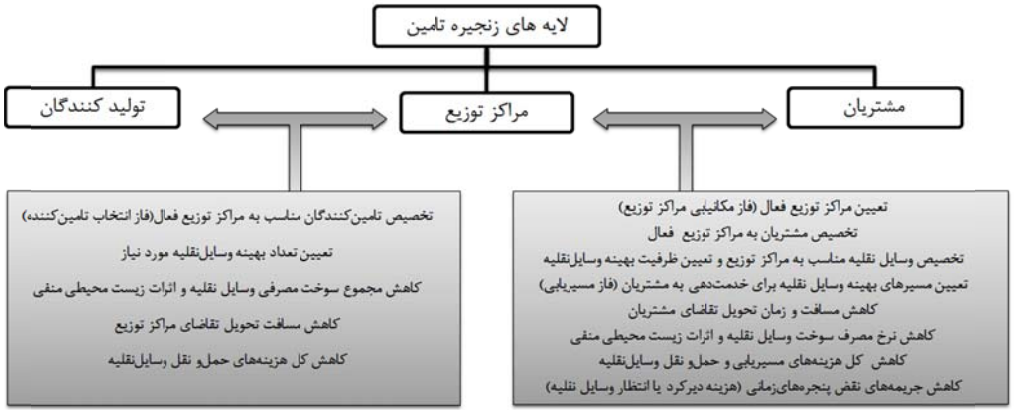
خدمات می‌دهند و بعد از طی کامل مسیرشان به همان ایستگاه باز می‌گردند. در ادبیات موضوع مسائل مسیریابی تک ایستگاهی بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است، در صورتیکه بر روی مسائلی که دارای بیش از یک ایستگاه می‌باشند، مطالعات کمتری صورت گرفته است. مساله مسیریابی وسایل نقلیه چند ایستگاهی در دنیای واقعی دارای کاربردهای فراوانی است، زیرا معمولاً برای ذخیره و توزیع کالاها در زنجیره‌های تامین و یا شهرهای بزرگ، بیشتر از یک ایستگاه بکارگرفته می‌شود. این مساله از جمله مسائل پیچیده است که در آن تعداد محاسبات لازم برای رسیدن به جواب بهینه، با افزایش اندازه مساله، بطور نمایی رشد می‌کند و حل این مسائل با استفاده از روش‌های دقیق مستلزم صرف زمان زیادی برای انجام محاسبات می‌باشد.

انسان با هدف رسیدن به رفاه بیشتر و زندگی بهتر، لطمات و صدمات جبران ناپذیری بر محیط زیست وارد کرده است. تخریب محیط زیست و استفاده بیش از حد منابع فسیلی تجدیدناپذیر نشانه‌های بارز آن می‌باشد. از میان آلاینده‌های مؤثر بر محیط‌زیست، نقش بخش حمل ونقل جاده‌ای در تأثیراتی که بر محیط‌زیست دارد بسیار قابل توجه می‌باشد. با وجود اینکه وسایل نقلیه به علت مقررات و قوانین زیست محیطی، نسبت به گذشته آلودگی کمتری ایجاد می‌کنند، اما در عمل به دلیل افزایش تعداد وسایل‌نقلیه، آلودگی ناشی از سوخت وسایل نقلیه هم اکنون در حال افزایش است. بخش حمل و نقل از مصرف‌کنندگان اصلی انواع سوخت‌های فسیلی در جهان است و ۲۵٪ دی‌اکسید کربن را در جهان تولید می‌نماید که حدود۸۰٪ تا ۹۰٪ آن را حمل و نقل جاده‌ای تولید می‌کند. در این راستا توجه به میزان انتشار گازهای آلاینده‌ی ناشی از بخش حمل و نقل از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. بصورت کلی افزایش تعداد خودروها باعث افزایش میزان مصرف سوخت وسایل‌نقلیه و همچنین افزایش اثرات مخرب حمل و نقل جاده‌ای بر محیط‌زیست می‌گردد. در نتیجه برای جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست و همچنین کاهش اثرات مخرب حمل و نقل جاده‌ای باید تعداد وسایل نقلیه و همچنین میزان مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه کاهش یابد.

حمل و نقل در بخش‌های مختلف بازار، تاثیر بسزایی بر روی ارزش نهایی کالاها دارد. در واقع صرف‌نظر از هزینه‌های تولید کالا، روش‌های حمل و نقل و توزیع مناسب اثر قابل توجهی بر روی ارزش نهایی محصول و در نتیجه قیمت نهایی محصول خواهند داشت. ارزشی که بخش‌های حمل و نقل و توزیع بر روی محصولات می‌گذارند با توجه به روش‌های حمل و نقل گوناگون و همچنین شرایط انتقال کالاها متغیر است و گاهی درصد بالایی از ارزش کالاها را تشکیل می‌دهد. مطابق گفته توث[1] و ویگو[2] در سال ۲۰۰۱، می‌توان با بکارگیری روش‌های حل کامپیوتری مناسب، هزینه کل مسائل حمل و نقل را بین ۵ تا ۲۰ درصد کاهش داد. دانتزیگ و فولکرسون در سال ۱۹۵۴ برای حل مساله مسیریابی، برنامه‌ریزی صفر و یک را بکارگرفتند [۲]. در سال ۱۹۵۹روش حل برنامه‌ریزی پویا توسط دانتزیگ و رامزر برای حل مساله مسیریابی مورد مطالعه قرار داده شد [۳] و در سال‌های ۱۹۸۱ و ۱۹۸۷ فیشر، لاپورت و نوبرت برای حل مسائل مسیریابی رویکردهای گوناگون روش شاخه و کران را توسعه دادند ([۴] ،[۵]). در سال‌های اخیر برای حل مسائل مسیریابی همراه با در نظر گرفتن پنجره زمانی، فیشر روش بهینه‌سازی تجزیه لاگرانژ را مورد مطالعه قرار داده است [۶] و روش شاخه و کران توسط برمل و سیمچی لوی بکار گرفته شده است [۷]. در زمینه الگوریتم‌های ابتکاری نیز در سال ۱۹۷۲ الگوریتم جارو برای اولین بار توسط ورن [۸] ارائه و سپس توسط ژیلت و میلر توسعه یافت [۹]. همچنین در سال ۱۹۷۹ کریستوفیدز و مینگوزی، روش دوفازی را ارائه کردند [۱۰]. در سال ۱۹۹۲ لاپورت طی مقاله‌ای مروری کلیه روش‌های بکار گرفته شده تا آن زمان را جمع‌آوری کرده و آن‌ها را به دو دسته روش‌های حل دقیق و روش‌های حل‌تخمینی طبقه‌بندی کرد [۱۱]. علاوه بر روش‌های ابتکاری که برای حل مسائل پیچیده مسیریابی بوجود آمده‌اند، روش‌های فرا ابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک، جستجوی ممنوع و غیره نیز ارائه گردیده است [۱۲]. مساله مسیریابی جزء مسائل پیچیده می‌باشد که حل آن در ابعاد بزرگ نیازمند بکارگیری روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری است. توجه به مساله مسیریابی از کاربردهای زیاد آن و همچنین سختی قابل ملاحظه آن نشات می‌گیرد. این مساله سعی می‌کند که مسافت کل طی شده، زمان کل سفر، تعداد وسایل‌نقلیه‌ی بکار گرفته شده و همچنین هزینه‌های کل مساله را بصورت توامان به حداقل برساند. مسائل مکان‌یابی - مسیریابی در دهه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعات اخیری که در این زمینه صورت گرفته شامل مقالات بالاک‌ریشنان، وارد و وان در سال ۱۹۸۷ [۱۳]، لاپورته در سال‌های ۱۹۸۸ و ۱۹۸۹ ([۱۴]، [۱۵])، برمن، جایلت و سیمچی‌لوی در سال ۱۹۹۵ [۱۶]، مین، جایارامن و اسریواستاوا در سال ۱۹۹۸ [۱۷] ، نایجی و سالهی در سال ۲۰۰۷ [۱۸] و همچنین پرودهون و پرینس در سال ۲۰۱۴ [۱۹] می‌باشد. مارتینز سالازار و همکارانش در سال ۲۰۱۴ مساله مکان‌یابی - مسیریابی را با در نظر گرفتن اهداف کاهش هزینه حمل و نقل و همچنین تعیین بهینه میزان بار وسایل نقلیه مطالعه نموده‌اند [۲۰]. حمیدی، فراهانی و سجادی نیز در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۴ مساله مکان‌یابی- مسیریابی را در سه سطح و با در نظر گرفتن چندین کالا مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مقالات محدودیت طول مسیر، تعداد محدود وسایل نقلیه‌ی با ظرفیت معین و همچنین هزینه‌های متغیر و ثابت برای

مساله در نظر گرفته شده است. همچنین مشتری‌ها می‌توانند توسط تسهیلات همه سطوح خدمت‌رسانی شوند. مسیرها نیز فقط برای تحویل کالاها به مشتریان مجاز می‌باشد و حمل و نقل بین تسهیلات می‌بایست به طور مستقیم باشد. حمیدی و همکاران در سال ۲۰۱۴ یک روش هیوریستسک بهبود یافته و توسعه یافته را نیز ارائه دادند ([۲۱]، [۲۲]، [۲۳]). تحقیقات و مقالات سال‌های اخیر در زمینه مسائل مسیریابی چند انباره، از جمله مقالات کوو و وانگ در سال ۲۰۱۲ [۲۴] ، ژو ، وانگ و یانگ در سال ۲۰۱۲ [۲۵] ، سالهی، عمران و وسان در سال ۲۰۱۴ [۲۶] و ژو و ژیانگ در سال۲۰۱۴ [۲۷] به تحلیل متغیرهای مختلف مساله با استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر[۳] پرداخته‌اند. همچنین ردریگز پریرا راموس، گومس و باربوسا پووا در سال ۲۰۱۴ در یک مساله مسیریابی چند انباره، مسافت سفر وسایل نقلیه و همچنین میزان انتشار گاز کربن را به طور همزمان مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۸]. چاگ-اینگ هسو در سال ۲۰۰۷، مساله مسیریابی کلاسیک را همراه با در نظر گرفتن مفهوم پنجره‌های زمانی و همچنین با بررسی فرایند تحویل کالاهای فاسدشدنی توسعه داد [۲۹]. در سال ۲۰۱۱ مو و همکارانش، مساله مسیریابی را در شرایط عدم تحویل به موقع کالاها مورد بررسی قرار دادند که این مساله زمان انتظار وسایل‌نقلیه را نیز در نظر می‌گرفت. در همین سال هانگتاوو لی و همکارانش، مساله مسیریابی وسایل‌نقلیه را همراه با در نظر گرفتن ظرفیت وسایل نقلیه، تقاضاهای تصادفی و محدودیت پنجره‌های زمانی توسعه دادند. وو و همکارانش یک هدف جدید به نام بهینه‌سازی مصرف سوخت را معرفی کردند که بر مبنای اهداف رایج مساله مسیریابی همراه با پنجره‌های زمانی پیشنهاد شده است. همچنین کیو و همکارانش مدلی را برای محاسبه نرخ مصرف سوخت پیشنهاد دادند که هدف این مدل، بهینه‌سازی همزمان مسیریابی وسایل نقلیه و کاهش مصرف سوخت بوده است. تلگا بکتاس و همکارانش نیز با ارائه مقاله‌ای، نشان دادند که میزان آلودگی منتشر شده بوسیله وسایل‌نقلیه، به میزان بار، سرعت و سایر عوامل وابسته به وسایل‌نقلیه مرتبط می‌باشد [۳۰]. در سال ۲۰۱۲ امراه دمیر و همکارانش مساله مسیریابی کلاسیک را همراه با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی توسعه دادند [۳۱]. در همین سال جابر جمایی و همکارانش یک مساله مسیریابی سبز دو هدفه را در زمینه لجستیک سبز معرفی کرده و برای حل مساله پیشنهادی، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب تکاملی[۴] را بکار گرفتند [۳۲]. همچنین کوپفر و همکارانش، رویکرد یکپارچه‌سازی ابتکاری را پیشنهاد کرده‌اند که هدف مینیمم‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با حمل‌و نقل را بجای مسافت طی شده وسایل‌نقلیه در نظر گرفته است [۳۳]. اییونگ زیاوو و همکارانش نیز نرخ مصرف سوخت را بصورت تابعی وابسته به بار وسایل نقلیه، برای یک بخش بزرگ و در حال افزایش هزینه‌های حمل و نقل محاسبه کرده‌اند. در این مقاله مدل بهینه‌سازی برای محاسبه نرخ مصرف سوخت وسایل‌نقلیه همراه با در نظر گرفتن ظرفیت وسایل نقلیه ارائه شده است [۳۴]. چابان و همکاران [۳۵] در سال ۲۰۱۲ یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی را برای طراحی یک زنجیره تامین پایدار ارائه دادند و این مدل را بعنوان ابزاری در درک استراتژی‌های بهینه زنجیره تامین، تحت سیاست‌های مختلف زیست‌محیطی معرفی کرده‌اند. در این مقاله بررسی‌های انجام شده بر روی هزینه‌های زیست‌محیطی بیانگر این امر است که در طراحی زنجیره‌های تامین، برنامه‌ریزی مبادله کالاها نقشی حیاتی و مهم را ایفا می‌نماید. مدل طراحی شده در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی ترکیبی است و در طراحی زنجیره تامین پایدار، اصول چرخه حیات زنجیره را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در واقع این مدل دارای چهارچوبی می‌باشد که تعادل بین اهداف اقتصادی و زیست محیطی زنجیره را تحت استراتژی‌های مختلف عملیاتی و هزینه‌ای ارزیابی می‌کند. در نتیجه مقاله نشان می‌دهد که به منظور تعیین استراتژی‌های زیست محیطی کارآمد در تمام سطوح زنجیره، قوانین و برنامه‌ریزی مبادله کالاها باید با یکدیگر هماهنگ‌سازی شوند و همچنین به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا با اتخاذ استراتژی‌های مدیریتی مناسب و یک رویکرد هزینه‌ای کارآمد به اهداف بلند مدت خود نائل شوند.

