چشم‌انداز مدیریت صنعتی
سال نهم، شماره ۳۶، زمستان ۱۳۹۸
شاپا چاپی: ۹۸۷۴-۲۲۵۱، شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۵-۲۶۴۵
ص‌ص ۱۸۸ – ۱۶۵

حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با درنظرگرفتن محدودیت حجم خودرو با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

امیر اسلامی‌نیا*، پرهام عظیمی**

چکیده

این پژوهش به بررسی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با درنظرگرفتن محدودیت حجم باری خودرو می‌پردازد که در این مسئله ناوگان حمل‌ونقل شامل وسایل نقلیه الکتریکی است که با توجه به ظرفیت محدود باتری آنان باید محدودیت‌های آن نیز در برنامه‌ریزی توزیع در نظر گرفته شود. به این منظور نقاط شارژ مجدد در شبکه حمل‌ونقل در نظر گرفته می‌شود تا در صورت نیاز به شارژ باتری، خودرو شارژ مجدد را انجام دهد و مسیر خود را تکمیل کند. ازآنجاکه وسایل نقلیه الکتریکی به‌صورت محدود در توزیع کالا استفاده می‌شوند، باید سایر جنبه‌های آن را نیز در نظر گرفت. یکی از جنبه‌های مهم محدودیت حجم باری این وسایل است که نسبتاً فضای باری کمتری دارند. گاهی ممکن است کالاهای تخصیص‌داده‌شده به یک وسیله نقلیه از نظر محدودیت وزنی موجه باشد، ولی مجموع حجم کالاها از حجم باری خودرو تجاوز کند؛ درنتیجه در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای فرموله‌سازی مسئله ارائه می‌شود؛ سپس چندین نمونه مسئله به‌منظور اعتبارسنجی طراحی و حل می‌شود که برای حل در ابعاد بزرگ از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: مسیریابی وسایل نقلیه؛ خودروی الکتریکی؛ شارژ مجدد؛ محدودیت حجم؛ الگوریتم شبیه‌سازی تبرید.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۸، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۳.

* دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی.
** دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی (نویسنده مسئول).
E-mail: p.azimi@yahoo.com

۱. مقدمه

یکی از رویکردهای علمی در کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، استفاده از برنامه‌ریزی بهینه حمل‌ونقل است. در مسائل برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، معمولاً کالا باید از طریق ناوگان حمل‌ونقل از تعدادی مبدأ به تعدادی مقصد انتقال یابد. این موضوع که کالا از کدام مبدأ به چه میزان و به کدام مقصد با چه نوعی از ناوگان حمل باید انتقال یابد تا تقاضای مقصدها تأمین شود و کالای انتقالی از هر مبدأ نیز متناسب با عرضه آن باشد، در حیطه مسائل برنامه‌ریزی حمل‌ونقل قرار می‌گیرد. از جمله کاربرد مسائل حمل‌ونقل در مسائل دنیای واقعی می‌توان به این موارد اشاره کرد: حمل مواد سوختی؛ توزیع محصولات کشاورزی؛ توزیع محصولات صنعتی و بنگاه‌های بازرگانی؛ تأمین مواد اولیه موردنیاز کارخانه‌ها؛ بهینه‌سازی حرکت قطارها، اتوبوس و هواپیما؛ توزیع پول از خزانه به شعب بانک‌ها؛ بهینه‌سازی زنجیره پُست محموله‌ها و حمل‌ونقل مواد معدنی. یکی از معضلات حمل‌ونقل، گرمایش زمین و افزایش آلایندگی است. گرمایش جهانی زمین به یک تهدید جدی برای انسان‌ها و طبیعت تبدیل شده است. تلاش‌های جهانی به‌منظور کاهش سریع آلایندگی انتشار گاز دی‌اکسید کربن طی «توافقنامه پاریس» در اجلاس تغییرات آب و هوایی که از سوی سازمان ملل در دسامبر ۲۰۱۵ برگزار شد، به امضا رسید [۱۸].

انرژی فسیلی بزرگ‌ترین منبع انتشار گاز دی‌اکسید کربن است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که توجه مردم به‌سوی سوخت‌های غیرفسیلی جذب شده است. معرفی وسایل نقلیه سبز، مانند خودروهای هیدروژنی و خودروهای الکتریکی نمونه خوبی از تلاش مردم برای استفاده از سوخت‌های غیرفسیلی است؛ بااین‌حال برنامه‌ریزی و مسیریابی وسایل نقلیه سبز در دستگاه‌های توزیع کالا پیچیده است. با توجه به محدودیت‌های فناوری، وسایل نقلیه الکتریکی معمولاً شعاع حرکتی کوتاه بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ مایل دارند [۵]و در طول مسیر به سوخت‌گیری و یا شارژ مجدد نیاز دارند. تعداد ایستگاه‌های شارژ مجدد بسیار محدود است. برای مثال فقط ۱۶۲۶ ایستگاه شارژ مجدد در سراسر کانادا وجود دارد [۱۶]؛ در نتیجه رویکرد مسیریابی خودروهای معمول همیشه برای مسیریابی وسایل نقلیه سبز مناسب نیستند. برای درنظرگرفتن محدودیت‌های خودروهای سبز الکتریکی، نقاط شارژ مجدد در شبکه حمل‌ونقل اعمال می‌شود تا در صورت لزوم به شارژ مجدد، خودرو شارژ شود و مسیر خود را ادامه دهد. به‌عنوان مسئله اصلی برنامه‌ریزی و عملیات سیستم تدارک و توزیع کالا، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ظرفیت‌دار اهمیت نظری و ارزش علمی دارد. بااین‌حال، استفاده از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ظرفیت‌دار برای تصمیم‌گیری‌های تدارکاتی دنیای واقعی اغلب دارای محدودیت‌هایی است و اغلب بسیاری از محدودیت‌های اضافی توسط مدل در نظر گرفته نمی‌شود [۱۰]. معضل اصلی در عملیات تدارکات، روشی برای اطمینان از این است که سفارشات حمل شده توسط خودرو آیا علاوه بر محدودیت وزن، محدودیت ابعاد وسیله نقلیه را رعایت می‌کنند یا خیر. مسائلی که شامل ترکیب مسئله مسیریابی و مسئله بسته‌بندی

هستند را «مسئله مسیریابی خودرو با محدودیت بارگذاری» می‌نامند [۷]. در این مسائل باید به موجه‌بودن هم‌زمان محدودیت ظرفیت وزنی و حجم وسایل نقلیه توجه شود و به دنبال راه‌حلی بهینه با درنظرگرفتن محدودیت‌های بالا بود. درنتیجه می‌توان این‌گونه برداشت کرد که بسته‌بندی کالاها و مسیریابی حرکت خودروها جزو مهم‌ترین عملیات‌ها در سیستم توزیع است.

در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه می‌شود که در آن هدف اصلی کمینه‌کردن مجموع مسافت طی‌شده توزیع کالا است. در محدودیت‌های مدل جنبه سبزبودن وسایل نقلیه اعمال می‌شود؛ به این صورت که برای هر وسیله نقلیه، ظرفیت باتری و نرخ مصرف شارژ الکتریکی وابسته به مسافت در نظر گرفته می‌شود که با توجه به سطح شارژ باتری و مسیر باقیمانده، بازدید نقاط شارژ مجدد صورت می‌گیرد و سطح باتری به مقدار ظرفیت باتری شارژ می‌شود؛ همچنین محدودیت حجم خودرو در کنار محدودیت وزنی مدنظر قرار می‌گیرد.

در ادامه در بخش دوم، مبانی نظری پژوهش بررسی می‌شود. در بخش سوم مدل‌سازی و تعریف مسئله ارائه خواهد شد. بخش چهارم به روش حل پیشنهادی اختصاص دارد. در بخش پنجم نتایج عددی از حل نمونه مسائل ارائه خواهد شد و در بخش ششم نتیجه‌گیری و بیان پیشنهادهای آتی صورت می‌پذیرد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

پژوهش‌های مرتبط با وسایل نقلیه الکتریکی در حوزه لجستیک سبز طبقه‌بندی می‌شود. مطالعات در این زمینه که با کاهش اثرات زیست‌محیطی همراه است در سال‌های اخیر افزایش یافته است. لجستیک سبز علاقه‌مند به تولید و توزیع کالاها با یک روش مناسب و درنظرگرفتن عوامل اجتماعی و محیط‌زیستی است [۱۹]. فعالیت‌های توزیع در زنجیره عرضه با جابه‌جایی کالاها از طریق زنجیره عرضه صورت می‌گیرد که این مسئله به حوزه مسیریابی و سایل نقلیه تعلق دارد. پژوهشگران در این زمینه تلاش دارند تا انتشار دی اکسید کربن را به‌عنوان هدف اصلی در نظر گیرند. برای مثال، فیگلیوزی (۲۰۱۰)، یک مدل مسیریابی و سایل نقلیه را ارائه داد که در آن حداقل‌کردن انتشار و مصرف سوخت به‌عنوان هدف اولیه با محدودیت‌های زمان سفر، پنجره زمانی و محدودیت ظرفیت در نظر گرفته شده است. یک تابع هزینه چندهدفه شامل هزینه به‌کارگیری وسایل نقلیه، فاصله مسیرها و انتشار گاز دی‌اکسید کربن در مدل استفاده شده است. یک روش ابتکاری مبتنی بر جست‌وجوی منطبق تصادفی حریصانه[1] برای کاهش میزان انتشار با درنظرگرفتن مجموع مسیرهای موجه، توسعه داده شده است [۶].

