مدل‌سازی ریاضی چندهدفه برای مسئله مسیریابی- مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی ناهمگن با پنجره زمانی

مقاله علمی – پژوهشی

عذرا قبادی، دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
رضا توکلی مقدم*، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
محمدفلاح، استاد، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
حامد کاظمی پور، استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: tavakoli@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹- پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵
صفحه ۷۶-۶۱

چکیده

یک رویکرد موثر برای رفع مسائل تغییرات آب و هوایی، جایگزین نمودن وسائط حمل ونقل الکتریکی با همتایان دیزلی خود است. هرچند این جایگزینی چالش های بسیار دارد، ولیکن غیرممکن نیست. در این مقاله، دو مدل ریاضی چندهدفه -چند انباره مسئله مسیریابی - مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ و تعویض باتری وسائط نقلیه الکتریکی باری ناهمگن ارائه شد بعلاوه برای افزایش رضایتمندی مشتریان، جریمه تخطی از پنجره‌های زمانی نیز در مدل‌ها اعمال گردید. هر یک از این دو مدل سه هدف را دنبال می‌کنند. هدف اول، کمینه نمودن (مجموع هزینه‌های مسیریابی، هزینه‌های احداث ایستگاه‌های شارژ یا تعویض باتری و هزینه تخطی از پنجره‌های زمانی)؛ هدف دوم، حداقل نمودن تعداد خودروهای مورد استفاده و هدف سوم، حداقل نمودن تعداد ایستگاه‌های شارژ یا تعویض باتری است. مدل‌ها توسط حل کننده سیپلکس با نرم افزار گمزدر اندازه کوچک حل شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد در مدل پیشنهادی اول که ایستگاه‌های تعویض باتری مورد بهره‌برداری قرارگرفتند؛ تعداد خودروهای کمتری مورد استفاده قرارگرفت. همچنین در مدل پیشنهادی دوم که ایستگاه‌ها شارژ بخشی ارائه می‌دهند؛ هزینه کل کمترگردید. ضمناً در هردو مدل با افزایش تعداد انبارها هزینه کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی – مکان‌یابی، وسائط نقلیه الکتریکی باری، مدل سازی چندهدفه، پنجره‌های زمانی نرم

۱-مقدمه

در حال حاضر، مسائل مربوط به محیط زیست به دغدغه مشترک مردم و جامعه دانشگاهی بدل شده‌است [Hu et al., 2017 ؛ Małgorzata, 2018]. طبق پیش‌بینی انجمن بین‌المللی حمل و نقل تا سال ۲۰۵۰ تقاضا در بخش حمل و نقل سه برابر و انتشار گاز Co_2 ناشی از حمل ونقل به میزان ۶۰ درصد افزایش خواهد یافت [ITF, 2017]. به همین جهت موضوع مقابله با چالش‌های بحران تغییرات آب و هوایی مورد توجه کشورهای جهان قرارگرفته‌است. از مزیت‌های استفاده وسائط نقلیه الکتریکی کاهش در انتشارگازهای گلخانه‌ای و میزان بسیار پایین آلودگی صوتی است. بنابراین پاکترین وسیله نقلیه در محیط های شهری، شهری و کلان شهرها بشمارمی‌آیند. به همین علت استفاده از خودروهای الکتریکی نه تنها برای توسعه پایدار کشورهای در حال توسعه فرصتی طلائی بشمارمی‌آید، که برای رفع نگرانی‌های زیست محیطی

کشورهای صنعتی پیشرفته نیز مفید است. درهمین راستا می‌توان به تصمیم اتحادیه اروپا به کاهش ٤٠ درصد میزان گازهای گلخانه‌ای نسبت به سال ۱۹۹۰، تا سال ۲۰۳۰ اشاره کرد [Schiffer and Walther, 2017].

پرجمعیت‌ترین کشورهای جهان یعنی چین، هند و ایالات متحده آمریکا [PRB, 2010]، نیز استفاده از تکنولوژی‌های حمل و نقل پاک را آغاز نموده‌اند. چین درجریان مسابقات المپیک ۲۰۰۸ از خودروهای الکتریکی جهت حمل زباله استفاده کرد. رئیس وزارت نیرو هند در ماه مه سال ۲۰۱٦، اعلام کرد هدف این کشوربرقی نمودن تمام وسائط نقلیه جاده‌ای تا سال ۲۰۳۰ است [Singh, 2016]. ایالات متحده آمریکا با داشتن تقریباً ۲۵ درصد از انتشارگازهای گلخانه‌ای در صنعت حمل و نقل از حمایت مالی بازاریابی و قانون سرمایه‌گذاری مجدد برای کاهش هزینه‌های خرید وسائط نقلیه سعی در تشویق استفاده ازکامیون‌های الکتریکی نموده‌است. در سال ۲۰۱٦ چین با فروش بیش از نیم میلیون خودروالکتریکی شامل ۳۲۰ هزار خودرو سواری ، ۱۲۰ هزار اتوبوس و٦٠ هزارکامیون متوسط وسنگین، از کالیفرنیا پیشی گرفت [Sperling, 2018].

