فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۳، شماره ۱، پاییز ۱۴۰۰، ص. ۱۰۹۰-۱۰۷۱
مقاله پژوهشی

مدل‌سازی ریاضی جدید برای مسئله موجودی - مسیریابی وسائط نقلیه الکتریکی

کوثر صادقی ولنی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، پردیس بین المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش
رضا توکلی مقدم (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران
فریبرز جولای، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران
E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۰۲ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۵

چکیده

فعالیت‌های صنعت حمل‌ونقل تاثیرات منفی قابل توجهی روی محیط زیست، اقتصاد و سلامت انسان دارد. از جمله راه‌کارهای کاهش اثرات زیست محیطی استفاده از وسائط نقلیه الکتریکی است. در این مقاله، یک مدل ریاضی جدید برای مسئله موجودی - مسیریابی وسائط نقلیه الکتریکی ارائه می‌شود. تابع هدف مدل ارائه شده شامل کمینه‌سازی کل هزینه‌های سیستم می‌باشد. از آن جاییکه باتری‌های وسائط نقلیه الکتریکی دارای ظرفیت مشخصی هستند، حداکثر مسافت قابل طی محدود است. لذا، در صورت اتمام شارژ باتری، امکان تعویض باتری در ایستگاه‌های تعویض باتری وجود دارد. در مدل پیشنهادی، کمبود مجاز نیست و تقاضای مشتریان قطعی و مشخص فرض می‌شود. با توجه به NP-hard بودن مسئله موردنظر، یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جستجوی همسایگی متغیر برای حل مسئله در ابعاد بزرگ پیشنهاد می‌شود. به منظور بررسی عملکرد این الگوریتم پیشنهادی، نتایج آن با حل حاصل از یک روش دقیق و یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مقایسه می‌شود. نتایج محاسباتی نشان دهنده عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: مساله مسیریابی - موجودی، وسائط نقلیه الکتریکی، الگوریتم فراابتکاری

۱. مقدمه

حمل‌ونقل و مدیریت موجودی دو عنصر اصلی لجستیک می‌باشند. هماهنگی این دو عنصر که به عنوان مسئله مسیریابی – موجودی (IRP) شناخته می‌شود عموما با سیستم مدیریت موجودی توسط فروشنده به کار برده می‌شود [Repoussis et al, 2008]. این مسئله را می توان در قالب یک گراف کامل $G=(V,A)$ تعریف کرد، که $V=\{0,1,2,...,n\}$ و A به صورت مجموعه گره‌ها و مجموعه کمان‌های بین هر دو گره تعریف می‌شود، که در آن گره‌ها و کمان‌ها به ترتیب نشان دهنده مشتریان و مسیر بین آنها، می‌باشد. علاوه بر این، $T=\{1,2,...,P\}$ نشان‌دهنده دوره‌های برنامه‌ریزی است. در IRP ، تامین‌کننده باید چهار تصمیم زیر را به طور همزمان اتخاذ کند:

۱- یک مشتری در چه دوره‌های زمانی بازدید شود؟

۲- چه مقدار محصول در هر بازدید به هر مشتری تحویل داده شود؟

۳- مشتریان در هر دوره چگونه به وسائط نقلیه تخصیص داده شوند؟

٤- ترتیب مشتریان در هر مسیر چگونه باشد؟

این تصمیمات باید به گونه‌ای گرفته شوند که هیچ مشتری در هیچ دوره‌ای با کمبود روبه‌رو نشود. مقدار محصولی که به هر یک از مشتریان تحویل داده می‌شود نباید بیشتر از ظرفیت ذخیره‌سازی مشتری باشد. کل محصولی که در هر دوره به مشتریان فرستاده می‌شود نباید از مقدار محصول موجود در منبع تجاوز کند و مقدار بار که هر وسیله حمل می‌کند نباید از ظرفیت آن تجاوز کند. IRP به دلیل پاسخگویی همزمان به مسیریابی وسیله نقلیه (VRP) و سطح موجودی نقش مهمی در لجستیک ایفا می‌کند و ثابت شده است که IRP یک مسئله NP-hard است [Liao et al, 2016].

ساده ترین حالت از مسأله مسیریابی مسأله فروشنده دوره گرد (TSP) است. در حالی که مسأله VRP به دنبال یافتن مسیرهای بسته ای برای هرکدام از وسایل نقلیه است که از یک انبار شروع و به آن ختم شود. در دنیای واقعی در مسایل VRP ، قیدهایی ظاهر م یشوند که رعایت آنها به شدت در انتخاب جواب تأثیرگذار است[کهفی و توکلی،۱۳۹٤]. فعالیت‌های صنعت حمل‌ونقل تاثیرات منفی قابل توجهی روی محیط، اقتصاد و سلامت انسان دارد [Koç, and Karaoglan, 2016]. با افزایش نگرانی‌ها در رابطه با ابعاد و مسائل زیست محیطی حمل‌ونقل، شرکت‌های لجستیک به دنبال کاهش تاثیرات زیست محیطی عملیات خود می‌باشند. از جمله اقدامات صورت گرفته استفاده از وسائط نقلیه با سوخت‌های جایگزین (AFV) از جمله انرژی الکتریکی (وسائط نقلیه الکتریکی(EV)) می‌باشد که دارای محدودیت‌هایی هستند. از جمله این محدودیت‌ها رنج حرکتی محدود آنها به دلیل ظرفیت محدود باتری‌ها و زمان طولانی شارژ باتری می‌باشد. به دلیل همین محدودیت رنج حرکتی ممکن است وسیله نقلیه الکتریکی برای تکمیل یک مسیر برای خدمت‌رسانی به مشتریان و بازگشت به دپو نیاز به شارژ باتری داشته باشد. به دلیل طولانی بودن زمان شارژ شدن می‌توان از تکنیک تعویض باتری به جای شارژ آن استفاده کرد. به دلیل نبود زیرساخت کافی و مناسب برای تعویض و همچنین فقدان استانداردهای یکسان برای باتری و زیرساخت، نیاز به استقرار ایستگاه‌های تعویض باتری توسط خود شرکت لجستیک وجود دارد. ایستگاه‌ها در بهینگی طرح مسیر وسائل نقش مهمی دارد. تحقیقات در زمینه مسیریابی وسائط نقلیه الکتریکی (EVRP) محدود بوده و علی‌رغم اهمیت موضوع تاکنون به مسئله مسیریابی وسائط نقلیه موجودی الکتریکی پرداخته نشده است. در این مقاله، یک مدل ریاضی جدید برای مسئله موجودی – مسیریابی وسائط نقلیه الکتریکی ارائه می‌شود. تابع هدف مدل ارائه شده شامل کمینه‌سازی کل هزینه‌های سیستم می‌باشد. وسائط نقلیه الکتریکی هستند و حداکثر مسافت قابل طی آنها،

محدود است. از این رو در صورت اتمام شارژ باتری، امکان تعویض باتری در ایستگاه‌های تعویض باتری وجود دارد. با توجه به NP-hard بودن مسئله پیشنهادی، یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مسئله در ابعاد بزرگ طراحی شده است. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج با نتایج حاصل از حل دقیق، و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی است.

در ادامه و در بخش دوم ادبیات موضوع ارائه می‌گردد. در بخش سوم و چهارم تعریف مسئله و مدل ریاضی ارائه می شود، در فصل پنجم روش‌های حل پیشنهادی توضیح داده می شود. بخش ششم به نتایج عددی تخصیص یافته است و در نهایت در بخش هفتم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲. ادبیات موضوع

مقالات کمی در زمینه VRP با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص EV وجود دارد. ونگ و شن یک مدل که تعداد تورها و زمان کل سفر را حداقل می‌کند ایجاد کردند. رنج حرکت وسیله نقلیه محدود است ولی مدت زمان شارژ، پنجره زمانی و ظرفیت وسائط درنظر گرفته نشده‌اند. یک الگوریتم چندگانه و کلونی برای حل مسئله پیشنهاد شده است[Wang and Shen, 2007]. کنراد و فیگلیوزی یک فرمولبندی جریان – کمان برای مسئله مسیریابی وسیله نقلیه و شارژ مجدد آنها (RVRP) ارائه کردند که در آنEV ها با رنج حرکتی محدود می‌توانند در بین مسیر در مکان مشتری‌ها مجددا شارژ شوند. به جای استفاده از ایستگاه‌های شارژ مجدد اختصاصی، نویسندگان فرض می‌کنند که مجموعه‌ای از مشتریان عملیات شارژ مجدد را در مکانشان فراهم می‌کنند. EV می‌تواند عمل شارژ مجدد را تا یک درصد مشخص از حداکثر ظرفیت انجام دهد که شارژ سریع نامیده می‌شود. مدل دو هدفه است. هدف اول تعداد مسیرها یا وسائط نقلیه را حداقل می‌کند. و هدف دوم هزینه کل مرتبط یا مسافت سفر، زمان سرویس و شارژ مجدد وسیله نقلیه را حداقل می‌کند [Conrad and Figliozzi, 2011]. اردوغان و میلر– هوک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه سبز (G-VRP) شامل وسائط نقلیه الکتریکی (EV) را معرفی کردند. مسئله تعیین مسیرهای تحویل با کم‌ترین هزینه از یک دپو به مجموعه‌ای از مشتریان در محدوده زمانی از قبل مشخص شده و بدون تجاوز از رنج حرکتی وسیله نقلیه که بستگی به ظرفیت مخزن سوخت دارد می‌باشد و کل مسافت طی شده یا هزینه کل را حداقل می‌کند و طول مسیرها محدود است. ایستگاه‌های سوخت‌گیری مجدد ممکن است توسط یک مشتری چندین بار بازدید شود و یا اصلا بازدید نشود. برای تطبیق، بازدیدهای بالقوه از ایستگاه‌های شارژ در فرمولبندی مدل گراف EVRP با ساختن چندین کپی از گره‌های نشان دهنده ایستگاه‌های شارژ نشان داده شده است. آنها دو روش حل ابتکاری ساختاری ارائه کردند. روش ابتکاری اصلاح شده ذخیره‌سازی کلارک و رایت که برای شامل شدن گره‌های ایستگاه‌های سوخت جایگزین AFS در طول فرآیند ادغام توسعه داده شده است و الگوریتم خوشه‌بندی برمبنای چگالی و روش بهبوددهنده که از ویژگی‌های خاص مسئله استفاده می‌کند [Erdogan and Miller-Hooks, 2012]. اشنایدر و همکاران یک روش ابتکاری ترکیبی برای حل مسئله مسیریابی EV با پنجره زمانی و ایستگاه‌های شارژ مجدد(E-VRPTW) پیشنهاد کردند. هدف یافتن تورهایی است که محدودیت‌های شارژ و محدودیت‌های پنجره زمانی را تامین کند. مدل آنها مسافت کل طی شده به وسیله ناوگان همگن EV را حداقل می‌کند. و فرض می‌کند زمان شارژ باتری بستگی به مقدار باتری باقیمانده در هنگام رسیدن به ایستگاه شارژ دارد. مسئله به وسیله یک رویکرد جستجوی همسایگی متغیر (VNS) که از جستجوی ممنوع (TS) به عنوان تکنیک بهینه‌سازی محلی استفاده می‌کند حل می‌شود [Schneider et al, 2012].