1. Greedy Randomized Adaptive Search

اشـــنایدر و همکاران (۲۰۱۴)، یک مســـئله مســـیریابی وســـایل نقلیه الکتریکی (EVRP)[1]با درنظرگرفتن پنجره زمانی و امکان شـــارژ جزئی در ایســـتگاه‌های شـــارژ ارائه دادند. آن‌ها یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر الگوریتم جســـت‌وجوی همســـایگی متغییر (VNS)[2]ارائه کردند [۲۰]. فیلیپ و همکاران (۲۰۱۴) از یک الگوریتم ابتکاری جســـت‌وجوی محلی ســـازنده[3]درون ســـاختار الگوریتم شـــبیه‌ســـازی تبرید غیرقطعی[4]بری حل یک EVRP با درنظرگرفتن شـــارژ جزئی و فناوری‌های مختلف شارژ باتری استفاده کردند [۴].

ساسی و همکاران (۲۰۱۵) از الگوریتم جست‌وجوی محلی تکرارشونده (ITS)[5]برای حل مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با ناوگان مختلط الکتریکی بهره گرفتند [۱۸]. یانگ و سان (۲۰۱۵) به ارائه مدل مسئله مسیریابی–مکانیابی ایستگاه‌های تعویض باتری[6]خودروهای الکتریکی پرداختند که تعیین موقعیت ایستگاه‌های تعویض باتری و مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی تحت محدودیت ظرفیت باتری، هدف اصلی مدل پیشنهادی آن‌ها بود [۲۳].

کشین و کتی (۲۰۱۶)، EVRP را با درنظرگرفتن شارژ جزئی و محدودیت پنجره زمانی، مدل‌سازی کردند و از الگوریتم جست‌وجوی همسایگی بزرگ (ALNS)[7]منطبق برای حل این مدل بهره گرفتند [۱۱]. هیرمن و همکاران (۲۰۱۶)، یک مسئله ترکیب ناوگان معمولی و وسایل نقلیه الکتریکی با پنجره زمانی ارائه دادند که فرض شده است وسایل نقلیه در بازدید ایستگاه‌های شارژ به میزان ظرفیت باتری خود شارژ می‌شوند. آن‌ها با استفاده از الگوریتم شاخه و قیمت[8]و الگوریتم جست‌وجوی همسایگی بزرگ، مدل را حل کردند [۸].

اریکو و همکاران (۲۰۱۵)، چهار نوع دیگر از EVRP مبتنی بر زمان مجاز شارژ مجدد در هر مسیر و شارژ جزئی و کامل در هر مسیر را توسعه دادند. آن‌ها برای هر نوع از توسعه‌های ارائه‌شده از الگوریتم شاخه و برش و قیمت[9]به‌منظور حل بهره گرفتند [۲]. ژانگ و همکاران (۲۰۱۸)، مسئله EVRP را با در نظر گرفتن فاکتورهای مسیر نظیر شیب جاده و فاکتورهای خودرو مانند سرعت، مساحت سطح پیشین خودرو و وزن خودرو را فرموله کردند. آن‌ها از الگوریتم کلونی مورچگان[10]و الگوریتم جست‌وجوی همسایگی بزرگ برای حل مدل پیشنهادی استفاده کردند [۲۴].

ماکرینا و همکاران (۲۰۱۹)، مدلی برای مسئله مسیریابی خودروهای الکتریکی و معمولی با پنجره زمانی و فرض شارژ جزئی خودروهای الکتریکی ارائه دادند. آن‌ها برای وسایل نقلیه الکتریکی

1. Electric Vehicle Routing Problem
2. Variable Neighborhood Search
3. Constructive Local Search Heuristics
4. Non-deterministic Simulated Annealing
5. Iterated Tabu Search
6. Battery Swap Location Routing Problem
7. Adaptive Large Neighborhood Search
8. Branch and Price
9. Branch and Price and Cut
10. Ant Colony Algorithm

محدودیت انتشار آلایندگی را نیز در مدل اعمال کردند و برای حل در ابعاد بالا از الگوریتم جست‌وجوی محلی تکرارشونده[1]بهره گرفتند [۱۳]. ترکیب مسائل مسیریابی و بارگذاری سه‌بُعدی، نخستین بار توسط گندرو و همکاران (۲۰۰۶)، مطرح شد. آن‌ها این مسئله را مسئله مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت‌دار با محدودیت‌های بارگذاری سه‌بُعدی (3L-CVRP)[2] نامیدند [۷]. در پژوهش‌های اخیر توجه به این مسائل و تعریف محدودیت‌های بارگذاری دوبُعدی و سه‌بُعدی برای انواع مسائل مسیریابی رشد زیادی داشته است. پیش از این در بیشتر مسائل مسیریابی وسیله نقلیه تمرکز بر ایجاد مسیرها و بهبود آن‌ها بوده است. محدودیت ظرفیت تنها محدودیت مربوط به بار وسیله نقلیه است؛ اما در شرایط واقعی، مسائل حمل‌ونقل با هر دو مسئله مسیریابی و بسته‌بندی سروکار دارند که علاوه بر ظرفیت وسیله نقلیه، محدودیت‌های بیشتری را در نظر می‌گیرند. آن‌ها مجموعه وسایل نقلیه را همگون در نظر گرفتند و مسیرها باید به‌گونه‌ای تعیین شوند که تقاضای مشتریان را تحویل دهند و از انبار شروع و به آن ختم شوند. یک الگوریتم جست‌وجوی ممنوع برای مسئله مسیریابی و جابه‌جایی مشتریان بین مسیرهای مختلف و یک الگوریتم جست‌وجوی ممنوع برای مسئله بارگذاری جعبه‌های مشتریان ارائه شده است.

ترانتیلیس و همکاران (۲۰۰۹) برای مسئله 3L-CVRP یک الگوریتم ترکیبی جست‌وجوی ممنوع و جست‌وجوی محلی هدایت‌شده اجرا کردند. جست‌وجوی ممنوع بخش مسیریابی را جست‌وجو می‌کند و شش روش ابتکاری بسته‌بندی مختلف به‌صورت تکرارشونده تا زمان به‌دست‌آمدن یک جواب شدنی اعمال می‌شوند. اگر هیچ جواب شدنی برای بارگذاری به‌دست نیامد، موارد توالی برای حداکثر سه بار دوباره مرتب می‌شوند (توالی مشتریان ثابت فرض شده است). آن‌ها یک نسخه جدیدی از مسئله 3L-CVRP معرفی کردند که در آن دردسترس‌بودن جعبه‌ها برای تخلیه نیز در نظر گرفته شد؛ به‌عبارت‌دیگر نزدیک‌ترین فاصله کارگر از جعبه یا جعبه‌هایی که باید در مکان تحویل کالای یک مشتری تخلیه شوند، نباید از عددی مانند β بیشتر باشد. آن‌ها این نسخه توسعه‌یافته را «L-CVRP۳ دستی»[3]نامیدند [۲۱].

جانکوئرا و همکاران (۲۰۱۳)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله مسیریابی با محدودیت‌های بارگذاری سه‌بُعدی ارائه کردند. آن‌ها فرض کردند که جعبه‌ها و وسایل نقلیه مکعب‌مستطیل شکل و با ابعاد معلوم هستند. هدف مسئله موردنظر پیداکردن حداقل هزینه برای مسیرهای تحویل کالا بود؛ درحالی‌که تضمین می‌کرد که جعبه‌ها به‌طور کامل داخل وسایل نقلیه قرار بگیرند و هیچ هم‌پوشانی با هم نداشته باشند؛ علاوه بر این، محدودیت‌های پایداری عمودی بار، محدودیت LIFO[4] و تحمل بار جعبه‌ها ارضا شوند. آن‌ها دردسترس‌بودن جعبه‌ها را

1. Iterated Local Search
2. Three Dimensional Loading - Capacitated Vehicle Routing Problem
3. Manual
4. Last In First Out

نیز در مدل خود در نظر گرفتند [۱۰]. سشیا و همکاران (۲۰۱۳)، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه و بارگذاری را برای مجموعه وسایل نقلیه ناهمگون در نظر گرفتند. محدودیت‌هایی که آن‌ها در نظر گرفتند شامل جهت‌گیری، پایداری عمودی، شکنندگی اقلام، سیاست بارگذاری و تخلیه بر اساس LIFO و دردسترس‌بودن جعبه‌ها بود. آن‌ها فرض کردند که بازدید هر مشتری، بیش از یک‌بار امکان‌پذیر است و امکان تحویل‌های شکسته‌شده را در نظر گرفتند. آن‌ها برای این مسئله یک رویکرد جست‌وجوی محلی پیشنهاد دادند. این الگوریتم بر پایه یک استراتژی ترکیبی بود که شامل شبیه‌سازی تبرید با جست‌وجوی همسایگی بزرگ می‌شد [۱]. وگامجا و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی برای توازن مسئله مسیریابی وسایل نقلیه و محدودیت‌های بارگذاری ارائه دادند. این مدل توسعه‌ای از 3L-CVRP است که شامل مقاومت اقلام، ظرفیت وزن خودرو، توزیع وزن در کابین بار خودرو و پنجره زمانی مشتریان است [۲۲].

