نشریه علمی «مدیریت زنجیره تامین»
سال بیست و چهارم، شماره ۷۵، تابستان ۱۴۰۱؛ ص ۱۲- ۱
علمی – پژوهشی

حل یک مسئله حمل‌ونقل مکان‌یابی– مسیریابی با در نظر گرفتن مسیرهای حمل سبز با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری

سیدمحمدتقی فاطمی قمی[1*]، بهاره عسگریان[2]
۱- استاد،۲- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
(دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲)

چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائل پیش روی شرکت‌های توزیع کالا، طراحی و تحلیل شبکه توزیع است. امروزه به دلیل آلودگی بیش‌ازحد محیط‌زیست اتخاذ تصمیم‌های بهینه برای کاهش انتشار گازهای آلاینده اهمیت یافته است. در این پژوهش، سعی بر آن است تا با ارائه مدلی به مکان‌یابی مناسب مراکز توزیع و مسیریابی وسایل نقلیه از این مراکز جهت سرویس‌دهی به مشتریان پرداخته شود. هدف این پژوهش کاهش هزینه‌های توزیع و مصرف سوخت و به‌تبع آن کاهش انتشار آلاینده کربن‌دی‌اکسید است. همچنین تلاش بر این بوده که با متعادل‌سازی بار کاری در هریک از مسیرها رضایتمندی رانندگان ناوگان حمل‌ونقل افزایش یابد. در ابتدا یک مدل ریاضی برای مسئله موردبررسی پیشنهاد شده و بعد از خطی‌سازی مدل پیشنهادی، این مدل در اندازه کوچک صحه‌گذاری شده است. به‌علاوه با توجه به ماهیت سخت مسئله، برای حل مدل در ابعاد بزرگ، یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مورداستفاده قرار گرفته است. شایان‌ذکر است به دلیل دست‌یابی به جواب‌های بهتر مسئله مکان‌یابی تسهیلات و مسیرهای توزیع کالا به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده است. در انتها نیز عملکرد الگوریتم با معرفی ۴ شاخص مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج عددی گزارش شده است. این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی کارایی لازم برای تولید جواب‌های پارتو باکیفیت را دارا می‌باشد که این جواب‌ها به‌صورت یکنواخت در فضای جواب مسئله پراکنده شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی تسهیلات، مسئله مکان‌یابی- مسیریابی، انتشار آلاینده، مسئله چندهدفه، توزیع کالا.

۱- مقدمه

بدون شک در دنیای امروز، محدود بودن منابع و افزایش تقاضا، باعث شده که بیشتر شرکت‌ها برای استفاده کارآمد از منابع خود به دنبال کاهش هزینه و افزایش بهره‌وری باشند و سازمان‌ها بر اساس این دو موضوع اتخاذ تصمیم نمایند. حمل‌ونقل و طراحی شبکه توزیع یکی از قدم‌های اساسی در ساخت یک زنجیره تأمین کارآمد و انعطاف‌پذیر است که توجه به آن می‌تواند در افزایش سهم بازار، کاهش قیمت و افزایش سودآوری شرکت‌ها نقش مهمی را ایفا کند. تحقیقات نشان می‌دهد ۳۰ درصد قیمت یک کالا به سیستم توزیع آن برمی‌گردد [۱].

مسئله مکان‌یابی شامل تعدادی سایت بالقوه جهت فعال‌سازی و تعدادی نقطه بالقوه جهت احداث این سایت‌ها و تسهیلات می‌باشد و هدف آن تعیین زیرمجموعه‌ای از سایت‌ها برای فعال‌سازی است به‌گونه‌ای که مجموع فواصل هر نقطه تقاضا از نزدیک‌ترین سایت به‌علاوه مجموع هزینه‌های فعال‌سازی این سایت‌ها حداقل شود. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه شامل تعدادی وسیله نقلیه مستقر در مرکز و تعدادی مشتری با تقاضای مشخص می‌باشد. هدف تعیین مسیر برای گروهی از این وسایل نقلیه است به‌گونه‌ای که هر وسیله از یک مسیر استفاده و تقاضای تمام مشتریان مسیر خود را برآورده کرده و در پایان به مرکز بازگردد. در نهایت نیز هزینه‌های استفاده از وسایل نقلیه و حمل‌ونقل می‌بایست حداقل شود. پرواضح است که اگر در این بررسی تنها از یک مسیر استفاده شود، مسئله فروشنده دوره‌گرد را خواهیم داشت.

به‌طورکلی مسئله مکان‌یابی مسیریابی وسایل نقلیه[1]، تعمیم‌یافته مسئله مسیریابی است که در آن مسئله مکان‌یابی نیز لحاظ گردیده و بدین‌صورت تعریف می‌شود: «از کل سایت‌های بالقوه، زیرمجموعه‌ای از سایت‌ها انتخاب و فعال شده و تعدادی از مشتریان به آن سایت‌ها تخصیص داده می‌شود. به‌علاوه و

* رایانامه نویسنده مسئول: fatemi@aut.ac.ir
[1] Vehicle routing problem

به‌صورت هم‌زمان مسیر وسایل نقلیه نیز به‌گونه‌ای تعیین می‌گردد که مجموع تقاضاها روی وسایل نقلیه و سایت‌ها متجاوز از ظرفیت آن‌ها نباشد. این وسایل از نقطه شروع حرکت کرده و در پایان مسیر به نقطه شروع بازمی‌گردند. همچنین هر مشتری توسط یک وسیله نقلیه سرویس‌دهی می‌شود. هدف این تصمیمات، حداقل کردن مجموع کل هزینه‌های فعال‌سازی سایت‌ها، استفاده از وسایل نقلیه و حمل‌ونقل می‌باشد به‌گونه‌ای که تقاضای هر مشتری ارضا شود» [۲].

در این پژوهش سعی بر این بوده است که با ارائه یک مدل جدید ریاضی برای مسئله مکان‌یابی مسیریابی[1] ابعاد جدیدتری از این مسئله موردبررسی قرار گیرد. همچنین با در نظرگیری مسیرهای سبز در شبکه سرویس‌دهی به مشتریان تلاش شده است معیارهای زیست‌محیطی نیز موردتوجه قرار گیرد. لازم به ذکر است در این پژوهش توزیع عادلانه بار کاری به‌عنوان یکی از معیارهای ارزیابی در نظر گرفته شده است. برای نزدیک‌سازی مسئله به شرایط دنیای واقعی ناوگان حمل‌ونقل به‌صورت ناهمگون و با ظرفیت‌های مختلف برای سرویس‌دهی به مشتریان فرض شده است. با توجه به دانش نویسندگان در نظرگیری هم‌زمان این موارد کمتر موردتوجه پژوهشگران بوده و در حقیقت مسئله پیشنهادی در این مقاله می‌تواند کاربردهای مهمی در دنیای واقعی داشته باشد. به‌عنوان مثال امروزه شرکت‌های فروش اینترنتی نقش مهمی در تأمین نیازهای مردم ایفا می‌کنند. در حقیقت وظیفه اصلی این شرکت‌ها دریافت کالا از فروشنده و توزیع کالا بین درخواست‌کنندگان این کالا است. به‌طور معمول این شرکت‌ها دارای انبارهای مرکزی بوده که کالا از این انبارها به سمت مشتریان ارسال می‌گردد؛ بنابراین پیدا کردن موقعیت مناسب جهت احداث انبار یا توسعه انبارهای فعلی تأثیر بسیار زیادی در هزینه‌های شرکت و افزایش رضایت‌مندی مشتریان از طریق سرویس‌دهی در زمان مناسب خواهد داشت.

در نهایت، مقاله دارای ساختار زیر است: در بخش ۲ پیشینه پژوهش مورد تحلیل قرار می‌گیرد. مدل ریاضی در بخش ۳ ارائه شده است. در بخش ۴ خطی‌سازی مدل و صحه‌گذاری بر مدل پیشنهادی موردتوجه قرار گرفته است. روش حل در بخش ۵ توضیح داده شده و همچنین در این بخش تنظیم پارامترهای مهم الگوریتم بررسی شده است. نتایج عددی در بخش ۶ ارائه و نهایتاً بخش ۷ به جمع‌بندی و ارائه پیشنهادها برای پروژه‌های آتی اختصاص یافته است.