هیرمن و همکاران مساله اندازه و ترکیب ناوگان و مسیریابی وسائل نقلیه با پنجره زمانی (E-FSMFTW) را بیان کردند که ناوگان شامل وسائل نقلیه الکتریکی می‌باشد. وسائل نقلیه

موجود از نظر ظرفیت حمل و نقل، اندازه باطری و قیمت متفاوتند. آنها مسأله را با الگوریتم شاخه و قیمت حل کردند. همچنین یک روش ابتکاری ترکیبی برای حل آن ارائه کردند. [Hiermann et al. 2016].

موراکامی مساله مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی و دیزلی را به صورت برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدلسازی کرد. وی تاثیر شرایط مختلف از جمله شیب جاده ها، سرعت و شتاب خودرو را بررسی نمود [Murakami, 2017].

ونگ و همکاران یک مدل بهینه سازی چند هدفه برای مسیریابی وسایل نقلیه الکتریکی ارائه کردند. آنها زمان سفر، مصرف انرژی و هزینه های شارژ را به عنوان اهداف مساله در نظر گرفتند. همچنین از رویکرد برنامه ریزی فازی و روابط اولویت فازی برای تبدیل سه تابع هدف به یک تابع هدف واحد استفاده کردند. برای حل مدل نیز یک الگوریتم ژنتیک ارائه نمودند [Wang et al, 2017].

مانسینی مسئله مسیریابی وسایل نقلیه ترکیبی را بررسی کرد که وسیله نقلیه هم از انرژی الکتریکی و هم از سوخت دیزلی استفاده می کند. هنگامی که باتری وسیله نقلیه کاملا تخلیه می شود، وسیله نقلیه به طور خودکار از سوخت دیزلی استفاده می کند. وی مساله را به صورت برنامه ریزی عددصحیح خطی مدل و برای حل آن یک الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ ارائه کرد [Mancini, 2017].

یکی از راه‌های غلبه بر محدودیت رنج حرکتی وسائط نقلیه الکتریکی و کوتاه کردن زمان شارژ باتری امکان استفاده از تکنولوژی‌های مختلف و شارژ مجدد بخشی(PR) به جای شارژ کامل (FR) می‌باشد. فلیپه و همکاران یک EVRP با چندین تکنولوژی شارژ را ارائه کردند. آنها الگوریتم‌های جستجوی محلی سازنده و قطعی و روش فراابتکاری براساس چهارچوب شبیه سازی تبرید (SA) را ارائه کردند. نتایج محاسباتی نشان داد استفاده از استراتژی‌های شارژ مجدد بخشی و فراهم بودن تکنولوژی‌های شارژ مجدد چندگانه می‌تواند باعث ذخیره هزینه و انرژی شود و در برخی مثال‌ها امکان‌پذیری را تضمین می‌کند [Felipe et al, 2014]. دسولنیر و همکاران مسئله EVRPTW را با در نظر گرفتن چهار استراتژی شارژ مجدد (FR – تکی ، PR- تکی، FR – چندگانه و PR – چندگانه) بررسی کردند و یک الگوریتم شاخه و قیمت و برش با رویکرد کارای لیبل‌گذاری و برش قابل کاربرد برای همه انواع مطالعه شده ارائه کردند [Desaulniers et al, 2014]. کسکین و کیتی یک مسئله مسیریابی وسائط نقلیه الکتریکی با پنجره‌های زمانی (EVRPTW) را بررسی کردند و محدودیت شارژ کامل را در آن آزاد کردند و شارژ بخشی را مجاز کردند (EVRPTW-PR) . آنها مسئله را به صورت برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط ۰-۱ فرمولبندی کردند. و یک الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ اصلاح شده (ALNS) برای حل کارای آن ارائه کردند [Keskin and Çatay, 2016]. لین و همکاران یک مسئله مسیریابی وسائط نقلیه الکتریکی عمومی (EVRP) را ارائه کردند که استراتژی بهینه مسیریابی با کم‌ترین هزینه زمان سفر و هزینه انرژی و حداقل تعداد EV ارسال شده را می‌یابد. مدل آنها اولین مدل EVRP است که تأثیر بار وسیله نقلیه بر روی مصرف انرژی را در نظر می‌گیرد. مدل آنها هر دو کار تحویل دادن و تحویل گرفتن را در نظر می‌گیرد [Lin et al, 2016]. لیائو و همکاران چندین مسئله برنامه‌ریزی مسیر EV را که امکان شارژ یا تعویض باتری را در نظر می‌گیرد مطالعه کردند. اولی تعیین کوتاه ترین مسیر (زمان سفر) است که وسیله نقلیه با یک ظرفیت باتری مشخص می‌تواند بین یک جفت مبدا و مقصد سفر داشته باشد. دومین مسئله توریابی، مجموعه‌ای از مشتریان را بازدید کند و به مبدا بازگردد و اگر لازم باشد در ایستگاه تعویض باتری توقف کند. همچنین دو سناریو در نظر گرفتند. یکی اینکه هر شهر یک ایستگاه تعویض در مکان خود دارد و دیگری اینکه ایستگاه تعویض در مکانی غیر از شهرها و در فاصله قابل قبول از آنها قرار دارد. آنها یک الگوریتم چندجمله‌ای برای مسئله کوتاه‌ترین

مسیر و مسئله یافتن تور EV با تور ثابت ارائه کردند [Liao et al, 2016]. بروگریلی و همکاران یک روش فراابتکاری سه مرحله‌ای که ترکیبی از یک روش دقیق با یک انشعاب محلی جستجوی همسایگی متغیر برای مسیریابی یک ناوگان وسائط نقلیه الکتریکی (EV) پیشنهاد کردند. EV ها مجاز به توقف در ایستگاه‌های شارژ مجدد برای شارژ (بخشی) می‌باشند. مسئله به طور سلسله مراتبی تعداد خودروهای الکتریکی استفاده شده و کل زمان صرف شده توسط این خودروهای الکتریکی، یعنی زمان سفر، زمان شارژ و زمان انتظار (با توجه به پنجره هر مشتری) را حداقل می‌کند [Bruglieria et al, 2017]. شائو و همکاران مسئله مسیریابی وسیله نقلیه الکتریکی با در نظر گرفتن زمان شارژ و زمان سفر متغیر را بررسی کردند. آنها مدل را با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای به دست آوردن مسیر، زمان خروج خودرو از دپو، و طرح شارژ حل کردند. در همین حال، یک الگوریتم دایجسترا داینامیک برای پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر بین هر دو گره مجاور در طول مسیرها اعمال می‌شود. نوسانات در زمان سفر برای انعکاس یک محیط ترافیک پویا به کاربرده شده است [Shao et al, 2017].