مساله‌ای که ما در این تحقیق مورد مطالعه قرار می‌دهیم در رابطه با مسیریابی و تخصیص مراکز توزیع، دریک شبکه زنجیره تامین سه سطحی است که شامل تولیدکنندگان، توزیع کنندگان و مشتریان می‌باشد. اهداف در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل کاهش هزینه‌های حمل‌و نقل، کاهش هزینه‌های نگهداری و کمبود موجودی در انبار مراکز توزیع، کاهش مجموع مصرف سوخت وسایل‌نقلیه و در نتیجه کاهش اثرات زیست محیطی منفی، تعیین تعداد و نوع وسایل نقلیه مورد نیاز برای خدمت‌دهی به مشتریان، تعیین مسیرهای بهینه برای توزیع تقاضاها و همچنین حداکثر کردن رضایت مشتریان با تحویل به موقع تقاضاها در زمان مقرر می‌باشد. نوآوری این تحقیق نسبت به تحقیقات پیشین، ارائه یک مدل یکپارچه است که تمامی اهداف مذکور را بصورت توامان تحقق بخشد، و در عین حال محدودیت‌های ظرفیت وسایل نقلیه، چند انباری بودن و محدودیت پنجره‌های زمانی را نیز در زنجیره تامین در نظر بگیرد. مدل پیشنهادی دارای وسایل‌نقلیه متنوع با ظرفیت‌های مختلف می‌باشد و برای خدمت‌رسانی به مشتریان، با محدودیت ممنوعیت عبور وسایل‌نقلیه از برخی مسیرهای صعب العبور روبرو می‌باشد. اهداف مدل پیشنهادی در بین لایه‌های زنجیره تامین مساله، بصورت زیر می‌باشد:



در ادامه تحقیق، بخش ۲ به تعریف مساله، ارائه مدل ریاضی و تشریح مدل پیشنهادی پرداخته است و در بخش ۳ نیز رویکردها و روش‌های حل پیشنهادی برای مساله ارائه شده است. در بخش ۴ برای اعتبارسنجی ابعاد کوچک و بزرگ مساله، به ترتیب چندین مثال عددی و یک مثال واقعی ارائه شده و با روش‌های پیشنهادی در بخش ۳ حل گردیده است. سپس برای ارزیابی کیفیت، نتایج حل مورد تحلیل و تفسیر قرار گرفته‌اند. در انتها بخش ۵ به جمع بندی و ارائه پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی پرداخته و در بخش ۶ نیز منابع مقاله ارائه شده است.

۲. تعریف مساله و تشریح مدل ریاضی پیشنهادی

با توجه به مرور ادبیات و بررسی شکاف‌ها و کمبودهای موجود در مسائل مسیریابی، در این مقاله مدلی یکپارچه و جامع ارائه شده است که برخی از این نقایص و کمبودها را پوشش دهد. مدل مورد بررسی بصورت همزمان در مورد مسیریابی وسایل نقلیه، تخصیص جریان‌ها در شبکه و تعیین اندازه محموله ارسالی کالاها تصمیم‌گیری می‌کند. در فرآیند تخصیص مراکز توزیع به مشتریان، هدف کاهش فاصله‌های طی شده توسط وسایل نقلیه و بنابراین کاهش هزینه‌های حمل و نقل می‌باشد. بعلاوه ما مجاز به منبع‌یابی‌های متعدد برای هر مرکز توزیع هستیم و یک مرکز توزیع می‌تواند توسط چندین کارخانه پشتیبانی شود، ولی هر مشتری تنها می‌تواند توسط یک مرکز توزیع خدمت‌دهی شود. تصمیم‌گیری در رابطه با ظرفیت وسایل نقلیه به طراحی شبکه مربوط می‌باشد. وسایل‌نقلیه اقلام را از یک تأمین‌کننده به چندین مشتری تحویل می‌دهند. مساله مسیریابی وسایل نقلیه کلاسیک، مجموعه‌ای از مسیرها را که هر کدام توسط یک وسیله نقلیه مورد استفاده قرار می‌گیرند تعیین می‌کند و این وسایل نقلیه از هر مرکز توزیع اعزام شده و در نهایت به همان مرکز توزیع بازمی‌گردند، به نحوی که نیاز مشتری برآورده شده و تمام محدودیت‌های عملیاتی نیز ارضا شود و در نتیجه منجر به حداقل شدن هزینه کل گردد. مساله مسیریابی – وسایل نقلیه پیشنهادی، مشابه مساله مسیریابی وسایل نقلیه کلاسیک است با این تفاوت که در این مساله، وسایل‌نقلیه دارای ظرفیت بوده و برای پاسخ به تقاضای مشتریان دارای محدودیت پنجره‌زمانی هستیم. در مسائل مسیریابی وسایل نقلیه، کاهش مصرف سوخت و همچنین کاهش هزینه‌های کل مساله مسیریابی از اهداف با اهمیت این مسائل بشمار می‌روند. هدف مدل پیشنهادی، بهینه‌سازی مساله مسیریابی وسایل‌نقلیه به منظور کاهش مصرف سوخت، کاهش اثرات زیست محیطی منفی، کاهش هزینه‌های مسیریابی و حمل و نقل وسایل‌نقلیه و همچنین کاهش زمان و مسافت طی شده وسایل‌نقلیه بصورت همزمان در یک مدل یکپارچه است، در حالی که محدودیت‌های ظرفیت وسایل نقلیه و پنجره‌های زمانی را نیز در نظر می‌گیرد. مفروضات مدل پیشنهادی به این صورت می‌باشد: تقاضاهای مشتریان ثابت و مشخص است، حداکثر ظرفیت هر وسیله نقلیه ثابت و مشخص است، مسیرهای بالقوه موجود برای وسایل‌نقلیه مشخص می‌باشد، حداکثر ظرفیت جریان در هر مسیر نیز ثابت و مشخص می‌باشد، فاصله بین مراکز تولیدی، مراکز توزیع و مشتریان مشخص است، مکان‌های بالقوه برای مراکز تولیدی و مراکز توزیع مشخص می‌باشد، برای پاسخ به تقاضاهای مشتریان محدودیت پنجره‌های زمانی در نظر گرفته شده است، هر یک از مشتریان باید تنها توسط یکی از مسیرهای موجود و با یک وسیله نقلیه خدمت دهی شوند، وسایل‌نقلیه مختلف با میزان مصرف سوخت و هزینه‌های حمل و نقل متفاوت برای حمل کالاها، در دسترس می‌باشد و هر وسیله نقلیه دارای ظرفیت وزنی و حجمی معین می‌باشد و در نهایت اینکه متغیرهای تصمیم مدل از نوع صفر و یک و عدد صحیح می‌باشند.

بخش حمل و نقل هزینه‌های آلودگی محیط‌زیست، آلودگی صوتی و همچنین هزینه از بین رفتن چشم اندازهای طبیعی را افزایش می‌دهد. با افزایش تعداد خودروها و همچنین افزایش مجموع سوخت مصرفی وسایل‌نقلیه در کشور، اثرات مخرب حمل و نقل جاده‌ای بر محیط زیست نیز افزایش می‌یابد. افزایش آلاینده‌ها خطرات و پیامدهای زیادی بر حیات انسان‌ها و کره زمین دارد و

انتشار این گازها عمدتاً ناشی از مصرف سوخت می‌باشد. لذا جهت کاهش اثرات مخرب حمل و نقل جاده‌ای بر محیط زیست و همچنین کاهش هزینه‌های مصرف سوخت، می‌بایست مجموع سوخت مصرفی وسایل نقلیه بهینه گردد.

۲-۱. نمادها و علائم بکار رفته در مدل ریاضی

در این بخش اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل پیشنهادی تشریح می‌شوند:

اندیس

i اندیس تولیدکنندگان $i \in \{1,2,...,I\}$

j اندیس مراکز توزیع (انبار) $j \in \{1,2,...,J\}$

k اندیس مشتریان $k \in \{1,2,...,K\}$

v اندیس وسایل‌نقلیه‌ی مراکز توزیع (انبار) $v \in \{1,2,...,V\}$

تقاضا

D_j: تقاضای کل برای مرکز توزیع j

D_k: تقاضای کل برای مشتری k

ظرفیت

$CapVM$: ظرفیت وسایل‌نقلیه در مسیر بین تولیدکننده و مرکز توزیع

$CapVD_v$: ظرفیت وسیله نقلیه v در مسیر بین مرکز توزیع و مشتریان

Cap_i: ظرفیت تولید کننده i

Cap_j: ظرفیت مرکز توزیع j

زمان

t_{ij}: طول مدت حرکت از تولید کننده i به مرکز توزیع j

t_{jk}: طول مدت حرکت از مرکز توزیع j به مشتری k

t_{ef}: طول مدت حرکت از نقطه e به نقطه f

t_j^*: طول مدت تخلیه محموله در مرکز توزیع j

τ_j: حداکثر زمان مجاز تامین تقاضای مرکز توزیع j

S_k: طول مدت خدمت به مشتریk

$[L_k,U_k]$: بازه پنجره‌زمانی برای خدمت به مشتری k

مسافت

d_{ij}: مسافت بین تولید کننده i و مرکز توزیع j

d_{jk}: مسافت بین مرکز توزیع j و مشتری k

d_{ef}: مسافت بین نقطه e و نقطه f

هزینه‌ها

TC_{ij}: هزینه حمل هر واحد کالا از تولیدکننده i به مرکز توزیع j

TC_{efv}: هزینه حمل هر واحد کالا بین نقطه e تا f توسط وسیله نقلیه v

RC_{ef}: هزینه مسیریابی بین نقطه e و نقطه f

GC: هزینه تخلف از محدودیت پنجره‌های زمانی (جریمه یک واحد زمانی تاخیر در تحویل کالا)

WC: هزینه انتظار وسایل‌نقلیه تا شروع خدمت

C_0: هزینه هر واحد (لیتر) سوخت وسیله نقلیه

Ho_j: هزینه نگهداری موجودی برای مرکز توزیع j

Λ_j: هزینه کمبود برای مرکز توزیع j

سایر پارامترها

FCR_{efv}: نرخ مصرف سوخت وسیله‌نقلیه v از نقطه e تا نقطه f

N: نشان دهنده یک عدد خیلی بزرگ است

متغیرهای تصمیم (صفر و یک)

Car_{jv}: اگر وسیله نقلیه v ام به مرکز توزیع j تخصیص یابد

$R_{e,f\ v}$: اگر نقطه e قبل از نقطه f بر روی مسیر وسیله نقلیه v باشد

Y_{ij}: اگر مرکز توزیع j ام به تولیدکننده i ام تخصیص یابد

Y_{jk}: اگر مشتری k ام به مرکز توزیع j ام تخصیص یابد

متغیرهای تصمیم (عدد صحیح)

γ_{ij}: جریان عبوری از تولیدکننده i به مرکز توزیع j

γ_{jkv}: جریان عبوری از مرکز توزیع j به مشتریk با وسیله نقلیه v

$\gamma_{ef\ v}$: جریان عبوری از مشتری e به مشتریf توسط وسیله نقلیه v

In_j: موجودی مرکز توزیع j در پایان دوره (بر حسب تعداد کالا)

Br_j: کمبود مرکز توزیع j در پایان دوره (برحسب تعداد کالا)

$B_{k,v}$: زمان رسیدن وسیله نقلیه v به مشتری k / زمان شروع خدمت به مشتری k با وسیله نقلیه v

$ZW_{k,v}$: میزان انتظار وسیله نقلیهv برای خدمت به مشتری k

$ZG_{k,v}$: میزان تخلف از پنجره زمانی وسیله نقلیه v برای خدمت به مشتری k

۲-۲. مدل ریاضی پیشنهادی

در این بخش مدل پیشنهادی ارائه شده تشریح می‌شود. مدل پیشنهادی بصورت یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح ترکیبی می‌باشد.

۲-۲-۱. تابع هدف

تابع هدف مساله در نظر دارد زمان و مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه، هزینه‌های مساله شامل هزینه حمل و نقل هر واحد کالا، هزینه نگهداری یا کمبود موجودی، هزینه جریمه تخلف از محدودیت پنجره زمانی و هزینه مصرف سوخت وسایل‌نقلیه را در طول مسیرهای طی شده برای تامین تقاضاها بصورت توامان بهینه کند. در این مقاله تلاش شده که تاثیر تمامی پارامترها و عوامل موثر در مساله بصورت توامان در نظر گرفته شود. همچنین سعی شده است که با همسان‌سازی و یکپارچه کردن

اهداف مساله، مدل مورد نظر بصورت تک هدفه فرموله شود تا در نتیجه‌ی آن، تحلیل و مقایسه‌ی نتایج حاصله از حل مدل بر روی نمودارها و جداول ساده‌تر و قابل فهم‌تر باشد. علارغم ساده‌تر شدن مقایسه‌ی نتایج حل، در نظر گرفتن تابع هدف بصورت تک هدفه، مدل پیشنهادی را به یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی تبدیل کرده است. عبارت (۱) تابع هدف مدل می‌باشد. تابع هدف مدل بترتیب شامل حداقل نمودن هزینه حمل‌و نقل هر واحد کالا از تولید کننده i به مرکز توزیعj، هزینه حمل و نقل هر واحد کالا از مرکز توزیع j به مشتری k توسط وسیله نقلیه v، هزینه حمل و نقل هر واحد کالا از مشتری e به مشتری f توسط وسیله نقلیه v، هزینه‌های مسیریابی بین دو گره، هزینه مصرف سوخت وسایل‌نقلیه در طول مسیر طی شده، هزینه نگهداری موجودی و هزینه کمبود کالا برای مرکز توزیع j و جریمه تخلف از پنجره‌های زمانی می‌باشد.

$$
\begin{aligned}
Minimize\ Z = & \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} TC_{ij}.\gamma_{ij} + \\
& \sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{v\in VD} TC_{jkv}.\gamma_{jkv} + \\
& \sum_{e\in K}\sum_{f\in K}\sum_{v\in VD} TC_{efv}.\gamma_{efv} + \\
& \sum_{e\in E}\sum_{f\in F}\sum_{v\in VD} RC_{ef}.R_{e,fv} + \\
& \sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{v\in VD} C_0.FCR_{jkv}.d_{jk}.R_{j,kv} + \\
& \sum_{e\in K}\sum_{f\in K}\sum_{v\in VD} C_0.FCR_{efv}.d_{ef}.R_{e,fv} + \\
& \sum_{j\in J}(In_j.Ho_j + Br_j.\Lambda_j) + \\
& \sum_{k\in K}\sum_{v\in VD} ZW_{k,v}.WC + \\
& \sum_{k\in K}\sum_{v\in VD} ZG_{k,v}.GC
\end{aligned}
\qquad (۱)
$$