[1] Location Routing Problem

۲- مرور ادبیات

ایده ترکیب مسائل مکان‌یابی و مسیریابی وسایل نقلیه قدمتی نزدیک به پنجاه سال دارد. در آن هنگام، واتسون و دوهرن [۳] وابستگی درونی این دو مسئله را برجسته نمودند؛ اما در آن مقطع زمانی کامپیوتر و ابزارهای محاسباتی در مدل‌سازی و بهینه‌سازی این دسته از مسائل توسعه چندانی نیافته بود. لذا مدل ارائه شده مدل بسیار ساده و ابعاد مسئله تحت بررسی بسیار کوچک و ابتدایی بود. چندین سال بعد، سالهی و راند [۴] نشان دادند درصورتی‌که برای حل مسئله مکان‌یابی انبار، مسیرهای جابجایی وسایل نقلیه نادیده گرفته شوند، ممکن است افزایش قابل‌توجهی در هزینه‌های سیستم‌های توزیع ایجاد شود. آن‌ها این موضوع را با انجام آزمایش‌های مختلف نشان دادند؛ ولیکن به دلیل محدودیت‌های محاسباتی که داشتند صرفاً مسائل با محدودیت‌های ساده توسط ایشان بررسی شد. علی‌رغم این محدودیت‌ها نتیجه‌گیری به‌دست‌آمده در این مقاله آغازگر نگاه متفاوت به مسئله مکان‌یابی و مسیریابی بود.

اوزیورد و آکسن [۵] برای حل مسئله مکان‌یابی مسیریابی یک سطحی روشی ابتکاری بر مبنای شاخه و کران، جستجوی ممنوعه و آزادسازی لاگرانژ ارائه نمودند. روش ارائه شده توسط ایشان بسیار نوآورانه بود. ازاین‌جهت که آن‌ها روش‌های حل دقیق و تقریبی را ترکیب کرده و در مسئله خود مورداستفاده قرار دادند. بااین‌وجود مفروضات موجود در مسئله پیشنهادی آن‌ها نیز ساده‌تر از مسائلی بود که در دنیای واقعی با آن‌ها روبه‌رو هستیم. ازاین‌رو رییک و همکاران [۶] یک گام فراتر نهاده و مدلی ارائه کردند که در آن مسئله مکان‌یابی مسیریابی با در نظر گرفتن ظرفیت محدود بررسی شده است. در این مقاله، تقاضای مشتریان باید به‌طور کامل پاسخ داده شود و همچنین نباید بیشتر از ظرفیت وسایل نقلیه، کالا به آن تخصیص یابد. نوآوری دیگر این مقاله این بود که آن‌ها در کنار کاهش هزینه‌های مسیریابی هزینه‌های عملیاتی را نیز کاهش می‌دادند. در حقیقت در نظرگیری ظرفیت محدود برای وسایل نقلیه یک گام روبه‌جلو در نزدیک کردن مسئله به مسائل موجود در دنیای واقعی بود.

در ادامه و با توسعه روش‌های نوین و تقریبی توجه پژوهشگران به استفاده از این الگوریتم‌ها بیشتر از پیش گردید. در همین راستا، نگوین و همکاران [۷] از الگوریتم جستجوی تصادفی حریصانه تطابقی[2] (GRASP) و فرایند یادگیری برای حل مسئله مکان‌یابی مسیریابی با در نظر گرفتن ظرفیت[3]

[2] Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
[3] Capacitated Location Routing Problem

(CLRP) در دو سطح استفاده کرده‌اند. به‌علاوه آن‌ها مسئله مکان‌یابی مسیریابی را با استفاده از روشی مبتنی بر الگوریتم جستجوی همسایگی تکرارشونده حل نمودند و جواب‌های پژوهش پیشین را بهبود دادند.

مسئله مکان‌یابی مسیریابی در بخش‌های مختلفی قابل‌استفاده می‌باشند. به‌عنوان مثال یکی از کاربردهای این دست از مسائل در طراحی شبکه‌های امداد برای افراد حادثه‌دیده است. یرات و گتجاهر [۸] مسئله طراحی یک سیستم تأمین با انبار میانی برای توزیع کالاهای امدادی برای افراد حادثه‌دیده را ارائه کرده‌اند. مسئله موردنظر آن‌ها سه هدفه بوده که شامل توابع هدف اقتصادی میان‌مدت، اقتصادی کوتاه‌مدت و بشردوستانه است. آن‌ها بعد از نشان دادن تناقض میان اهداف معرفی شده، مسئله را با استفاده از یک روش ریاضی ابتکاری حل نمودند. ولی چون الگوریتم ابتکاری پیشنهادی خاص این مسئله بود در موارد مشابه کاربرد ندارد و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری به‌مانند الگوریتمی که در مقاله جاری ارائه شده می‌تواند این مشکل را برطرف نماید.

اخیراً الگوریتم‌های ترکیبی شبیه‌سازی و فراابتکاری موردتوجه محققین برای حل مسائل بهینه‌سازی قرار گرفته است. رودریگز و همکاران [۹] یک الگوریتم ترکیبی متشکل از شبیه‌سازی تصادفی و یک رویکرد جستجوی محلی برای حل مسئله مکان‌یابی مسیریابی با ظرفیت محدود پویا با تقاضای فازی را ارائه نموده‌اند. در نظرگیری عدم قطعیت در تقاضا یکی دیگر از نوآوری‌های اصلی این مسئله بود. حال آن‌که محققین به‌طور شفاف دلیل استفاده از عدم قطعیت از نوع فازی را در پژوهش خود بیان نکردند.

در مقاله‌ای دیگر و به‌منظور نزدیک کردن مسئله به دنیای واقعی، میاندوآبچی و فراهانی [۱۰] مفهوم ظرفیت را در برخی از مسائل مسیریابی، به‌صورت ظرفیت جاده‌ای در نظر گرفته‌اند. به کمک این مسئله تنظیم جهت خیابان و اضافه کردن خیابان‌های جدید در شبکه جاده‌های شهری بر اساس مفهوم ظرفیت محدود حمل‌ونقل موردبررسی بوده است. در شرایطی که در دنیای واقعی با مسائل مهمی مانند ترافیک مسیرها و مسائل زیست‌محیطی مواجه هستیم، ارائه این مقاله یک قدم روبه‌جلو در جهت در نظرگیری این نوع محدودیت‌ها در مسائل مسیریابی بود. حال آنکه پژوهشگران می‌توانند آن را به مسائل مکان‌یابی مسیریابی نیز تعمیم دهند.

اخیراً، مارتینز و همکاران [۱۱] مسئله حمل‌ونقل مکان‌یابی مسیریابی[1] (TLRP) را به‌عنوان یک توسعه از مسئله مکان‌یابی مسیریابی معرفی کردند. در مقاله ایشان مسئله حمل‌ونقل از کارخانه به انبارهای میانی نیز در نظر گرفته شده بود که در کارهای قبلی کمتر بررسی می‌شد. مدل پیشنهادی آن‌ها دارای دو تابع هدف بود که شامل کاهش هزینه‌های توزیع و توازن حجم کار برای وسایل نقلیه می‌شد. آن‌ها برای حل مسئله نیز از ترکیب دو الگوریتم جستجوی پراکنده تابو[2] و الگوریتم ژنتیک چندهدفه بر مبنای ناچیرگی[3] استفاده کرده‌اند. لازم به ذکر است در این مسئله کل ناوگان حمل‌ونقل مشابه در نظر گرفته شده بود ولی در مسائل دنیای واقعی این مورد چندان صادق نیست. در مسائل مکان‌یابی مسیریابی با ظرفیت محدود، به تفاوت ظرفیت وسایل نقلیه کمتر پرداخته شده است. با توجه به دانش نویسندگان، تنها پردودون و پرینس [۱۲] و ناگای و سالهی [۱۳] در مقالات مروری خود جزئیات بیشتری در مسائل مکان‌یابی مسیریابی با عنایت به نکته فوق ارائه داده‌اند.