همان‌گونه که مطرح گردید، به دلیل طولانی بودن زمان شارژ باتری، بهینه‌سازی شبکه توزیع با زیربنای تعویض باتری بخش مهمی از استقرار شبکه لجستیک با وسائط نقلیه الکتریکی می‌باشد و نیز بهترین مدل مالکیت زیرساخت تعویض باتری مدل مالکیت شرکت است که بیان می‌کند شرکت‌های لجستیک ایستگاه‌های تعویض باتری (BSS) برای EV را خودشان مستقر و عملیاتی کنند. بنابراین مشخص کردن استراتژی مکان ایده‌آل BSSها و طرح مسیریابی وسیله نقلیه در یک شبکه توزیع برای شرکت‌های لجستیک بسیار مهم می‌باشد. این مسئله به عنوان مسیریابی وسائط نقلیه الکتریکی و مکان‌یابی ایستگاه‌های تعویض باتری (BSS-EVLRP) شناخته می‌شود. مسئله مسیریابی– مکان‌یابی (LRP) دو سطح تصمیمات استراتژیک (مکان‌یابی) و تاکتیکی (مسیریابی) را با هم ادغام می‌کند. بعد از فرمولبندی پرل [Perl, 1983] برای مدل LRP تنوع و گسترش بسیاری از LRP در ادبیات موضوع دیده می‌شود. بیشتر انواع LRPهای مطالعه شده بر تعیین تعداد و مکان بهینه دپوها و تعیین همزمان تورهای توزیع بهینه تمرکز دارند. مقالات کمی وجود دارد که مکان‌یابی ایستگاه تعویض یا شارژ باتری و مسیریابی EV را به طور همزمان مطالعه کرده باشند. ورلی و کلابجان مسئله مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ مجدد و طراحی همزمان مسیرهای EV را بیان کردند. هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های سفر، هزینه‌های شارژ مجدد و هزینه‌های مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ مجدد می‌باشد. روش حلی پیشنهاد نشد [Worley and Klabjan, 2012].

جدول ۱. خلاصه مقالات مرور شده

مرجع	مسیریابی	موجودی	چندهدفه	مکان یابی ایستگاه شارژ و تعویض باطری	تاثیر بار بر مصرف انرژی	توقف های میانی	پنجره زمانی	نوع شارژ: شارژ کامل	نوع شارژ: شارژ بخشی	روش حل: ابتکاری	روش حل: دقیق
اردوغان و میلر- هوک	*						*			*	
ونگ و شن	*									*	
کنراد و فیگلیوزی	*		*						*	*	
اشنایدر و همکاران	*					*	*			*	
هیرمن و همکاران	*						*			*	*
موراکامی	*				*			*			
ونگ و همکاران	*		*							*	
مانسینی	*									*	
فلیپه و همکاران	*								*	*	*
دسولنیر و همکاران	*						*		*	*	
کسکین و همکاران	*						*		*	*	
لین و همکاران	*					*					
لیائو و همکاران	*										
بروگریلی و همکاران	*						*		*	*	
شائو و همکاران	*							*		*	
ورلی و کلابجان	*			*							
میرچندانی	*			*							
یانگ و سان	*			*						*	
هف و همکاران	*			*						*	
شیفر و والتر	*		*	*							
پژوهش جاری	*	*		*						*	

میرچندانی و همکاران در مورد زمانبندی ناوگان وسائط نقلیه الکتریکی و مکان‌یابی ایستگاه تعویض باتری برای تبدیل وسائط نقلیه ناوگان به EV بحث کردند. آنها مسئله کوتاه‌ترین مسیر را در مبحث مسیریابی EV معرفی کردند [Mirchandani et al, 2012]. یانگ و سانیک مسئله مسیریابی وسائط نقلیه الکتریکی و مکان‌یابی ایستگاه‌های تعویض باتری همزمان (BSS-EV-LRP) را ارائه کردند. هدف تعیین استراتژی مکان ایستگاه‌های تعویض باتری (BSS) و طرح مسیریابی وسائط نقلیه الکتریکی با محدودیت ظرفیت باتری می‌باشد. مسئله به صورت مدل برنامه‌ریزی عددصحیح فرمولبندی شده است. یک

روش ابتکاری چهارمرحله‌ای و یک رویکرد جستجوی ممنوع دو مرحله‌ای اصلاح شده برای حل مسئله پیشنهاد شده است [Yang and Sun, 2015]. هف و همکاران یک روش حل براساس جستجوی همسایگی متغیر تطبیقی برای مسئله مکان‌یابی ایستگاه تعویض باتری و مسیریابی وسائط نقلیه الکتریکی ارائه کردند [Hof et al, 2017]. شیفر و والتر یک رویکرد مکان‌یابی و مسیریابی برای در نظر گرفتن مسیریابی وسائط نقلیه الکتریکی و استقرار ایستگاه‌های شارژ به طور همزمان ارائه کردند. مدل آنها علاوه بر مسافت طی شده تعداد وسائط نقلیه و ایستگاه‌های شارژ را نیز حداقل می‌کند[Schiffer and Walther, 2017]. خلاصه و دسته بندی مقالات مرور شده در جدول (۱) ارائه شده است.

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که علی‌رغم اهمیت موضوع، با توجه به دانش نویسندگان تاکنون تحقیقی در این زمینه انجام نشده است. در این مقاله یک مدل ریاضی برای مسئله مسیریابی موجودی وسائط نقلیه الکتریکی ارائه شده است در مدل پیشنهادی حداکثر مسافت قابل طی وسائط نقلیه بر اساس مصرف شارژ باتری ها لحاظ شده است. همچنین امکان تاسیس ایستگاه های تعویض باتری در مدل پیشنهادی درنظر گرفته شده است. در مدل ریاضی ارائه شده این امکان لحاظ شده است تا باتری وسائط نقلیه پس از بازدید از ایستگاه های تعویض باتری، به طور کامل شارژ گردند و بتواند مسافت بیشتری را بپیمایند.

با توجه به Np-Hard بودن مسئله پیشنهادی یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مسئله در ابعاد بزرگ طراحی شده است.

۳. تعریف مسئله

در این مقاله یک مسئله مسیریابی وسائط نقلیه موجودی الکتریکی در یک ناوگان همگن بررسی می‌شود که در آن EV ها به صورت روزانه و در طول افق برنامه‌ریزی تقاضای مشتریان را تحویل می‌دهند. با توجه به محدودیت ظرفیت باتری‌ها در طول مسیر یک وسیله نقلیه ممکن است با کمبود شارژ مواجه شده و برای ادامه مسیر نیاز به تعویض باتری داشته باشد، لذا مکان‌یابی مراکز تعویض باتری از بین مکان‌های بالقوه اهمیت زیادی در کاهش هزینه‌های توزیع خواهد داشت در مواردی که مکان کاندید در مکان مشتری قرار دارد از یک گره مجازی برای نشان دادن آن در مجموعه مکان‌های کاندید استفاده می‌شود. استقرار ایستگاه تعویض در هر مکان کاندید یک هزینه ثابت دارد. از طرف دیگر مشتری فضای مشخص و محدودی برای نگهداری موجودی کالا دارد که می‌تواند برای تقاضای یک یا چند روز آینده خود موجودی نگهداری کند. بنابراین می‌توان در بعضی روزها مشتری را بازدید نکرد و تقاضای آن روزها را از قبل به آن مشتری تحویل داد. اهداف مدل پیشنهادی شامل کمینه‌سازی هزینه‌های مسیریابی، موجودی و مکان‌یابی مراکز تعویض باتری می‌باشد. در این مسئله تصمیمات زیر گرفته می‌شود:

- در چه بازه‌های زمانی از افق زمانی برنامه‌ریزی از یک مشتری بازدید به عمل آید،
- چه مقدار کالا در هر بازدید به یک مشتری تحویل داده شود،
- در کدام مکان‌های کاندید ایستگاه‌های تعویض باتری استقرار یابد،
- هر مشتری در هر روز به چه وسیله نقلیه‌ای تخصیص یابد،
- توالی بازدید از مشتریان در هر مسیر چگونه است،
- در هر مسیر از کدام یک از مراکز تعویض باتری بازدید به عمل می‌آید و توالی بازدید از آنها در یک مسیر چگونه باشد.

مفروضات مهم در مسئله و مدل ریاضی به شرح زیر می باشد:

- یک نوع محصول بین مشتریان توزیع می‌شود.
- یک نقطه دپو وجود دارد.
- افق برنامه‌ریزی متناهی است.
- تقاضای مشتریان در همه‌ی دوره‌های زمانی در ابتدای افق برنامه‌ریزی مشخص است.
- حداکثر تعداد وسائط نقلیه در دسترس محدود است.

- هم عرضه‌کننده و هم مشتری هزینه نگهداری را متحمل می‌شوند.
- هر مشتری ظرفیت محدود نگهداری موجودی دارد.
- مشتریان در ابتدای افق برنامه‌ریزی دارای موجودی اولیه می‌باشند.
- کمبود مجاز نیست.
- هر مشتری در هر دوره حداکثر توسط یک وسیله نقلیه سرویس می‌گیرد.
- حداکثر مسافت قابل طی وسائط نقلیه بدون تعویض باتری محدود است.

٤. مدل ریاضی پیشنهادی

در این بخش، مدل پیشنهادی برای مسیریابی وسائط نقلیه موجودی الکتریکی بیان می‌شود.

٤-١ مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل

در این زیر بخش مجموعه‌ها، اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل پیشنهادی تعریف می‌شوند.