۲-۲-۲. محدودیت های مدل

در این بخش محدودیت‌های مدل پیشنهادی تشریح می‌شوند.

$$\gamma_{ij} \le \min\{Cap_i, CapVM\} \quad \forall i\in I, j\in J \qquad (۲)$$

$$\gamma_{ij} \le Y_{ij}.N \quad \forall i\in I, j\in J \qquad (۳)$$

$$\sum_{j\in J} D_j Y_{ij} \le Cap_i \quad \forall i\in I \qquad (۴)$$

$$\sum_{i\in I}\gamma_{ij} = D_j \quad \forall j\in J \qquad (۵)$$

$$\sum_{k\in K} D_k Y_{jk} \le Cap_j \quad \forall j\in J \qquad (۶)$$

$$\sum_{k\in K} Y_{jk} = 1 \quad \forall j\in J \qquad (۷)$$

$$\sum_{j\in J} Y_{jk} \le 1 \quad \forall k\in K \qquad (۸)$$

$$\gamma_{jkv} \le \min\{Cap_j, CapVD_v\} \quad \forall j\in J, k\in K, v\in VD \qquad (۹)$$

$$\gamma_{jkv} \le Y_{jk}.N \quad \forall j\in J, k\in K, v\in VD \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{j\in Jv}\sum_{\epsilon VD}\gamma_{jkv} = \sum_{j\in Jv}\sum_{\epsilon VD} D_k \quad \forall k\in K \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{k\epsilon Kv}\sum_{\epsilon VD} R_{k,ev} \le 1 \quad \forall e\in E \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{e\in Ev}\sum_{\epsilon VD} R_{k,ev} = 1 \quad \forall\ k\epsilon K \tag{۱۳}$$

$$\sum_{k\epsilon Kv}\sum_{\epsilon VD} R_{e,kv} \le 1 \quad \forall\ e\in E \tag{۱۴}$$

$$\sum_{e\in Ev}\sum_{\epsilon VD} R_{e,kv} = 1 \quad \forall\ k\epsilon K \tag{۱۵}$$

$$\sum_{f\epsilon F} R_{e,fv} = \sum_{f\epsilon F} R_{f,ev} \quad \forall\ e\in E, v\epsilon VD \tag{۱۶}$$

$$\sum_{e\epsilon K} R_{j,ev} + \sum_{e\epsilon K} R_{e,kv} - Y_{jk} \le 1 \quad \forall\ j\in J, k\in K, v\in VD \tag{۱۷}$$

$$\sum_{e\in E}\sum_{k\epsilon K} R_{e,kv}\ .\ D_k \le CapVD_v \quad \forall v\in VD \tag{۱۸}$$

$$\sum_{e\epsilon Kv\epsilon VD}\sum \gamma_{e,fv} = \sum_{e\epsilon Kv\epsilon VD}\sum D_f\ .R_{e,fv} \quad \forall\ f\in K \tag{۱۹}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{k\epsilon K} \gamma_{jkv} + \sum_{e\epsilon K}\sum_{f\epsilon K} \gamma_{e,fv} \le CapVD_v \quad \forall\ v\in VD \tag{۲۰}$$

$$Car_{jv} = \sum_{k\in K} R_{j,kv} \quad \forall\ j\in J, v\in V \tag{۲۱}$$

$$D_j - \sum_{k\epsilon K}\gamma_{j,kv} - \sum_{e\epsilon K}\sum_{f\epsilon K}\gamma_{e,fv} = In_j - Br_j \quad \forall\ j\in J, v\epsilon VD \tag{۲۲}$$

$$\left(t_{ij} + t_j^*\right).Y_{ij} \le \tau_j \quad \forall\ i\in I,\ j\in J \tag{۲۳}$$

$$\sum_{j\in J} t_{jk}\ .Y_{jk} = \sum_{j\in J}\sum_{v\epsilon VD} B_{kv}.R_{j,kv} \quad \forall\ k\in K \tag{۲۴}$$

$$\left(B_{fv} - B_{ev} - S_e - t_{ef}\right)R_{efv} = 0 \quad \forall\ e\in K, f\in K, v\in VD \tag{۲۵}$$

$$ZW_{kv} = Max\left(\left(L_k - B_{kv}\right),0\right) \quad \forall\ v\in VD,\ k\in K \tag{۲۶}$$

$$ZG_{kv} = Max\left(\left(B_{kv} + S_k - U_k\right),0\right) \quad \forall\ v\in VD,\ k\in K \tag{۲۷}$$

$$R_{efv}, R_{jkv}, Y_{ij}, Y_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall\ i\in I, j\in J, k\in K, v\in VD \tag{۲۸}$$

$$\gamma_{ij}, \gamma_{jkv}, \gamma_{efv}, B_{kv}, ZW_{kv}, ZG_{kv} \ge 0 \quad \forall\ i\in I, j\in J, k\in K, v\in VD \tag{۲۹}$$

محدودیت (۲) نشان دهنده این است که میزان جریان عبوری از تولیدکننده i به مرکز توزیع j، باید کمتر از ظرفیت تولیدکننده i و ظرفیت حمل وسایل نقلیه باشد. محدودیت (۳) نشان دهنده این است، در صورتی از تولید کننده i به مرکز توزیع j جریان عبوری خواهیم داشت که تولیدکننده i به مرکز توزیع j تخصیص داده شود. محدودیت (۴) نشان دهنده این است که میزان تقاضای پاسخ داده شده توسط تولیدکننده i باید کمتر از ظرفیت تولیدکننده i باشد. محدودیت (۵) نشان دهنده این است که میزان کل جریان ارسالی به مرکز توزیع j باید برابر با تقاضای مرکز توزیع j باشد. محدودیت (۶) نشان دهنده این است که میزان جریان عبوری از مرکز توزیع j به تمام مشتریان، کوچکتر یا مساوی ظرفیت مرکز توزیع j می‌باشد. محدودیت‌های (۷) و (۸) نشان دهنده این است که هر گره مشتری حداکثر دارای یک ورودی می‌باشد. محدودیت (۹) نشان دهنده این است که میزان جریان عبوری از مرکز توزیع j به مشتری k توسط وسیله نقلیه v ام، کوچکتر یا مساوی ظرفیت مرکز توزیعj و ظرفیت وسیله نقلیه v ام برای پاسخ به تقاضاها می‌باشد. محدودیت (۱۰) نشان دهنده این است در صورتی که مشتری k ام به مرکز توزیع j ام تخصیص نیابد میزان جریانی بین مرکز توزیع j و مشتری k ام وجود نخواهد داشت. محدودیت (۱۱) نشان دهنده این است که میزان کل جریان عبوری از مراکز توزیع به مشتری k ام برابر با میزان تقاضای مشتری k ام می‌باشد. محدودیت‌های (۱۲) تا (۱۵) نشان دهنده این است که هر گره مشتری حداکثر یک جریان ورودی و یک جریان خروجی خواهد داشت و تنها توسط یک وسیله نقلیه خدمت‌دهی می‌شود، در واقع تضمین می‌کند که هر مشتری توسط یک وسیله نقلیه و یک مرکز توزیع خدمت‌دهی شود. محدودیت (۱۶) نشان دهنده این است که اگر یک جریان (مسیر) به مشتری k ام وارد شود، باید یک جریان(مسیر) نیز از آن خارج گردد، همچنین تضمین می‌کند که هر وسیله نقلیه که از یک مرکز توزیع حرکت می‌کند، پس از خدمت‌رسانی و تحویل سفارشات به مشتریان دوباره به همان مرکز توزیع باز می‌گردد. محدودیت (۱۷) نشان دهنده این است که مشتری k ام به مرکز توزیع j ام تخصیص می‌یابد اگر و تنها اگر یک مسیر بین مشتری k ام و مرکز توزیع j ام وجود داشته باشد. محدودیت (۱۸) نشان

دهنده این است که کل تقاضاهایی که توسط وسیله نقلیه vام پاسخ داده می‌شود باید کوچکتر مساوی ظرفیت وسیله نقلیه vام باشد. محدودیت (۱۹) تعیین می‌کند که میزان جریان حمل شده به مشتری kام باید دقیقا برابر با تقاضای مشتری k ام باشد. محدودیت (۲۰) تضمین می‌کند که کل جریان حمل شده بین مراکز توزیع و مشتریان توسط یک وسیله نقلیه، از ظرفیت آن وسیله نقلیه کمتر است. محدودیت (۲۱) نشان دهنده این است که وسیله نقلیه vام به مرکز توزیع j ام تخصیص یافته است. محدودیت (۲۲) نشان دهنده این است که اگر وسیله نقلیه v ام به مرکز توزیع j ام تخصیص یابد، تفاضل میان تقاضای مرکز توزیع j ام و میزان جریان عبوری از مرکز توزیع j ام به تمام مشتریان توسط وسیله نقلیه v ام، برابر با تفاضل میان موجودی و کمبود کالا در مرکز توزیع j ام در پایان دوره سفارش‌دهی می‌باشد. محدودیت (۲۳) تضمین می‌کند که زمان تحویل سفارش مرکز توزیع j ام از تولیدکننده iام، بیش از حداکثر زمان مجاز برای تحویل سفارش به مرکز توزیع j ام نشود. محدودیت‌های (۲۴) و (۲۵) زمان رسیدن وسیله نقلیه vام به مشتری k ام را تعیین می‌کنند. محدودیت‌های (۲۶) و (۲۷) میزان تخلف از محدودیت‌های پنجره زمانی خدمت به مشتریان را تعیین می‌کنند. محدودیت‌های (۲۸) و (۲۹) بترتیب نشان‌دهنده، صفر و یک بودن متغیرهای تصمیم $Y_{ij}, Y_{jk}\ R_{e,fv}, R_{j,kv}$، و بزرگتر مساوی صفر (غیرمنفی) بودن متغیرهای تصمیم $\gamma_{e,fv}, \gamma_{jkv}, \gamma_{ij}, B_{k,v}$ و $ZW_{k,v}, ZG_{k,v}$ می‌باشند.

۳. رویکردهای حل پیشنهادی

به طور کلی روش‌های حل مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی به دو دسته روش‌های دقیق و روش‌های تقریبی (غیر دقیق) تقسیم می‌شوند. روش‌های دقیق با استفاده از قضایای ریاضی، جواب بهینه را بدست می آورند ولی روش‌های تقریبی جوابی نزدیک به جواب بهینه را در زمانی مناسب ارائه می‌دهند و به دلیل قدرت بالای این روش‌ها، معمولا در مسائل پیچیده و با ابعاد بزرگ از آن‌ها استفاده می‌شود. روش‌های تقریبی به دو دسته الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری تقسیم می‌شوند. نکته‌ای که در هنگام استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری باید بدان توجه نمود این است که ممکن است در بهینه‌های محلی به دام بیفتند در صورتی که الگوریتم‌های فرا ابتکاری این مشکل را حل نموده‌اند. مسائل مسیریابی وسایل نقلیه از نوع مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح NP- Hard بوده و به دلیل پیچیدگی و بزرگی ابعاد مساله عموما برای حل آن لازم است از روش‌های غیر دقیق استفاده شود تا در زمان مناسب جوابی نزدیک به جواب بهینه را ارائه نماید. در واقع برای حل این مساله با روش‌های حل دقیق، زمان محاسبات بسیار زیاد است و با توجه به حجم مساله نیز به صورت نمایی افزایش می‌یابد، به این علت برای چنین مسائلی اغلب از روش‌های تخمینی استفاده می‌شود. الگوریتم‌های غیر دقیق می‌توانند تضمین کنند که جواب‌هایی نزدیک به جواب بهینه برای ابعاد بزرگ مساله، با زمان محاسبه معقول یافت شود، بنابراین می‌توان به سرعت به جوابی دست یافت که به اندازه کافی به جواب بهینه نزدیک می‌باشد. برای حل مدل پیشنهادی این مقاله از الگوریتم‌های فرا ابتکاری شبیه‌سازی تبرید[5]، جستجوی ممنوع[6] و جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی استفاده شده است. در ادامه شبه کد الگوریتم‌های فرا ابتکاری بکار گرفته شده نمایش داده شده است و مفاهیم مرتبط با الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی توضیح داده می‌شود.

```
Initialize parameters;
S0 = Generate Initial Solution();
T = T0;
SBest = S0;
While(T < TTotal)
    Until(N ≤ Max_iteration)
        Generate Neighbor Solution S
        If f(S) < f(S0)
            S0 ← S
            SBest = S
            N = N + 1
        Else
            Δf = f(S) − f(S0);
            p = random();
            If (p < exp(−Δf / KT))
                S0 ← S
                N = N + 1
            End
        End
    End
    T = α × T
End
Print SBest
```

شکل ۱. شبه کد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

```
Initialize parameters;
S0 = Generate Initial Solution();
SBest = S0;
Initial Tabu List;
Initial Action List;
While(Stopping Criterion not met)
    For(N ≤ Max_iteration)
        For(A ≤ Action List_iteration)
            Generate Neighbor Solution S
              according to allowable Action List
            If f(S) < f(SBest)
              SBest ← S
            End
            Update Tabu list
            N = N + 1
        End
    End
    Print SBest
End
```

شکل ۲. شبه کد الگوریتم جستجوی ممنوعه

۳-۱. الگوریتم ترکیبی جستجوی همسایگی متغیر و شبیه‌سازی تبرید (VNS-SA)

الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در سال ۱۹۹۶ توسط بریمبرگ[۷] و ملادنویچ[۸] طراحی شد. ایده اصلی این الگوریتم تعویض سیستماتیک ساختار همسایگی‌ها در طول جستجو، برای جلوگیری از به دام افتادن در بهینه محلی است. این الگوریتم بصورت سیستماتیک فضای جواب را با تغییر همسایه‌های جواب فعلی جستجو می‌کند. الگوریتم با تولید جواب اولیه، تعریف ساختارهای همسایگی و استفاده از روشی مناسب برای جستجوی همسایگی کار خود را شروع می‌کند و تا زمانی‌که معیار خاتمه برقرار شود، حلقه اصلی الگوریتم تکرار می‌شود. الگوریتم از دو فاز اصلی تکان‌دهنده[۹] و جستجوی محلی[۱۰] تشکیل شده است. در فاز تکان‌دهنده، الگوریتم با استفاده از یک ساختار همسایگی از جواب فعلی S_0 به جواب همسایه S_1 می‌رسد و یک همسایه را بصورت تصادفی از نزدیکترین همسایه‌ها انتخاب می‌کند. سپس در فاز جستجوی محلی با استفاده از روش‌های جستجوی محلی، از جواب همسایه S_1 به جواب بهینه محلی $S_{Local\ Optimal}$ می‌رسد. حال اگر جواب بهینه بدست آمده از جواب فعلی بهتر بود، جایگزین آن می‌شود و دوباره به ساختار همسایگی اول برمی‌گردیم، در غیر اینصورت به ساختار همسایگی بعدی می‌رویم و مراحل تکرار می‌شود. در واقع جستجو را برای یافتن جواب بهینه بهتر ادامه می‌دهیم. حلقه الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در یک دما تا زمانیکه $k \le k_{\max}$ باشد ادامه می‌یابد، و پس از آن دما با استفاده از رابطه $T = \alpha \times T$ بروز رسانی می‌شود. الگوریتم ترکیبی تا رسیدن به دمای پایانی ادامه می‌یابد.

```
Make set of neighborhood structures N_k ∀ k = 1,2,...,k_max
S0 = Generate Initial Solution( );
SBest = S0;
T = T0;
While(T ≤ TTotal)
    k = 1;
    While(k ≤ kmax)
        Sshake = Shaking (S0 , Nk)
        SLocal Optimal = Local Search(Sshake)
        If f(SLocal Optimal) < f(S0)
            S0 ← S Local Optimal ;
            SBest = S Local Optimal ;
            k = 1 ;
        Else k = k + 1 ;
        End
    End
    T = α × T;
    Update SBest obtained
End
Print Final SBest
```

شکل ۳. شبه کد الگوریتم VNS-SA

۳-۲. ساختارهای همسایگی الگوریتم VNS-SA

در این الگوریتم ترکیبی، برای ایجاد همسایگی‌های جدید جواب فعلی، از پنج عملگر حرکتی استفاده شده است. ساختارهای استفاده شده در این مقاله از ساختارهای همسایگی متداول برای تبرید طراحی شده نیز در ابتدا الگوریتم کار خود را با بدست آوردن جواب اولیه S_0 آغاز می‌کند و جواب اولیه به عنوان جواب فعلی سیستم قرار می‌گیرد. برای حل مساله مورد نظر از پنج ساختار همسایگی استفاده می‌شود. شروع الگوریتم با ساختار همسایگی اول $k = 1$ می‌باشد. الگوریتم نخست در فاز تکان‌دهنده بر اساس ساختار همسایگی kام از جواب فعلی S_0 به جواب همسایه S_1 می‌رسد و یک همسایه را بصورت تصادفی از نزدیکترین همسایه انتخاب می‌کند. سپس در فاز جستجوی همسایگی بر روی جواب همسایگی S_1 جستجوی همسایگی صورت گرفته و جواب بهینه محلی $S_{Local\ Optimal}$ حاصل می‌شود. جستجوی همسایگی در الگوریتم ترکیبی با استفاده از روش شبیه‌سازی تبرید، و با بکارگیری ساختار همسایگی kام به عنوان عملگر حرکتی، با حرکت به نقاط همسایه اجرا می‌گردد. حال اگر جواب بهینه $S_{Local\ Optimal}$ حاصله، از جواب فعلی S_0 بهتر بود، جایگزین S_0 می‌شود و دوباره به ساختار همسایگی اول $k = 1$ برمی‌گردیم، در غیر اینصورت به ساختار همسایگی بعدی $k = k + 1$ رفته و مراحل تکرار می‌شود، در واقع جستجو را برای یافتن جواب بهینه بهتر ادامه می‌دهیم. حلقه الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر در یک دما تا زمانیکه $k \le k_{\max}$ باشد ادامه می‌یابد، و پس از آن دما با استفاده از رابطه $T = \alpha \times T$ بروز رسانی می‌شود. الگوریتم ترکیبی تا رسیدن به دمای پایانی ادامه می‌یابد.

حل مساله مسیریابی وسایل نقلیه با پنجره‌های زمانی هستند. عملگر حرکتی اول انتقال(Insertion) می‌باشد. در این عملگر حرکتی در ابتدا دو عنصر i وj بصورت تصادفی انتخاب می‌شوند، سپس عنصر i ام را از جای خود برداشته و در مکان عنصر j+1 (یک خانه بعد از عنصر j) قرار می‌دهد. عملگر حرکتی دوم معکوس‌سازی(Reversion) می‌باشد. در این عملگر حرکتی در ابتدا دو عنصر i وj بصورت تصادفی انتخاب می‌شوند، سپس ترتیب قرار گرفتن عناصر i و j و تمامی عناصر بین i و j معکوس می‌شوند. عملگر حرکتی سوم تعویض(Swap) می‌باشد که در این عملگر حرکتی در ابتدا دو عنصر i وj بصورت تصادفی انتخاب می‌شوند، سپس عناصر i و j با یکدیگر تعویض می‌شوند. عملگر حرکتی چهارم تعویض تور(Tour Swap) می‌باشد که در این عملگر حرکتی بجای دو عنصر i و j، دو ردیف از عناصر بصورت تصادفی انتخاب شده، سپس با یکدیگر تعویض می‌شوند. و درنهایت عملگر حرکتی پنجم تعویض تور دو مرتبه‌ای (Twice Tour Swap) می‌باشد که در این عملگر حرکتی بجای دو ردیف از عناصر، چهار ردیف از عناصر بصورت تصادفی انتخاب شده، سپس عناصر اول و چهارم و عناصر دوم و سوم ترتیب‌شان را با یکدیگر تعویض می‌کنند.

۴. محاسبه و تحلیل نتایج

در ابتدا برای ارزیابی اعتبار ابعاد کوچک مساله، پنج مثال عددی با ابعاد مختلف تولید شده و با نرم افزار گمز و الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید، جستجوی ممنوع و جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی حل می‌شوند. در ادامه برای اعتبارسنجی ابعاد بزرگ مساله، یک مثال عددی واقعی ارائه شده و به دلیل پیچیدگی و بزرگی ابعاد مساله برای حل آن از الگوریتم‌های فرا ابتکاری شبیه‌سازی تبرید، جستجوی ممنوع و جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی استفاده شده تا در زمان مناسب جوابی نزدیک به جواب بهینه را ارائه نماید. در انتها نتایج حاصل از هر کدام مورد تحلیل و تفسیر قرار می‌گیرد. برای تنظیم پارامترهای هر الگوریتم، آزمایش‌های زیادی را با مجموعه مقادیر متفاوتی از پارامترها انجام داده و در پایان با در نظر گرفتن بهترین نتایج حاصله از هر مجموعه، مقادیر پارامترها برای هر الگوریتم تعیین گردیده است. در ادامه برای مساله مورد نظر پنج مثال عددی با ابعاد مختلف تولید شده و با در نظر گرفتن پارامترهای تعیین شده برای هر الگوریتم، نتایج حاصله از الگوریتم‌ها در هر بعد از مساله با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند.

۴-۱. مثال عددی

۴-۱-۱. تعریف مساله و طراحی مثال عددی

یک شرکت حمل و نقل جاده‌ای در تلاش است تا با درنظر گرفتن تعداد وسایل‌نقلیه در دسترس و همچنین ظرفیت هر وسیله نقلیه، مجموعه‌ای بهینه از مسیرها را تعیین کند، بگونه‌ای که تقاضای مشتریان حتی‌المقدور در زمان معین پاسخ داده شود و رضایت مشتریان نیز به حداکثر برسد. مثال‌های عددی طراحی شده‌ی مرتبط با مساله مسیریابی وسایل نقلیه پیشنهادی، مجموعه‌ای از مسیرها را تعیین می‌کند که هر کدام توسط یک وسیله نقلیه مورد استفاده قرار می‌گیرند و این وسایل نقلیه از هر مرکز توزیع یا انبار حرکت کرده و به مشتریانی که از لحاظ جغرافیایی پراکنده هستند خدمت‌رسانی می‌کنند و در انتهای مسیر نیز به همان مرکز توزیع باز می‌گردند، بنحوی که از مجموعه بهینه‌ای از مسیرها عبور کرده، نیاز مشتریان برآورده شده و تمام محدودیت‌های عملیاتی نیز ارضا شود و در نتیجه منجر به حداقل شدن هزینه کل نیز گردد. مساله‌ای که ما در این مثال‌ها درنظر گرفتیم، در رابطه با مسیریابی و تخصیص مشتریان به مراکز توزیع در یک شبکه زنجیره تامین سه‌سطحی می‌باشد. در این بخش برای ارزیابی صحت مدل پیشنهادی در مسائل با ابعاد کوچک تعدادی مثال عددی تولید می‌شود. ابعاد مسائل طراحی شده برای مدل پیشنهادی در جدول ۱ نمایش داده شده است. نحوه انتخاب مقادیر پارامترها در هر مساله به اینصورت است که برای هر پارامتر در هر مساله، یک حد پایین و بالا در نظر گرفته می‌شود و مقادیر پارامترها بصورت تصادفی در بین حدود پایین و بالا تعیین می‌شوند.

جدول ۱. ابعاد مسائل آزمایشی طراحی شده

مساله نمونه	ابعاد مساله	تعداد تولیدکنندگان	تعداد مراکز توزیع	تعداد مشتریان	تعداد وسایل‌نقلیه
۱	۲-۳-۵-۴	۲	۳	۵	۴
۲	۲-۴-۸-۵	۲	۴	۸	۵
۳	۳-۷-۱۲-۸	۳	۷	۱۲	۸
۴	۳-۹-۱۶-۱۰	۳	۹	۱۶	۱۰
۵	۴-۱۱-۲۰-۱۲	۴	۱۱	۲۰	۱۲

۴-۱-۲. حل مدل و تحلیل نتایج

در این بخش کیفیت نتایج ابعاد کوچک مساله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به همین منظور در بخش قبل تعدادی مثال عددی در چندین بعد طراحی گردید. برای هر بعد از مساله، چندین ترکیب متفاوت از مقادیر پارامترها طراحی شده است، بگونه‌ای که شرایط دنیای واقعی بهتر شبیه‌سازی گردد. الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید، جستجوی ممنوع و جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی، در نرم‌افزارMatlab کدنویسی شده‌اند و تمامی تست‌ها توسط رایانه‌ای با مشخصات پردازشگر Core i5 2.53GHz و حافظه داخلی 4GB اجرا شده است. نتایج تمامی روش‌های حل پیشنهادی، برای ارزیابی کیفیت نتایج با یکدیگر مقایسه گردیده و خلاصه نتایج در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. میانگین مقادیر تابع هدف و همچنین میانگین زمان حل روش‌های بکار گرفته شده، معیارهای مقایسه کیفیت نتایج می‌باشند.

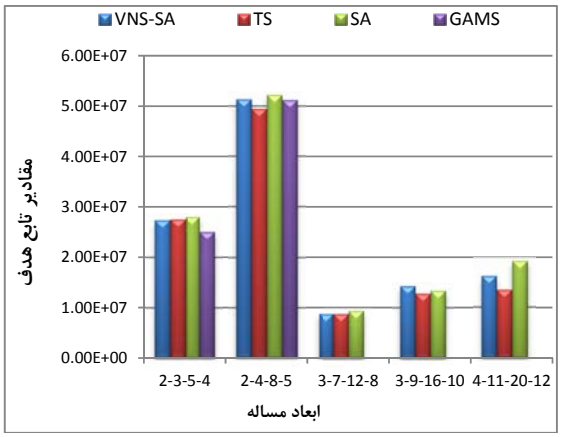
جدول ۲. خلاصه نتایج حل مسائل آزمایشی

ابعاد مساله	تعداد تکرار	GAMS		SA		TS		VNS-SA	
		میانگین مقدار تابع هدف	درصد خطا از مقدار بهینه	میانگین مقدار تابع هدف	درصد خطا از مقدار بهینه	میانگین مقدار تابع هدف	درصد خطا از مقدار بهینه	میانگین مقدار تابع هدف	درصد خطا از مقدار بهینه
۲-۳-۵-۴	۳	۲/۵۰۵e+۷	۰	۲/۷۹۹e+۷	۱۱/۷۳	۲/۷۴۹e+۷	۹/۷۴۰۵	۲/۷۳۶e+۷	۹/۲۲۱
۲-۴-۸-۵	۳	۵/۱۲۱e+۷	۳/۵۵	۵/۲۲۲e+۷	۵/۶۰۱	۴/۹۴۵e+۷	۰	۵/۱۳۶e+۷	۳/۸۶۲
۳-۷-۱۲-۸	۳	~	~	۹/۳۰۹e+۶	۷/۰۴۹	۸/۷۱۴e+۶	۰/۲۰۶	۸/۶۹۶e+۶	۰
۳-۹-۱۶-۱۰	۳	~	~	۱/۳۳۳e+۷	۴/۳۸۵	۱/۲۷۷e+۷	۰	۱/۴۲۷e+۷	۱۱/۷۴۶
۴-۱۱-۲۰-۱۲	۳	~	~	۱/۹۱۶e+۷	۴۲/۴۵	۱/۳۴۵e+۷	۰	۱/۶۲۱e+۷	۲۰/۵۲