از بررسی مقایسه هزینه‌های خرید وعملیاتی کامیون‌های الکتریکی که توسط فنگ و فیگلیوزی [Feng and Figliozzi, 2013] انجام پذیرفت، می‌توان دریافت که اگرچه هزینه خرید این خودروها سه برابر بیشتر است، اما هزینه انرژی آنها چهار برابر و هزینه تعمیرونگهداری آنها بیست برابر کمتر از کامیون‌های دیزلی است [Taefi et al., 2015]. علاوه‌براین کامیون‌های الکتریکی در مقایسه با کامیون‌های مرسوم استهلاک کمتری دارند. کشورها برای آن‌که استفاده گسترده‌تراز این خودروها را تشویق کنند، مشوقهایی در نظرگرفته‌اند. مثلاً درایالات متحده تامین هزینه خرید این خودروها کوپن "خرید کامیون نیویورک"ارائه می‌شود، که هشتاد درصد خرید خودرو الکتریکی تا سقف شصت هزار دلار را برای خریداران تسهیل نموده‌است [NYSERDA, 2015]. نمونه دیگر ازمشوق‌ها استفاده از خودروهای الکتریکی، معافیت عوارض جاده‌ای در کشور نروژ است [Hannisdahl, Malvik and Wensaas, 2013]. در ایتالیا برای دسترسی به مرکزشهر وسائط نقلیه دیزلی سالانه ۵۷۰ یورو ولی وسائط نقلیه الکتریکی ۳۰۰ یورو، پرداخت می‌کنند [AustriaTech, 2014].

با این وجود، خودروهای الکتریکی با چالش‌های دیگری مانند محدودیت‌های رانندگی، عدم ایجاد زیرساخت‌ها و تجهیزات ایستگاه‌های شارژ وتعویض باتری ومسائل فنی روبرو هستند. این موارد در تصمیم‌گیری‌های مسیریابی و مکان‌یابی اثرگذارخواهد بود.

ایجاد ایستگاه‌های شارژ معمولاً به‌عهده دولت‌ها است، ولی تصمیم‌گیری شرکت‌ها در استفاده از این نوع خودروها در ناوگان حمل و نقل‌شان علاوه براینکه بر پتانسیل استفاده از خودروهای الکتریکی تأثیر دارد، دولتها را نیز ترغیب به ایجاد زیر ساختهای مورد نیاز این نوع حمل و نقل را برای استفاده‌های شهری و بین شهری می‌نمایند.

در این مقاله، دو مدل ریاضی برای مسئله مسیریابی- مکان‌یابی ایستگاه‌های با سه هدف حداقل نمودن هزینه‌های مسیر و احداث ایستگاه‌ها و تخطی از پنجره زمانی به همراه دو هدف حداقل نمودن تعداد خودروهای مورد استفاده و احداث ایستگاه‌ها ارائه شد. در این مدل‌ها چندانباره و خودروهای الکتریکی باری ناهمگن در نظرگرفته شده‌است. مدل‌ها برای نمونه‌های کوچک حل گردیده است.

۲- پیشینه تحقیق

به‌رغم وجود مقالات گسترده و همه جانبه درحوزه مسائل مسیریابی و مکان‌یابی وسائط نقلیه غیرالکتریک که می‌توان به مقالات ذیل اشاره نمود، [Alinaghian, and Shokouhi, 2018][Tavakkoli-Moghaddam and Eghbali, 2018][Mohamadpour and Ghousi and Tahrkani, 2019][Ataei and Sadeghian, Hamedi, 2019] مطالعات محدودی در زمینه وسائط نقلیه الکتریکی بخصوص توزیع کنندگان کالا صورت گرفته‌است. دلیل چنین کمبودی را می‌توان محدودیت رنج حرکتی، دسترسی محدود به ایستگاه‌های شارژ و تعویض باتری دانست؛ که منجرب پیچیدگی‌مدل‌سازی در این مورد شده‌است.