راد و همکاران (۲۰۱۶)، یک مدل ریاضی در راستای کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تأمین دوسطحی با درنظرگرفتن وسایل حمل‌ونقل چندگانه و چند محصول ارائه دادند و مدل این پژوهش را در یک مطالعه موردی به‌کار بردند. آن‌ها همچنین با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری به حل مدل پرداختند. نتایج محاسباتی نشان داد که الگوریتم رقابت استعماری، عملکرد مناسبی برای حل این مدل دارد [۱۶].

فرازمند و پیشوایی (۲۰۱۸)، یک مدل ریاضی استوار برای طراحی شبکه حمل‌ونقل ترکیبی بار با استفاده از دو روش حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای ارائه کردند. هدف اول آن‌ها حداقل‌کردن هزینه‌ها و هدف دوم، کاهش ریسک تصمیم‌گیری بود. آن‌ها برای اعتبارسنجی مدل از مطالعه موردی در صنعت سیمان بهره گرفتند و نتایج نشان داد که توسعه ایستگاه‌های راه‌آهن و انتقال حجم زیادی از سیمان حمل‌شده از جاده به شبکه‌ی ریلی، موجب کاهش قابل‌توجه هزینه‌ها می‌شود [۳]. مرتضوی و سیف‌برقی (۲۰۱۸)، یک مدل زنجیره تأمین سه‌سطحی، شامل کارخانه‌ها، انبارها و خرده‌فروشان در حوزه مکان‌یابی تسهیلات ارائه دادند. مدل ارائه‌شده دوهدفه و اهداف آن، کمینه‌کردن هزینه کل شبکه و کمینه‌کردن میزان انتشار گاز CO_2 بود. مدل پیشنهادی با استفاده از روش محدودیت اپسیلون حل و یافته‌های آن با روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای مقایسه شد [۱۵]. خلاصه پژوهش‌های بررسی‌شده در جدول ۱، نوآوری این پژوهش نسبت به کارهای صورت‌گرفته، متمایز شده است.

جدول ۱. خلاصه مبانی نظری بررسی‌شده

روش حل	مسیریابی	نوع خودرو		محدودیت		پژوهشگران
		معمولی	الکتریکی	وزن	حجم	
جست‌وجوی ممنوع	کلاسیک	✓			✓	ترانتیلیس و همکاران (۲۰۰۹)
روش تجزیه و آزاد سازی	کلاسیک	✓			✓	جانکوئرا و همکاران (۲۰۱۳)
ترکیب شبیه‌سازی تبرید با جست‌وجوی همسایگی	کلاسیک	✓			✓	سشیا و همکاران (۲۰۱۳)
ابتکاری	کلاسیک	✓			✓	وگامجا و همکاران (۲۰۱۹)
جست‌وجوی همسایگی متغییر	کلاسیک		✓	✓		اشنایدر و همکاران (۲۰۱۴)
ابتکاری جست‌وجوی محلی سازنده	کلاسیک		✓	✓		فیلیپ و همکاران (۲۰۱۴)
جست‌وجوی محلی تکرارشونده	کلاسیک		✓	✓		ساسی و همکاران (۲۰۱۵)
جست‌وجوی همسایگی بزرگ	کلاسیک		✓	✓		کشین و کتی (۲۰۱۶)
شاخه، قیمت و جست-وجوی همسایگی بزرگ	کلاسیک	✓	✓	✓		هیرمن و همکاران(۲۰۱۶)
شاخه، برش و قیمت	کلاسیک		✓	✓		اریکو و همکاران (۲۰۱۵)
کلونی مورچگان و جست‌وجوی همسایگی بزرگ	کلاسیک		✓	✓		ژانگ و همکاران (۲۰۱۸)
شبیه‌سازی تبرید	کلاسیک		✓	✓	✓	پژوهش حاضر

با توجه به بررسی مقاله‌ها و پژوهش‌های مرتبط در حوزه مسیریابی خودروهای الکتریکی و مسئله مسیریابی با محدودیت بارگذاری، ترکیب این دو مسئله و ارائه مدلی که این دو مبحث را دربرگیرد تاکنون ارائه نشده است. ازآنجاکه وسایل نقلیه الکتریکی نسبت به وسایل نقلیه معمولی ظرفیت باری و ابعادی کمتری دارند، باید این دو محدودیت را به‌طور هم‌زمان به‌منظور ارائه یک راه‌حل بهینه و موجه در نظر گرفت. در این پژوهش مدلی برای مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی با محدودیت حجم باری خودرو ارائه می‌شود که خودروها در صورت نیاز به شارژ باتری به نقاط شارژ مجدد رفته و باتری خود را شارژ کنند؛ همچنین محدودیت‌های وزنی و باری خودرو به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته می‌شود.

۳. روش‌شناسی پژوهش

فرض کنید یک شرکت توزیع کالا باید تقاضای مشتریان را که در نقاط مختلفی قرار دارند، تحویل دهد. هر مشتری تنها یک نوع کالا را سفارش می‌دهد. کالاهای سفارش‌داده‌شده مشتریان دارای وزن و ابعاد متفاوتی است؛ از طرفی ناوگان شرکت از نوع الکتریکی است که دارای یک باتری با ظرفیت مشخص و نرخ مصرف وابسته به مسافت است که با پیمودن مسافت از شارژ خودرو کاسته می‌شود؛ همچنین خودروهای الکتریکی دارای ظرفیت وزنی و حجمی متفاوتی هستند. هدف شرکت، تعیین ترتیب بازدید مشتریان با هدف کاهش مسافت طی شده است که باید محدودیت‌های مرتبط با سطح شارژ باتری، محدودیت وزنی و ابعاد خودرو در نظر گرفته شود. برای مثال، فرض کنید یک شرکت باید تقاضای ۶ مشتری را از انبار اصلی ارسال کند. در شبکه حمل‌ونقل ۲ ایستگاه شارژ مجدد نیز وجود دارد. اطلاعات مربوط به مشتریان و وسایل نقلیه مطابق جدول‌های ۲و ۳، است.

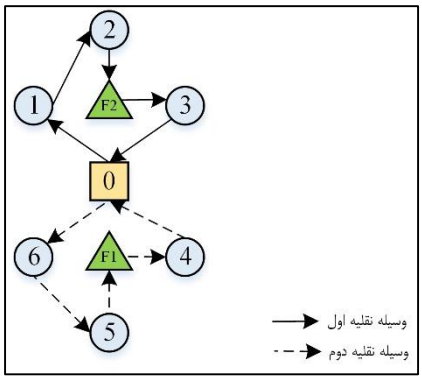
جدول ۲. اطلاعات گره‌های نمونه مسئله

گره	انبار	مشتری۱	مشتری۲	مشتری۳	مشتری٤	مشتری٥	مشتری٦	ایستگاه شارژ ۱	ایستگاه شارژ ۲
مختصات X	۵۰	۴۰	۵۰	۶۰	۶۰	۵۰	۴۰	۵۰	۵۰
مختصات Y	۵۰	۶۰	۷۰	۶۰	۴۰	۳۰	۴۰	۴۰	۶۰
تقاضا	۰	۲۰	۶۰	۴۰	۴۰	۸۰	۷۰	۰	۰
وزن	۰	۱/۸	۲/۵	۳/۳	۲/۹	۳/۱	۱/۴	۰	۰
ابعاد	۰	۱/۲	۱	۱/۱	۱/۳	۱/۰۵	۰/۹	۰	۰

جدول ۳. اطلاعات وسایل نقلیه نمونه مسئله

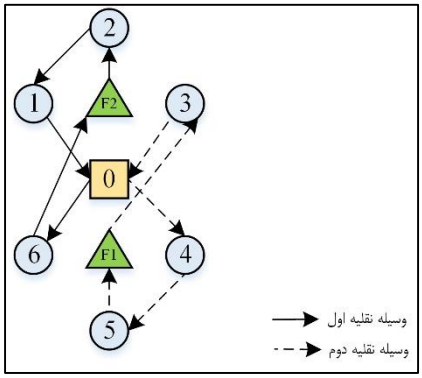
	وسیله نقلیه اول	وسیله نقلیه دوم
ظرفیت وزنی	۳۲۰	۵۰۰
ظرفیت حجمی	۱۵۰	۱۸۰
ظرفیت باتری	۴۰	۴۵
نرخ مصرف	۱	۱/۱