مسائل مکان‌یابی مسیریابی از زاویه‌های دیگر نیز قابل‌بررسی است. بالأخص که اهداف زیست‌محیطی در سال‌های اخیر توجه دانشمندان و سازمان‌های دولتی و خصوصی را به خود جلب کرده است. در پژوهش فرخی اصل و همکاران [۱۴] تغییرات آب‌وهوا، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های جهانی مربوط به آلودگی محیط‌زیست، مطرح شده است. بخش عمده‌ای از این تغییرات ناشی از تولید گازهای گلخانه‌ای CO_2، متان و دیگر گازهای گلخانه‌ای است. پارک و لیم [۱۵]، مارتینز و همکاران [۱۱] و سوینتون [۱۶] در پژوهش‌های خود به برآورد قیمت سایه آلاینده‌های مختلف مانند دی‌اکسید گوگرد ناشی از تولید لوازم الکتریکی، CO_2 منتشرشده از نیروگاه‌های برقی در کشور کره و ضایعات ناشی از صنایع تولید سرامیک در کشور اسپانیا پرداخته‌اند. در تمامی این پژوهش‌ها و موارد مشابه، یک یا چند تابع هدف به مسائل زیست‌محیطی پرداخته است. معیاری که معمولاً نشان‌دهنده توجه به مسائل زیست‌محیطی بوده، میزان انتشار آلاینده کربن‌دی‌اکسید است که با فرمول‌های مختلفی قابل‌محاسبه است. در مواردی هم که ماهیت تسهیلات موردبررسی نامطلوب است، سعی بر این بوده که این تسهیلات حتی‌الامکان از مراکز شهری دور گردند. سبیهی و ایگلس [۱] در مقاله خود، پژوهش‌های مختلفی در حوزه حمل‌ونقل سبز را ارائه دادند که در آن به اندازه‌گیری اثرات زیست‌محیطی روش‌های

[1] Transportation Location Routing Problem
[2] Tabu Search
[3] Non-Dominated Search Genetic Algorithm

مختلف توزیع کالا، کاهش مصرف انرژی، مدیریت دفع زباله در کنار کاهش هزینه‌های توزیع، پرداخته‌اند. در مقاله جدیدی نیز، معنوی‌زاده و همکاران [۱۷] در پژوهشی به بررسی تأثیر مصرف سوخت در مسیرهای مختلف پرداخته و مدل‌های مختلف را موردبررسی قرار دادند. همچنین در مسئله آن‌ها، ناوگان حمل‌ونقل در نظر گرفته شده امکان سوخت‌گیری انواع مختلف سوخت را دارا می‌باشد. بدین معنی که ناوگان حمل‌ونقل مورداستفاده دوگانه‌سوز می‌باشند. آن‌ها نشان دادند که اضافه کردن چنین وسایل نقلیه‌ای به ناوگان حمل‌ونقل باعث افزایش سودآوری سازمان در درازمدت خواهد شد. همچنین سلیمی فرد و همکاران [۱۸] در مسائل مسیریابی وسایل نقلیه به‌صورت مستقیم اثرات زیست‌محیطی را در توابع هدف خود در نظر گرفته‌اند. رویکرد اصلی آن‌ها در این مقاله توسعه یک روش تحقیق در عملیات جهت بهینه‌سازی مسئله بود. آن‌ها توانستند الگوریتم کارا برای حل اسن مسئله ارائه نمایند که در مقایسه با الگوریتم‌های قبلی مورداستفاده عملکرد بهتری داشت. بکتاش و لاپورته [۱۹] مسئله مسیریابی را با توجه به آلاینده‌ها به‌عنوان توسعه‌ای از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه کلاسیک توسعه دادند که در آن آلاینده‌ها موردتوجه اساسی قرار گرفته است. فرمول ارائه شده در این مقاله جهت محاسبه گازهای آلاینده منتشرشده در مقالات متعددی مورداستفاده بوده است. به‌علاوه، اردوگان و میلر-هوکس [۲۰] مدلی برای حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با توجه به حمل‌ونقل سبز و وسایل نقلیه متفاوت ارائه نمودند. در این بررسی وسایل نقلیه در میزان حجم منبع سوخت با یکدیگر متفاوت هستند و تعداد محدودی مکان برای سوخت‌گیری در هر مسیر وجود دارد. این مفروضات باعث ایجاد تفاوت بین این مقاله و مقالات قبلی گردید. اخیراً نیز، فرخی اصل و همکاران [۲۱] در مقاله‌ای از یک مدل مکان‌یابی مسیریابی استفاده کردند که مفاهیم مربوط به امنیت، محیط‌زیست و سلامت را با مفاهیم موجود در تحقیق در عملیات ترکیب کرده و از آن در حوزه مدیریت پسماند استفاده نمودند؛ لذا می‌توان به این نتیجه رسید که مدل‌های مکان‌یابی مسیریابی نه‌تنها در حوزه توزیع کالا و خدمات بلکه در لجستیک معکوس و جمع‌آوری ضایعات نقش اساسی را دارا می‌باشند. در مقاله جدیدی که توسط شولیچاه و همکارانش [۲۲] ارائه شده است، نویسندگان به بررسی میزان کربن دی‌اکسید تولیدشده در طبیعت در مدل مکان‌یابی مسیریابی پرداخته‌اند. بدین منظور مدل ریاضی توسط آن‌ها ارائه شده که تابع هدف آن کاهش این آلاینده می‌باشد. در نهایت نیز مدل پیشنهادی بر روی یک مورد واقعی در جاوا اندونزی پیاده‌سازی شده و نتایج گزارش شده است.

در نهایت و با توجه به مقالات بررسی شده در بخش مرور ادبیات مشخص می‌گردد که توجه به مسئله مکان‌یابی مسیریابی سبز کمتر از سایر حوزه‌های مرتبط می‌باشد. لذا در پژوهش جاری سعی بر این بوده است که یک مدل جدید ریاضی برای این مسئله ارائه شود. همچنین در این پژوهش توزیع عادلانه بارکاری به‌عنوان یکی از معیارهای ارزیابی در نظر گرفته شده است که در کمتر کاری در ادبیات موضوع به آن پرداخته شده است. فرض ناهمگون بودن ناوگان حمل‌ونقل نیز برای نزدیک سازی مسئله به شرایط دنیای واقعی به مدل‌های قبلی اضافه شده است.

۳- تعریف مسئله

در این مقاله، مسئله مکان‌یابی مسیریابی با در نظر گرفتن ظرفیت محدود وسایل نقلیه و با هدف کاهش انتشار آلاینده کربن‌دی‌اکسید ارائه می‌شود. ناوگان حمل‌ونقل در این مسئله به‌صورت ناهمگن است، به‌عبارت‌دیگر ظرفیت وسایل نقلیه با یکدیگر متفاوت می‌باشد. محصول تولیدشده از کارخانه‌ها توسط وسایل نقلیه به مراکز توزیع انتقال داده شده و محصول از طریق مراکز توزیع به دست مشتریان می‌رسد. این مسئله بدین گونه تعریف می‌شود که تعدادی نقاط کاندید برای استقرار مراکز توزیع وجود دارد. مکان و میزان تقاضای هر مشتری نیز از قبل مشخص است. هر مشتری به یک مرکز توزیع با ظرفیت محدود اختصاص داده می‌شود. کالای موردنیاز مشتریان توسط وسایل نقلیه ناهمگن که ظرفیت‌های محدود و متفاوتی دارند، تأمین می‌گردد. هر سفر از یک مرکز توزیع شروع شده و پس از چند مشتری در همان نقطه خاتمه می‌یابد. در این مدل، هزینه ثابتی برای استقرار هر مرکز توزیع در مکان کاندید و همچنین برای استفاده از هر وسیله نقلیه در تابع هدف در نظر گرفته شده است. این هزینه ثابت به‌گونه‌ای است که با افزایش ظرفیت وسیله نقلیه افزایش می‌یابد. تابع هدف هزینه مسیریابی را نیز در برمی‌گیرد. لازم به ذکر است که با تولید محصول و حرکت وسایل نقلیه مقداری CO_2 تولید می‌شود. هدف اصلی این مقاله تعیین مکان مراکز توزیع مستقرشده در نقاط کاندید و مسیرهای تخصیص‌یافته به هر مرکز توزیع است. مفروضات مسئله به شرح زیر است:

- تقاضای تمام مشتریان برآورده می‌شود.
- مسئله تک‌محصولی است.
- هر مشتری یک‌بار و تنها توسط یک وسیله نقلیه به‌طور کامل سرویس‌دهی می‌شود.

- هزینه استفاده از وسیله نقلیه‌ای که ظرفیت بالایی دارند بیشتر از هزینه استفاده از وسیله نقلیه با ظرفیت کمتر است.
- وسایل نقلیه‌ای که محصول را از کارخانه‌ها به مراکز توزیع انتقال می‌دهند با وسایل نقلیه‌ای که محصول را از مراکز توزیع به مشتریان انتقال می‌دهند، متفاوت هستند. هر دو ناوگان حمل‌ونقل ناهمگن هستند.
- مجموع میزان تقاضای تمامی مشتریانی که در یک سفر قرار دارند باید کمتر یا مساوی ظرفیت وسیله نقلیه تخصیص‌یافته به آن سفر باشد.
- میزان کربن‌دی‌اکسید انتشاریافته بر اساس واحد مسافت طی شده توسط وسیله نقلیه محاسبه می‌شود.