آرتمایر و همکاران اولین مطالعه را با استفاده از مفهوم تئوری گراف برای مسئله بهینه سازی مسیر وسائل نقلیه با سوخت‌های جایگزین ارائه نمودند. و همچنین الگوریتم عمومی کوتاه‌ترین مسیر را توسعه دادند. بعلاوه مدل مسیریابی انرژی-کارا را با وجود باتری‌های قابل شارژ مجدد به عنوان یک مورد خاص پیشنهاد کردند؛ که محدودیت‌های مفروض را رعایت می‌کرد[Artmeier et al., 2010].

میرچندانی و همکاران علاوه بر تحقیق پیرامون زمان‌بندی ناوگان وسائط نقلیه الکتریکی و مکان‌یابی ایستگاه‌های تعویض باتری، کوتاه‌ترین مسیر را برای مسیریابی خودروهای الکتریکی معرفی نمودند [Mirchandani, Madsen, and Adler, 2012]. ورلی و کلابجان مکان‌یابی ایستگاه تعویض یا شارژ باتری و مسیریابی خودروهای الکتریکی را بررسی کردند. هدف مسئله‌شان، حداقل کردن مجموع هزینه‌های سفر، هزینه‌های شارژ مجدد و هزینه‌های مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ مجدد بود. مسئله با برنامه ریزی خطی و بر اساس مسیریابی کلاسیک خودرو بدون روش حل خاصی ارائه گردید. آنها مدل‌شان را با داده‌های یک شرکت بزرگ تحویل بسته‌های فوری در شیکاگو برای کامیون‌های اندازه متوسط الکتریکی آزمایش نمودند [Worley and Klabjan, 2012].

ون‌دوئین و همکاران بدنبال مشخص نمودن ناوگان ایده‌آل خودروهای الکتریکی(EVs) در مرکز شهر آمستردام برای توزیع کالا از یک مرکز انتقال کالابه مجموعه‌ای از مشتریان، بودند. هدفشان تعیین ناوگان بهینه از EVs و مسیرهای تحویل برای ارائه سطح خدمت مورد نظر مشتریان با پنجره‌زمانی تحویل، زمان سرویس و تقاضای مشخص با حداقل هزینه بود. ده ترکیب ناوگان مورد آزمایش قرار گرفت و یکی از آنها با کمترین هزینه متوسط هر تحویل و سطح خدمت بیش از ۹۹ درصد برای اجرا توصیه شد[Van Duin et al., 2013]

دسالنیرز و همکاران مسئله مسیریابی وسائط نقلیه الکتریکی با پنجره‌های زمانی را با در نظر گرفتن چهار استراتژی شارژ مجدد (براساس اینکه یک یا چند شارژ مجدد در هر مسیر مجاز بوده وباتری‌ها کامل یا بخشی شارژ می‌شوند) بررسی کردند و یک الگوریتم شاخه و قیمت و برش با رویکرد کارای لیبل‌گذاری، برای استراتژی‌های چهارگانه فوق ارائه کردند [Desaulniers et al., 2014]. اشنایدر و همکاران مسئله مسیریابی وسائط نقلیه الکتریکی با پنجره زمانی و ایستگاه‌های شارژ مجدد را مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه آنها ازنظر فرضیات فرآیند شارژ متفاوت است. هدف مسئله، عبارت بود از یافتن تورهایی که محدودیت‌های شارژ و محدودیت‌های پنجره‌زمانی را برآورده سازد. مدل پیشنهادی، مسافت کل طی شده به وسیله ناوگان همگن EVs را حداقل کرده و فرض می‌کنند زمان شارژ باتری به مقدار باتری باقیمانده در هنگام رسیدن به ایستگاه شارژ وابسته‌است. برای حل مسئله، یک رویکرد جستجوی همسایگی متغیر که از جستجوی ممنوع به عنوان روش بهینه‌سازی محلی استفاده می‌کند، پیشنهاد گردید [Schneider, Stenger, and Goeke, 2015]. گوئیک و اشنایدر مسیریابی ناوگان ناهمگن خودروهای الکتریکی و سنتی را با مدلی طرح کردند که دارای سه تابع هدف بود. این سه تابع هدف عبارت بودند از حداقل نمودن فاصله سفر، هزینه و هزینه‌های انرژی الکتریکی و دیزلی بعلاوه هزینه جایگزینی باتری با محدودیت‌های مربوط به آن مطرح نمودند [Goeke and Schneider, 2015].