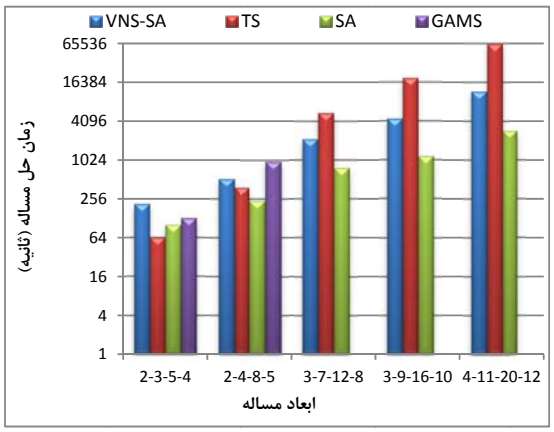
جدول ۳. خلاصه نتایج حل مسائل آزمایشی

ابعاد مساله	تعداد تکرار	GAMS		SA		TS		VNS-SA	
		میانگین زمان حل (ثانیه)	درصد خطا از زمان بهینه	میانگین زمان حل (ثانیه)	درصد خطا از زمان بهینه	میانگین زمان حل (ثانیه)	درصد خطا از زمان بهینه	میانگین زمان حل (ثانیه)	درصد خطا از زمان بهینه
۲-۳-۵-۴	۳	۱۲۸/۸۸۸	۱۰۰/۷۷	۱۰۱/۱۱	۵۷/۵۰۲	۶۴/۱۹۶	۰	۲۱۳/۵۸۱	۲۳۲/۷
۲-۴-۸-۵	۳	۹۷۲/۲۴۵	۳۰۸/۳۵	۲۳۸/۰۸۹	۰	۳۸۳/۸۶۷	۶۱/۲۲۸	۵۲۳/۵۵۳	۱۱۹/۸۹
۳-۷-۱۲-۸	۳	~	~	۷۷۷/۱۳۵	۰	۵۵۳۵/۶۴۵	۶۱۲/۳۱	۲۱۶۶/۰۱۳	۱۷۸/۷۱
۳-۹-۱۶-۱۰	۳	~	~	۱۱۶۶/۹۱	۰	۱۹۰۲۱/۹۸	۱۵۳۰/۱۱	۴۴۵۴/۰۰۸	۲۸۱/۶۹
۴-۱۱-۲۰-۱۲	۳	~	~	۲۸۹۹/۰۵۸	۰	۶۴۶۱۷/۵۵	۲۱۲۸/۹۱	۱۱۸۳۳/۲	۳۰۸/۱۷

خلاصه نتایج حل در جداول ۲ و ۳ نمایش داده شده است. طبق نتایج جدول ۲، در بعد ۴-۵-۳-۲ نرم افزار گمز، در بعد ۵-۸-۴-۲ الگوریتم جستجوی ممنوع، در بعد ۸-۱۲-۷-۳ الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی و در بعدهای ۱۰-۱۶-۹-۳ و ۱۲-۲۰-۱۱-۴ نیز الگوریتم جستجوی ممنوع بهینه‌ترین نتایج را حاصل کرده‌اند. در این مقاله برای حل مسائل آزمایشی، حداکثر زمان مجاز در نظر گرفته شده ۷۲۰۰۰ ثانیه (۲۰ ساعت) می‌باشد. با توجه به پیچیدگی مدل مساله مسیریابی پیشنهادی و همچنین محدودیت حداکثر زمان حل در نظر گرفته شده برای آن، مشاهده می‌شود که نرم افزار گمز قادر به حل ابعاد ۸-۱۲-۷-۳، ۱۰-۱۶-۹-۳ و ۱۲-۲۰-۱۱-۴ مسائل آزمایشی در حداکثر زمان مجاز تعیین شده نمی‌باشد.

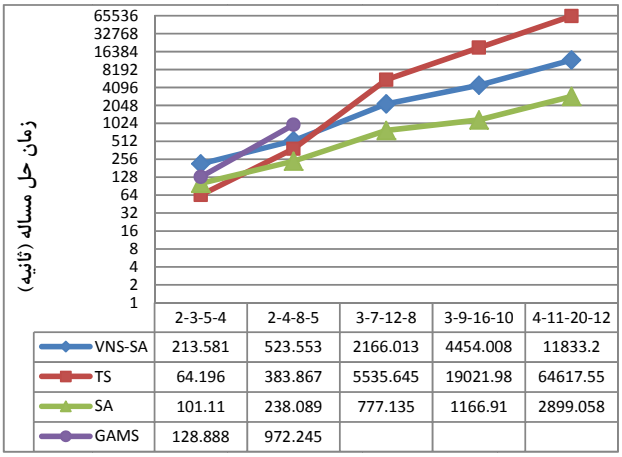


شکل ۴. نمودار مقایسه مقادیر تابع هدف

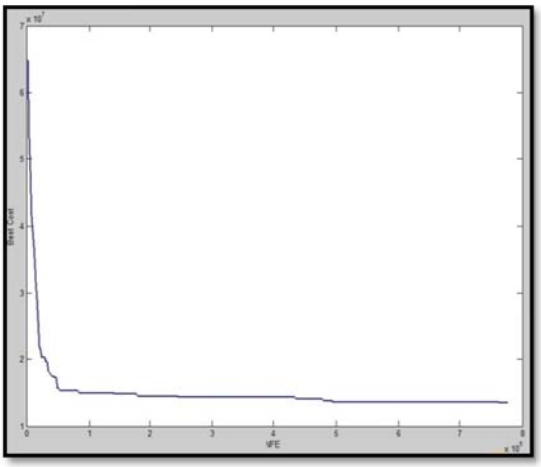


شکل ۵. نمودار مقایسه مقادیر زمان حل مساله

طبق روند نتایج حل و شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که با بزرگتر شدن ابعاد مساله، مقادیر تابع هدف الگوریتم جستجوی ممنوع، نتایج با کیفیت بهتری را دارا می‌باشد. جدول ۳ زمان حل مسائل را نشان داده است. در بعد ۴-۵-۳-۲ الگوریتم جستجوی ممنوع و در ابعاد ۵-۸-۴-۲ ، ۸-۱۲-۷-۳، ۱۰-۱۶-۹-۳ و ۱۲-۲۰-۱۱-۴ الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بهینه‌ترین زمان حل را دارا می‌باشند. همانطوری که از روند نتایج زمان حل مسائل و اشکال ۵ و ۶ استنباط می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که زمان حل و رسیدن به جواب بهینه نرم افزار گمز، با بزرگتر شدن ابعاد مساله به شدت افزایش می‌یابد. پس از نرم افزار گمز روند افزایشی زمان حل الگوریتم جستجوی ممنوع در رتبه بعدی قرار دارد. روند افزایشی زمان حل الگوریتم‌های جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بترتیب در رتبه‌های بعدی می‌باشند.



شکل ۶. روند افزایشی زمان حل روش‌های بکار گرفته شده



شکل ۷. روند بهبود نتایج حل

شکل ۷ نشان می‌دهد که الگوریتم VNS-SA در بعد ۱۰-۱۶-۹-۳، دارای روند بهبود در رسیدن به جواب بهینه، در تکرارهای مختلف الگوریتم می‌باشد. در این شکل محور افقی نمودار (NFE) نشان دهنده تعداد تکرارهای الگوریتم می‌باشد و محور عمودی نمودار (Best Cost) بهترین جواب حاصله تا آن تکرار مشخص را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده از حل مسائل آزمایشی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای حل مسائل با ابعاد کوچک، نرم افزار گمز جواب‌های با کیفیت مناسبی را حاصل می‌کند و همچنین دارای زمان حل مناسب و معقولی نیز می‌باشد. این بدین خاطر است که سایر روش‌های حل بکار گرفته شده یا از نظر زمان حل، و یا از نظر کیفیت جواب‌های حاصله بهتر از نرم افزار گمز نمی‌باشند. ولی هنگامی‌که ابعاد مساله بزرگتر می‌شود، الگوریتم جستجوی ممنوع، نسبت به سایر روش‌ها جواب‌های با کیفیت بهتری را حاصل می‌کند ولی دارای این عیب می‌باشد که زمان حل مساله بصورت تصاعدی افزایش می‌یابد. همانطور که از نتایج استنباط می‌شود در بعد ۱۲-۲۰-

۴-۱۱ زمان حل الگوریتم جستجوی ممنوع تقریبا بیست برابر زمان حل الگوریتم شبیه‌سازی تبرید می‌باشد. همچنین با افزایش ابعاد مساله مشاهده می‌شود که زمان حل الگوریتم شبیه‌سازی تبرید رشد صعودی کمتری را نسبت به سایر روش‌ها دارا می‌باشد و زمان حل آن تقریبا برابر با ۴ تا ۲۵ درصد زمان حل سایر روش‌ها است، ولی با بزرگتر شدن ابعاد مساله کیفیت جواب‌های حاصله از این روش کاهش می‌یابد. الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی، با بزرگ شدن ابعاد مساله نسبت به سایر روش‌های حل، کیفیت جواب حل و زمان حل قابل قبولی را دارا می‌باشد. به عبارت دیگر الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی با بزرگتر شدن ابعاد مساله، هم دارای کیفیت جواب حل قابل قبول است و هم نسبت به روش‌هایی که دارای کیفیت جواب حل مشابه می‌باشند زمان حل کوتاهتری را دارا می‌باشد. در واقع این الگوریتم بین کیفیت جواب حل و مدت زمان حل، یک حالت تعادلی را برقرار می‌کند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که در بین تمامی روش‌های حل بررسی شده در این بخش، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی، نسبت به سایر روش‌ها دارای کیفیت جواب حل و زمان حل مناسب‌تری می‌باشد.

۴-۲. مثال عددی واقعی

مثال عددی ارائه شده در این بخش، مدل مسیریابی وسایل‌نقلیه برای خدمت‌دهی به مشتریان عسل در سراسر کشور می‌باشد. در واقع باید بگونه‌ای مسیریابی و تخصیص مشتریان به مراکز توزیع صورت گیرد که بصورت همزمان رضایت مشتریان و هزینه کل صرف شده بهینه گردد. برای بدست آوردن اطلاعات مورد نیاز، از پایان نامه‌ها و مقالات کار شده در این زمینه و همچنین سایت‌های مربوطه مانند سایت سازمان جهاد کشاورزی، سایت زنبور عسل ایران، سایت اداره کل دامپزشکی و غیره استفاده شده و اطلاعات بدست آمده با نظرات خبرگان این زمینه بروز و استفاده شده است. در ادامه شرح تفصیلی مساله مورد نظر ارائه شده است.

۴-۲-۱. تعریف مساله

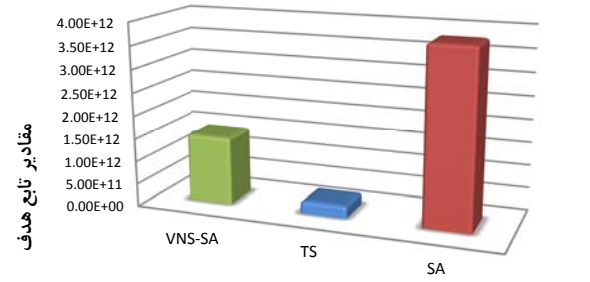
بدلیل شرایط آب و هوایی مساعد و متنوع در سرتاسر ایران، شغل زنبورداری و تولید عسل طبیعی از پتانسیل‌های بالقوه‌ی بسیاری برخوردار می‌باشد و سرمایه گذاری‌های اخیر دولت و بخش‌های خصوصی در این صنعت، نوید دهنده‌ی آینده‌ای روشن برای این صنعت در ایران است. از عوامل موثر در هزینه‌های تامین عسل، هزینه‌ی حمل‌و نقل بوده که بسته به محل تولید عسل متغیر است. از آنجا که تغییرات شرایط آب و هوایی و تغییرات فصلی باد و باران تاثیر بسیار زیادی در محل تولید عسل دارد، محل کوچ زنبورداران در هر فصل تغییر می‌کند. از این جهت مسافت میان تامین‌کننده تا انبارهای تامین متغیر است و این خود سبب تغییر هزینه‌های حمل‌و نقل می‌گردد. ضمنا باید بدین نکته اشاره داشت که هزینه‌های حمل و نقل تنها شامل مسافت موجود میان تامین‌کننده و انبارهای موقت نمی‌باشد. بلکه نوع جاده و راه‌های ارتباطی نیز در هزینه‌های حمل‌و نقل تاثیر به سزایی دارد. در بسیاری از موارد تامین‌کننده در مناطق صعب العبور مستقر می‌باشد و هزینه‌ی انتقال عسل طبیعی از آن مکان تا نزدیک‌ترین جاده‌های ارتباطی قابل توجه بوده و بدین جهت باید به کمک مدلی مناسب این هزینه‌ها را تخمین زده و در هزینه‌های تامین و مسیریابی لحاظ کرد. این مثال عددی، به بررسی مدلی جهت مسیریابی و تخصیص مشتریان در یک زنجیره تامین عسل طبیعی پرداخته است. زنجیره تامین عسل مورد نظر، دارای ۱۲ تولیدکننده، ۱۶ مرکز توزیع، ۲۰ وسیله نقلیه و ۸۰ مشتری می‌باشد. هدف از حل این مدل بدست آوردن مسیرهای بهینه برای خدمت‌رسانی به موقع به مشتریان عسل می‌باشد. در واقع باید تخصیص تولیدکنندگان به مراکز توزیع و خدمت‌دهی مراکز توزیع به مشتریان عسل بگونه‌ای باشد که هزینه مدل و رضایت مشتریان بصورت همزمان بهینه گردد. مدل مساله بصورت تک دوره‌ای بوده و در این مثال عددی تنها یک دوره زمانی تولید عسل طبیعی در نظر گرفته شده است. وسایل‌نقلیه بکارگرفته شده در مسیرهای بین تولیدکنندگان و مراکز توزیع، مشابه بوده و دارای ظرفیت ۴۵۰ تن می‌باشند. وسایل‌نقلیه مراکز توزیع که برای خدمت‌رسانی به مشتریان بکار گرفته می‌شوند، ۲۰ وسیله نقلیه با ظرفیت‌های مختلف می‌باشند که دارای ۶ نوع اصلی است. تمامی ۲۰ وسیله نقلیه از نوع کشنده مرسدس بنز ۳۸۵۰ تیتان با ظرفیت‌های مختلف ۱۰۰ تا ۶۰۰ تن می‌باشد. کشنده مرسدس بنز ۳۸۵۰ تیتان با قدرت ۵۰۰ اسب بخار قابلیت حمل بار تا ۶۰۰ تن را دارا می‌باشد. هزینه هر واحد سوخت وسیله نقلیه (لیتر) برابر با ۱۶۰ تومان می‌باشد. زنجیره تامین عسل مورد نظر با تمامی اعضای زنجیره در شکل ۸ نشان داده شده است. نقاط سبز رنگ نشان دهنده تولیدکنندگان بوده و شامل شهرهای ارسباران، اسفراین، اردبیل، ایذه، بابل، بیرجند، تالش، جم، لالی، خوی، رابر و خاش می‌باشد. نقاط آبی رنگ نشان دهنده مراکز توزیع زنجیره بوده و شامل شهرهای تبریز، رشت، مشهد، اهواز، شیراز، تهران، کرمان، ساری، زاهدان، بندرعباس، خرم‌آباد، سنندج، اصفهان، یزد، ارومیه و بجنورد می‌باشد. همچنین نقاط زرد رنگ نشان دهنده مشتریان زنجیره می‌باشد که در شکل ۸، محل قرار گرفتن ۸۰ مشتری مشخص شده است. تمامی مقادیر و پارامترهای مساله در ضمیمه ۱ آورده شده است.