اگر مسئله بالا بدون درنظرگرفتن محدودیت حجم خودرو و تنها با محدودیت ظرفیت وزنی و ظرفیت باتری حل شود، جواب به‌صورت زیر خواهد شد:



شکل ۱. جواب نمونه مسئله بدون درنظرگرفتن محدودیت حجم خودرو

مجموع مسافت طی‌شده که همان مقدار تابع هدف مسئله است، در این حالت برابر ۱۲۴/۸۵ واحد است. جواب بالا محدودیت ظرفیت وزنی و سطح شارژ را ارضا می‌کند؛ ولی محدودیت حجم خودرو در آن در نظر گرفته نشده است. شکل ۲، جواب مسئله بالا با درنظرگرفتن محدودیت حجم خودرو است:



شکل ۲. جواب نمونه مسئله با درنظرگرفتن محدودیت حجم خودرو

طبق شکل ۲، با درنظرگرفتن محدودیت حجم خودرو، جواب بهینه مسئله تغییر می‌کند. مجموع مسافت طی‌شده در این حالت برابر ۱۴۹/۵۷ واحد است. قابل‌ملاحظه است که اضافه‌شدن محدودیت حجم خودرو باعث بدترشدن (افزایش) تابع هدف می‌شود؛ زیرا محدودیت حجم خودرو، مانند سایر محدودیت‌ها، باعث کاهش فضای جواب مسئله می‌شود.

با توجه به توضیحات و مثال شرح‌داده‌شده، مدل ریاضی مسئله مسیریابی خودروهای الکتریکی با درنظرگرفتن هم‌زمان محدودیت‌های وزنی، حجم و باتری ارائه می‌شود. فرضیه‌های مسئله به شرح زیر است:

۱. تمامی پارامترها قطعی و ثابت هستند؛
۲. وسایل نقلیه ناهمگن هستند؛
۳. هر مشتری فقط‌وفقط یک‌مرتبه و تنها توسط یک وسیله نقلیه بازدید می‌شود؛
۴. وسایل نقلیه از انبار شروع به حرکت می‌کنند و به انبار بازمی‌گردند؛
۵. ایستگاه شارژ مجدد در صورت نیاز بازدید می‌شود؛
۶. هر مشتری تنها یک نوع کالا سفارش می‌دهد.؛
۷. سطح شارژ خودروها هنگام خروج از انبار و پس از شارژ مجدد در ایستگاه‌ها به میزان ظرفیت باتری است.

مجموعه‌ها

N: تمامی گره‌ها (انبار، مشتریان و ایستگاه‌های شارژ مجدد)
N_C: مجموعه مشتریان
N_f: مجموعه جایگاه‌های سوخت
$\{0\}$: انبار
K: وسایل نقلیه

پارامترها

d_{ij}: فاصله بین گره i و گره j (Km)
D_i: تعداد تقاضای مشتری i (تقاضای انبار و ایستگاه‌های شارژ مجدد برابر صفر است).
m_i: وزن تقاضای مشتری i (Kg)
b_i: عرض تقاضای مشتری i (m)
h_i: طول تقاضای مشتری i (m)
s_i: ارتفاع تقاضای مشتری i (m)
B_i: مجموع ابعاد تقاضای مشتری i $B_i = D_i \times (b_i \times h_i \times s_i)$
C_k: ظرفیت وزنی وسیله نقلیه k (Kg)
A_k: ظرفیت حجمی وسیله نقلیه k (m^3)
F_k: ظرفیت باتری الکتریکی وسیله نقلیه k (KWh)
r_k: نرخ مصرف سوخت الکتریکی وسیله نقلیه k $(\frac{KWh}{Km})$
n : تعداد نقاط مشتریان و ایستگاه‌های شارژ مجدد

متغییرهای تصمیم

Z: مقدار تابع هدف

X_{ijk}: اگر وسیله نقلیه k بعد از گره i به گره j برود، مقدار ۱ و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

y_{ik}: سطح شارژ الکتریکی که وسیله k نقلیه هنگام ترک گره i دارد. $i \epsilon N$

q_{jk}: سطح شارژ الکتریکی که وسیله نقلیه k هنگام رسیدن به جایگاه سوخت j دارد. $j \in N_f$

u_{ik}: متغییر کمکی به‌منظور حذف زیرتور

حال مدل ریاضی مسئله ارائه می‌شود. مدل پیشنهادی بر اساس مدل مقاله مونتایا و همکاران (۲۰۱۵) توسعه داده شده است [۱۳]؛ به‌طوری‌که معادلات ۷ تا ۱۱، به‌عنوان نوآوری اصلی و توسعه مدل در نظر گرفته شده است.

$$Min\ Z = \sum_{k\in K}\sum_{i\in N}\sum_{j\in N} d_{ij}.X_{ijk} \quad (۱)$$

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

$$\sum_{k\in K}\sum_{j\in N} X_{ijk} \le 1 \qquad \forall\, i \in N_f \quad (۳)$$

$$\sum_{j\in N\setminus 0} X_{0jk} \le 1 \qquad \forall k \in K \quad (۴)$$

$$\sum_{i\in N} X_{jik} - \sum_{i\in N} X_{ijk} = 0 \qquad \forall\, j \in N\ , \forall k \in K \quad (۵)$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{j\in N} D_i.m_i.X_{ijk} \le C_k \qquad \forall k \in K \quad (۶)$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{j\in N} B_i.X_{ijk} \le A_k \qquad \forall k \in K \quad (۷)$$

$$r_k * d_{ij} * X_{ijk} - F_k(1 - X_{ijk}) \le y_{ik} - y_{jk} \le r_k * d_{ij} * X_{ijk} + F_k(1 - X_{ijk}) \qquad \forall\, i \in N\ , \forall j \in N_c\ , \forall k \in K \quad (۸)$$

$$r_k * d_{ij} * X_{ijk} - F_k(1 - X_{ijk}) \le y_{ik} - q_{jk} \le r_k * d_{ij} * X_{ijk} + F_k(1 - X_{ijk}) \qquad \forall\, i \in N\ , \forall j \in N_f\ , \forall k \in K \quad (۹)$$

$$y_{ik} \ge d_{i0} * r_k * X_{i0k} \qquad \forall\, i \in N\backslash\{0\}\ , \forall k \in K \quad (۱۰)$$

$$y_{ik} = F_k \qquad \forall\, i \in \{0\} \cup N_f\ , \forall k \in K \quad (۱۱)$$

$$u_{ik} - u_{jk} + n.X_{ijk} \le n - 1 \qquad \forall\, i \in N\ , \forall\, j \in N, \forall k \in K \quad (۱۲)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i \in N\ , \forall\, j \in N, \forall k \in K \quad (۱۳)$$

$$y_{ik}\ , q_{jk}\ , u_{ik} \ge 0 \qquad \forall\, i,j \in N\ , \forall k \in K \quad (۱۴)$$

تابع هدف ۱، نشان‌دهنده مجموع مسافت طی‌شده است. محدودیت ۲، نشان می‌دهد که هر مشتری باید حتماً بازید شود. محدودیت ۳، تضمین می‌کند که هر ایستگاه شارژ مجدد حداکثر یک‌مرتبه بازدید شود. محدودیت ۴، تضمین می‌کند هر وسیله نقلیه حداکثر یک‌مرتبه مورداستفاده قرار گیرد. محدودیت ۵، پیوستگی جریان مسیر وسایل نقلیه را تضمین می‌کند. محدودیت‌های ۶ و ۷، به‌ترتیب نشان می‌دهند که مجموع وزن بار و ابعاد تقاضای مشتریان بازدیدشده توسط هر خودرو نباید از ظرفیت وزنی و حجمی آن خودرو بیشتر شود. محدودیت‌های ۸ و ۹، سطح شارژ باتری خودروها را در هر گره محاسبه می‌کنند. محدودیت ۱۰، تضمین می‌کند که اگر مسیری بین یک گره و انبار وجود داشته باشد، سطح باتری در آن گره به میزان بازگشت به انبار باشد. محدودیت ۱۱، نشان می‌دهد که سطح شارژ باتری هر خودرو پس از خروج از انبار و پس از بازدید ایستگاه شارژ به‌اندازه ظرفیت باتری شارژ می‌شود. محدودیت ۱۲، زیرتور را از بین می‌برد. محدودیت‌های ۱۳ و ۱۴، نوع متغییرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

مدل ارائه‌شده، یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MILP)[1]است که مسئله به دلیل پیچیدگی بالا جزو مسائل دسته Np-Hard طبقه‌بندی می‌شود و رسیدن به جواب دقیق و حل آن در یک زمان چندجمله‌ای معقول، میسر نیست. ازآنجاکه مدل این مسئله توسعه‌ای از مسئله EVRP است و مسئله EVRP خود جزو مسائل Np-Hard است، مدل این پژوهش نیز جزو مسائل Np-Hard محسوب می‌شود. حل این قبیل از مسائل با روش‌های حل دقیق منطقی است؛ اما حل آن‌ها با ابعاد متوسط و بزرگ توسط روش‌های حل دقیق به دلیل افزایش نمایی زمان حل، توجیه‌پذیر نیست؛ بنابراین ارائه روش‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل این قبیل مسائل ضروری است.