مجموعه‌ها:

V: $V=\{0,1,2,\ldots,n\}$ مجموع گره‌ها ،گره صفر انبار (عرضه‌کننده)و $V'=V/\{0\}$ مشتریان

Q: $Q=\{n+1,n+2,\ldots,m\}$ مجموع گره‌های کاندید برای استقرار ایستگاه‌های شارژ باتری

T: $t\in T,\ T=\{1,2,\ldots,p\}$ تعداد دوره‌های زمانی

K: $k\in K,\ K=\{1,2,\ldots,k\}$ تعداد وسیله نقلیه

پارامترها:

h_i: هزینه نگهداری یک واحد موجودی در انبار مشتری iام

Cap_i: ظرفیت نگهداری موجودی مشتری iام

Q_k: ظرفیت وسیله نقلیه kام

d_i^t: تقاضای مشتری i ام در دوره tام

c_{ij}: هزینه جابه‌جایی از گره i به گره j

I_0^0: موجودی اولیه انبار مرکزی در ابتدای افق برنامه‌ریزی

I_i^0: موجودی اولیه مشتری iام در ابتدای افق برنامه‌ریزی

B: عددی بزرگ

f_i: هزینه استقرار ایستگاه شارژ باتری در گره iام

md: حداکثر مسافت قابل طی توسط وسیله نقلیه

r: میزان مصرف شارژ باتری به ازای یک واحد مسافت پیموده شده

متغیرهای تصمیم:

x_{ij}^{kt}: اگر وسیله نقلیه kام در دوره t از مشتری iام / انبار به مشتری jام برود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر

I_i^t: سطح موجودی مشتری iام در پایان دوره tام

q_i^{kt}: مقدار بار تحویل داده شده به مشتری iام توسط وسیله نقلیه kام در دوره tام

y_i^{kt}: اگر گره i در دوره t توسط وسیله نقلیه k ملاقات شود برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر

u_i^{kt} : متغیری برای جلوگیری از ایجاد زیر تور

y_i : اگر ایستگاه شارژ باتری در گره i استقرار یابد برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر

F_i^{kt} : میزان شارژ باتری باقیمانده کامیون k در گره i در دوره t

٤-٢ مدل ریاضی

در این قسمت مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌گردد.

$$\text{Min} \sum_{i\in v\cup Q}\sum_{j\in v\cup Q}\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} c_{ij}x_{ij}^{kt} + \sum_{i\in v'}\sum_{t\in T} h_i I_i^t + \sum_{i\in Q} f_i y_i \quad (١)$$

s.t.

$$\sum_{k\in K}\sum_{i\in v\cup Q} x_{ij}^{kt} \le 1 \quad \forall j \in v',\ j \ne i,\ t \in T \quad (٢)$$

$$\sum_{i\in v\cup Q}\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} x_{ii}^{kt} = 0 \quad (٣)$$

$$\sum_{i\in v\cup Q} x_{ij}^{kt} = \sum_{i\in v\cup Q} x_{ji}^{kt} \quad \forall j \in v\cup Q,\ k \in K,\ t \in T \quad (٤)$$

$$\sum_{j\in v'\cup Q} x_{0j}^{kt} \le 1 \quad \forall k \in K,\ t \in T \quad (٥)$$

$$q_j^{kt} \le BM * \sum_{i\in v\cup Q} x_{ij}^{kt} \quad \forall j \in \text{v}', \text{k} \in \text{K}, \text{t} \in \text{T} \quad (٦)$$

$$\sum_{i\in v'} q_i^{kt} \le Q_k \quad \forall k \in K,\ t \in T \quad (٧)$$

$$I_i^t = I_i^{t-1} + \sum_{k\in K} q_i^{kt} - d_i \quad \forall i \in v',\ t \in T \quad (٨)$$

$$I_i^t \le capp_i \quad \forall i \in v',\ t \in T \quad (٩)$$

$$\sum_{t\in T} u_0^t = 0 \quad (١٠)$$

$$u_i^t + 1 \le u_j^t + BM * (1 - \sum_{k\in K} x_{ij}^{kt}) \quad \forall i \in v,\ j \in v',\ t \in T \quad (١١)$$

$$F_i^{kt} \le md \quad \forall i \in v\cup Q, k \in K,\ t \in T \quad (١٢)$$

$$F_j^{kt} \le F_i^{kt} - r.c_{ij} + BM(1 - x_{ij}^{kt}) \quad \forall i \in v\cup Q,\ j \in v, k \in K,\ t \in T \quad (١٣)$$

$$F_i^{kt} \ge r.c_{ij} - BM(1 - x_{ij}^{kt}) \quad \forall i, j \in v\cup Q, k \in K,\ t \in T \quad (١٤)$$

$$\sum_{i\in v}\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} x_{ij}^{kt} \le BMy_j \quad \forall j \in Q \quad (١٥)$$

$$I_i^t \ge 0 \quad \forall t \in T, i \in v \quad (١٦)$$

$$q_i^{kt} \ge 0 \quad \forall k \in K, \text{t} \in \text{T}, \text{i} \in \text{v}' \quad (١٧)$$

$$x_{ij}^{kt} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in v\cup Q, k \in K, \text{t} \in \text{T} \quad (١٨)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in Q \tag{۱۹}$$

$$F_i^{kt} \geq 0 \quad \forall k \in K, \mathrm{t} \in \mathrm{T}, \mathrm{i} \in \mathrm{v} \tag{۲۰}$$

$$u_i^{kt} \geq 0 \quad \forall k \in K, \mathrm{t} \in \mathrm{T}, \mathrm{i} \in \mathrm{v} \tag{۲۱}$$

معادله (۱) تابع هدف مسئله می‌باشد که مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه نگهداری موجودی و هزینه استقرار ایستگاه‌های شارژ باتری را کمینه می‌نماید. محدودیت(۲) تضمین می‌کند که هر یک از مشتریان در یک دوره زمانی بیش از یک بار نمی‌توانند ملاقات شوند. محدودیت (۳) بیان می‌کند که یک وسیله نقلیه نمی‌تواند از یک مشتری به همان مشتری برود. عبارت (٤) تضمین می‌کند اگر در یک دوره زمانی مشخص وسیله نقلیه‌ای به گره وارد شده باشد باید در همان دوره از آن گره خارج شود. محدودیت (۵) بیان می‌کند که وسیله‌های نقلیه در هر روز حداکثر یک بار استفاده می‌شود. محدودیت (٦) بیان می‌کند در صورتی میزان کالای حمل شده توسط یک وسیله نقلیه در یک روز برای یک مشتری مقدار می‌گیرد که آن وسیله نقلیه در آن روز مشتری مورد نظر را بازدید کرده باشد.

محدودیت (۷) بیان می‌کند که میزان بار تحویل داده شده توسط هر وسیله نقیله در هر دوره باید از ظرفیت وسیله نقلیه کمتر باشد. عبارت (۸) میزان سطح موجودی آخر دوره در مشتریان را بیان می‌کنند. محدودیت (۹) بیان می‌کند که سطح موجودی یک مشتری نباید از ظرفیت انبار آن مشتری بیشتر باشد. محدودیت (۱۰) و (۱۱) برای جلوگیری از ایجاد زیر تور است. عبارت (۱۲) بیان می‌کند که حداکثر میزان شارژ باتری یک وسیله نقلیه محدود است. محدودیت (۱۳) بیان می‌کند که مقدار شارژ باقیمانده در یک وسیله نقلیه برابر با میزان شارژ باتری در مشتری قبلی منهای میزان مصرف باتری در مسیر بین دو مشتری می‌باشد. محدودیت (١٤) تضمین می‌کند که یک وسیله نقلیه تنها درصورتی بتواند از یک مشتری به مشتری بعدی برود که حداقل به اندازه شارژ مورد نیاز برای طی فاصله بین آن دو شارژ داشته باشد. محدودیت (۱۵) بیان می‌کند که یک وسیله نقلیه تنها درصورتی به یک ایستگاه شارژ باتری می‌رود که آن ایستگاه استقرار یافته باشد. محدودیت (١٦) بیان می‌کند که هیچ گونه کمبود برای مشتریان در هیچ دوره‌ای قابل پذیرش نیست. محدودیت های (۱۷) الی (۲۱) نوع متغیرها را بیان می‌کند.

۵. رویکرد حل مسأله

در این بخش الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی توضیح داده شده و در ادامه نحوه تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی ارائه می‌شود.

۵-۱ نمایش جواب

در مسئله مطرح پنج تصمیم بایستی گرفته شود: ۱- در هر دوره از افق برنامه‌ریزی چه مشتریانی بازدید شوند، ۲- چه مقدار محصول برای هر مشتری بازدید شده در یک دوره ارسال شود، ۳- ایستگاه‌های تعویض باتری در چه مکان‌هایی استقرار یابند، ٤- در هر دوره، مسیریابی چگونه باشد و ۵- در هر مسیر تعویض باتری در چه زمانی و در کدام ایستگاه باتری رخ دهد. بدین منظور از یک ساختار ماتریسی دو بخشی برای نمایش جواب استفاده شده است. بخش اول شامل یک ماتریس باینری با ابعاد $|v'| \times |T|$ است. یعنی به ازای هر مشتری در هر دوره یک سلول در نظر گرفته شده است. مقدار یک در سلول نشان‌دهنده بازدید مشتری مربوطه در دوره مشخص است. با توجه به ماتریس نمایش جواب، برنامه بازدید از مشتریان در افق برنامه‌ریزی و سپس میزان ارسال کالا در هر بار بازدید برای هر مشتری مشخص می‌گردد. بخش دوم جواب یک بردار با تعداد m سلول می‌باشد. یعنی به ازای هر مکان کاندید برای استقرار ایستگاه تعویض باتری یک سلول درنظر گرفته شده است. عدد یک در سلول استقرار ایستگاه تعویض باتری در مکان کاندید

مورد نظر را نشان می‌دهد. شکل (۱) یک مثال از نمایش جواب با چهار مشتری و چهار دوره می‌باشد.