هایرمان و همکاران مسئله اندازه و ترکیب ناوگان و مسیریابی وسائط نقلیه با پنجره‌زمانی وایستگاه‌های شارژ را مطرح کردند. ناوگان شامل انواع وسائط نقلیه الکتریکی بود که از نظر ظرفیت حمل و نقل، اندازه باتری و قیمت متفاوت بودند. آنها مسئله را با الگوریتم شاخه و قیمت حل نمودند و همچنین از یک روش ابتکاری ترکیبی استفاده کردند که عبارت بود از یک جستجوی همسایگی بزرگ انطباقی همراه با جستجوی محلی و رویکرد برچسب گذاری. آن‌ها به منظورآزمایش مدل مجموعه‌ای از مسائل استاندارد جدید ایجاد کردند و با حل این مسائل و مسائل استاندارد موجود، کارایی روش ارزیابی شد [Hiermann et al., 2016]. کسکین و کاتای یک برنامه شارژ سریع / کامل برای مسئله مسیریابی خودرو الکتریکی با پنجره‌زمانی که محدودیت شارژ کامل را در نظر گرفته و با مجاز شمردن شارژ بخشی درزمان توقف در ایستگاه‌های شارژمسئله را ارائه کردند. هدف آن‌ها حداقل سازی طول سفر بود. آن‌ها مسئله را بصورت برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط ۰-۱ مدل‌سازی نمودند و از الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ اصلاح شده حل کردند. مدل را با مسائل استاندارد در ادبیات موضوع آزمایش کردند. نتایج، عمکرد شارژ بخشی در تصمیمات مسیریابی را نشان داد [Keskin and Çatay, 2016].

هُف و همکاران مسئله تصمیم گیری همزمان مسیریابی و مکان‌یابی ایستگاه تعویض باتری را بررسی کردند. آنها با استفاده از روش متاهیورستیک جستجوی همسایگی متغیر تطبیقی به حل مدل پرداختند. نتایج بدست آمده کارایی روش را نشان داد [Hof, Schneider and Goeke, 2017].

شیفر و والتر مسئله مسیریابی مکان یابی خودرو الکتریکی با پنجره‌زمانی و شارژ جزیی را بطور همزمان مسیریابی و

مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی در نظر گرفتند. مدلی که آنها ارائه نمودند، مسافت طی شده و تعداد وسائط نقلیه و همچنین ایستگاه‌های شارژ را حداقل می‌کرد [Schiffer, and Walther,2017].

ونگ و همکاران انتخاب مسیر بهینه برای سفر و شارژ خودرو الکتریکی(سواری) را با درنظرگرفتن سه مدل تک هدفه مطرح کردند. اهداف مدلها به ترتیب عبارت بود از کم کردن زمان سفر که شامل زمان رانندگی و زمان انتظاردر صف و زمان شارژ؛ کم کردن هزینه‌های شارژ شامل هزینه برق مصرفی، پارکینگ و سرویس؛ وسومین هدف کم نمودن انرژی مصرفی بود. آنها مدل‌ها را با یک الگوریتم ژنتیک حل نمودند [Wang et al., 2018]. امیری و همکاران مدیریت زمانبندی شارژ بهینه خودروهای الکتریکی (اتوبوس) را ازمیان ایستگاه‌های تعویض باتری بیان نمودند. مدل‌شان شامل حداقل نمودن شارژ باتری و هزینه ازدست رفته، آزادسازی ظرفیت شبکه و انحراف از ولتاژ نرمال بود. آنها با استفاده از الگوریتم ژنتیک مدل را حل وبا نمونه‌های تولید شده آن را تست نمودند [Amiri, Jadid and Saboori, 2018].

شیائو و همکاران مسئله مسیریابی خودرو الکتریکی با پنجره‌زمانی فارغ از مکان‌یابی را ارائه کردند. آنها نرخ مصرف انرژی را در طول مسیر براساس سرعت وبار تحت مدل برنامه ریزی خطی بیان نمودند. رابطه غیر خطی سرعت و زمان را با تقریب‌های داخلی وبیرونی خطی وسپس با روش دقیق برای نمونه‌های کوچک و روش ابتکاری برای صد مشتری حل کردند. [Xiao et al. , 2019].

کسکین و همکاران در مقاله اخیر مدل مسئله مسیریابی خودروهای الکتریکی را با در نظر گرفتن زمان انتظار در ایستگاه‌های شارژ و ظرفیت محدودی ارائه دادند. همچنین به تصمیمات مرتبط با این حوزه پرداختند. مدل را از ترکیب روش جستجوی همسایگی متغیر تطبیقی حل نمودند. نتایج بررسی نشان می‌دهد که انتظار در صف ایستگاه‌ها شارژ با نوع مسئله و طول صف مرتبط است. بعلاوه هزینه کل را از یک درصد تا بیست درصد افزایش خواهد داد. [Keskin et al. , 2019].