٤. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

پیش از این بیان شد که مسئله مسیریابی خودروها از نوع مسائل Np-Hard است و با افزایش اندازه مسئله، زمان حل به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد و امکان استفاده از روش‌های دقیق برای حل آن‌ها در ابعاد بزرگ وجود ندارد؛ بنابراین با توجه به آنچه در پیشینه موضوع بیان شد، روش‌های فراابتکاری برای حل این مسائل به‌کار می‌رود. در این بخش با استفاده از روش فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید، مدل پژوهش حل می‌شود.

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید. الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده به‌اختصار SA[2]، یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری ساده و اثربخش در حل مسائل بهینه‌سازی است. منشأ این الگوریتم،

1. Mixed Integer Linear Programming
2. Simulated Annealing

پژوهش‌های کریک پاتریک و همکاران (۱۹۸۳) است [۱۲] که متخصصانی در زمینه فیزیک آماری بودند. آن‌ها برای حل مسائل سخت بهینه‌سازی، روشی مبتنی بر روش تبرید تدریجی پیشنهاد کردند. این روش شامل قراردادن ماده در دمای بالا و سپس کم‌کردن تدریجی دما است.

این الگوریتم یک جست‌وجوی تصادفی را به‌کار می‌گیرد که علاوه‌بر پذیرش حرکت‌های منجر به بهبود تابع هدف، حرکت‌هایی که در تابع هدف بهبود ایجاد نمی‌کنند را در طول اجرای الگوریتم می‌پذیرد. الگوریتم SA از یک جواب اولیه شروع کرده، یک جواب همسایگی برای جواب حاضر پیدا می‌کند و در صورت بهبود تابع هدف به آن همسایگی می‌رود؛ با یک احتمال حتی در صورت عدم‌بهبود تابع هدف نیز به آن همسایگی می‌رود. این کار منجر می‌شود تا از گرفتارشدن در نقطه بهینه محلی اجتناب شود. احتمال پذیرش جواب بهبودنیافته از رابطه ۱۵، محاسبه می‌شود. در این رابطه Δ مقدار تغییر در تابع هدف و T دمای اولیه است که از یک عدد به سمت صفر میل می‌کند و هر چه میزان T بیشتر باشد، احتمال قبول یک جواب بدتر بیشتر می‌شود.

$$p = \exp(-\frac{\Delta}{T}) \quad (۱۵)$$

الگوریتم از دو حلقه تشکیل می‌شود که یک حلقه دما را از دمای اولیه تا دمای نهایی کاهش می‌دهد. یکی از معمول‌ترین مکانیزم‌های کاهش دما عبارت است از: مکانیزم کاهش دمای نمایی در r گام با شروع از دمای اولیه T و فاکتور کاهش دمای $0 < \alpha < 1$. انجام می‌شود. در هر گام r تعدادی همسایگی ایجاد شده و پذیرش و یا عدم‌پذیرش آن بررسی می‌شود؛ سپس دمای جاری با رابطه $T_r = \alpha^r T$ کاهش می‌یابد. حلقه دوم تعداد تکرار را در هر دما مشخص می‌کند. عوامل مؤثر بر زمان‌بندی کاهش دما شامل موارد دمای اولیه، دمای نهایی، نحوه کاهش دما و تعداد تکرار در دما است.

مزیت اصلی الگوریتم SA توانایی آن برای رفع گرفتاری در نقطه بهینه محلی در حرکت به سمت نقطه بهینه است.

گام‌های الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

۱. تعریف مسئله: این مرحله شامل تعریف تابع هزینه و مشخص‌کردن تعداد تکرارها در هر دما تعداد کل تکرارها، ضریب سردشدن دما و غیره است؛

۲. مقداردهی اولیه: یک توالی تصادفی در ابتدا ایجاد می‌شود؛

۳. ایجاد یک جواب در همسایگی جواب فعلی؛

۴. ارزیابی: در این مرحله مقدار تابع هزینه به‌ازای همسایگی جدید محاسبه می‌شود؛

۵. همسایه از جواب فعلی بهتر است: حرکت به جواب جدید؛

۶.تابع احتمال رابطه ۱۵ از عدد تصادفی یک‌نواخت بزرگ‌تر است؛ حرکت به جواب جدید؛
۷. در غیر این صورت بازگشت به گام ۳؛
۸. به‌روزرسانی پارامترهای الگوریتم و مسئله؛
۹. حفظ بهترین جواب؛ چون لزوماً همیشه بهترین نیست؛
۱۰. تکرار: در صورت عدم‌برقراری شرایط اتمام الگوریتم؛ حرکت به گام ۳.

ساختار نمایش پاسخ. مهم‌ترین جزء در اجرای یک الگوریتم فراابتکاری، نحوه تعیین ساختار نمایش جواب است. نمایش جواب یک مسئله متفاوت از مسائل دیگر است و تعیین مناسب آن می‌تواند به بهبود عملکرد الگوریتم منجر شود.

ازآنجاکه مدل پیشنهادی این پژوهش توسعه‌ای از مسئله مسیریابی خودرو است، برای ایجاد ساختار جواب از یک جایگشت تصادفی که ترتیب بازدید و نحوه تخصیص گره‌ها به خودروها را نشان می‌دهد، استفاده می‌شود. بدین منظور با فرض مسئله تک‌انباره و ناهمگن خودروها: C: تعداد مشتریان، F: تعداد ایستگاه‌های شارژ مجدد، K: تعداد خودروهای دردسترس؛ ساختار جواب یک جایگشت تصادفی به ابعاد $C+F+K-1$ است. برای درک صحیح مطلب یک مثال عددی ارائه می‌شود:

فرض شود در مسئله تعداد مشتریان برابر ۸، تعداد ایستگاه‌های شارژ برابر ۲ و تعداد خودروها برابر ۲ باشد، ساختار جواب یک جایگشت به ابعاد ۸+۲+۲−۱=۱۱ مطابق شکل ۳ می‌شود. بدین معنا که اعداد ۱ تا ۱۱ به‌صورت تصادفی در یک ماتریس تک‌سطری قرار بگیرند.

۶	۱	۳	۹	**۱۱**	۲	۵	۴	۷	۱۰	۸

شکل ۳. نحوه نمایش پاسخ

برای تفسیر ماتریس عدد ۱۱ که در جایگشت بالا با دایره مشخص شده است، جداکننده بین گره‌های تخصیص‌داده‌شده به خوروی اول و خودروی دوم است و ایستگاه‌های شارژ با زیرخط مشخص شده‌اند. نحوه تعیین ترتیب بازدید گره‌ها به‌صورت زیر است:

خودروی اول از انبار شروع به حرکت می‌کند و پس از بازدید مشتریان ۶، ۱ و ۳ به ایستگاه شارژ ۹ می‌رود و به انبار باز بازمی‌گردد. مشابهاً خودروی دوم حرکت خود را از انبار آغاز می‌کند و پس از بازدید مشتریان ۲، ۵، ۴ و ۷ به ایستگاه شارژ ۱۰ می‌رود و پس از آن مشتری ۸ را بازدید می‌کند و در انتها به انبار باز بازمی‌گردد.

متغییر تصمیم بازدید هر گره از این نحوه نمایش جواب به‌راحتی قابل‌استخراج بوده و متغییرهای مرتبط با میزان بار حمل‌شده و سطح شارژ باتری نیز با مشخص‌شدن مسیر هر خودرو قابل‌محاسبه است.

تضمین موجه‌بودن جواب. در هر تکرار الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای بررسی موجه‌بودن جواب از تکنیک تابع جریمه استفاده می‌شود. بدین منظور باید محدودیت‌های سوخت وسیله نقلیه هنگام رسیدن به گره‌ها مقداری مثبت باشد؛ همچنین مجموع وزن بار حمل‌شده و ابعاد آن نباید از ظرفیت وسیله نقلیه تجاوز کند. در روش تابع جریمه، به‌ازای هر واحد تخطی از فضای موجه‌بودن، یک جریمه بسیار بزرگ به تابع هدف اعمال می‌شود که این خود باعث بدترشدن تابع هدف خواهد شد. توابع جریمه استفاده‌شده به شرح زیر است:

$$PF_1: \max(-F, 0) \quad (۱۶)$$

در رابطه ۱۶، مقدار F سطح شارژ وسیله نقلیه هنگام رسیدن به هر گره اعم از مشتریان، ایستگاه شارژ و انبار است.

$$PF_2 = \max\left(\frac{UWC}{C} - 1{,}0\right) \quad (۱۷)$$

در رابطه ۱۷، UWC مجموع بار وزنی حمل‌شده توسط وسیله نقلیه و C ظرفیت وزنی وسیله نقلیه است.