در بخش اول شکل (۱) مشتری دوم در دوره‌های اول و سوم بازدید می‌شود. لذا در بازدید دوره اول محصولات مورد تقاضای مشتری برای دوره اول و دوم و در بازدید دوره سوم محصولات مورد تقاضای مشتری برای دوره‌های سوم، چهارم و پنجم برای مشتری ارسال می‌شود. همچنین بر اساس بخش دوم جواب، در مکان‌های کاندید ۲، ۳، ٤ و ۸ ایستگاه تعویض باتری استقرار می‌یابد. سپس بر اساس برنامه بازدید و با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری مسیرهای روزانه و بازدید از ایستگاه‌های تعویض باتری شکل می‌گیرند.

بخش اول

افق برنامه ریزی

مشتریان	۱	۲	۳	٤	۵
۱	۰	۱	۱	۰	۱
۲	۱	۰	۱	۰	۰
۳	۱	۱	۰	۰	۰
٤	۱	۰	۰	۱	۰

بخش دوم

تعداد مکان کاندید

۱	۲	۳	٤	۵	٦	۷	۸
۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱

شکل۱. نمایش جواب برای مثالی با چهار مشتری، پنج روز و هشت مکان کاندید

۵-۱-۱ الگوریتم مسیریابی روزانه

۱. با توجه به بخش اول رشته جواب مشتریانی که در هر روز بایستی بازدید شوند را مشخص نمایید.

۲. در هر روز بدون توجه به محدودیت ظرفیت باتری‌ها گام‌های زیر را اجرا کنید.

۳. مشتریان را به ترتیب فاصله از دپو مرتب نمایید و از ابتدای لیست مشتریان را انتخاب کنید.

٤. مشتری انتخاب شده را به یک وسیله نقلیه تخصیص و تور وسیله نقلیه را از دپو به مشتری و از مشتری به دپو شکل دهید.

۵. بقیه مشتریان را به ترتیب انتخاب کنید. هر مشتری را بین تمامی یال‌های تورهای شکل گرفته قرار دهید همچنین در صورت وجود تور خالی مشتری را در تور خالی نیز جا داده و هزینه تخصیص مشتری را محاسبه نمایید. در نهایت مشتری را به بهترین نقطه با کمترین هزینه تخصیص دهید.

٦. برای همه مسیرها کمبود شارژ باتری را بررسی کنید. در هر مسیر از ابتدای مسیر شروع کنید و گره قبل از گره‌ای که با کمبود شارژ باتری مواجه می‌شود را انتخاب کرده از آنجا به نزدیکترین مرکز تعویض باتری رفته و دوباره به مسیر از قبل تعیین شده باز گردید. این کار را تا بررسی همه گره‌های داخل مسیر ادامه دهید.

۵-۲ الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر (VNS) یک الگوریتم فراابتکاری است که برای حل مسائل ترکیبی و بهینه‌سازی جهانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نخستین بار ملادنوویچ و هانسن در سال ۱۹۹۷ الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر را مطرح نمودند. ایده اصلی این الگوریتم، تغییر همسایگی سیستماتیک با استفاده از یک روش جستجوی محلی می‌باشد [Mladenović and Hansen, 1997].

ساختار کلی این روش به این شکل است که در ابتدا چند ساختار همسایگی و یک جواب اولیه مشخص می‌شود و پس از آن الگوریتم با استفاده از ساختار همسایگی اولیه، با یکی از دو رویکرد انتخاب اولین بهبود و یا انتخاب بهترین بهبود شروع به جستجو می‌نماید. در صورت مشاهده بهبود در جواب، جواب بهتر جایگزین جواب کنونی می‌شود و ساختار همسایگی به اولین حالت باز می‌گردد. همچنین پس از چندین تکرار و در صورت عدم مشاهده بهبود در جواب، وارد ساختار همسایگی بعدی می‌شود. شرایط توقف در این الگوریتم شامل مواردی چون محدودیت تعداد تکرار، زمان حل، تعداد تکرار بین دو بهبود متوالی در جواب و همچنین یافتن یک جواب بهینه محلی در کل ساختارهای همسایگی می‌باشد. الگوریتم VNS نسبت به سایر

الگوریتم‌های فراابتکاری ساختار ساده‌تری داشته و مزیت آن تعداد پارامترهای کم است، که موجب افزایش سرعت این الگوریتم شده است. شکل۲ شبه کد این الگوریتم را نشان می‌دهد [Mladenović and Hansen, 1997].

۵-۲-۱ الگوریتم پیشنهادی VNS برای مسئله

الگوریتم VNS چهار گام اصلی شامل: تولید جواب اولیه، فاز تغییر ناگهانی، فاز جستجوی محلی و نهایتا توقف، دارد که در ادامه هر یک از گام‌ها برای مسئله مطرح توضیح داده می‌شود.

- تولید جواب اولیه : جواب اولیه به طور تصادفی و با تولید ماتریس توصیف شده در زیر بخش ٤-١ ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که تولید جواب اولیه تا یافتن یک جواب موجه ادامه می‌یابد.

Algorithm: variable neighborhood search

Input: neighborhood structures Ni , i = 1,2, . . , , imax and initial solution
S=initial solution ();
Repeat
i= 1;
While (i ≤ imax)
s′=Shake (s, Ni)
s′∗=Local search (s′)
if c(s′∗) < c(s)
s ← s′∗
i = 1 ;
else
if i=imax
i=1
else
i = i + 1;
Until stop condition are met;
Output: The best solution;

شکل ۲. شبه کد الگوریتم VNS

- مرحله تغییر ناگهانی: هدف از این فاز ایجاد یک تغییر ناگهانی در جواب موجود می‌باشد [Fleszar et al, 2009]. در این فاز از ۱۰ ساختار ایجاد همسایگی استفاده می‌شود، که در دو دسته ساختارهای همسایگی مربوط به بازدید از مشتریان و ساختارهای مربوط به مکان‌یابی مراکز تعویض باتری دسته‌بندی شده‌اند. تعداد ٦ ساختار همسایگی مربوط به دسته اول و ٤ ساختار همسایگی برای دسته دوم در نظر گرفته شده‌اند. ترتیب ساختارهای همسایگی بر اساس حجم تغییرات اعمالی آنها بر جواب از ساختار همسایگی ساده به ساختار همسایگی پیچیده مرتب شده است. و ترتیب استفاده از آنها به ترتیب مشخص شده می‌باشد. در صورتی ساختار همسایگی تغییر می‌کند که در ۳۰ تکرار متوالی بهبودی در جواب حاصل نشود.
- ساختارهای همسایگی مربوط به بازدید مشتریان در روزهای افق برنامه‌ریزی

۱. کاهش تعداد بازدیدهای مشتری: یک مشتری به تصادف انتخاب و یکی از سلول‌های مربوطه با مقدار یک را صفر کنید.

۲. افزایش تعداد بازدیدهای مشتری: یک مشتری به تصادف انتخاب و یکی از سلول‌های مربوطه با مقدار صفر را یک کنید.

۳. کاهش تعداد مشتریان یک روز: به تصادف یک روز را انتخاب کنید. سپس، به تصادف مقادیر ۲ سلول از سلول‌های با مقدار یک در روز انتخاب شده را به صفر تغییر دهید.

٤. افزایش تعداد مشتریان یک روز: به تصادف یک روز را انتخاب کنید. سپس، به تصادف مقادیر ۲ سلول از سلول‌های با مقدار صفر در روز انتخاب شده را به یک تغییر دهید.

۵. کاهش تعداد مشتریان یک روز: به تصادف یک روز را انتخاب کنید. سپس به تصادف عددی بین ۳ تا ۵ انتخاب کنید. عدد انتخابی را ch بنامید. سپس، به تصادف مقدار ch سلول از سلول‌های با مقدار یک در روز انتخاب شده را به صفر تغییر دهید.

٦. افزایش تعداد مشتریان یک روز: به تصادف یک روز را انتخاب کنید. سپس به تصادف عددی بین ۳ تا ۵ انتخاب کنید. عدد انتخابی را ch بنامید. سپس به تصادف مقدار ch سلول از سلول‌های با مقدار صفر در روز انتخاب شده را به یک تغییر دهید.

- ساختارهای همسایگی مکان‌یابی:

۱. کاهش یک مکان: یک نقطه با مقدار یک به تصادف انتخاب و مقدار آن صفر می‌شود

۲. افزایش یک مکان: یک نقطه با مقدار صفر به تصادف انتخاب و مقدار آن یک می‌شود.

۳. کاهش تعداد مکان‌ها: عددی بین ۲ تا ٤ به تصادف انتخاب شده، به تعداد انتخاب شده نقطه با مقدار یک به تصادف انتخاب و مقدار آن صفر می‌شود.

٤. افزایش تعداد مکان‌ها: عددی بین ۲ تا ٤ به تصادف انتخاب شده، به تعداد انتخاب شده نقطه با مقدار صفر به تصادف انتخاب و مقدار آن یک می‌شود.

- مرحله جستجوی محلی: هدف از این مرحله پیدا کردن جواب‌های بهینه محلی است. پس از ایجاد همسایگی در این مرحله بر روی جواب تغییر پیدا کرده روش‌های جستجوی محلی اعمال می‌شوند. در این مقاله از جستجوی محلی Swap استفاده شده است.

۱. مشتریانی که در تکانه مربوطه ترکیب بازدید آنها تغییر کرده است را به ترتیب انتخاب کنید. سپس جستجوی محلی Swap را بر روی سول‌های مربوط به مشتری انتخاب شده اعمال کنید. برای این کار هر بار یک سلول با مقدار یک و یک سلول با مقدار صفر به تصادف از سلول‌های مربوط به مشتری مربوطه انتخاب می‌شود و مقادیر آنها جابه‌جا می‌شوند. این کار تا عدم بهبود جواب در ۱۰ تکرار متوالی ادامه می‌یابد.