۴-۲-۲. حل مدل و تحلیل نتایج

حل دقیق و بدست آوردن جواب‌های بهینه جز برای دسته‌ای از مسائل با ابعاد کوچک، برای سایر مسائل مسیریابی وسایل‌نقلیه

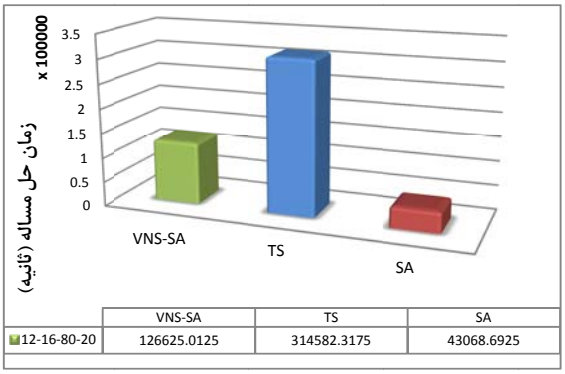
امکان‌پذیر نمی‌باشد. برای حل مدل مثال واقعی ارائه شده، الگوریتم‌های فرا ابتکاری شبیه‌سازی تبرید، جستجوی ممنوع و جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی بکار گرفته شده است. الگوریتم‌های فرا ابتکاری در نرم افزارMatlab کدنویسی شده‌اند و نتایج تمامی روش‌های حل، برای ارزیابی کیفیت نتایج با یکدیگر مقایسه می‌گردند. میانگین مقادیر تابع هدف و همچنین میانگین زمان حل، معیارهای مقایسه کیفیت نتایج می‌باشند. تمامی تست‌ها توسط رایانه‌ای با مشخصات پردازشگر Core i5 2.53GHz و حافظه داخلی 4GB اجرا شده است. خلاصه نتایج حاصله از روش‌های حل مختلف، در اشکال ۹ و ۱۰ آورده شده است. در این بخش نتایج حاصل از هر سه روش حل، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

شکل ۸. زنجیره تامین عسل طبیعی با تمامی اعضای زنجیره



	VNS-SA	TS	SA
12-16-80-20	1.49E+12	2.73E+11	3.82E+12

شکل ۹. نمودار مقایسه مقادیر تابع هدف



	VNS-SA	TS	SA
12-16-80-20	126625.0125	314582.3175	43068.6925

شکل ۱۰. نمودار مقایسه مقادیر زمان حل مساله

شکل ۱۱ . نمایش مسیریابی تمام سطوح شبکه زنجیره تامین عسل طبیعی

همانطور که در نمودارهای مقایسه‌ای اشکال ۹ و ۱۰ نشان داده شده است، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در مقایسه با دو روش حل دیگر دارای کوتاهترین زمان حل می‌باشد، ولی از کیفیت جواب مناسبی برخوردار نیست. این در حالی است که الگوریتم جستجوی ممنوعه نسبت به دو روش حل دیگر دارای کیفیت جواب بسیار مناسب‌تری می‌باشد ولی زمان رسیدن به جواب مناسب برای این الگوریتم تقریبا چهار تا دوازده برابر دو روش حل دیگر است. در بین این سه روش حل، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی، در تعداد تکرار معین و ثابت الگوریتم، هم دارای کیفیت حل قابل قبول است و هم نسبت به روش‌هایی که دارای کیفیت جواب حل مشابه می‌باشند زمان حل کوتاه‌تری را دارا می‌باشد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم

جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی در مقایسه با سایر روش‌ها، در شرایط و زمان حل مشابه، دارای کیفیت حل و کارایی بیشتری است. تمامی نتایج حل الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی، در ضمیمه ۲ آورده شده است. خلاصه نتایج حل نیز بصورت شماتیک در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. زنجیره تامین عسل شامل مراکز تولید، مراکز توزیع و مشتریان عسل می‌باشد و در شکل۱۱ تخصیص مراکز تولید عسل به مراکز توزیع عسل، تخصیص مشتریان به هر یک از انبارهای فعال برای توزیع عسل و در نهایت نحوه مسیریابی تمام اجزای شبکه زنجیره تامین عسل نمایش داده شده است.

۵. نتیجه‌گیری

پارامترها با بررسی ادبیات این حوزه تحقیقاتی، شکاف‌های متعددی برای این مساله شناسایی شد که در این مقاله سعی شده است با ارائه‌ی مدلی پیشنهادی، برخی از این کاستی‌ها برطرف گردد. مساله مسیریابی ارائه شده در زنجیره تامین سه سطحی (شامل تأمین‌کنندگان، مراکز توزیع و مشتریان)، جهت پاسخ به تقاضای مشتریان طراحی شده است. خروجی مدل تعیین می‌کند که در یک افق برنامه‌ریزی چه مقدار کالا، در چه زمانی و از کدام مرکز توزیع به کدام مشتری ارسال شود تا در کنار کمینه کردن هزینه‌های زنجیره تأمین از جمله هزینه‌های نگهداری و کمبود موجودی و حمل و نقل کالاها، که غالباً در ادبیات موضوع دیده می‌شود، اهداف مهم دیگری تحت عنوان هزینه‌های جریمه تخلف از محدودیت پنجره زمانی یا هزینه‌های انتظار وسایل‌نقلیه تا شروع خدمت و همچنین تعیین نوع و تعداد وسایل نقلیه‌ی با مصرف سوخت مناسب نیز بصورت توامان در نظر گرفته شوند. پس از ارائه مدل پیشنهادی، فرضیات مدل، اهداف مدل و روش‌های حل ارائه شده برای این مدل تشریح گردید و در ادامه اعتبارسنجی ابعاد کوچک و بزرگ مساله مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل ریاضی طراحی شده در نظر دارد که تا حد امکان تاثیر تمامی پارامترها و عوامل موثر در این مساله را بصورت توامان در نظر بگیرد. در واقع سعی شده است تا با همسان‌سازی اهداف مساله و ارائه یک مدل تک هدفه، تحلیل و درک نتایج حاصله از آن، در مقایسه با توابع چندهدفه ساده‌تر و قابل فهم‌تر باشد. ولی از آنجاییکه در نظر گرفتن تابع هدف بصورت تک هدفه پیچیدگی بیشتری به مدل می‌دهد، مدل پیشنهادی به یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی تبدیل شده است. برای اعتبارسنجی ابعاد کوچک مساله چندین مثال عددی طراحی شده و با نرم افزار گمز و الگوریتم‌های فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید، جستجوی ممنوع و جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی حل گردید. سپس برای اعتبارسنجی ابعاد بزرگ مساله یک نمونه واقعی ارائه شده و با الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی حل گردید. الگوریتم‌های فراابتکاری در نرم افزار Matlab R2013 کدنویسی شده و نتایج تمامی تست‌ها، برای ارزیابی کیفیت نتایج با یکدیگر مقایسه گردیدند. تمامی تست‌ها توسط رایانه‌ای با مشخصات پردازشگر Core i5 2.53GHz و حافظه داخلی 4GB اجرا شده است. از آنجا که با یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی روبرو هستیم، با افزایش تعداد متغیرهای صفر و یک در ابعاد مسائل دنیای واقعی، زمان حل آن بطور نمایی افزایش می‌یابد و حل آن با روش‌های دقیق امکان‌پذیر و توجیح‌پذیر نمی‌باشد. از این رو برای حل ابعاد بزرگ این مساله تنها الگوریتم‌های فرا ابتکاری بکار گرفته شده است و نتایج حاصل از این محاسبات نیز نشان می‌دهد که الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی نسبت به سایر الگوریتم‌ها، دارای کیفیت نتایج حل مناسب‌تری بوده و در مدت زمان مناسبی نیز به جواب بهینه می‌رسد. در دنیای واقعی این تحقیق برای سازمان‌های بسیاری کاربردی و مفید می‌باشد. مهمترین بخش این تحقیق کاهش هزینه‌های حمل و نقل، تعیین تعداد وسایل‌نقلیه مورد نیاز و همچنین تعیین وسایل نقلیه‌ی با مصرف سوخت مناسب می‌باشد که منجر به کاهش اثرات زیست محیطی منفی می‌شود. همچنین سازمان‌های مربوطه با استفاده از اینگونه مدل‌ها قادرند مسیرهای مناسب را جهت کاهش هزینه‌های حمل‌و نقل و در نتیجه کاهش کل هزینه‌های سازمان بکار گیرند. نتایج حاصل از چنین تحقیق‌هایی می‌تواند یکی از مهمترین مشکلاتی را که سازمان‌ها با آن روبه رو می‌باشد، برطرف نماید. در آینده ایده‌ها و نوآوری‌های بالقوه‌ای، مسائل این زمینه تحقیقاتی را برای دنیای واقعی تکمیل‌تر و کاربردی‌تر خواهند کرد که در ادامه به چند مورد از این زمینه‌ها اشاره شده است. جهت انطباق بیشتر مدل مساله با شرایط واقعی، می‌توان مدل مساله را پویا در نظر گرفت. در واقع برای واقعی‌تر شدن مساله و نزدیک شدن به جواب بهینه واقعی، می‌بایست پارامترهای مساله را غیر قطعی فرض نموده و مدل مساله را در فضای عدم قطعیت در نظر گرفت. همچنین برای مسائل مسیریابی در نظر گرفتن همزمان اهداف متفاوت و تعادلی، از قبیل اهداف اجتماعی، زیست محیطی و هزینه‌ای، به واقعی‌تر شدن مساله کمک می‌کند. همچنین می‌توان در حوزه‌ی کالاهای فاسدشدنی، برنامه‌ریزی و زمانبندی سیستم‌های تولیدی و مسیریابی را به گونه‌ای یکپارچه درنظر گرفت تا زنجیره مورد نظرکمترین میزان هزینه را متقبل شود.

ضمیمه ۱. مقادیر و پارامترهای مثال عددی واقعی (زنجیره تامین عسل طبیعی)

جدول ۱. تقاضای کل برای مراکز توزیع (برحسب تن)

تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع
۴۳۱	اصفهان	۴۲۷	زاهدان	۴۳۹	شیراز	۴۲۷	تبریز
۴۳۶	یزد	۴۳۱	بندرعباس	۴۲۶	تهران	۴۳۷	رشت
۴۳۹	ارومیه	۴۲۱	خرم آباد	۴۳۵	کرمان	۴۳۲	مشهد
۴۲۲	بجنورد	۴۲۱	سنندج	۴۳۵	ساری	۴۳۱	اهواز

جدول ۲. تقاضای کل برای مشتریان (برحسب تن)

تقاضا	مشتری	تقاضا	مشتری	تقاضا	مشتری	تقاضا	مشتری	تقاضا	مشتری
۱۵۲	۶۵	۱۲۲	۴۹	۵۰	۳۳	۷۵	۱۷	۱۴۰	۱
۱۶۴	۶۶	۱۳۰	۵۰	۷۲	۳۴	۱۵۷	۱۸	۱۵۵	۲
۹۵	۶۷	۵۰	۵۱	۸۱	۳۵	۱۳۶	۱۹	۲۶	۳
۲۸	۶۸	۱۱۷	۵۲	۱۴۱	۳۶	۱۶۴	۲۰	۱۵۶	۴
۲۹	۶۹	۱۱۳	۵۳	۱۲۰	۳۷	۱۱۳	۲۱	۱۰۹	۵
۴۷	۷۰	۳۱	۵۴	۵۷	۳۸	۶۱	۲۲	۲۱	۶
۱۴۴	۷۱	۲۴	۵۵	۱۶۲	۳۹	۱۴۵	۲۳	۵۱	۷
۱۲۷	۷۲	۸۷	۵۶	۱۰	۴۰	۱۶۰	۲۴	۹۵	۸
۱۴۰	۷۳	۱۶۴	۵۷	۷۷	۴۱	۱۱۷	۲۵	۱۶۳	۹
۴۵	۷۴	۶۱	۵۸	۶۸	۴۲	۱۳۰	۲۶	۱۶۵	۱۰
۱۵۹	۷۵	۱۰۲	۵۹	۱۳۲	۴۳	۱۲۸	۲۷	۳۱	۱۱
۱۶۳	۷۶	۴۲	۶۰	۱۳۷	۴۴	۷۰	۲۸	۱۶۶	۱۲
۱۳۷	۷۷	۱۲۹	۶۱	۳۶	۴۵	۱۱۳	۲۹	۱۶۳	۱۳
۸۹	۷۸	۴۷	۶۲	۸۶	۴۶	۳۳	۳۰	۸۵	۱۴
۱۰۷	۷۹	۸۸	۶۳	۷۸	۴۷	۱۲۲	۳۱	۱۳۷	۱۵
۱۸۳	۸۰	۱۲۱	۶۴	۱۱۲	۴۸	۴۹	۳۲	۲۸	۱۶

جدول ۳. ظرفیت تولید کنندگان (برحسب تن)

ظرفیت	تولیدکننده	ظرفیت	تولیدکننده	ظرفیت	تولیدکننده	ظرفیت	تولیدکننده
۷۰	لالی	۳۰۰	اسفراین	۸۰۰	تالش	۵۰۰	بابل
۲۰۰	جم	۲۰	ایذه	۱۰۰	رابر	۲۵۰۰	خوی
۳	خاش	۳۰	بیرجند	۱۵۰۰	اردبیل	۹۰۰	ارسباران

جدول ۴. ظرفیت مراکز توزیع (برحسب تن)

تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع
۴۳۱	اصفهان	۴۲۷	زاهدان	۴۳۹	شیراز	۴۲۷	تبریز
۴۳۶	یزد	۴۳۱	بندرعباس	۴۲۶	تهران	۴۳۷	رشت
۴۳۹	ارومیه	۴۲۱	خرم آباد	۴۳۵	کرمان	۴۳۲	مشهد
۴۲۲	بجنورد	۴۲۱	سنندج	۴۳۵	ساری	۴۳۱	اهواز

جدول ۵. زمان تخلیه محموله وسایل‌نقلیه در مرکز توزیع (برحسب دقیقه)

تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع
۲۵۸.۶	اصفهان	۲۵۶.۲	زاهدان	۲۶۳.۴	شیراز	۲۵۶.۲	تبریز
۲۶۱.۶	یزد	۲۵۸.۶	بندرعباس	۲۵۵.۶	تهران	۲۶۲.۲	رشت
۲۶۳.۴	ارومیه	۲۵۲.۶	خرم آباد	۲۶۱	کرمان	۲۵۹.۲	مشهد

۲۵۳.۲	بجنورد	۲۵۲.۶	سنندج	۲۶۱	ساری	۲۵۸.۶	اهواز

جدول ۶. هزینه نگهداری موجودی برای هر مرکز توزیع به ازای هر واحد کالا

تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع
۱۳۰۰	اصفهان	۱۵۰۰	زاهدان	۱۳۰۰	شیراز	۱۶۰۰	تبریز
۱۴۰۰	یزد	۱۶۰۰	بندرعباس	۱۶۰۰	تهران	۱۵۰۰	رشت
۱۲۰۰	ارومیه	۱۳۰۰	خرم آباد	۱۴۰۰	کرمان	۱۲۰۰	مشهد
۱۶۰۰	بجنورد	۱۲۰۰	سنندج	۱۳۰۰	ساری	۱۳۰۰	اهواز

جدول ۷. هزینه کمبود موجودی برای هر مرکز توزیع به ازای هر واحد کالا

تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع	تقاضا	مرکز توزیع
۹۰۰۰	اصفهان	۱۱۰۰۰	زاهدان	۱۱۰۰۰	شیراز	۹۰۰۰	تبریز
۹۰۰۰	یزد	۱۰۰۰۰	بندرعباس	۸۰۰۰	تهران	۱۰۰۰۰	رشت
۱۱۰۰۰	ارومیه	۹۰۰۰	خرم آباد	۱۱۰۰۰	کرمان	۸۰۰۰	مشهد
۸۰۰۰	بجنورد	۱۲۰۰۰	سنندج	۸۰۰۰	ساری	۱۱۰۰۰	اهواز

جدول ۸. زمان خدمت به مشتری (برحسب دقیقه)

تقاضا	مشتری	تقاضا	مشتری	تقاضا	مشتری	تقاضا	مشتری	تقاضا	مشتری
۹۱.۲	۶۵	۷۳.۲	۴۹	۳۰	۳۳	۴۵	۱۷	۸۴	۱
۹۸.۴	۶۶	۷۸	۵۰	۷.۲	۳۴	۹۴.۲	۱۸	۹۳	۲
۵۷	۶۷	۳۰	۵۱	۱۲.۶	۳۵	۸۱.۶	۱۹	۱۵.۶	۳
۱۶.۸	۶۸	۷۰.۲	۵۲	۸۴.۶	۳۶	۹۸.۴	۲۰	۹۳.۶	۴
۱۷.۴	۶۹	۶۷.۸	۵۳	۷۲	۳۷	۶۷.۸	۲۱	۶۵.۴	۵
۲۸.۲	۷۰	۱۸.۶	۵۴	۳۴.۲	۳۸	۶	۲۲	۱۲.۶	۶
۸۶.۴	۷۱	۱۴.۴	۵۵	۹۷.۲	۳۹	۸۷	۲۳	۳۰.۶	۷
۲۸.۲	۷۲	۵۲.۲	۵۶	۶	۴۰	۹۶	۲۴	۵۷	۸
۸۴	۷۳	۹۸.۴	۵۷	۴۶.۲	۴۱	۷۰.۲	۲۵	۹۷.۸	۹
۲۷	۷۴	۳۶.۶	۵۸	۴۰.۸	۴۲	۷۸	۲۶	۹۹	۱۰
۹۵.۴	۷۵	۶۱.۲	۵۹	۷۹.۲	۴۳	۷۶.۸	۲۷	۱۸.۶	۱۱
۳۷.۸	۷۶	۲۵.۲	۶۰	۸۲.۲	۴۴	۴۲	۲۸	۹۹.۶	۱۲
۲۲.۲	۷۷	۷۷.۴	۶۱	۲۱.۶	۴۵	۶۷.۸	۲۹	۹۷.۸	۱۳
۲۷.۶	۷۸	۲۸.۲	۶۲	۵۱.۶	۴۶	۱۹.۸	۳۰	۵۱	۱۴
۶۴.۲	۷۹	۵۲.۸	۶۳	۴۶.۸	۴۷	۷۳.۲	۳۱	۸۲.۲	۱۵
۴۹.۸	۸۰	۷۲.۶	۶۴	۶۷.۲	۴۸	۶	۳۲	۱۶.۸	۱۶

جدول ۹. پنجره زمانی خدمت به مشتری (برحسب دقیقه)

تقاضا	مشتری	تقاضا	مشتری	تقاضا	مشتری	تقاضا	مشتری
[۵۴۷ ۳۶۷۷]	۶۱	[۶۰۲ ۳۷۳۲]	۴۱	[۱۲۱ ۳۶۴۴]	۲۱	[۱۵۲ ۳۶۵۴]	۱
[۱۰ ۳۴۸۴]	۶۲	[۶۳۰ ۳۸۰۴]	۴۲	[۱۷۵ ۳۴۸۳]	۲۲	[۶۰۹ ۳۶۲۰]	۲
[۲۸ ۳۶۵۶]	۶۳	[۳۲۷ ۳۴۷۷]	۴۳	[۹۷ ۳۸۹۳]	۲۳	[۱۰۱ ۳۶۲۸]	۳
[۱۱۲ ۳۷۴۶]	۶۴	[۳۲۶ ۳۴۰۸]	۴۴	[۹۰ ۳۴۵۹]	۲۴	[۵۵۰ ۳۵۳۴]	۴
[۴۳۲ ۳۷۸۲]	۶۵	[۲۲۵ ۳۵۲۷]	۴۵	[۵۷۹ ۳۴۸۰]	۲۵	[۳۵۹ ۳۶۶۹]	۵
[۴۸۸ ۳۵۹۳]	۶۶	[۶۰۰ ۳۵۴۲]	۴۶	[۳۸۶ ۳۴۴۳]	۲۶	[۶۶۴ ۳۶۷۰]	۶

۷	[۵۲ ۳۸۷۵]	۲۷	[۳۶۶ ۳۴۸۱]	۴۷	[۲۴۶ ۳۶۱۲]	۶۷	[۴۳۲ ۳۵۷۵]
۸	[۲۹۵ ۳۸۶۰]	۲۸	[۹۶ ۳۶۲۰]	۴۸	[۷۴ ۳۶۶۸]	۶۸	[۳۰۰ ۳۹۸۸]
۹	[۷۱ ۳۷۵۹]	۲۹	[۵۶۸ ۳۵۳۷]	۴۹	[۵۲۰ ۳۳۸۷]	۶۹	[۳۶۴ ۳۳۵۵]
۱۰	[۶۴۱ ۳۵۸۲]	۳۰	[۴۱۴ ۳۹۴۵]	۵۰	[۲۵۹ ۳۵۰۵]	۷۰	[۱۹۷ ۳۹۲۰]
۱۱	[۳ ۳۸۷۱]	۳۱	[۲۳۴ ۳۶۱۶]	۵۱	[۱۶۱ ۳۸۶۴]	۷۱	[۴۹۶ ۳۹۳۹]
۱۲	[۵۱۶ ۳۶۸۵]	۳۲	[۳۴۲ ۳۴۵۳]	۵۲	[۲۶۹ ۳۳۴۹]	۷۲	[۱۲۶ ۳۸۶۱]
۱۳	[۵۴۵ ۳۵۶۳]	۳۳	[۲۶۸ ۳۹۳۳]	۵۳	[۶۴ ۳۹۴۹]	۷۳	[۴۵۸ ۳۳۹۵]
۱۴	[۵۷۹ ۳۹۵۶]	۳۴	[۵۰ ۳۹۸۳]	۵۴	[۸۸ ۳۸۱۷]	۷۴	[۱۲۲ ۳۵۰۴]
۱۵	[۵۶ ۳۹۱۴]	۳۵	[۱۶۰ ۳۶۲۲]	۵۵	[۶۲۸ ۳۶۵۵]	۷۵	[۲۴۵ ۳۵۵۳]
۱۶	[۲۶۶ ۳۶۹۶]	۳۶	[۸۲ ۳۴۰۴]	۵۶	[۶۳۷ ۳۷۱۵]	۷۶	[۴۱۷ ۳۷۸۳]
۱۷	[۱۷۳ ۳۷۴۵]	۳۷	[۱۲۲ ۳۵۰۲]	۵۷	[۳۸۳ ۳۴۸۸]	۷۷	[۵۲۰ ۳۴۲۱]
۱۸	[۵۳۳ ۳۷۲۱]	۳۸	[۱۶۰ ۳۶۰۲]	۵۸	[۳۹ ۳۶۳۶]	۷۸	[۵۴ ۳۸۱۱]
۱۹	[۲۸۷ ۳۴۶۸]	۳۹	[۲۷۸ ۳۷۲۶]	۵۹	[۱۵۶ ۳۹۷۲]	۷۹	[۶۱۹ ۳۴۰۱]
۲۰	[۶۰۷ ۳۵۳۰]	۴۰	[۳۳ ۳۵۰۴]	۶۰	[۲۳۵ ۳۶۹۴]	۸۰	[۵۱۷ ۳۷۶۶]

ضمیمه ۲. نتایج حل الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ترکیبی مثال عددی واقعی (زنجیره تامین عسل طبیعی)

جدول ۱۰. میزان جریان عبوری از تولید کننده i به مرکز توزیع (انبار)j

i \ j	تبریز	رشت	مشهد	اهواز	شیراز	تهران	کرمان	ساری	زاهدان	بندرعباس	خرم آباد	سنندج	اصفهان	یزد	ارومیه	بجنورد
بابل	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۷/۱۴۳	۳/۱۴۰	۰	۰	۲۱۸	۰	۰
خوی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵/۲۱۳	۷/۱۴۳	۰	۰	۹/۴۷	۰	۰	۰
ارسباران	۰	۰	۰	۰	۰	۵/۱۰۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹/۴۷	۰	۰	۰
تالش	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳/۱۴۰	۰	۹/۴۷	۲۱۸	۰	۰
رابر	۰	۰	۰	۷/۱۴۳	۰	۵/۱۰۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
اردبیل	۰	۰	۰	۱۴۳/۷	۰	۰	۰	۰	۵/۲۱۳	۰	۳/۱۴۰	۰	۹/۴۷	۰	۰	۰
اسفراین	۰	۰	۰	۱۴۳/۷	۰	۰	۰	۰	۰	۷/۱۴۳	۰	۰	۹/۴۷	۰	۰	۰
ایذه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹/۴۷	۰	۰	۰
بیرجند	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹/۴۷	۰	۰	۰
لالی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹/۴۷	۰	۰	۰
جم	۰	۰	۰	۰	۰	۵/۱۰۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
خاش	۰	۰	۰	۰	۰	۵/۱۰۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۹/۴۷	۰	۰	۰

جدول ۱۱. میزان جریان عبوری از مرکز توزیع (انبار)j به مشتری k توسط وسیله نقلیه v

مرکز توزیع	مشتری	وسیله نقلیه	میزان جریان عبوری
اهواز	۷۰	۳	۴۷
تهران	۳۰	۸	۳۳
زاهدان	۵۷	۱۲	۱۶۴
بندرعباس	۴۱	۱	۷۷
خرم آباد	۳	۷	۲۶
اصفهان	۷۶	۱۶	۱۶۳
یزد	۳۷	۲۰	۱۲۰

جدول ۱۲. تخصیص مرکز توزیع (انبار) j ام به تولید کننده i ام

i \ j	تبریز	رشت	مشهد	اهواز	شیراز	تهران	کرمان	ساری	زاهدان	بندرعباس	خرم آباد	سنندج	اصفهان	یزد	ارومیه	بجنورد
بابل	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰
خوی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰
ارسباران	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
تالش	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰
رابر	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
اردبیل	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰
اسفراین	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰
ایذه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
بیرجند	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
لالی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
جم	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
خاش	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰

جدول ۱۳. تخصیص وسیله نقلیه v ام به مرکز توزیع j

j \ v	وسیله نقلیه ۱	وسیله نقلیه ۲	وسیله نقلیه ۳	وسیله نقلیه ۴	وسیله نقلیه ۵	وسیله نقلیه ۶	وسیله نقلیه ۷	وسیله نقلیه ۸	وسیله نقلیه ۹	وسیله نقلیه ۱۰	وسیله نقلیه ۱۱	وسیله نقلیه ۱۲	وسیله نقلیه ۱۳	وسیله نقلیه ۱۴	وسیله نقلیه ۱۵	وسیله نقلیه ۱۶	وسیله نقلیه ۱۷	وسیله نقلیه ۱۸	وسیله نقلیه ۱۹	وسیله نقلیه ۲۰
اهواز	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
تهران	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
زاهدان	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بندرعباس	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
خرم آباد	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
اصفهان	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۱۴. تخصیص مشتری k ام به مرکز توزیع (انبار) j ام

مراکز توزیع	مشتریان تخصیص داده شده
تبریز	-
رشت	-
مشهد	-
اهواز	-۷۰ ۲۶ ۲۷- ۴۸- ۴۳- ۵۸- ۳۳- ۳۴- ۳۸- ۲۰- ۳۵- ۷۱- ۱- ۵۴- ۵۵- ۵۳- ۵۲-
شیراز	-
تهران	-۵۰ ۳۰
کرمان	-
ساری	-
زاهدان	۵۷-۵۶-۹-۶۴-۶۳-۱۱-۲۹-۲۸
بندرعباس	۴۱-۱۶-۲-۷۲-۳۹-۶۱-۲۱-۲۳-۲۴-۶۹-۴۹-۸
خرم آباد	۳
سنندج	-

اصفهان	۷۶-۷۷-۷۸-۶۲-۲۵-۴۲-۲۲-۶-۶۵-۳۱-۶۶-۶۷-۶۸-۱۷-۳۶-۵-۷۵-۷۴-۷۳-۵۹-۴۰-۱۲-۴-۸۰ -۴۷-۴۶-۱۰-۱۵-۷-۱۳-۱۴-۷۹-۶۰-۴۵-۳۲-۱۹-۱۸-۵۱-۴۴
یزد	۳۷
ارومیه	-
بجنورد	-

جدول ۱۵. میزان موجودی و کمبود مرکز توزیع j در پایان دوره (بر حسب تعداد کالا)