مدل پیشنهادی سه تابع هدف به شرح زیر دارد:

۱- کاهش هزینه‌های تولید، توزیع محصول و احداث مراکز توزیع

۲- متعادل‌سازی مسیرهای هر سفر

۳- کاهش میزان تولید و انتشار کربن‌دی‌اکسید

۳-۱- مجموعه‌ها و پارامترهای مسئله

$k = \{1,2,...,K\}$: مجموعه کارخانه‌ها

$j = \{1,2,...,J\}$: مجموعه مراکز بالقوه توزیع

$l = \{1,2,...,L\}$: مجموعه وسایل نقلیه‌ای که بین مراکز توزیع و گره‌ها جابجا می‌شوند

$i,i' = \{1,2,...,I\}$: مجموعه گره‌ها یا مشتریان

K: تعداد کارخانه‌ها

PP_k: ظرفیت تولید کارخانه k

J: تعداد مکان بالقوه احداث مراکز توزیع

L : تعداد وسایل نقلیه برای جابجایی کالا از مراکز توزیع به گره‌ها

N: تعداد وسایل نقلیه برای جابجایی کالا از کارخانه‌ها به مراکز توزیع

I: تعداد مشتریان

d_{kj} : هزینه ارسال وسیله نقلیه از کارخانه k به مرکز توزیع j

R: ظرفیت وسیله نقلیه‌ای که کالا را از کارخانه به مراکز توزیع جابجا می‌کنند.

g_j: هزینه احداث مرکز توزیع j

Co_k: هزینه تولید هر واحد محصول در کارخانه k

b_j: ظرفیت مرکز توزیع j

h_i: تقاضای گره i

$C_{ii'}$: هزینه سفر از مشتری i به مشتری i' در مسیر حرکت وسیله نقلیه

Cs_i: هزینه سفر به مشتری i به‌عنوان اولین مشتری (از انبار به اولین گره)

Cei: هزینه سفر به مشتری i به‌عنوان آخرین مشتری (از آخرین گره مسیر به انبار)

Q_l : ظرفیت وسیله نقلیه نوع l برای جابجایی کالا از مراکز توزیع و تحویل آن به مشتریان

$\tau_{ii'}$: فاصله مکان استقرار مشتری i و مشتری i'

τz_{ij} : فاصله مکان استقرار مشتری i و مرکز توزیع j

T_l داکثر مسافتی که وسیله نقلیه نوع l می‌تواند طی کند.

O_k: میزان CO_2 انتشاریافته به ازای تولید هر واحد محصول توسط کارخانه k

o_j: میزان CO_2 انتشاریافته به ازای جابجایی هر واحد مسافت وسیله نقلیه نوع j

۳-۲- متغیرهای تصمیم

P_k: میزان محصول تولیدشده توسط کارخانه k

v_{kj}: مقدار کالای ارسال‌شده از کارخانه k به مرکز توزیع j

w_{kj}: تعداد وسایل نقلیه فرستاده‌شده از کارخانه k به مرکز توزیع j

$$= y_j \begin{cases} \text{در صورتی که مرکز توزیع در نقطه } j \text{ام احداث شود} \\ \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$= z_{ij} \begin{cases} 1 & \text{در صورتی که مشتری } i \text{ از مرکز توزیع } j \text{ سرویس بگیرد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$= B_{lj} \begin{cases} 1 & \text{در صورتی که وسیله نقلیه } l \text{ به مرکز توزیع } j \text{ تخصیص داده شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$= X_{0i}^{(l)} \begin{cases} 1 & \text{در صورتی که مشتری } i \text{ اولین سرویس گیرنده } l \text{ باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$= X_{i0}^{(l)} \begin{cases} 1 & \text{در صورتی که مشتری } i \text{ آخرین سرویس گیرنده } l \text{ باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$= X_{ii'}^{(l)}$ $\begin{cases} 1 & \text{در صورتی که مشتری } i' \text{ بعد از مشتری } i \text{ سرویس گیرنده } l \text{ باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

S_{li}: مسافت طی شده تا گره i ام توسط وسیله نقلیه l

u_{il}: مجموع بار تحویل داده شده توسط وسیله نقلیه l ام بعد از تحویل سفارش مشتری i

e_{il}: مقدار مسافتی که وسیله نقلیه l تا تحویل سفارش مشتری iام طی کرده است

$L_{(max)}$: طولانی‌ترین مسیر طی شده توسط تمام وسیله نقلیه

$L_{(min)}$: کوتاه‌ترین مسیر طی شده توسط تمام وسیله نقلیه

W_l: طولانی‌ترین مسیر طی شده توسط وسیله نقلیه l ام

۳-۳- توابع هدف

در تابع هدف اول، رابطه (۱)، هدف مینیمم کردن هزینه‌ها است. بخش اول رابطه هزینه‌های ارسال کالا از کارخانه‌ها به مراکز توزیع محاسبه شده است. بخش دوم هزینه‌های فعال بودن مراکز توزیع می‌باشد. بخش سوم نیز هزینه‌های ارسال کالا به گره i ام به‌عنوان اولین و یا آخرین گره است. بخش چهارم هزینه‌های ارسال کالا بین گره‌ها و در نهایت بخش پنجم تابع هدف هزینه‌های تولید محصولات در کارخانه‌ها است.

تابع هدف دوم، رابطه (۲)، مسافت طی شده توسط هریک از وسایل نقلیه را متعادل می‌کند. به عبارتی زمانی که فاصله بین کمترین و بیشترین طول مسیر کاهش می‌یابد، منجر به توزیع عادلانه‌تر بارکاری (طول مسیر) بین وسایل نقلیه خواهد شد. در حقیقت هدف اصلی از این تابع هدف توزیع متعادل بارکاری بین ناوگان حمل‌ونقل است که در نهایت می‌تواند به افزایش رضایتمندی رانندگان وسایل نقلیه منجر شود.

تابع هدف سوم، رابطه (۳)، انتشار آلاینده کربن دی‌اکسید توسط وسایل نقلیه و کارخانه‌ها را کاهش می‌دهد. این تابع وزن گاز کربن دی‌اکسید تولیدشده در طول مسیرها را موردمحاسبه قرار می‌دهد. لازم به ذکر است که به دلیل متفاوت بودن واحدهای تابع هدف اول (هزینه)، دوم (مسافت) و سوم (وزن) و همچنین تناقض موجود بین این توابع هدف امکان یکی کردن آن‌ها وجود ندارد. بدیهی است رسیدن به کمترین طول مسیرها لزوماً به معنای کمترین فاصله بین ماکزیمم و مینیمم طول مسیرها نیست و اینکه ممکن است مسیری که دارای مسیر کوتاه‌تری است بنا به برخی دلایل زیست‌محیطی کمترین خطر را برای محیط‌زیست نداشته باشد.

$$Min\ f1 = \sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} d_{kj}w_{kj} + \sum_{j=1}^{J} y_j g_j + \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}(Cs_i X_{0i}^{(j)} + Ce_i X_{i0}^{(j)}) + \sum_{i=1}^{I}\sum_{i\prime=1}^{I}\sum_{l=1} c_{ii\prime}\, x_{ii\prime}^{(l)} + \sum_{k=1}^{K} Co_k P_k \quad (۱)$$

$$Min\ f2 = L_{(max)} - L_{(min)} \quad (۲)$$

$$Min\ f3 = \sum_{i\prime=1}^{I}\sum_{i=1}^{I}\sum_{l=1}^{L}\sum_{j=1}^{J} X_{ii\prime}{}^{l}.\tau_{il}.o_l.B_{lj} + \sum_{k=1}^{K} O_k.P_k \quad (۳)$$

۴-۳- محدودیت‌ها

$$\sum_{j=1}^{J} v_{kj} \le P_k \quad \forall k \quad (۴)$$

$$w_{kj} \ge \frac{v_{kj}}{R} \quad \forall k.j \quad (۵)$$

$$\sum_{k=1}^{K} v_{kj} \le b_j y_j \quad \forall j \quad (۶)$$

$$\sum_{k=1}^{K} v_{kj} \ge \sum_{i=1}^{I} h_i z_{ij} \quad \forall j \quad (۷)$$

$$\sum_{j=1}^{J} z_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (۸)$$

$$\sum_{i=1}^{I} X_{i0}^{(l)} = \sum_{i=1}^{I} X_{0i}^{(l)} \quad \forall j \quad (۹)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i\neq i\prime}}^{I} X_{ii\prime}^{(l)} = z_{i\prime j} \quad \forall j.i'.l \quad (۱۰)$$

$$\sum_{\substack{i'=1 \\ i\neq i'}}^{I} X_{ii'}{}^{(l)} = z_{ii'} \qquad \forall j\,.i.l \qquad (۱۱)$$

$$u_{il} - u_{i'l} + Q_l \sum_{l=1}^{L} X_{ii'}{}^{(l)}\,.\,B_{lj} \leq Q_l - h_{i'} \qquad \forall i\,.i'.l \qquad (۱۲)$$