۲. در صورتی که تغییر ناگهانی، مربوط به بخش دوم رشته جواب باشد آنگاه دو نقطه در بخش دوم رشته جواب به تصادف انتخاب شده و مقادیر آنها جابه‌جا می‌شوند این کار تا عدم بهبود جواب در۱۰ تکرار متوالی ادامه می‌یابد.

- شرط توقف الگوریتم: در هر همسایگی الگوریتم در صورتی که در تعداد تکرار Shakeiter جواب بهتری از جواب فعلی یافت نشود همسایگی الگوریتم افزایش می‌یابد و در صورتی الگوریتم در همسایگی $l_{\max}$ باشد همسایگی به l_1 باز می‌گردد. الگوریتم به شرطی متوقف می‌شود که به تعداد تکرار مشخص Iterationmax برسد. لازم به ذکر است در ابتدای شروع الگوریتم با احتمال ۰٫۸ ساختار همسایگی مربوط به بازدید روزانه انتخاب می‌شود و با احتمال ۰٫۲ ساختارهای مربوط به مکان‌یابی ایستگاه‌های تعویض باتری انتخاب می‌شوند. هرگاه در طول الگوریتم بازگشت به ساختار همسایگی اول از هر یک از ساختارها ایجاد شد این قائده احتمالی برقرار است.

۵-۳ الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید

این الگوریتم یک رهیافت تکراری برای حل مسأله بوده و ایده آن از فرآیند ذوب یک جامد به سمت یک حالت دارای حداقل انرژی به وجود آمده است. فرآیند فعالیت این الگوریتم همانند شکل گیری کریستالهای فلز گداخته در هنگام سرد شدن است. فرآیند فیزیکی سرمایش که هد ف از آن کاهش دمای ماده به پایین ترین سطح انرژی است، تعادل گرمایی نامیده می شود. فرآیند سرمایش با ماده ای در وضعیت گداخته آغاز می شود و سپس بتدریج دمای آن کاهش می یابد .د ر هر دما جسم، مجاز به رسیدن تعادل گرمایی است .دما نباید خیلی به سرعت کاهش یابد، بویژه در مراحل اولیه، د ر غیراین صورت، برخی کاستی ها در ماده پدیدار شده و ماده به وضیعت انرژی کمینه نخواهد رسید .کاهش دما شبیه به کاهش مقدار تابع هدف (در مسایل کمینه سازی) است که توسط یک سری تغییرات بهبود دهنده انجام می گیرد. برای اینکه دما به آهستگی کاهش یابد، باید تغییرات غیر بهبوددهنده تابع هدف نیز با احتمال معینی انتخاب شوند بطوریکه وقتی تابع هدف کاهش می یابد این احتمال نیز کاهش یابد[توکلی مقدم و همکاران، ۱۳۹۳]. این امر موجب می شود که الگوریتم در بهینه های موضعی گرفتار نشود. الگوریتم SA بدین منظور از یک تابع احتمالی جهت پذیرش جواب های بدتر استفاده می‌کند. این تابع عبارت است از:

$$P = e^{\frac{-[F(s)-F(q)]}{KT}} \qquad (۲۲)$$

در معادله (۲۲) q، s، k و T به ترتیب موقعیت فعلی، موقعیتی در همسایگی، ثابت بولتزمن و دمای فعلی می‌باشد.

لازم به ذکر است که جواب اولیه الگوریتم با استفاده از روش تولید جواب اولیه در بخش (۱-۲-٤) بدست می‌آید.

در الگوریتم شبیه سازی تبرید در هر تکرار یکی از روشهای جستجوی همسایگی استفاده می شود تا جواب جدیدی تولید شود. در این الگوریتم رویه مشخصی برای استفاده از روشهای جستجوی همسایگی وجود ندارد. اما در الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر ابتدا روشهای جستجوی همسایگی بر حسب میزان تغییراتی که در جواب اعمال می کنند مرتب می شوند. سپس الگوریتم از روش جستجوی همسایگی با کمترین تغییر در جواب جستجوی خود را شروع می کند و در صورت عدم یافتن جواب در چند تکرار متوالی روش جستجوی بعدی که جواب فعلی را با تغییر بیشتری همراه می کند را انتخاب می کند. این امر سبب می شود که در صورتی که جواب فعلی خوب باشد الگوریتم با تغییرات اندک در جواب به دنبال جواب های بهتری باشد و در صورتی که جواب بهتری یافت نشد جواب تغییر بیشتری بکن و یا به عبارت دیگر جستجوی در فضاهای دور تری از جواب فعلی ادامه یابد.

٤-٥ تنظیم پارامتر

پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری تاثیر زیادی در عملکرد مناسب آنها دارند. آنالیز تاگوچی ازجمله روش‌های آماری است که برای تنظیم پارامترها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش تاگوچی از نسبتی به نام سیگنال به نویز S/N برای بررسی جواب استفاده می‌شود. در این نسبت S میزان مطلوبیت است و N مقدار عدم مطلوبیت می‌باشد. درنتیجه هدف افزایش مقدار این نسبت تا حد امکان است [Montgomery, 1997].

برای هر الگوریتم پارامترهای تاثیرگذار با سعی و خطا مشخص شد. برای هر پارامتر سه سطح در نظر گرفته شد. در ادامه برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده‌شد. با توجه به تعداد فاکتورهای انتخابی و سطوح انتخاب‌شده برای تحلیل، جدول استاندارد تعامدی مناسب برای این مطالعه انتخاب شد. سپس سه مسئله نمونه به تصادف انتخاب شد. هر مسئله با توجه به مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترها در هر سطر از جدول تاگوچی، ۱۰ بار اجرا شد. میانگین مقدار توابع هدف بدست آمده به نرم‌افزار مینی‌تب گزارش شد. در نهایت برای هر پارامتر، سطح با بیشترین نسبت S/N، به‌عنوان بهترین سطح برای آن پارامتر در نظر گرفته شد. با توجه به تنظیم پارامترها، پارامترهای مربوط به الگوریتم‌های فراابتکاری مطابق جدول (۲) در نظر گرفته شده است. در این جدول Iterationmax و shakeiter و classPro به ترتیب حداکثر تعداد تکرار، تعداد تکرار در هر همسایگی و احتمال انتخاب ساختارهای همسایگی مربوط به بازدید روزانه مشتریان در الگوریتم VNS هستند. همچنین $Tend$ دمای نهایی و α ضریب کاهش دما در الگوریتم SA می‌باشند. لازم به ذکر است $T0$ دمای اولیه، برابر با تابع هدف جواب اولیه در نظر گرفته شد.

٦. نتایج محاسباتی

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در ابعاد کوچک تعداد ۱۲ مسئله با ابعاد کوچک به‌صورت تصادفی تولید شد و نتایج حاصل از حل دقیق مسائل با نرم افزار Gams با نتایج حاصل از دو الگوریتم SA و VNS مقایسه شدند. برای تولید مسائل نمونه در ابعاد بزرگ از نمونه مسائل آگرات با تغییراتی استفاده شد. مقدار تقاضا و فاصله اقلیدسی شهرها و نیز تعداد وسائط نقلیه در دسترس برای سرویس‌دهی برای ۲۷ مسئله در نمونه مسائل آگرات موجود است. تعداد روزهای مسائل نمونه به طور تصادفی در بازه [3,6] و تقاضای مشتریان در هر روز ثابت در نظر گرفته شد. نتایج مسائل در ابعاد بزرگ برای الگوریتم پیشنهادی با نتایج حاصل از الگوریتم SA مقایسه شده است. تعداد مکان‌های کاندید ایستگاه‌های تعویض باتری در بازه $[\lceil 3+0.1N \rceil + \lfloor 2+0.05N \rfloor]$در نظر گرفته شده است. مختصات نقاط کاندید در بازه مختصات مشتریان و به صورت

تصادفی و هزینه تاسیس ایستگاه‌های تعویض باتری در بازه [500,1000] تولید شد.

جدول ۲. پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری توسط آنالیز تاگوچی

الگوریتم SA		الگوریتم VNS	
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۰,۰۱	Tend	۲۰۰	Iterationmax
۰,۰۱	α	۳۰	Shakeiter
		۰,۸	classPro

٦-١ کارایی الگوریتم‌ها برای مسائل با ابعاد کوچک

نتایج حاصل از حل مسائل نمونه در ابعاد کوچک در جدول (۳) نمایش داده شده‌اند. در این جدول اطلاعات مسئله بطور اختصاری *N-T-K-M* نشان داده شده است، که، N بیانگر تعداد مشتریان، T تعداد روزها، K تعداد وسائط نقلیه و در نهایت M مشخص کننده تعداد مکان‌های کاندید برای استقرار ایستگاه‌های تعویض باتری می‌باشد. زمان‌ها در جدول بر اساس ثانیه می‌باشند و خطا بر اساس درصد بیان شده است. برای محاسبه درصد خطا در جدول (۲) از فرمول (۲۳) بهره برده شده است.

$$Gap\% = \frac{AS - BS}{BS} \times 100 \qquad (۲۳)$$

در این معادله AS و BS به ترتیب جواب حاصل از الگوریتم و بهترین جواب یافته شده است.