$$PF_3 = \max\left(\frac{UAC}{A} - 1{,}0\right) \quad (۱۸)$$

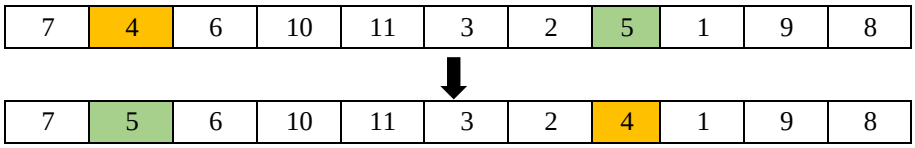
در رابطه ۱۸، UAC مجموع ابعاد حمل‌شده توسط وسیله نقلیه و A ظرفیت ابعادی وسیله نقلیه است. بر اساس روابط ۱۶، ۱۷ و ۱۸، تابع هدف الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum_{k\in K}\sum_{i\in N}\sum_{j\in N} d_{ij}.X_{ijk} + M.(PF_1 + PF_2 + PF_3) \quad (۱۹)$$

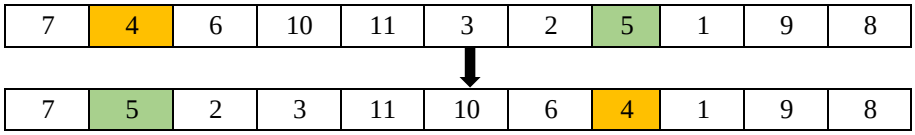
در رابطه ۱۹، مقدار M جریمه اعمال‌شده به تابع هدف بابت تخطی از مقدار موجه است.

مکانیزم ایجاد همسایگی. در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای رسیدن به یک حل جدید، نیاز است که در ساختار جواب فعلی تغییری ایجاد شود تا یک همسایگی جدید در فضای حل پیدا شود. در این الگوریتم ۳ اپراتور ایجاد همسایگی اعمال می‌شود که در هر تکرار از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، یکی از این ۳ عملگر با احتمال یکسان به تصادف انتخاب می‌شوند:

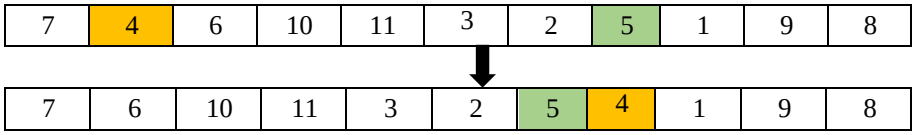
تعویض[1]: دو گره به تصادف انتخاب می‌شوند و جای آن‌ها با یکدیگر عوض می‌شود.



معکوس‌سازی[2]: در این روش علاوه بر عوض‌شدن جای دو گره، جای گره‌های میانی آن‌ها نیز معکوس می‌شود.



حذف و انتقال[3]: در این روش گره اول انتخاب‌شده حذف و به بعد از گره دومی منتقل می‌شود.



تنظیم پارامتر. برای هر الگوریتم فراابتکاری، پارامترهای زیادی وجود دارد که باید تنظیم شوند. منظور از تنظیم پارامتر، انتخاب بهترین مقدار یا حالت برای پارامترها است؛ به‌نحوی‌که الگوریتم بهترین عملکرد ممکن را از خود نشان دهد. برای این منظور عموماً از تکنیک طراحی آزمایش‌ها بهره‌گیری می‌شود. طراحی آزمایش‌ها مجموعه‌ای از آزمایش‌ها است که در آن‌ها با ایجاد تغییرات هدفمند در متغیرهای ورودی یک فرآیند، تغییرات ایجادشده بر روی متغیر خروجی با پاسخ ارزیابی می‌شود. برای این کار، روش‌های آماری متعددی وجود دارد؛ اما استفاده از رویکردهایی چون

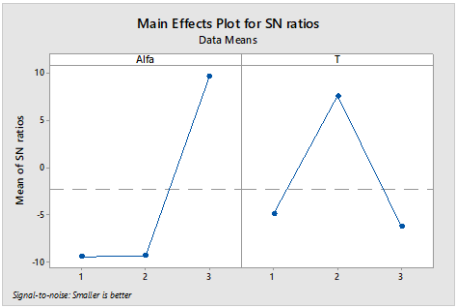
1. Swap
2. Reversion
3. Insertion

آزمایش‌ها عاملی کامل همواره صرفه اقتصادی ندارد. در این‌گونه آزمایش‌ها، تعداد آزمایش‌های لازم برابر $N = L^m$ است که در آن N تعداد آزمایش‌ها، L تعداد سطوح هر عامل و m تعداد عامل‌ها است؛ بنابراین با افزایش تعداد عامل‌ها و سطوح آن‌ها، محاسبات لازم برای انجام آزمایش‌ها بسیار پیچیده و زمان‌بر می‌شود. تاگوچی یکی از روش‌های رایج برای طراحی آزمایش‌ها است که در آن از طراحی آزمایش‌های کسری استفاده می‌شود. در این روش، زیرمجموعه مناسبی از آزمایش‌های عاملی کامل انتخاب شده و به‌منظور یافتن ترکیب بهینه مقدار عامل‌ها اجرا می‌شوند. بدین ترتیب می‌توان در زمان لازم برای انجام آزمایش‌ها صرفه‌جویی کرد. برای طراحی آزمایش‌ها در این پژوهش از نرم‌افزار Minitab ۱۸ استفاده شده است. الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید دارای ۲ پارامتر است (پارامترهای الگوریتم فراابتکاری همان فاکتورهای تاگوچی هستند) که برای هر کدام ۳ سطح در نظر گرفته می‌شود. آزمایش‌های موردنیاز برای تحلیل تاگوچی (شامل ۹ آزمایش) توسط نرم‌افزار مینی‌تب طراحی شده و بر روی مثالی با ابعاد متوسط آزمایش می‌شود. سطوح پارامترها و بهترین مقدار به‌دست‌آمده برای هر پارامتر در جدول ۴، ارائه شده است.

جدول ۴. مقادیر پارامترهای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

پارامتر	توضیح	سطح کم (۱)	سطح متوسط (۲)	سطح زیاد (۳)
Alfa	ضریب سردسازی	۰/۸	۰/۹	۰/۹۹
T	دمای آغازین	۲۰	۳۰	۴۰

شایان ذکر است که پارامترهای تعداد تکرار داخلی و خارجی نیاز به تنظیم ندارند؛ زیرا مقدار این پارامترها هر چه بیشتر باشد، طبیعتاً باعث بهبود جواب می‌شود؛ زیرا باعث افزایش زمان حل و اکتشاف گسترده‌تری از فضای حل می‌شوند؛ ازاین‌رو برای تنظیم پارامتر تنها دو پارامتر ضریب سردسازی و دمای آغازین که مقدار آن روی عملکرد الگوریتم تأثیر دارد، تنظیم می‌شوند. با اجرای طرح آزمایش L9 بر روی یک نمونه مسئله و بی‌مقیاس‌سازی مقادیر تابع هدف به‌دست‌آمده و به‌منظور کمینه‌سازی مقادیر بی‌مقیاس‌شده، نمودار نسبت سیگنال به نویز مطابق شکل ۴، به‌دست می‌آید.



شکل ۴. نمودار سیگنال به نویز الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

بر اساس شکل ۴، مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم SA مطابق جدول ۵، است.

جدول ۵. مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

پارامتر	توضیح	مقدار بهینه
Alfa	ضریب سردسازی	۰/۹۹
T	دمای آغازین	۳۰

معیار توقف الگوریتم. مهیارهای توقف گوناگونی، مانند سپری‌شدن تعداد تکرار معین، سپری‌شدن یک زمان معین و رسیدن به انحراف ازپیش‌تعیین‌شده، برای الگوریتم‌های فراابتکاری وجود دارد. در این پژوهش معیار توقف الگوریتم، عدم‌بهبود جواب در ۱۰۰ تکرار متوالی است.