$$h_i \leq u_{il} \leq Q_l \qquad \forall i\,.l \qquad (۱۳)$$

$$e_{il} - e_{i'l} + (T_l + \tau_{ii'}) \sum_{l=1}^{L} X_{ii'}{}^{(l)}\,.\,B_{lj} + (T_l + \tau_{i'i}) \sum_{l=1}^{L} X_{i'i}{}^{(l)}\,.\,B_{lj} \leq T_l \qquad \forall i\,.h.l \qquad (۱۴)$$

$$e_{il} \leq T_l - \sum_{j=1}^{J} \tau z_{ij} X_{i0}{}^{(l)}\,.\,B_{lj} \qquad \forall i\,.l \qquad (۱۵)$$

$$L_{(max)} \geq e_{il} + \sum_{l=1}^{L} \tau_{ij} X_{i0}{}^{(l)}\,.\,B_{lj} \qquad \forall i\,.l \qquad (۱۶)$$

$$L_{(min)} \leq e_{il} + \sum_{j=1}^{n} \left(\tau z_{ij} - T_l\right) X_{i0}{}^{(j)}\,.\,B_{lj} + T_l \qquad \forall i\,.l \qquad (۱۷)$$

$$L_{(min)} \leq e_{il} + \sum_{j=1}^{n} \left(\tau z_{ij} - T_l\right) X_{i0}{}^{(l)}\,.\,B_{lj} + T_l \qquad \forall i\,.l \qquad (۱۸)$$

$$W_l \geq e_{il} \qquad \forall i\,.l \qquad (۱۹)$$

$$L_{(max)} \geq W_l \qquad \forall l \qquad (۲۰)$$

$$L_{(min)} \leq W_l \qquad \forall l \qquad (۲۱)$$

$$\sum_{j=1}^{J} B_{lj} = 1 \qquad \forall l \qquad (۲۲)$$

$$P_k \leq PP_k \qquad \forall k \qquad (۲۳)$$

$$y_j, z_{ij}, B_{lj}, X_{il}^{(j)} \in \{0.1\} \qquad (۲۴)$$

$$p_k.V_{kj}.W_{kj} \geq 0$$

رابطه (۴) بیان می‌دارد که میزان کالای ارسال‌شده از هر کارخانه به مراکز توزیع نباید بیشتر از میزان محصول تولیدشده در آن کارخانه باشد. رابطه (۵) تضمین می‌کند که میزان کالای ارسالی به مراکز توزیع کوچک‌تر یا مساوی مجموع ظرفیت وسایل نقلیه فرستاده‌شده به آن مرکز توزیع باشد. رابطه (۶) تضمین می‌کند که میزان کالای ارسال‌شده از هر کارخانه به مراکز توزیع از ظرفیت آن مرکز تجاوز نکند. رابطه (۷) تضمین می‌کند که مجموع تقاضای مشتریان تخصیص‌یافته به هر مرکز توزیع از میزان کالای ارسال‌شده به آن مرکز توزیع تجاوز کند.

رابطه (۸) بیان می‌دارد که هر گره تنها به یک مرکز توزیع تخصیص داده شود. رابطه (۹) اظهار می‌دارد که به ازای هر گره شروع در هر سفر برای هر مرکز توزیع باید یک گره پایان نیز وجود داشته باشد. رابطه (۱۰) تضمین می‌کند که هر سفر تخصیص‌یافته به مرکز توزیع j ام تنها در صورتی به گره i' حرکت می‌کند که گره i' به این مرکز تخصیص داده شده باشد. نیز رابطه (۱۱) تضمین می‌کند که از هر سفر تخصیص‌یافته به مرکز توزیع j ام، از گره i تنها در صورتی به گره دیگری حرکت می‌کنیم که گره i به مرکز توزیع j تخصیص داده شده باشد.

رابطه (۱۲) بیان می‌کند که درصورتی‌که وسیله نقلیه l ام بعد از گره i به گره i' سرویس دهد، مقدار کالای تحویل داده شده تجمعی حداکثر به‌اندازه تقاضای گره i' افزایش می‌یابد و درصورتی‌که وسیله نقلیه l ام بعد از گره i به گره دیگری به‌جز i' سرویس دهد، مقدار کالای تحویل داده شده تجمعی تا پایان سرویس‌دهی به گره iام، حداکثر به‌اندازه ظرفیت وسیله نقلیه منهای تقاضای گره i'، از مقدار کالای تحویل داده شده تجمعی تا پایان سرویس‌دهی به گره i' بیشتر است. رابطه (۱۳) بیان می‌دارد که مقدار کالای تحویل داده شده تجمعی تا پایان سرویس‌دهی به گره i ام توسط وسیله نقلیه lام، حداقل برابر با تقاضای گره i ام و حداکثر برابر با ظرفیت وسیله نقلیه lام است.

در رابطه (۱۴) میزان مسافت طی شده بین گره‌های i و i' (درصورتی‌که وسیله نقلیه نوع l بین دو گره i و i' جابجا شود) برابر با فاصله دو گره و کم‌تر از حداکثر مسافت طی شده توسط وسیله نقلیه نوع l است. در رابطه (۱۵) درصورتی‌که گره i اولین گره باشد، میزان مسافت طی شده از مرکز توزیع j تا گره iام باید کمتر یا مساوی e_{il} باشد. در رابطه (۱۶) باید مقدار e_{il} کوچک‌تر یا مساوی حداکثر مسافت طی شده توسط وسیله نقلیه نوع l منهای فاصله مستقیم گره i تا مرکز توزیع j باشد.

روابط (۱۷ و ۱۸) نیز برای برآورد طولانی‌ترین و کوتاه‌ترین مسیر موردنیاز است. رابطه (۱۹) بیان می‌دارد که طولانی‌ترین مسیر طی شده توسط وسیله نقلیه l ام، بزرگ‌تر یا مساوی مقدار مسافت تجمعی است که وسیله نقلیه l ام تا تحویل سفارش تمام مشتری‌ها طی کرده است.

روابط (۲۰ و ۲۱) به ترتیب بیانگر بیشترین و کمترین مسافت در تمام سفرها است. رابطه (۲۲) برای تخصیص هر وسیله نقلیه به یک مرکز توزیع مشخص است. رابطه (۲۳)

تضمین می‌کند که میزان تولید کارخانه‌ها از ظرفیت آن‌ها تجاوز نکند.

۴- اعتبارسنجی مدل

برای اعتبار سنجی مدل از نرم‌افزار GAMS استفاده شده است. این نرم‌افزار جهت حل مدل‌های ریاضی مورداستفاده قرار می‌گیرد و برای مسائل با درجه سختی بالا در ابعاد کوچک قادر به حل مدل است [۲۳]. برای اینکه مدل را در زمان کمتر در نرم‌افزار گمز حل کنیم، مناسب‌تر است که آن را به شکل برنامه‌ریزی خطی ارائه کنیم. دلیل این امر آن است که در این نرم‌افزار ابزارهای حل با قابلیت بالا برای حل مدل‌های خطی وجود دارد و غالباً نتایج حاصل از مدل‌های غیرخطی به‌صورت بهینه محلی است [۲۴].

همان‌گونه که در مدل ریاضی مشاهده می‌شود در تابع هدف سوم و روابط (۱۸، ۱۷، ۱۶، ۱۵، ۱۴ و ۱۲) دو متغیر (صفر و یک) در یکدیگر ضرب شده‌اند؛ لذا محدودیت‌های مذکور غیرخطی می‌باشند؛ بنابراین از روابط زیر برای خطی‌سازی آن‌ها استفاده شده است [۲۵]:

$$zz_j = X_{ii'}{}^{(l)} \cdot B_{lj} \quad (۲۴)$$

$$zz_j = X_{ii'}{}^{(l)} + B_{lj} - 1 \quad (۲۵)$$

$$zz_j \le X_{ii'}{}^{(l)} \quad (۲۶)$$

$$zz_j \le B_{lj} \quad (۲۷)$$

بنابراین روابط (۱۲ و ۱۴) به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$u_{il} - u_{i'l} + Q_l \sum_{j=1}^{J} zz_j \le Q_l - h_{i'} \quad \forall i.h.l \quad (۲۸)$$

$$e_{il} - e_{i'l} + (T_l + \tau_{ii'}) \sum_{j=1}^{J} zz_j + (T_l + \tau_{i'i}) \sum_{j=1}^{J} zz_j \le T_l \quad \forall i.h.l \quad (۲۹)$$