همانگونه که از جدول (۲) مشخص است کیفیت جواب‌های حاصل از دو الگوریتم فراابتکاری مناسب است. درصد خطای الگوریتم‌های VNS، SA به ترتیب برابر با ۰,۰۳٤٪ و ۰,۹۰۳٪ است. حداکثر میزان خطا برابر با ۳,۳۱٪ است که مربوط به مسئله ۱۲ بوده و توسط الگوریتم SA به دست آمده است. از نظر زمان حل نیز هر دو الگوریتم فراابتکاری عملکرد مطلوبی دارند. میانگین زمان حل الگوریتم VNS تقریبا دو برابر میانگین زمان حل الگوریتم فراابتکاری دیگر است. به طور میانگین زمان حل روش دقیق تقریبا ٥٤ برابر الگوریتم پیشنهادی است.

٦-٢ کارایی الگوریتم‌ها برای مسائل با ابعاد بزرگ

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری VNS در ابعاد بزرگ ۲۷ مسئله نمونه تولید شده به عنوان مسائل نمونه در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از حل مسائل نمونه در جدول (٤) ارائه شده است.

الگوریتم فراابتکاری VNS در ابعاد بزرگ عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم SA ارائه نموده است. از منظر درصد خطا، الگوریتم فراابتکاری با ۰,۰۰۳۷٪ خطا، خطای بسیار ناچیزی دارد. الگوریتم SA با میانگین خطای ۱,۹٤٪ عملکرد ضعیفتری نسبت به الگوریتم پیشنهادی دارد. از نظر زمان حل، زمان حل الگوریتم VNS حدوداً ۱,۵ برابر الگوریتم فراابتکاری SA است. در ۲٦ مسئله از ۲۷ مسئله نمونه الگوریتم فراابتکاری VNS به بهترین جواب دست یافته است. بیشترین میزان خطای الگوریتم VNS برابر با ۰,۱٪ است و حداکثر میزان خطا برای الگوریتم SA برابر با ۳,٦٪ است. نتایج نشان‌دهنده عملکرد کارای الگوریتم VNS پیشنهادی است.

جدول ۳ . نتایج در ابعاد کوچک

#	N-T-K-M	روش دقیق		الگوریتم SA			الگوریتم VNS		
		تابع هدف	زمان	تابع هدف	زمان	Gap%	تابع هدف	زمان	Gap%
۰۱	٤-۲-۲-۲	۲۱٥٦	۰,٥	۲۱٥٦	۰,٦	۰	۲۱٥٦	۰,٥	۰
۰۲	٦-۲-۲-۲	۲۳۳٥	۲۰,۹	۲۳۳٥	۰,۷	۰	۲۳۳٥	۱	۰
۰۳	۷-۲-۲-۲	۲٤٥٥	۲٦٥,۲	۲٤٥۸	۰,۹	۰,۱۲	۲٤٥٥	۰,۹	۰
۰٤	٤-۳-۲-۲	۲٤٦۱	۱,٤	۲٤٦۱	۱	۰	۲٤٦۱	۲,۱	۰
۰٥	٥-٤-۲-۲	۲۹۰۱	۱۱٦,٥	۲۹۲۰	۳,۸	۰,٦٤	۲۹۰۱	٥,۹	۰

الگوریتم VNS			الگوریتم SA			روش دقیق		N-T-K-M	#
Gap%	زمان	تابع هدف	Gap%	زمان	تابع هدف	زمان	تابع هدف		
۰	۷,۱	۲٤٥۱	۰,۸٤	٦,۲	۲٤۷۲	۳۸۹,۱	۲٤٥۱	۳-۲-۲-۷	۰٦
۰	۱۹,۹	۲٤۳۹	۰	۱۳,٦	۲٤۳۹	۲۸۱٥,٥	۲٤۳۹	۳-۲-۲-۸	۰۷
۰	۰,۹	۲٥۱۸	۱,٥۲	۰,۷	۲٥٥٦	۳,٥	۲٥۱۸	۳-۲-۳-٤	۰۸
۰	۲٤,۳	۲۹۰۰	۰,۳۷	۹,٥	۲۹۱۱	۱٦۰,۷	۲۹۰۰	۳-۲-٤-٥	۰۹
۰	۱۹	۲۲۱۱	۲,۲٤	۱۱,٦	۲۲٦۱	۱٦٤,۳	۲۲۱۱	٤-۲-۲-٦	۱۰
۰	٤۹,۲	۲۲۹٦	۱,۷۹	۲۳,۹	۲۳۳۷	۱۱۱۱,۹	۲۲۹٦	٤-۲-۲-۷	۱۱
۰,٤۱	٥۲,۹	۳۱۸۹	۳,۳۱	۳۱,٦	۳۲۸۱	٤۸٥۰,٥	۳۱۷٦	٤-۲-۳-۹	۱۲
۰,۰۳٤	۱٥,۳۱	۲٥۲٦,۰	۰,۹۰۲٥	۸,٦۷٥	۲٥٤۸,۹۲	۸۲٥	۲٥۲٤,۹۲	میانگین	

از نظر زمان حل نیز نسبت به حل دقیق بسیار بهتر عمل نمود. به طور میانگین زمان حل روش دقیق تقریبا ٥٤ برابر الگوریتم پیشنهادی بدست آمد. الگوریتم پیشنهادی در ابعاد بزرگ نیز نسبت به الگوریتم SA دارای عملکرد بهتری بود. در این ابعاد خطای الگوریتم پیشنهادی و SA به ترتیب برابر با ۱,۹٤ و ۰,۰۰۳۷٪ بدست آمد. نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی هم از لحاظ کیفیت جواب و هم زمان محاسباتی می-باشد.

جدول ٤. نتایج در ابعاد بزرگ

الگوریتم SA			الگوریتم VNS			N-T- K-M	#
Gap%	زمان	تابع هدف	Gap%	زمان	تابع هدف		
۱,٥	۱۱٦	۳۸٦٦	۰	۱۷۰	۳۸۰۹	٦-٥-٤-۳۲	۰۱
۱,۲	۱۰۹	۳۳٦۹	۰	۲۱۷	۳۳۲۹	٤-٥-٦-۳۳	۰۲
۱,٥	۱٤٥	۳۳٦۱	۰	۲٦٤	۳۳۱۱	٤-٦-٤-۳۳	۰۳
۱,۲	۱٤٤	٦۰۹۷	۰	۲٥٤	٦۰۲٥	٥-٥-٥-۳٤	۰٤
۱,۸	۱۱۰	٤۰۲٥	۰	۲۱٦	۳۹٥٤	٦-٥-۳-۳٦	۰٥
۱,٥	۱٦٦	۲۷۸۹	۰	۳۱۸	۲۷٤۸	٤-٥-٤-۳۷	۰٦
۱,۱	۳۱۹	٤۲۳٥	۰	٦۲٦	٤۱۸۹	٦-٤-٦-۳۷	۰۷
۱,۱	٤۸۳	٤۰٦۷	۰	٥۲۲	٤۰۲۳	٦-٥-٦-۳۸	۰۸
۱	٤۱۷	۳۷٥٤	۰	٥۰٦	۳۷۱۷	۷-٥-٦-۳۹	۰۹
۱,۲	٤۱۲	٤۹۲۲	۰	٦۳٦	٤۸٤۰	۷-٦-٦-۳۹	۱۰
۱	۱۰۹	٥٤۳٦	۰	۱٦۱	٥۳۸۲	۷-۷-٦-٤٤	۱۱
۰	۱٤۱	۳٥٥۲	۰,۱	۱۳٦	۳٥٥٦	٥-٦-۳-٤٥	۱۲
۱,۸	۱۷٥	٤۷۲٤	۰	۱۹۹	٤٦٤۰	٦-۷-٤-٤٥	۱۳
۲,۸	۱۸۷	٥۹۹۹	۰	۲۱۰	٥۸۳٦	۷-۷-٦-٤٦	۱٤
۲,٥	۱۹۸	۷۳٥۷	۰	۲۹۰	۷۱۷۸	٦-۷-۳-٤۸	۱٥

#	N-T- K-M	الگوریتم VNS			الگوریتم SA		
		تابع هدف	زمان	Gap%	تابع هدف	زمان	Gap%
١٦	٥٣–٦–٧–٦	٦٦٦٦	٣٥٩	٠	٦٨٤٦	٣١٣	٢,٧
١٧	٥٤–٥–٧–٩	٦٩٦٥	٤٤٠	٠	٧١١٨	٣٥٩	٢,٢
١٨	٥٥–٥–٩–٥	٥٧٢٤	٦٨٠	٠	٥٨٧٣	٤٠٩	٢,٦
١٩	٦٠–٥–٩–٨	٥٢٠٠	٧٢١	٠	٥٣٤٦	٥٧٥	٢,٨
٢٠	٦١–٥–٩–٥	٣٢٧٦	١٥٧	٠	٣٣١٥	٧٤	١,٢
٢١	٦٢–٤–٨–٩	٤٣٤٤	١٦٥	٠	٤٤١٤	١٣٦	١,٦
٢٢	٦٣–٤–٩–١٠	٥٣١٤	٣٢١	٠	٥٤٤٢	١٢٤	٢,٤
٢٣	٦٣–٦–١٠–٥	٥٧٩٧	٤٠٣	٠	٦٠٠٦	٢٢٨	٣,٦
٢٤	٦٤–٤–٩–٩	٦٢٥٤	٦٠٨	٠	٦٣٧٩	١٨٥	٢
٢٥	٦٥–٤–٧–٩	٢٦١١	١١٧	٠	٢٦٨١	١٧٦	٢,٧
٢٦	٦٩–٤–٩–١٠	٤٧٨٠	٣٨٥	٠	٤٩٤٣	٢١٣	٣,٤
٢٧	٨٠–٤–١٠–٧	٦٣٦٥	٤٢٨	٠	٦٥٩٤	٣١٠	٣,٦
	میانگین	٤٨٠٨,٦٣	٣٥٢,١٩	٠,٠٠٣٧	٤٩٠٧,٨	٢٣٤,٥٦	١,٩٤