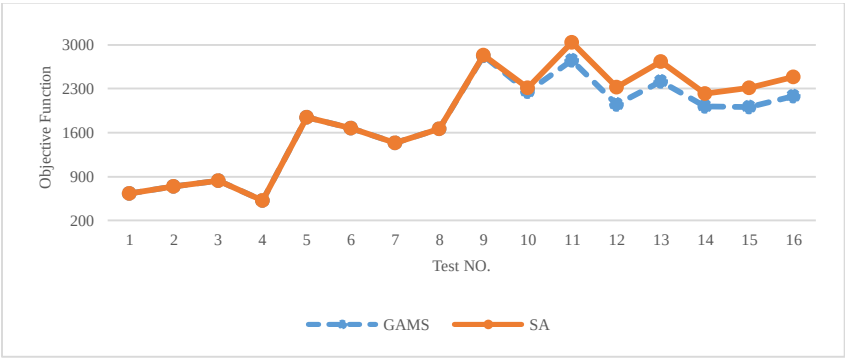
ایجاد و اجرای نمونه مسائل. به‌منظور حل مدل ریاضی با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ۳۰ نمونه مسئله به‌صورت تصادفی تولید شد. ابتدا برای اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده، مدل با نرم‌افزار GAMS 24.1.2 اجرا می‌شود تا از صحت مدل پیشنهادی اطمینان حاصل شود؛ سپس مسائل در اندازه‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۵، ۵۰، ۸۰ و ۱۰۰ گره با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید اجرا می‌شود و میزان انحراف جواب‌های الگوریتم از حل دقیق موردبررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۶. نتایج حل نمونه مسائل توسط نرم‌افزار GAMS و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

Test NO.	GAMS	GAMS TIME	SA	SA TIME	GAP(%)
۱	۶۲۶/۳۵۸	۰/۲۳	۶۲۶/۶۵۸	۱۲/۹۱	۰
۲	۷۴۶/۲۱۹	۰/۲۶	۷۴۶/۲۱۹	۱۲/۷۵	۰
۳	۸۳۲/۱۹۸	۰/۲۱۶	۸۳۲/۱۹۸	۱۲/۵	۰
۴	۵۱۹/۶۲۱	۰/۲۲۵	۵۱۹/۶۲۱	۱۴/۲۶	۰
۵	۱۸۴۵/۴۰۹	۶۰۶/۱۸	۱۸۴۵/۴۰۹	۳۰/۵۳	۰
۶	۱۶۷۱/۷۷۷	۹۴۶/۱	۱۶۷۱/۷۷۷	۲۹/۹	۰
۷	۱۴۳۵/۵۶	۴۰۳/۵۴	۱۴۳۵/۵۶	۳۵/۵	۰
۸	۱۶۵۸/۳۴۸	۶۵۲/۸۳۳	۱۶۵۸/۳۴۸	۳۲/۷	۰
۹	۲۸۲۳/۷۶	۹۳۶۳/۹۷۵	۲۸۳۱/۱۹۳	۷۵/۳	۰/۲۷
۱۰	۲۲۵۲/۱۲	۸۷۵۲/۳۶	۲۳۱۷/۱۷	۴۸/۶۴	۲/۸۹
۱۱	۲۷۵۴/۳۹	۹۳۲۴/۲۱	۳۰۳۴/۶۸	۴۷/۸۸	۱۰/۱۸
۱۲	۲۰۴۸/۴۵	۸۸۵۶/۴۴	۲۳۲۵/۴۱۶	۷۱/۸۵	۱۳/۵۳
۱۳	۲۴۱۹/۲۵	۱۵۲۵۲/۹۸	۲۷۲۸/۳۰۵	۱۱۷/۱	۱۲/۷۸
۱۴	۲۰۱۷/۹۲	۱۴۵۲۳/۳	۲۲۲۴/۱۴۵	۱۰۱/۳	۱۰/۲۲
۱۵	۲۰۰۸/۲۱	۱۵۹۶۳/۲	۲۳۱۲/۲۴۴	۱۱۴/۵۸۵	۱۵/۱۴

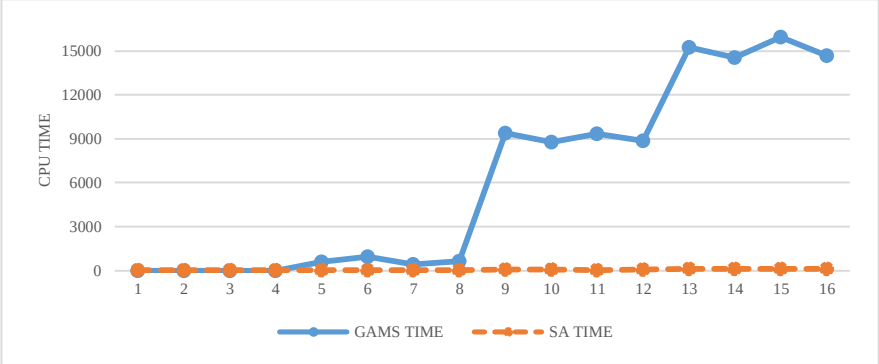
Test NO.	GAMS	GAMS TIME	SA	SA TIME	GAP(%)
۱۶	۲۱۸۶/۳۶	۱۴۶۶۵/۸۵	۲۴۸۲/۵۷	۹۷/۷۶	۱۳/۵۵
۱۷	-	-	۴۳۸۴/۴۱۵	۱۹۵/۴۱	-
۱۸	-	-	۴۹۱۸/۰۲۵	۲۱۱/۶۳	-
۱۹	-	-	۳۶۹۷/۴۸	۲۰۳/۶۸	-
۲۰	-	-	۲۹۰۵/۳۱۶	۲۴۴/۱۳	-
۲۱	-	-	۲۷۲۴/۵۸۳	۲۱۶/۵	-
۲۲	-	-	۵۲۳۵/۹۳۰۳	۵۸۸/۱۲۵	-
۲۳	-	-	۵۱۳۹/۸۶	۵۸۹/۱	-
۲۴	-	-	۴۴۶۱/۷۸	۵۵۴/۷۱	-
۲۵	-	-	۹۳۷۸/۹۸۸	۶۰۴/۴۳	-
۲۶	-	-	۷۷۵۰	۴۷۹/۳۳	-
۲۷	-	-	۹۹۲۲/۷۹۲	۳۵۷/۳۲۸	-
۲۸	-	-	۱۱۸۶۶/۷	۴۲۰/۹۸	-
۲۹	-	-	۱۳۲۲۵/۶۲	۷۵۴/۲۸	-
۳۰	-	-	۸۹۰۲/۱۱	۶۵۵/۱۵	-

با توجه به جدول ۶، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای مسائل بسیار کوچک دارای شکاف بهینگی بسیار اندکی است که این نشان از کارکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی دارد؛ همچنین در ابعاد متوسط و بالا (۳۵ گره به بالا) نرم‌افزار گمز قادر به رسیدن به جواب بهینه در زمان ۵ ساعت نیست و با افزایش تعداد گره‌ها، زمان حل به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد که به دلیل NP-Hard بودن مدل است. شکل ۵، جواب بین الگوریتم SA و نرم‌افزار گمز برای ابعاد ۵ تا ۲۰ گره را نشان می‌دهد.



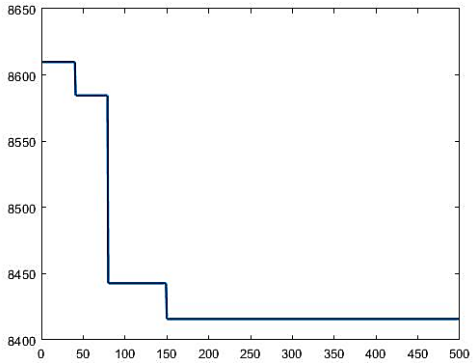
شکل ۵. مقادیر تابع هدف حاصل از الگوریتم SA و نرم‌افزار GAMS

شکل ۵، نشان می‌دهد که جواب‌ها در ابعاد کوچک با هم برابر است و وقتی ابعاد مسئله بالا می‌رود دارای شکاف بهینگی می‌شود. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که زمان حل الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بسیار کمتر از نرم‌افزار GAMS بوده و این الگوریتم در یک زمان مناسب‌تر به جواب‌هایی مناسب رسیده است.



شکل ۶. زمان حل الگوریتم SA و نرم‌افزار GAMS

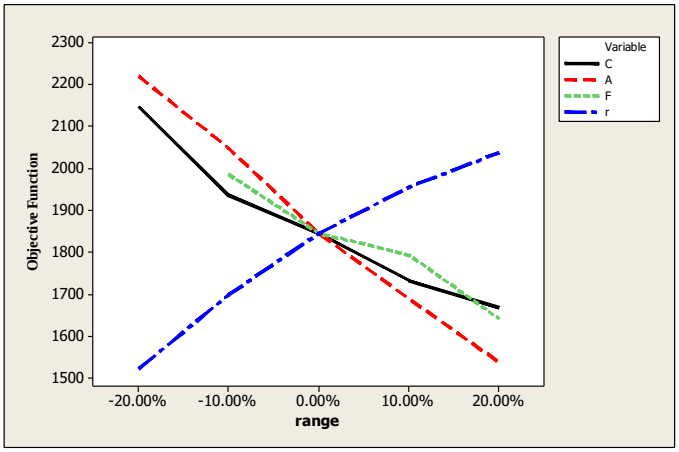
شکل ۷، نمودار همگرایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را نشان می‌دهد. در این نمودار واضح است که الگوریتم از تکرار ۱۵۰ به بعد به همگرایی رسیده است.