خلاصه مقالات بالا در جدول ۱، براساس نوع مسئله، نوع شارژ، ترکیب ناوگان و همچنین اهداف، انبار، در نظرگرفتن پنجره‌زمانی به همراه روش‌های حل؛ دسته‌بندی و ارائه گردیده است. بررسی نشان می‌دهد که بسیاری مقالات به مسئله مسیریابی و مکان‌یابی و پنجره‌زمانی و حتی به مسئله مکان‌یابی- موجودی [Sadeghi-Velni, Tavakkoli-Moghaddam and Jolai 2018] پرداخته‌اند، ولیکن منحصراً مقاله حاضر به مدل‌سازی ریاضی چند هدفه چند انباره مسئله مسیریابی و مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ یا تعویض باتری وسائط نقلیه الکتریکی باری ناهمگن با در نظر گرفتن جریمه تخطی از پنجره‌های زمانی می‌پردازد.

۳- تعریف مسئله

در این مقاله دو مدل ریاضی چند هدفه چند انباره برای مسئله مسیریابی- مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ / تعویض باتری خودروهای الکتریکی باری ناهمگن با پنجره‌های زمانی نرم ارائه می‌شود. پنجره زمانی به این علت در مدل اعمال گردید؛ که اغلب مشتریان برای دریافت کالا محدودیت زمانی تعریف می‌کنند و فقط در آن ساعات امکان دریافت کالا را دارند. این بازه زمانی به پنجره زمانی معروف است؛ دارای سه نوع مدل سخت، نرم و مختلط است. در نوع مدل پنجره زمانی نرم امکان سرویس دهی تا حد معینی خارج از بازه تعیین شده با جریمه امکان پذیراست[Azi et al., 2007] [Thangiah et al., 1991]. با توجه به محدودیت حرکتی خودروهای الکتریکی مد نظر داشتن این موضوع بسیار کاربردی است.

هر مدل، سه هدف را دنبال می‌کنند. اهداف مدل‌های پیشنهادی عبارتنداز هدف اول، کمینه‌سازی هزینه‌های مسیریابی، هزینه‌های احداث ایستگاه‌های شارژ یا تعویض باتری و هزینه‌های تخطی از پنجره‌های زمانی. هدف دوم، کمینه سازی تعداد خودروهای مورد استفاده و هدف سوم حداقل‌سازی تعداد ایستگاه‌های شارژ یا تعویض باتری.

جدول ۱. مقالات بررسی شده خودروهای الکتریکی

مرجع	سال	مسیریابی	مکان‌یابی ایستگاه شارژ/تعویض باتری	موجودی	نوع شارژ		اندازه وترکیب ناوگان			توقف میانی	چندهدفه	چندانباره	پنجره زمانی	تأثیر وزن و شیب جاده	روش حل		
					شارژ بخشی	شارژ کامل	اندازه	همگن	ناهمگن						دقیق	ابتکاری /فراابتکاری	ترکیبی
آرتمایر وهمکاران	۲۰۱۰	✓													✓		
ورلی و کلابجان	۲۰۱۲	✓	✓														
میرچندانی و همکاران	۲۰۱۲	✓	✓														
اشنایدو همکاران	۲۰۱۴	✓	✓				✓						✓				✓
دسالینرز و همکاران	۲۰۱۴	✓			✓	✓							✓		✓		
گوئیک و اشنایدر	۲۰۱۵	✓				✓			✓				✓	✓			
کسکین و کاتای	۲۰۱۶	✓			✓								✓				
هایرمان و همکاران	۲۰۱۶	✓	✓						✓							✓	✓
هُف و همکاران	۲۰۱۷	✓	✓							✓						✓	
شیفر و والتر	۲۰۱۷	✓	✓		✓	✓							✓			✓	
ونگ و همکاران	۲۰۱۸	✓									✓					✓	
امیری و همکاران	۲۰۱۸															✓	
صادقی و همکاران	۲۰۱۸	✓	✓	✓				✓								✓	
شیائو و همکاران	۲۰۱۹	✓											✓		✓	✓	
کسکین و همکاران	۲۰۱۹	✓															✓
پژوهش حاضر	۲۰۱۹	✓	✓						✓	✓	✓	✓	✓		✓		

با توجه به اینکه مالکیت خودروهای الکتریکی و همچنین ایستگاه‌های شارژ/تعویض باتری برای شرکت‌های لجستیکی حمل و نقل هزینه‌بر است؛ تصمیم‌گیری در خصوص تعداد خودروهای مورد استفاده در برنامه‌ریزی مسئله مسیریابی مکان‌یابی دارای اهمیت بالایی می‌گردد. بعلاوه، گرچه زمان توقف خودروها در ایستگاه‌های تعویض باتری بسیار کمتر خواهد بود و لیکن هزینه احداث و تامین باتری این ایستگاه‌ها در تصمیم‌گیری تاثیر گذار است. لذا، این موارد بصورت اهداف جداگانه نیز در نظر گرفته شده است.