همچنین در این نرم‌افزار به‌جای ضرب متغیرهای $X_{i0}{}^{(l)}$ و B_{lj} از متغیر z_{aj} و به‌جای ضرب متغیرهای $X_{0i}{}^{(l)}$ و B_{lj} از متغیر z_{bj} ، استفاده شده است؛ لذا روابط (۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸) به‌صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\sum_{j=1}^{J} \tau z_{ij} . zb_j \le e_{il} \le T_l + \sum_{j=1}^{J} (\tau z_{ij} - T_l) za_j \quad \forall i.l \quad (۳۰)$$

$$e_{il} \le T_l - \sum_{j=1}^{J} \tau z_{ij} . za_j \quad \forall i.l \quad (۳۱)$$

$$L_{(max)} \ge e_{il} + \sum_{j=1}^{J} \tau_{ij} . za_j \quad \forall i.l \quad (۳۲)$$

$$L_{(min)} \le e_{il} + \sum_{j=1}^{J} (\tau z_{ij} - T_l) za_j + T_l \quad \forall i.l \quad (۳۳)$$

و در نهایت تابع هدف سوم نیز به‌صورت زیر تغییر می‌کند:

$$Min\ f3 = \sum_{i'=1}^{I} \sum_{i=1}^{I} \sum_{l=1}^{L} \sum_{j=1}^{J} zz_j . \tau_{ii'} . o_l + \sum_{k=1}^{K} O_k . P_k \quad (۳۴)$$

با تغییرات اعمال‌شده در محدودیت‌ها مدل تبدیل به یک مدل برنامه‌ریزی خطی شده و به‌راحتی با استفاده از نرم‌افزار گمز قابل‌حل و اعتبارسنجی است. بدین منظور یک مسئله در ابعاد کوچک به‌صورت تصادفی تولید شده و مدل پیشنهادی برای این مسئله حل شده است. داده‌های مسئله‌ها در لینک اینترنتی ذیل قابل‌مشاهده است. مقادیر توابع هدف به‌دست‌آمده از حل مدل توسط نرم‌افزار گمز به‌صورت جداگانه به ازای هر تابع هدف در جدول (۱) آمده است:

جدول (۱). نتایج مربوط به توابع هدف از حل مدل

تابع هدف	مقدار
F_1	۳۶۵۷۰۲
F_2	۰
F_3	۲۴۵۶٫۸۳

۵- الگوریتم NSGA-II

روش NSGA-II یک روش متداول برای حل مسائل با چند تابع هدف بر مبنای الگوریتم ژنتیک است که نخستین بار سرینیواس و دب [۲۶] از آن برای حل مسئله چندهدفه استفاده نمودند. در حقیقت این الگوریتم را می‌توان به‌عنوان توسعه‌ای بر الگوریتم ژنتیک تک هدفه که الگوریتمی فراابتکاری است در نظر گرفت. در الگوریتم‌های فراابتکاری به‌طور کامل نمی‌توان به جواب بهینه دست یافت، اما می‌توان تا تقریب مناسبی به جواب بهینه نزدیک

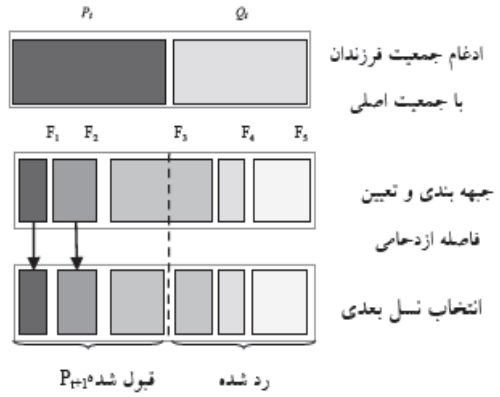
شد؛ لذا الگوریتم‌های فراابتکاری، از جایگاه ویژه‌ای در حل مسائل بهینه‌سازی به‌خصوص مسائل با ابعاد بزرگ برخوردار هستند. دراین‌بین الگوریتم‌های فراابتکاری به دو نوع جمعیت محور و ذره محور تقسیم‌بندی می‌شوند که الگوریتم ژنتیک با توجه به ایجاد تکامل در جمعیت جواب‌ها از نوع جمعیت محور می‌باشد. لازم به ذکر است الگوریتم‌های تکاملی که از تکنیک بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت استفاده می‌کنند، بخش مهمی از روش‌های فراابتکاری را تشکیل می‌دهند. ایده اصلی الگوریتم‌های تکاملی، استفاده از جمعیت مشخصی از جواب‌های مسئله است که به‌صورت تصادفی ایجاد شده و هر یک از آن‌ها نقطه‌ای از فضای جستجو (یک جواب برای مسئله) را مشخص می‌کنند.

نسخه اولیه الگوریتم مورداستفاده در این مقاله (NSGA) یک روش کارآمد به‌منظور حل مسائل با چند تابع هدف است، ولی برای انتخاب ذره‌های غالب ضعف دارد و همچنین دارای پیچیدگی محاسباتی بالایی می‌باشد؛ لذا در این مقاله یک روش اصلاح‌شده به نام NSGA-II توسعه داده شده است. این روش از الگوریتم NSGA بهتر عمل می‌کند، زیرا از اطلاعات S_p و P یعنی مجموع اعضای جمعیتی که توسط ذره P مغلوب شده است و تعداد دفعاتی که ذره P توسط سایر ذرات مغلوب شده، استفاده می‌نماید.

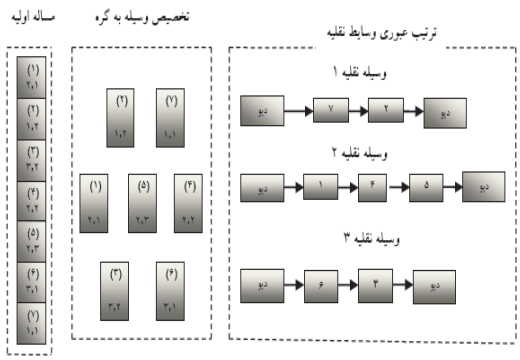
لازم به ذکر است چون در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه جواب‌ها بر اساس توابع هدف به‌مانند مسائل تک‌هدفه قابل مرتب‌سازی نیستند؛ لذا باید از مفهوم چیرگی[1] در مقایسه جواب‌ها استفاده کرد [۲۷]. در نهایت هدف این الگوریتم ارائه دسته‌ای از جواب‌های ناچیره است که به تصمیم‌گیرنده نهایی در اتخاذ تصمیم مناسب کمک می‌کند.

۵-۱- نمایش جواب‌ها

در روش‌های فراابتکاری یکی از عوامل بسیار مهم در تعیین کیفیت جواب‌ها نحوه نمایش آن‌ها است [۲۸]. برای تعیین جواب اولیه ابتدا یک کروموزوم به‌اندازه تعداد گره‌ها تعریف شد و سپس به هر ژن موجود در هر کروموزوم یک عدد تصادفی در بازه (0,m+1-ε) تخصیص داده شد. لذا، در هر کروموزوم، هر ژن مانند ژن i اُم نشان‌دهنده گره i اُم است و مقدار صحیح عدد داخل هر ژن نشان‌دهنده شماره وسیله نقلیه‌ای است که به آن گره خدمت می‌دهد. بعد از مشخص شدن تخصیص وسایل نقلیه به گره‌ها، ترتیب سرویس‌دهی به آن‌ها باید مشخص گردد. در نتیجه، مقدار اعشاری تخصیص داده به ژن‌ها نشان‌دهنده ترتیب عبور وسیله نقلیه از گره است. این مقادیر به ترتیب نزولی مرتب شده‌اند و نشان‌دهنده ترتیب سرویس‌دهی به گره‌ها می‌باشند. شکل‌های (۱ و ۲) نشان‌دهنده روش به‌کاررفته در ایجاد جواب اولیه و شیوه نمایش جواب‌ها است.



شکل (۱). نحوه انتقال جمعیت به نسل بعدی در الگوریتم مورداستفاده



شکل (۲). نحوه نمایش جواب‌ها در الگوریتم مورداستفاده

۵-۲- تعیین پارامترهای الگوریتم

الگوریتم‌های فراابتکاری معمولاً روی پارامترهای خود حساس هستند و جواب‌های ارائه شده به مقدار بسیار زیادی به پارامترهای آنان بستگی دارند. در این بخش پارامترهای در نظر گرفته شده برای حل این مدل فراابتکاری توضیح داده خواهد شد. برای تنظیم پارامترهای مسئله از روش آزمون‌وخطا استفاده شده است. برای این منظور یک مسئله به‌صورت تصادفی انتخاب شد و با تغییر پارامترهای الگوریتم به حل مسئله پرداخته شد. لازم به ذکر است در این خصوص روش‌های متفاوتی مانند روش تاگوچی نیز جهت تنظیم پارامترها قابل پیاده‌سازی می‌باشد [۲۱]. مدل پیشنهادی توسط الگوریتم NSGA-II حل شده و پارامترهای آن در جدول (۲) نشان داده شده است:

[1] Dominance

جدول (۲). پارامترهای NSGA-II

نوع عملگر	مقدار
عملگر تقاطعی	۰/۸
عملگر جهشی	/۳

۶- نتایج محاسباتی

در این بخش نتایج محاسباتی ناشی از حل مدل در ابعاد کوچک و ابعاد بزرگ نشان داده شده است. مدل برای ۱۰ نمونه بزرگ و ۱۰ نمونه کوچک مسئله حل شده است که نتایج آن در جدول (۳ و ۴) آورده شده است.