شکل ۷. نمودار همگرایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

تحلیل حساسیت. به‌منظور بررسی تغییرات پارامترهای مدل و اثر آن‌ها بر مقدار تابع هدف از تحلیل حساسیت استفاده می‌شود. بدین منظور ۴ پارامتر ظرفیت سوخت وسیله نقلیه، نرخ مصرف سوخت، محدودیت وزنی و ابعادی وسایل نقلیه در نظر گرفته می‌شود. شکل ۸، روند تغییرات پارامترهای ذکرشده را در بازه ۲۰- درصد تا ۲۰+ درصد با گام ۱۰+ درصد نشان می‌دهد. همان‌طور

که مشاهده می‌شود با کاهش پارامترهای ظرفیتی (باتری، حجم و وزن)، مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد؛ چراکه با کاهش این مقادیر تعداد وسیله نقلیه موردنیاز برای سرویس‌دهی بیشتر می‌شود و هزینه‌های طی مسیر و هزینه استفاده از خودروها افزایش می‌یابد؛ همچنین با افزایش این پارامترها مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد که دلیل آن عکس حالت کاهشی است. برای پارامتر نرخ مصرف با کاهش آن مقدار تابع هدف کم می‌شود که به‌دلیل کاهش بازدید ایستگاه شارژ است که بر تعداد وسیله نقلیه استفاده‌شده و هزینه‌های مسیر تأثیر مستقیم دارد.



شکل ۸ تحلیل حساسیت پارامترهای مدل

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، مسئله مسیریابی خودروهای الکتریکی با درنظرگرفتن محدودیت حجم خودروها مدل‌سازی شده و توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید حل شد؛ به‌طوری‌که در مدل پیشنهادی برای نزدیک‌ترکردن مسئله به دنیای واقعی، محدودیت ظرفیت حجمی خودرو به مدل نیز اعمال شد. وسایل نقلیه الکتریکی با توجه به اینکه ابعاد باتری آن‌ها حجم زیادی از فضای دردسترس را اشغال می‌کند، حجم باری محدودتری نسبت به وسایل نقلیه معمولی دارند؛ بنابراین به‌منظور اطمینان از به‌دست‌آوردن جواب‌های موجه در سیستم مسیریابی، این محدودیت در مدل در نظر گرفته شد. اجرای یک نمونه مسئله نشان داد که اعمال محدودیت حجم باری خودرو می‌تواند بر مقدار تابع هدف و ترتیب بازدید مشتریان و ایستگاه‌های شارژ تأثیر بگذارد. برای حل مسئله در ابعاد بالا از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده شد.

نتایج حاصل از اجرای ۳۰ نمونه مسئله ایجادشده تصادفی حاکی از آن است که این الگوریتم در مسائل با اندازه کوچک به جواب بهینه می‌رسد و با افزایش ابعاد، دارای انحراف از جواب بهینه

می‌شود؛ همچنین زمان حل الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در مقایسه با نرم‌افزار GAMS بسیار کمتر بوده و برای ابعاد متوسط و بزرگ توجیه‌پذیر است.

درنظرگرفتن ناوگانی مختلط شامل خودروی الکتریکی و هیبریدی، اعمال سایر محدودیت‌های مرتبط با حجم خودرو، نظیر تعیین چیدمان کالاها و محدودیت فشار قابل‌تحمل اقلام، از نوآوری‌های قابل‌توسعه بر روی این مدل است؛ همچنین می‌توان از سیاست شارژ جزئی برای شارژ باتری‌ها استفاده کرد. درنظرگرفتن امکان تعویض باتری در ایستگاه‌های شارژ و توازن هزینه بین تعویض و شارژ باتری یکی دیگر از پیشنهادهای این پژوهش است؛ همچنین می‌توان از الگوریتم‌های ابتکاری به‌منظور تعیین بازید ایستگاه‌های شارژ و تولید جواب اولیه باکیفیت به‌منظور بهبود الگوریتم حل پیشنهادی استفاده کرد.

منابع

1. Ceschia, S., Schaerf, A., & Stützle, T. (2013). Local search techniques for a routing-packing problem. *Computers & industrial engineering*, *66(4)*, 1138-1149.
2. Errico, F., Desaulniers, G., Irnich, S., & Schneider, M. (2015). *Branch-price-and-cut algorithms for electric vehicle-routing Problems with time Windows* (No. 77209). Darmstadt Technical University, Department of Business Administration, Economics and Law, Institute for Business Studies (BWL).
3. Farazmand, M., & Pishvaee, M. (2018). Multimodal Transportation Network Design Model under Uncertainty Conditions (Case Study: Cement Transportation in Iran). *Industrial Management Perspective*, *31*, 115-139 (in Persian).
4. Felipe, Á., Ortuño, M. T., Righini, G., & Tirado, G. (2014). A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *71*, 111-128.
5. Feng, W., & Figliozzi, M. (2013). An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *26*, 135-145.
6. Figliozzi, M. (2010). Vehicle routing problem for emissions minimization. *Transportation Research Record*, *2197(1)*, 1-7.
7. Gendreau, M., Iori, M., Laporte, G., & Martello, S. (2006). A tabu search algorithm for a routing and container loading problem. *Transportation Science*, *40(3)*, 342-350.
8. Hiermann, G., Puchinger, J., Ropke, S., & Hartl, R. F. (2016). The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations. *European Journal of Operational Research*, *252(3)*, 995-1018.
9. Iori, M., & Martello, S. (2010). Routing problems with loading constraints. *Top*, *18(1)*, 4-27.
10. Junqueira, L., Oliveira, J. F., Carravilla, M. A., & Morabito, R. (2013). An optimization model for the vehicle routing problem with practical three-dimensional loading constraints. *International Transactions in Operational Research*, *20(5)*, 645-666.
11. Keskin, M., & Çatay, B. (2016). Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *65*, 111-127.
12. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, *220(4598)*, 671-680.
13. Macrina, G., Pugliese, L. D. P., Guerriero, F., & Laporte, G. (2019). The green mixed fleet vehicle routing problem with partial battery recharging and time windows. *Computers & Operations Research*, *101*, 183-199.
14. Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J. E., & Villegas, J. (2015). *The electric vehicle routing problem with partial charging and nonlinear charging function* (Doctoral dissertation, LARIS).
15. Mortazavi, S., & Seifbargi, M. (2018). Two-Objective Modeling of Location-Allocation Problem in a Green Supply Chain Considering Transportation System and CO2 Emission. *Industrial Management Perspective*, *29*, 163-185 (In Persian).

16. Rad, A., Sadeghi, A., & Ghasemi, B. (2016). Mathematical Modeling of Two-Echelon with Multiple Manufacturers and Transportation in the Supply Chain. *Industrial Management Perspective*, *23*, 77-100 (in Persian).
17. Revesz, R. L., Howard, P. H., Arrow, K., Goulder, L. H., Kopp, R. E., Livermore, M. A., ... & Sterner, T. (2014). Global warming: Improve economic models of climate change. *Nature News*, *508(7495)*, 173.
18. Sassi, O., Cherif-Khettaf, W. R., & Oulamara, A. (2015). Iterated tabu search for the mix fleet vehicle routing problem with heterogenous electric vehicles. In *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences* (pp. 57-68). Springer, Cham.
19. Sbihi, A., & Eglese, R. W. (2007). Combinatorial optimization and green logistics. *4OR*, *5(2)*, 99-116.
20. Schneider, M., Stenger, A., & Goeke, D. (2014). The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation Science*, *48(4)*, 500-520.
21. Tarantilis, C. D., Zachariadis, E. E., & Kiranoudis, C. T. (2009). A hybrid metaheuristic algorithm for the integrated vehicle routing and three-dimensional container-loading problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *10(2)*, 255-271.
22. Vega-Mejía, C. A., Montoya-Torres, J. R., & Islam, S. M. (2019). A nonlinear optimization model for the balanced vehicle routing problem with loading constraints. *International Transactions in Operational Research*, *26(3)*, 794-835.
23. Yang, J., & Sun, H. (2015). Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles. *Computers & Operations Research*, *55*, 217-232.
24. Zhang, S., Gajpal, Y., Appadoo, S. S., & Abdulkader, M. M. S. (2018). Electric vehicle routing problem with recharging stations for minimizing energy consumption. *International Journal of Production Economics*, *203*, 404-413.

Solving the Electric Vehicle Routing Problem Considering the Vehicle Volume Limitation Using a Simulated Annealing Algorithm

Amir Eslaminia[*], Parham Azimi[**]

Abstract

This study investigates the problem of electric vehicles routings with a limit on the volume of vehicles capacity. In this regard, the fleet which includes some electric vehicles with given limited battery capacities, should also be taken into account in the planning of distribution. To this end, recharge points are provided in the transmission network to recharge the cars and complete their routes if a battery needs to be recharged. As electric vehicles are only used in the distribution of goods, other aspects should also be considered. One of the important aspects of cargo volume limitation is the relatively low cargo space. Sometimes the goods assigned to a vehicle may be justified by the weight limit but the total volume of goods may exceed the freight volume. Thus, in this research, a mathematical programming model for the problem is presented. Then, several problem instances are designed to validate the model. Then a simulated annealing based algorithm is developed to solve large-scale problems for real world applications.

Keyword: Vehicles Navigation; Electric Vehicles; Recharge Stations; Volume Capacity; Simulated Annealing Algorithm.

Received: June 08, 2019, Accepted: Jan. 23, 2020.
* Master of Science in Industrial Engineering, Qazvin Research Branch, Islamic Azad University.
** Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University (Corresponding Author).
E-mail: p.azimi@yahoo.com