دراین مسائل این مقاله تصمیمات زیر گرفته می‌شود.

-مکان‌های کاندید ایستگاه‌های شارژ یا تعویض باتری.

-درهرمسیر کدام ایستگاه تعویض باتری بازدید می‌شود وتوالی مسیر چگونه است؟

-تعداد خودروهای مورد استفاده

این مرحله به مفروضات مهم وتعاریف مشترک مدل‌های پیشنهادی می‌پردازیم.

-برای هر کمان(i,j) یک فاصلهD_{ij} بین گره i وj وجوددارد.

-چند نقطه دپو (انبار) وجود دارد.

-تعداد مسیرهای خروجی هر انبار فعال با تعداد مسیر ورودی آن برابراست.

-تقاضای مشتریان مشخص است.

-هر مشتری در هر دوره حداکثر از یک وسیله نقلیه سرویس می‌گیرد.
-وسائط نقلیه ناهمگن هستند لذا ظرفیت بار $Capf_k$ و ظرفیت باتری $Capb_k$ آن‌ها متفاوت است.
-سرعت شارژ در هر واحد زمان SBT و سرعت خودرو SP ثابت است و تغییرارتفاع تاثیر ندارد.
-محدودیتی در تعداد وسائط نقلیه به طور همزمان در یک گره شارژ وجود ندارد.
-شارژ درگره مشتری به موازات عملیات سرویس Ser_i انجام می‌شود.
-وسائط نقلیه در آغاز مسیر با شارژ کامل حرکت می‌کنند و امکان شارژ شب درانبارها وجود دارد.

٤- مدل‌های پیشنهادی

دراین بخش، مدل‌های پیشنهادی مسئله چند هدفه چند انباره مسیریابی و مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ باتری خودروهای الکتریکی ناهمگن با پنجره‌زمانی نرم(MOMDHEVLRP-STW-BS/PR) پیشنهاد شده‌است. مدل با شماره (۱) ایستگاه‌های تعویض باتری (MOMDHEVLRP-STW-BS) و مدل ایستگاه‌های شارژبخشی (MOMDHEVLRP-STW-PR) با شماره (۲) مشخص شده‌اند. مدل (۱) بعنوان مدل پایه است و به مدل (۲) شرایط یا پارامترهایی اضافه یا تغییراتی درآن ایجاد شده‌است. مسئله مورد نظر بصورت یک گراف کامل A مجموعه‌ای از گره‌های UT و $A=\{(i,j)|i,j\in UT, i\neq j\}$ بین هر دوگره تعریف گردیده‌است. ضمناً مدل‌ها تماماً برنامه‌ریزی خطی مختلط است.

٤-١- مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم مدل‌ها

در این زیر بخش مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم یصورت کلی برای هر دو مدل تعریف می‌شود. لازم به ذکر است که تغییرات یا اضافات با شرحی مشخص می‌گردد.

مجموعه‌ها و شمارنده‌ها

NC گره‌های مشتریان
NR گره‌های ایستگاه‌های شارژ / تعویض باتری
K وسائط نقلیه الکتریکی $k\in K, K=\{1,2,...,k\}$
Da گره انبارها برای خودروهای توزیع
Db گره انبارها برای خودروهای ورودی
DT اجتماع تمام گره‌های انبار برای خودروهای توزیع وورودی
Sub_i مجموعه گره‌های حذف زیرتور (مسیرهای ناقص) مرتبط با گره $i\ i\in\{NC\cup NR\cup DT\}$
USub اجتماع تمام مجموعه های Sub_i
NT اجتماع تمام گره‌های مشتریان NC و ایستگاه‌های شارژ /تعویض باتریNR وگره‌های حذف زیرتور USub
CTa اجتماع گره‌های مشتریان NC و انبارها برای Da
Ua اجتماع گره‌های $i\in NT$ و انبارهای توزیع Da
Ub اجتماع گره‌های $i\in NT$ و انبارهای وروریDb
UT اجتماع گره‌های $i\in NT$ وگره‌های $i\in DT$