	تبریز	رشت	مشهد	اهواز	شیراز	تهران	کرمان	ساری	زاهدان	بندرعباس	خرم آباد	سنندج	اصفهان	یزد	ارومیه	بجنورد
موجودی	۰	۰	۰	۰	۰	۲۶۳	۰	۰	۰	۰	۳۹۵	۰	۰	۳۱۶	۰	۰
کمبود	۰	۰	۰	۱۱۷۲	۰	۰	۰	۰	۴۱۰	۹۱۱	۰	۰	۳۵۹۸	۰	۰	۰

جدول ۱۶. زمان رسیدن وسیله نقلیه v به مشتری k / زمان شروع خدمت به مشتری k با وسیله نقلیه v

مشتری	زمان	مشتری	زمان	مشتری	زمان	مشتری	زمان	مشتری	زمان
۱	۸/۶۹۷۵	۱۷	۹۳۶۲	۳۳	۴۰۱۸	۴۹	۸۱۲۲	۶۵	۴/۵۶۶۸
۲	۱۸۴۸	۱۸	۲/۲۱۵۸۰	۳۴	۴۲۱۶	۵۰	۸/۶۳۶	۶۶	۸/۷۵۶۱
۳	۵۸۱	۱۹	۶/۲۱۳۹۲	۳۵	۸/۵۳۵۲	۵۱	۴/۲۲۲۵۱	۶۷	۲/۷۹۳۷
۴	۲/۱۳۶۸۶	۲۰	۴/۴۸۷۹	۳۶	۹۷۴۳	۵۲	۶/۸۵۳۸	۶۸	۲/۸۱۴۸
۵	۶/۱۰۲۹۶	۲۱	۸/۵۱۹۷	۳۷	۳۵۴	۵۳	۸/۸۳۲۲	۶۹	۶/۶۷۳۴
۶	۸/۴۶۰۸	۲۲	۸/۴۰۸۴	۳۸	۲/۴۵۸۰	۵۴	۸/۸۰۰۵	۷۰	۹۱۵
۷	۲/۱۷۷۶۲	۲۳	۶/۵۵۱۹	۳۹	۲/۳۸۸۱	۵۵	۴/۸۱۴۱	۷۱	۴/۶۰۶۴
۸	۲/۹۱۲۸	۲۴	۶/۵۷۱۰	۴۰	۶/۱۲۵۵۸	۵۶	۴/۱۰۵۰	۷۲	۲۹۶۵
۹	۶/۱۷۶۷	۲۵	۸/۲۹۷۶	۴۱	۸۰۸	۵۷	۸۱۰	۷۳	۴/۱۱۵۲۸
۱۰	۱۷۰۰۳	۲۶	۲/۱۷۶۷	۴۲	۳۵۵۲	۵۸	۴/۳۴۹۵	۷۴	۴/۱۱۴۲۰
۱۱	۸/۴۰۷۴	۲۷	۲/۱۹۱۵	۴۳	۲/۳۱۶۰	۵۹	۴/۱۱۸۲۹	۷۵	۱۱۱۹۱
۱۲	۶/۱۳۱۸۴	۲۸	۲/۴۵۳۲	۴۴	۴/۲۲۸۵۴	۶۰	۸/۲۰۵۴۰	۷۶	۵۲۵
۱۳	۸/۱۸۵۳۹	۲۹	۴/۴۳۷۷	۴۵	۲۰۷۲۹	۶۱	۴/۴۴۳۸	۷۷	۸/۶۷۴
۱۴	۶/۱۹۱۰۲	۳۰	۶۲	۴۶	۴/۱۶۳۹۹	۶۲	۶/۲۳۹۴	۷۸	۱۱۸۷
۱۵	۱۷۳۷۸	۳۱	۶/۶۵۹۵	۴۷	۶/۱۶۲۰۶	۶۳	۳۰۵۵	۷۹	۶/۲۰۰۸۹
۱۶	۲/۱۴۶۴	۳۲	۶/۲۱۱۸۲	۴۸	۲۴۳۴	۶۴	۴/۲۷۳۸	۸۰	۸/۱۵۲۷۹

جدول ۱۷. میزان جریان عبوری از مشتری e به مشتری f توسط وسیله نقلیه v

از مشتری	به مشتری	وسیله نقلیه	میزان جریان عبوری	از مشتری	به مشتری	وسیله نقلیه	میزان جریان عبوری
۱	۵۴	۳	۳۱	۲	۷۲	۱	۱۲۷
۴	۸۰	۱۶	۱۸۳	۵	۷۵	۱۶	۱۵۹
۶	۶۵	۱۶	۱۵۲	۷	۱۳	۱۶	۱۶۳
۹	۶۴	۱۲	۱۲۱	۱۰	۱۵	۱۶	۱۳۷
۱۱	۲۹	۱۲	۱۱۳	۱۲	۴	۱۶	۱۵۶
۱۳	۱۴	۱۶	۸۵	۱۴	۷۹	۱۶	۱۰۷
۱۵	۷	۱۶	۵۱	۱۶	۲	۱	۱۵۵
۱۷	۳۶	۱۶	۱۴۱	۱۸	۵۱	۱۶	۵۰
۱۹	۱۸	۱۶	۱۵۷	۲۰	۳۵	۳	۸۱
۲۱	۲۳	۱	۱۴۵	۲۲	۶	۱۶	۲۱

۲۳	۲۴	۱	۱۶۰	۲۴	۶۹	۱	۲۹
۲۵	۴۲	۱۶	۶۸	۲۶	۲۷	۳	۱۲۸
۲۷	۴۸	۳	۱۱۲	۲۹	۲۸	۱۲	۷۰
۳۰	۵۰	۸	۱۳۰	۳۱	۶۶	۱۶	۱۶۴
۳۲	۱۹	۱۶	۱۳۶	۳۳	۳۴	۳	۷۲
۳۴	۳۸	۳	۵۷	۳۵	۷۱	۳	۱۴۴
۳۶	۵	۱۶	۱۰۹	۳۸	۲۰	۳	۱۶۴
۳۹	۶۱	۱	۱۲۹	۴۰	۱۲	۱۶	۱۶۶
۴۱	۱۶	۱	۲۸	۴۲	۲۲	۱۶	۶۱
۴۳	۵۸	۳	۶۱	۴۵	۳۲	۱۶	۴۹
۴۶	۱۰	۱۶	۱۶۵	۴۷	۴۶	۱۶	۸۶
۴۸	۴۳	۳	۱۳۲	۴۹	۸	۱	۹۵
۵۱	۴۴	۱۶	۱۳۷	۵۳	۵۲	۳	۱۱۷
۵۴	۵۵	۳	۲۴	۵۵	۵۳	۳	۱۱۳
۵۶	۹	۱۲	۱۶۳	۵۷	۵۶	۱۲	۸۷
۵۸	۳۳	۳	۵۰	۵۹	۴۰	۱۶	۱۰
۶۰	۴۵	۱۶	۳۶	۶۱	۲۱	۱	۱۱۳
۶۲	۲۵	۱۶	۱۱۷	۶۳	۱۱	۱۲	۳۱
۶۴	۶۳	۱۲	۸۸	۶۵	۳۱	۱۶	۱۲۲
۶۶	۶۷	۱۶	۹۵	۶۷	۶۸	۱۶	۲۸
۶۸	۱۷	۱۶	۷۵	۶۹	۴۹	۱	۱۲۲
۷۰	۲۶	۳	۱۳۰	۷۱	۱	۳	۱۴۰
۷۲	۳۹	۱	۱۶۲	۷۳	۵۹	۱۶	۱۰۲
۷۴	۷۳	۱۶	۱۴۰	۷۵	۷۴	۱۶	۴۵
۷۶	۷۷	۱۶	۱۳۷	۷۷	۷۸	۱۶	۸۹
۷۸	۶۲	۱۶	۴۷	۷۹	۶۰	۱۶	۴۲
۸۰	۴۷	۱۶	۷۸	-	-	-	-

پی‌نوشت

1. Toth
2. Vigo
3. Variale Neighborhood Search (VNS)
4. Non-dominating Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)
5. Simulated Annealing (SA)
6. Tabu Search (TS)
7. Brimberg
8. Mladenovi'c
9. Shaking
10. Local Search

مراجع

[1] Ghiani G, Laporte G, Musmanno R. Introduction to Logistics System Planning and Control, West Sussex, England, John Wiley & Sons Inc, resources Management Science, Vol. 44, (2004), pp. 859-877.

[2] Dantzig GB, Fulkerson DR. Minimizing the number of tankers to meet a fixed schedule, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 1, (1954), pp. 217-222.

[3] Dantzig GB, Ramser JH. The truck dispatching problem, Management Science, Vol. 6, (1959), pp. 80-91.

[4] Fisher M. The Lagrange relaxation method for solving integer programming problems, Management Science, Vol. 27, (1981), pp. 1-18.

[5] Laport G, Nobert Y. Exact algorithm for the vehicle routing problem, Surveys in Combination Oriel Optimization, Amsterdam, Vol. 132, (1987), pp. 147-184.

[6] Osvald A, Stirn LZ. A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food, Journal of Food Engineering, Vol. 85, (2008), pp. 285-295.

[7] Lysgaard J. The pyramidal capacitated vehicle routing problem, European Journal of Operational Research, Vol. 205, (2010), pp. 59-64.

[8] Mu Q, Eglese RW. Disrupted capacitated vehicle routing problem with order release delay, Annals of Operations Research, Vol. 207, (2013), pp. 201-216.

[9] Wu X, Ma S, Shi Y. Fuel consumption optimization for vehicle routing problem with time windows, Journal of Convergence Information Technology (JCIT), Vol. 3, (2011), pp. 332-337.

[10] Kuo Y, Wang CC. Optimizing the VRP by minimizing fuel consumption, An International Journal, Vol. 22, (2011), pp. 440-450.

[11] Aras N, Aksen D, Tuğrul Tekin M. Selective multi-depot vehicle routing problem with pricing, Transportation Research Part C, Vol. 19, (2011), pp. 866–884.

[12] Lei H, Laporte G, Guo B. The capacitated vehicle routing problem with stochastic demands and time windows, Computers & Operations Research, Vol. 38, (2011), pp. 1775–1783.

[13] Balakrishnan A, Ward J, Wong R. Integrated facility location and vehicle routing models: Recent work and future prospects, American Journal of Mathematical and Management Sciences, Vol. 7, (1987), pp. 35-61.

[14] Laporte G. Location-routing problems, .In B. Golden, & A. Assad (Eds.), Vehicle routing: Methods and studies, Amsterdam: North-Holland, (1988), pp. 163–198.

[15] Laporte G. A survey of algorithms for location-routing problems, Investigación Operativa, Vol. 1, (1989), pp. 93–123.

[16] Berman O, Jaillet P, Simchi-Levi D. Location-routing problems with uncertainty, In Z. Drezner (Ed.), Facility location: A survey of applications and methods, New York: Springer, (1995), pp. 427–452.

[17] Min H, Jayaraman V, Srivastava R. Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions, European Journal of Operational Research, Vol. 108, (1998), pp. 1-15.

[18] Nagy G, Salhi S. Location-routing: Issues, models and methods, European Journal of Operational Research, Vol. 177, (2007), pp. 649-672.

[19] Prodhon C, Prins C. A survey of recent research on location-routing problems, European Journal of Operational Research, Vol. 238, (2014), pp. 1-17.

[20] Martínez-Salazar IA, Molina J, Ángel-Bello F, Gómez T, Caballero R. Solving a bi-objective transportation location routing problem by metaheuristic algorithms, European Journal of Operational Research, Vol. 234, (2014), pp. 25–36.

[21] Hamidi M, Farahmand K, Sajjadi SR, Modeling a four-layer location routing problem, International Journal of Industrial Engineering Computations, Vol. 3, (2012), pp. 43–52.

[22] Hamidi M, Farahmand K, Sajjadi SR, Nygard K. A hybrid GRASP tabu search metaheuristic for a four-layer location-routing problem, International Journal of Logistics Systems and Management, Vol. 12, (2012), pp. 267–287, 2012.

[23] Hamidi M, Farahmand K, Sajjadi SR, Nygard K. A heuristic algorithm for a multi-product four-layer capacitated location-routing problem, International Journal of Industrial Engineering Computations, Vol. 5, (2014), pp. 87–100.

[24] Kuo Y, Wang CC. A variable neighborhood search for the multi-depot vehicle routing problem with loading cost, Expert Systems with Applications, Vol. 39, (2012), pp. 6949–6954.

[25] Xu Y, Wang L, Yang Y. A new variable neighborhood search algorithm for the multi - depot heterogeneous vehicle routing problem with time windows, Electronic Notes in Discrete Mathematics, Vol. 39, (2012), pp. 289–296.

[26] Salhi S, Imran A, Wassan NA. The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation, Computers & Operations Research, Vol. 52, (2014), pp. 315-325, 2014.

[27] Xu Y, Jiang W. An improved variable neighborhood search algorithm for multi-depot heterogeneous vehicle routing problem based on hybrid operators, International Journal of

Control and Automation, Vol. 7, (2014), pp. 299–316.

[28] Rodrigues Pereira Ramos T, Gomes MI, Barbosa-Póvoa AP. Economic and environmental concerns in planning recycle waste collection systems, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 62, (2014), pp. 34–54.

[29] Hsu CI, Hung SF, Li HC. Vehicle routing problem with time-windows for perishable food delivery, Journal of Food Engineering, Vol. 80, (2007), pp. 465–475.

[30] Bektas T, Laporte G. The Pollution-Routing Problem, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 45, (2011), pp. 1232–1250.

[31] Demir E, Bektas T, Laporte G. An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pollution-Routing Problem, European Journal of Operational Research, Vol. 223, (2012), pp. 346–359.

[32] Jemai J, Zekri M, Mellouli K. An NSGA-II algorithm for the green vehicle routing problem, Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7245, (2012), pp. 37-48.

[33] Kopfer H, Schönberger J, Kopfer H. Reducing greenhouse gases emissions of a heterogeneous vehicle fleet, Flexible Services and Manufacturing Journal, Vol. 26, (2013), pp. 221-248.

[34] Xiao Y, Zhao Q, Kaku I, Xu Y. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem, Computers & Operations Research, Vol. 39, (2012), pp. 1419–1431.

[35] Chaabane A, Ramudhin A, Paquet M. Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme, International Journal of Production Economics, Vol. 135, (2012), pp. 37-49.