جدول (۳). نتایج محاسباتی برای حل مسائل با ابعاد کوچک

	NSGA-II				
MID	تعداد جواب‌های پارتو	شاخص پراکندگی	زمان حل (ثانیه)	تعداد مشتریان	تعداد نقاط بالقوه مرکز توزیع	تعداد وسایل نقلیه
۱/۰۲۲	۲	۰	۶/۰۳۶	۸	۲	۲
۱/۱۲۴	۴	۰/۶۷۹	۶/۴۳۹	۹	۲	۲
۱/۰۰	۳	۰/۴۵۶	۶/۳۶۴	۱۰	۲	۲
۰/۸۷۴	۴	۰/۳۶۷	۶/۴۴۱	۱۱	۳	۲
۰/۷۷۰	۱	-	۶/۰۳۱	۱۲	۲	۲
۰/۶۵۵	۲	۰/۲۴۲	۷/۰۶۵	۱۱	۲	۳
۱/۱۰۰	۵	۰/۶۶۶	۷/۸۶۵	۱۲	۳	۳
۰/۹۹۶	۳	۱/۰۰۳	۷/۵۶۹	۱۳	۳	۳
۰/۹۲۳	۲	۱	۷/۶۶۵	۱۴	۳	۳
۰/۸۷۶	۵	۱/۱۲۰	۶/۸۷۶	۱۵	۳	۳
۰/۹۳۴		۰/۶۱۵	۶/۸۳۷			میانگین

بیشترین تعداد مشتری در سایز کوچک ۱۵، مراکز بالقوه توزیع ۳ و بیشترین تعداد وسیله نقلیه ۳ است. همان‌گونه که در جدول (۳) قابل‌مشاهده است با وجود اینکه تعداد نقاط مربوط به مشتری ۱۵ و تعداد وسایل نقلیه ۳ در نظر گرفته شده ولی زمان موردنیاز برای حل این مسئله در حدود ۶۹۰۰ ثانیه می‌باشد که زمان زیادی است و با افزایش سایز مسئله این عدد به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. همچنین بر اساس اطلاعات جدول (۳) می‌توان این استدلال را داشت که تأثیرگذاری تعداد وسایل نقلیه بر روی پیچیدگی مسئله بیشتر از تعداد مشتریان موجود در شبکه می‌باشد. طبق آزمایش‌های صورت گرفته در تعداد ۱۵ مشتری ۳ مرکز توزیع و ۴ نوع وسیله نقلیه نرم‌افزار GAMS قادر به حل مدل موردنظر نبود؛ بنابراین استفاده از الگوریتم فراابتکاری در سایزهای بزرگ‌تر بسیار راهگشا خواهد بود.

به‌منظور مقایسه کارایی الگوریتم چهار معیار مقایسه از جمله تعداد جواب‌های پارتو[1]، شاخص پراکندگی[2] (DM)، متوسط فاصله از نقطه ایدئال[3] (MID) و زمان محاسباتی مورد بهره‌برداری قرار گرفت. مقادیر شاخص پراکندگی و متوسط فاصله ایدئال با استفاده از روابط زیر قابل‌محاسبه هستند:

$$DM = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \max(||X_t^i - Y_t^i||)} \quad (۳۵)$$

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sqrt{(\frac{f_1^i - f_1^{best}}{f_{1,total}^{max} - f_{1,total}^{min}})^2 + (\frac{f_2^i - f_2^{best}}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}})^2}}{n} \quad (۳۶)$$

که مقدار $max(||X_t^i - Y_t^i||)$ فاصله بین جواب‌های غیر مغلوب Y_t^i و X_t^i است. همچنین معیار متوسط فاصله ایدئال هرچه کوچک‌تر باشد بهتر است. n همان تعداد جواب‌های پارتو است. مقادیر $f_{1,total}^{min}$ و $f_{1,total}^{max}$ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار برای تابع هدف اول (رابطه ۱) می‌باشند.

مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه مسئله میانگین زمان حل موردنیاز دو برابر شده است. با افزایش اندازه مسئله شاخص پراکندگی و نیز تعداد جواب‌های پارتو افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که در ابعاد بزرگ‌تر الگوریتم توان بالایی را در جستجوی جواب‌های کارا دارد. در ارتباط با شاخص فاصله از نقطه ایدئال، به دلیل محدود بودن فضای جستجو در مسائل با اندازه کوچک، الگوریتم فاصله کمتری از نقطه ایدئال (که یک نقطه فرضی است) دارد. این فاصله در ابعاد بزرگ‌تر اندکی افزایش می‌یابد اما این تغییر برای شاخص‌های پراکندگی و متوسط فاصله ایدئال در مقایسه با تغییرات دو شاخص میانگین زمان حل و تعداد جواب‌های پارتو بسیار ناچیز است. جدول‌های (۳ و ۴ میزان) میانگین دو شاخص ذکرشده را گزارش می‌کند و حاکی از آن است که می‌توان از این الگوریتم برای حل مسئله در اندازه‌های بسیار بزرگ‌تر نیز استفاده نمود.

[1] Number Of Pareto Solutions
[2] Diversity Metrics
[3] Mean Ideal Distance

جدول (۴). نتایج محاسباتی برای حل مسائل با ابعاد بزرگ

MID	NSGA-II					
	تعداد جواب‌های پارتو	شاخص پراکندگی	زمان حل (ثانیه)	تعداد مشتریان	تعداد نقاط بالقوه مرکز توزیع	تعداد وسایل نقلیه
۱/۲۴۱	۵	۰/۴۱۲	۹/۱۱۵	۷۰	۵	۱۰
۱/۳۶۴	۶	۰/۴۵۷	۱۰/۲۳۹	۸۰	۵	۱۰
۱/۲۱۴	۳	۰/۹۹۱	۱۰/۵۶۴	۷۰	۵	۱۲
۱/۰۶۱	۲	۱/۲۶۴	۱۱/۱۴۴	۸۰	۵	۱۲
۰/۹۳۵	۷	۱/۱۲۳	۱۳/۲۶۹	۹۰	۶	۱۲
۰/۷۹۵	۶	۰/۹۹۵	۱۶/۴۶۲	۷۰	۷	۱۴
۱/۳۳۶	۸	۰/۶۵۵	۱۸/۴۲۸	۸۰	۷	۱۴
۱/۲۰۹	۴	۰/۸۷۵	۱۹/۳۷۹	۹۰	۸	۱۴
۱/۱۲۱	۶	۰/۹۴۶	۲۲/۱۲۳	۸۰	۸	۱۵
۱/۰۶۳	۱۰	۱/۱۰۰	۲۰/۳۶۰	۹۰	۱۰	۱۵
۱/۱۳۴		۰/۸۸۲	۱۵/۱۱۳			میانگین

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای مطالعات و پژوهش‌های آتی

در این مقاله، یک مدل حمل‌ونقل مکان‌یابی مسیریابی وسایل نقلیه چندهدفه شامل کمینه‌سازی هزینه حمل‌ونقل و متعادل‌سازی مسیرهای هر سفر ارائه شد. کاهش میزان تولید و انتشار CO_2، برای در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی و توزیع عادلانه بار کاری بین ناوگان حمل‌ونقل از دیگر اهداف این پژوهش بوده است. قیود ظرفیت وسایل نقلیه و مراکز توزیع از جمله قیود موردتوجه مقاله است. اعتبارسنجی مدل چندهدفه به‌وسیله نرم‌افزار گمز صورت پذیرفت. الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II برای ۱۰ نمونه کوچک و ۱۰ نمونه بزرگ حل شد. نتایج نشان داد که با افزایش اندازه مسئله مقدار شاخص پراکندگی و متوسط فاصله ایدئال تغییر چندانی پیدا نمی‌کنند؛ بنابراین می‌توان از این الگوریتم برای حل این مسئله در اندازه‌های بسیار بزرگ‌تر نیز استفاده نمود. تنها باید به این نکته توجه داشت که با افزایش اندازه مسئله زمان حل افزایش می‌یابد. به‌علاوه مدل ریاضی پیشنهادی در این مقاله می‌تواند در صنایع مختلف بالأخص صنعت توزیع کالا در سطوح استراتژیک (تعیین انبارهای مرکزی و میانی) و سطوح عملیاتی (تعیین مسیرهای بهینه سرویس‌دهی به مشتریان) مورداستفاده قرار گیرد.

برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود که محدودیت پنجره زمانی نیز به مدل اضافه گردد تا مدل تطابق بیشتری با مسائل موجود در دنیای واقعی داشته باشد. به‌علاوه پیشنهاد می‌شود که الگوریتم فراابتکاری دیگری ارائه گردد و نتایج با الگوریتم ارائه شده در این مقاله مقایسه شود. همچنین می‌توان از روش تاگوچی برای تنظیم پارامترهای الگوریتم فراابتکاری استفاده کرد که پیش‌بینی می‌شود نتایج بهتری را ارائه خواهد کرد.

۸- منابع

[1] A. Sbihi and R.W. Eglese, "Combinatorial optimization and green logistics", 4OR, vol. 5(2), pp. 99-116, 2007.

[2] H. Farrokhi-Asl, R. Tavakkoli-Moghaddam, B. Asgarian, and E. Sangari, "Metaheuristics for a bi-objective location-routing-problem in waste collection management", Journal of Industrial and Production Engineering, vol. 34(4), pp. 239-252, 2017.

[3] C. D. T. Watson-Gandy and P. J. Dohrn, "Depot location with van salesmen—a practical approach", Omega, vol. 1(3), pp. 321-329, 1973.

[4] S. Salhi, and, G.K. Rand, "The effect of ignoring routes when locating depots", European journal of operational research, vol.39 (2), pp. 150-156, 1989.

[5] Z. Özyurt and D. Aksen, "Solving the multi-depot location-routing problem with lagrangian relaxation", In Extending the horizons: Advances in computing, optimization, and decision technologies (pp. 125-144). Springer, Boston, MA, 2007.

[6] J. Rieck, C. Ehrenberg, and J. Zimmermann, "Many-to-many location-routing with inter-hub transport and multi-commodity pickup-and-delivery", European Journal of Operational Research, vol. 236(3), pp. 863-878, 2014.

[7] V.P. Nguyen, C. Prins, and C. Prodhon, "Solving the two-echelon location routing problem by a GRASP reinforced by a learning process and path relinking" European Journal of Operational Research, vol. 216(1), pp. 113-126, 2012.

[8] S. Rath, and W.J. Gutjahr, "A math-heuristic for the warehouse location–routing problem in disaster relief" Computers & Operations Research, vol. 42, pp. 25-39, 2014.

[9] I. Rodríguez-Martín, J. J. Salazar-González, and H. Yaman, H. "A branch-and-cut algorithm for the hub location and routing problem" Computers & Operations Research, vol. 50, pp. 161-174, 2014.

[10] E. Miandoabchi and R.Z. Farahani, "Optimizing reserve capacity of urban road networks in a discrete network design problem" Advances in Engineering Software, vol. 42(12), pp. 1041-1050, 2011.

[11] I. A. Martínez-Salazar, J. Molina, F. Ángel-Bello, T. Gómez, and R. Caballero, "Solving a bi-objective transportation location routing problem by metaheuristic algorithms" European Journal of Operational Research, vol. 234(1), pp. 25-36, 2014.

[12] C. Prodhon and C. Prins, "A survey of recent research on location-routing problems" European

Journal of Operational Research, vol. 238(1), pp. 1-17, 2014.

[13] G. Nagy and S. Salhi, "Location-routing: Issues, models and methods" European journal of operational research, vol. 177(2), pp. 649-672, 2007.

[14] H. Farrokhi-Asl, A. Makui, A. Jabbarzadeh, and F. Barzinpour, "Solving a multi-objective sustainable waste collection problem considering a new collection network" Operational Research, vol. 20(4), pp. 1977-2015, 2020.

[15] H. Park and J. Lim, "Valuation of marginal CO {sub 2} abatement options for electric power plants in Korea", Energy Policy, vol. 37(5), pp. 1834-1841, 2009.

[16] J. R. Swinton, "At what cost do we reduce pollution? Shadow prices of SO2 emissions" The Energy Journal, vol. 19(4), 1998.

[17] N, Manavizadeh, H. Farrokhi-Asl, and S. F. WT Lim, "A New Mathematical Model for the Green Vehicle Routing Problem by Considering a Bi-Fuel Mixed Vehicle Fleet" Journal of Optimization in Industrial Engineering, vol. 13(2), pp. 165-183, 2020.

[18] K. Salimifard, H. Shahbandarzadeh, and R.Raeesi, "Green transportation and the role of operation research", In Int. Conf. Traffic Transp. Eng. (ICTTE 2012), Vol. 26, pp. 74-79, 2012.

[19] T. Bektaş, and G. Laporte, "The pollution-routing problem", Transportation Research Part B: Methodological, vol. 45(8), pp. 1232-1250, 2011.

[20] S. Erdoğan, and E. Miller-Hooks, "A green vehicle routing problem" Transportation research part E: logistics and transportation review, vol. 48(1), pp. 100-114, 2012.

[21] H. Farrokhi-Asl, A. Makui, R. Ghousi, and M. Rabbani, "Developing a hazardous waste management system with consideration of health, safety, and environment" Computers & Electrical Engineering, vol. 82, pp. 106553, 2020.

[22] A. N. Sholichah, Y. Yuniaristanto, and I. Wayan Suletra. "Location Routing Problem with Consideration of CO2 Emissions Cost: A Case Study." Jurnal Teknik Industri, vol. 21(2), pp. 225-234, 2020.

[23] M. Rabbani, H. Farrokhi-Asl, H. Rafiei, and R. Khaleghi, R. "Using metaheuristic algorithms to solve a dynamic cell formation problem with consideration of intra-cell layout design" Intelligent Decision Technologies, vol. 11(1), pp. 109-126, 2017.

[24] A. Azadeh and H. Farrokhi-Asl, "The close–open mixed multi depot vehicle routing problem considering internal and external fleet of vehicles" Transportation Letters, vol. 11(2), pp. 78-92, 2019.

[25] R. Rabbani and H. Farrokhi, "Integrating Data Envelopment Analysis and Reverse Auction Using Bi-level Programming Approach", Supply Chain Management, vol. 20(59), pp. 69-83, 2018. (In Persian)

[26] N. Srinivas, and K. Deb, K. "Muiltiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms" Evolutionary computation, vol.2 (3), pp. 221-248, 1994.

[27] M. Rabbani, A. Nikoubin, and H. Farrokhi-Asl, "Using modified metaheuristic algorithms to solve a hazardous waste collection problem considering workload balancing and service time windows" Soft Computing, vol. 25(3), pp. 1885-1912, 2021.

[28] M. Rabbani, R. Heidari, H. Farrokhi-Asl, and N. Rahimi, "Using metaheuristic algorithms to solve a multi-objective industrial hazardous waste location-routing problem considering incompatible waste types" Journal of Cleaner Production, vol. 170, pp. 227-241, 2018.

Iranian Journal of Supply Chain Management

Vol. 24, No. 75, Summer, 2022

Solving a Location Routing Problem Considering Green Routes Using a Metaheuristic Algorithm

S. M. T. Fatemi Ghomi*, B. Asgarian

*Professor, Department of Industrial Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 11/08/2021; Accepted: 21/02/2022)

Abstract

Design and analysis of distribution systems are among the key factors which have been of interest to logistics corporations in recent years. Two main elements in designing a distribution network are finding acceptable locations for facilities and effective routes. Simultaneous consideration of these two elements is called location routing problem. Nowadays, because of environment pollutions, making good decisions about declining the CO2 emission rate has become a critical issue. The main contributor in CO2 emissions are fleet vehicles. This paper aims to propose a new mathematical model for the location routing problem in order to reduce the distribution and hence the fuel costs which in turn lead to CO2 emission rate reduction. Driver satisfaction is also pursued by balancing the drivers' workloads. A mathematical model is proposed for the problem and then linearized and validated for small scale conditions. As the large scale problem has many complexities, a multipurpose optimization algorithm, namely the NSGA-II algorithm which is a well-known metaheuristic algorithm is applied. To obtain a better solution, facility locations and route allocations are considered simultaneously. The algorithm performance is evaluated by introducing 4 indicators and the numerical results are reported. The results show that the suggested algorithm has the required efficiency to produced high quality parato solutions which are uniformly distributed in the problem's solution space.

Keywords: Facility Location Problem, Location Routing, Pollutant Emission, Multi-Objective Problem, Commodity Distribution

* Corresponding Author E-mail: emi@aut.ac.ir