پارامترها:
Cd_{ijk} هزینه جابجایی از گره i به گره j با خودرو k ام
Cc_i هزینه استقرار ایستگاه‌های شارژ / تعویض باتری در گره i ام
CP هزینه جریمه زودکرد و دیرکرد رسیدن به مشتری به ازای هر واحد زمانی
Ce_k هزینه شارژ / تعویض باتری خودرو k ام
$Capf_k$ ظرفیت بار خودرو k ام
$Capb_k$ظرفیت باتری خودرو k ام
$CapE_k$ نرخ مصرف انرژی باتری بر اساس نوع آن در هر واحد مسافت پیموده شده
iD_i مشخصه هر انبار $i\in DT$
Di_{ij} کمترین فاصله $i\in Ua$ و $j\in Ub$
Td_{ijk} زمان سفر بین گره $i\in Ua$ و $j\in Ub$ و $Td_i=Di_{ij}SP^{-1}$وقتی SP سرعت خودرو است.
Ser_i زمان مورد نیاز خدمت دهی در گره $i\in NC$
et_i زودترین زمان پنجره زمانی گره $i\in UT$
e^{-1} تخطی منفی از حد پایین پنجره‌زمانی گره $i\in UT$
e^{+1} تخطی مثبت از حد پایین پنجره‌زمانی گره $i\in UT$
lt_i دیرترین زمان پنجره زمانی گره $i\in UT$
L^{+1} تخطی مثبت از حد بالای پنجره‌زمانی گره $i\in UT$
L^{-1} تخطی منفی از حد بالای پنجره‌زمانی گره $i\in UT$
Dem_i تقاضای گره $i\in UT$
SBT مقدار زمانی که برای تعویض باتری صرف می‌شود.

MN بیشترین مراکز شارژ برای مکان‌یابی

LBCar حدپایین برای تعداد خودروهایی که می‌توانند یک انبار را ترک کنند.

RC نرخ انرژی شارژ درواحد زمان (پارامترافزوده شده مدل۲)

M عدد مثبت خیلی بزرگ

متغیرهای تصمیم:

X_{ijk} اگر حرکت‌های خودرو $k \in K$ در مسیر از گره $i \in Ua$ به گره $j \in Ub$ به شرط اینکه $i \neq j$ برود برابر یک است در غیر این صورت برابر صفر.

Y_i اگر در گره $i \in NR$ یک محل تعویض باتری یافت شود برابر یک در غیر اینصورت برابر صفر (متغیر تصمیم مدل۱)

Y_i اگر در گره $i \in \{NC \cup NR\}$ یک ایستگاه شارژ باتری یافت شود برابر یک در غیر اینصورت برابر صفر(متغیر تصمیم مدل۲)

AE_{ik} مقدارشارژ باقی مانده خورو k ام درگره $i \in NT$ (متغیر تصمیم مدل۲)

AT_i لحظه زمانی که خودرو وارد گره $i \in UT$

FL_{ik} مقدار بار تخلیه شده وقتی خودرو k ام وارد به گره i ام $i \in UT$

EL_{ik} مقدار انرژی باتری تخلیه شده براساس نوع باتری خودرو k ام وارد به گره i ام $i \in UT$

UBCar حد بالا برای تعداد خودروهایی که می‌توانند یک انبار را ترک کنند.

ID_i شماره مشخص شده انبار $h \in Da$ شروع مسیر که از گره $i \in Ub$ می‌گذرد.

٤-١-١- مدل‌های ریاضی

در این زیر بخش، مدل‌های ریاضی پیشنهادی مدل‌های (۱) و (۲) ارائه شده‌است مدل‌ها دارای توابع هدف مشترک هستند. مدل شماره (۱) برای ایستگاه‌های تعویض باتری (MOMDHEVLRP- STW-BS) به شرح ذیل است.

$$Min\ Z_1 = \sum_{i\in Ua}\sum_{j\in Ub}\sum_{k\in K}(Ce_k + Cd_{ijk})Td_{ijk}\cdot X_{ijk} + \sum_{i\in R} Cc_i \cdot Y_i + \sum_{i\in UT} CP\cdot(e_i^- + l_i^+) \quad (۱)$$

$$Min\ Z_2 = UBCar \quad (۲)$$

$$Min\ Z_3 = \sum_{i\in NR} Y_i \quad (۳)$$

s.t.