٧. نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این مقاله یک مدل ریاضی جدید برای مسئله مسیریابی وسائط نقلیه موجودی الکتریکی ارائه شد. تابع هدف مدل ارائه شده شامل کمینه‌سازی هزینه مسافت طی شده و موجودی بود. وسائط نقلیه الکتریکی هستند و از آن جاییکه باتری‌ها ظرفیت مشخصی دارند، حداکثر مسافت قابل طی، محدود است. لذا امکان تعویض باطری در ایستگاه های تعویض باطری وجود دارد. در ادامه یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مسئله در ابعاد بزرگ طراحی شد. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی نتایج با نتایج حاصل از حل دقیق، و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مقایسه شد. نتایج نشان دهنده عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی است. در ابعاد کوچک الگوریتم پیشنهادی به جز یک مورد در تمامی مسائل نمونه به جواب بهینه دست یافت.

به عنوان پیشنهادات آتی خاص این تحقیق می توان عدم قطعیت را در پارامترهای اصلی مساله از جمله تقاضا، میزان مصرف سوخت و ... در نظر گرفت. همچنین با توجه به ویژگی های مساله می توان اهداف چندگانه و متضاد را مورد بررسی قرار داد. وابسته بودن میزان مصرف سوخت به میزان کالای حمل شده و روش های حل جدید از جمله پیشنهادات برای تحقیقات آتی می باشد.

٨. پی‌نوشت‌ها

VRP: Vehicle Routing Problem
IRP: Inventory Routing Problem
AFV: Alternative Fuel Vehicle
AFS: Alternative Fuel Station
EV: Electric Vehicle
EVRP: Electric Vehicle Routing Problem
E-VRPTW: EVRP Time Window
PR: Partial Recharge
FR: Full Recharge
EVRP-PR: EVRP Partial Recharge
LRP: Location-Routing Problem
BSS: Battery Swap Station
BSS-EVLRP: Battery Swap Station Electric Vehicle Location-Routing Problem
VNS: Variable Neighborhood Search

TS: Tabu Search
SA: Simulated Annealing
ALNS: Adaptive Large Neighborhood Search

۹. منابع

– توکلی مقدم، رضا، علینقیان، مهدی، سلامت بخش، علیرضا (۱۳۹۳) "مسأله مسیریابی وسائط نقلیه دوره ای با پنجره زمانی در حالت رقابتی با روش شبیه سازی تبرید بهبود یافته"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، شماره ٤، تابستان ۱۳۹۳، ص. ٤٤٩-٤٧٠.

– کهفی، عاطفه، توکلی مقدم، رضا (۱۳۹۳) "حل مدل مسیریابی وسایل نقلیه چندانباره مبتنی بر کاهش ریسک با استفاده از یک الگوریتم خفاش چندهدفه"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، شماره ۳، بهار ۱۳۹٤، ص. ۵۲۲-۵۰۷.

-Bruglieria, M., Mancinib, S. , Pezzellac, F. , Pisacaned, O., Suracic, S. (2017) "A three-phase matheuristic for the time-effective electric vehicle routing problem with partial recharges" Electronic Notes in Discrete Mathematics, vol. 58, pp. 95–102.

-Conrad, R.G., Figliozzi, M.A. (2011) "The recharging vehicle routing problem" In: Proceedings of the industrial engineering research conference. Reno, NV.

-Montgomery, D.C. (1997), "Montgomery Design and Analysis of Experiments", USA.

-Desaulniers, G., Fausto, E., Irnich, S., & Schneider, M. (2014) "Technical report les cahiers du gerad, g-2014-110. Canada: Montreal.

-Erdogan, S. & Miller-Hooks, E. (2012) "A green vehicle routing problem", Transp. Res. E: Logist. Transp. Rev. vol. 48, pp. 100–114.

-Felipe, A., Ortuno, 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, vol. 71(1), pp. 111-128.

-Fleszar, K.I., Osman, H., Hindi, K. S., (2009)"A variable neighbourhood search algorithm for the open vehicle routing problem," European Journal of Operational Research, vol. 195, pp. 803-80.

-Hiermann, G., Puchinger, J., Stefan Ropke, S. & F. Hartl, R. (2016) "The Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations", European Journal of Operational Research, Vol.252, pp. 995–1018.

-Hof, J., Schneider, M., Goeke, M., (2017) "Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an AVNS algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops", Transportation Research Part B: Methodological, vol. 97, pp.102–112.

-Keskin, M. & Çatay, B. (2016) "Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows", Transportation Research, Part C, vol. 65, pp. 111–127.

-Koç, C. & Karaoglan, I. (2016) "The green vehicle routing problem: A heuristicbased exact solution approach", Applied Soft Computing, vol. 39, pp. 154–164.

-Liao, C.S., Lu, S.H., Shen, Z.J.M. (2016) "The electric vehicle touring problem", Transportation Research Part B, vol. 86, pp. 163–180.

-Lin, J., Zhou, W. & Wolfson, O. (2016) "Electric vehicle routing problem", Transportation Research Procedia, vol.12, pp. 508 – 521.

-Mancini, S., (2017) "The Hybrid Vehicle Routing Problem", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol.78, pp1-12.

-Mirchandani, P., Madsen, O.B.G. & Adler, J. (2012) "Scheduling and location issues in transforming service fleet vehicles to electric vehicles", in: 12th International Conference on Advanced Systems for Public Transport, Santiago, Chile.

-Mladenović, N., Hansen, P., (1997) "Variable neighborhood search", Computers & Operations Research, Vol. 24, issue. 11, pp. 1097-1100.

-Murakami, K. (2017) " A new model and approach to electric and diesel-powered vehicle routing", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 107,pp23-37.

-Perl, J. (1983) "Unified warehouse location-routing analysis", Technical Report, North-western University, Illinois.

-Repoussis, P., Paraskevopoulos, D., Tarantilis, C. & Ioannou, G. (2006) "A reactive greedy randomized variable neighborhood tabu search for the vehicle routing problem with time windows", Hybrid Metaheuristics, 124-138.

-Schiffer, M., Walther, G., (2017) "The electric location routing problem with time windows and partial recharging", European Journal of Operational Research, vol. 260, pp. 995–1013.

-Schneider, M. , Stenger, A. & Goeke, D. (2012) "The electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations", Technical Report, University of Kaiser-slautern, Kaiserslautern.

-Shao, S., Guan, W., Ran, B., He, Z., Bi, J., (2017) "Electric vehicle routing problem with charging time and variable travel time", Mathematical Problems in Engineering, 2017.

-Wang, H. & Shen, J. (2007) "Heuristic approaches for solving transit vehicle scheduling problem with route and fueling time constraints", Appl. Math. Comput. Vol. 190, pp. 1237–1249.

-Wang, Y., Bi, J., Guan, W., Zhao, X. (2017) " Optimising route choices for the travelling and charging of battery electric vehicles by considering multiple objectives", Transportation Research Part D: Transport and Environment, In Press.

-Worley, O. & Klabjan, D. (2012) "Simultaneous vehicle routing and charging station siting for commercial electric vehicles", In: IEEE International Electric Vehicle Conference, Greenville, SC, 1–3.

-Yang, J. & Sun, H. (2015) "Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles", Computers &Operations Research, vol. 55, pp. 217–232.

کوثر صادقی ولنی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه تهران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع – گرایش صنایع در سال ۱۳۸۹ را از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نمود. در حال حاضر ایشان دانشجوی دکتری رشته مهندسی صنایع در پردیس کیش دانشگاه تهران می‌باشد. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مسیریابی وسایل نقلیه، الگوریتم های فراابتکاری در زمینه بهینه سازی، بهینه سازی مسائل حمل و نقل ، لجستیک و طراحی شبکه زنجیره تامین می باشد.

رضا توکلی مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳٦۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۷۲ از دانشگاه ملبورن - استرالیا اخذ نمود .ایشان در سال ۱۳۷٦ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه سوین برن –استرالیا گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی سیستمهای صنعتی (مکانیابی و استقرارتسهیلات)، مسیریابی وسایط حمل و نقل، لجستیک و طراحی شبکه زنجیره تامین، زمانبندی و توالی عملیات، الگوریتم‌های فرابتکاری در بهینه‌سازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد تمام در دانشگاه تهران است.

فریبرز جولای، فارغ التحصیل رشته مهندسی صنایع از دانشگاه امیرکبیر در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد به ترتیب در سال‌های ۱۳٦٦ و ۱۳٦۹ می‌باشد. وی در سال ۱۳۷۷ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه گرنوبل – انستیتو ملی پلی تکنیک (INPG) فرانسه گردید.

زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان زمانبندی و توالی عملیات، فرایندهای تصادفی و تئوری صف، مسیریابی وسایط حمل و نقل، برنامه ریزی تولید و کنترل موجودی، بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد تمام در دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه تهران است.