$$\sum_{j\in Ubi\neq j}\sum_{k\in K} X_{ijk} = 1 \qquad \forall i \in NC \quad (٤)$$

$$\sum_{j\in Ub|i\neq j}\sum_{k\in K} X_{ijk} \leq 1 \qquad \forall i \in \{NR \bigcup USub\} \quad (٥)$$

$$\sum_{j\in Ubi\neq j} X_{ijk} = \sum_{j\in Ua|i\neq j} X_{jik} \qquad \forall i \in NT,\ k \in K \quad (٦)$$

$$LBCar \leq \sum_{j\in Ub|}\sum_{k\in K} X_{ijk} \leq UBCar \qquad \forall i \in UD_0 \quad (٧)$$

$$\sum_{i\in NR} Y_i \leq MN \quad (٨)$$

$$\sum_{j\in Ua|i\neq j} X_{jik} \leq M\cdot Y_i \qquad \forall i \in NR \quad (٩)$$

$$\sum_{j\in Ua|h\neq j} X_{jhk} \le M \cdot Y_i \qquad \forall i \in NR,\ h \in Sub_i \qquad (۱۰)$$

$$AT_j \ge AT_i + \left(Td_{ijk} + USub_i\right)\cdot X_{ijk} - M\cdot\left(1 - X_{ijk}\right) \qquad \forall i \in Ua,\ j \in Ub \mid i \neq j,\ k \in K \qquad (۱۱)$$

$$AT_j \ge AT_i + Td_{ijk}\cdot X_{ijk} - M\cdot\left(1 - X_{ijk}\right) \qquad \forall i \in Sub_{h\in NC},\ j \in Ub \mid i \neq j,\ k \in K \qquad (۱۲)$$

$$AT_j \ge AT_i + Td_{ijk}\cdot X_{ijk} + SBT\cdot X_{ijk} - M\cdot\left(1 - X_{ijk}\right) \qquad \forall i \in \left\{NR \bigcup Sub_{h\in NR}\right\},\ j \in Ub \mid i \neq j,\ k \in 1 \qquad (۱۳)$$

$$AT_i + et_i^- - et_i^+ = et_i \qquad \forall i \in UT \qquad (۱۴)$$

$$AT_i + lt_i^- - lt_i^+ = lt_i \qquad \forall i \in UT \qquad (۱۵)$$

$$EL_{jk} \le EL_{ik} - CapE_k \cdot Di_{ij} \cdot X_{ijk} + M\cdot\left(1 - X_{ijk}\right) \qquad \forall i \in \left\{Da \bigcup NC \bigcup Sub_{h\in NC}\right\},\ j \in Ub \mid i \neq j,\ k \in K \qquad (۱۶)$$

$$EL_{jk} \le Capb_k - CapE_k \cdot Di_{ij} \cdot X_{ijk} + M\cdot\left(1 - X_{ijk}\right) \qquad \forall i \in \left\{NR \bigcup Sub_{h\in R}\right\},\ j \in Ub \mid i \neq j,\ k \in K \qquad (۱۷)$$

$$EL_{ik} \le Capb_k \qquad \forall i \in Da,\ k \in K \qquad (۱۸)$$

$$FL_{jk} \le FL_{ik} - Dem_i \cdot X_{ijk} + M\cdot\left(1 - X_{ijk}\right) \qquad \forall i \in Ua,\ j \in Ub \mid i \neq j,\ k \in K \qquad (۱۹)$$

$$FL_{ik} \le Capf_k \qquad \forall i \in Da,\ k \in K \qquad (۲۰)$$

$$ID_j \ge X_{ijk}\cdot iD_i - M\cdot\left(1 - X_{ijk}\right) \qquad \forall i \in Da,\ j \in UT,\ k \in K \qquad (۲۱)$$

$$ID_j \le X_{ijk}\cdot iD_i + M\cdot\left(1 - X_{ijk}\right) \qquad \forall i \in Da,\ j \in UT,\ k \in K \qquad (۲۲)$$

$$ID_j \ge ID_i - M\cdot\left(1 - X_{ijk}\right) \qquad \forall i \in UT,\ j \in Ub,\ k \in K \qquad (۲۳)$$

$$ID_j \le ID_i + M\cdot\left(1 - X_{ijk}\right) \qquad \forall i \in UT,\ j \in Ub,\ k \in K \qquad (۲۴)$$

$$ID_j = iD_j \qquad j \in UT \qquad (۲۵)$$

$$X_{ij} \in \{0;1\} \qquad \forall i \in Ua,\ j \in Ub \mid i \neq j \qquad (۲۶)$$

$$Y_i \in \{0;1\} \qquad \forall i \in NR \qquad (۲۷)$$

$$AT_i, FL_{ik}, EL_{ik} \in IR^+ \qquad \forall i \in UT, k \in K \qquad (۲۸)$$

$$ID_i \in IR^+ \qquad \forall i \in Ub \qquad (۲۹)$$

معادله‌های (۱)، (۲)، (۳) توابع هدف مسئله می‌باشند. این توابع هدف به ترتیب معادلهٔ (۱) (مجموع هزینه‌های حمل و نقل و هزینه استقرار ایستگاه‌های تعویض باتری و هزینه تخطی از پنجره‌های زمانی)؛ معادلهٔ (۲) (تعداد خودروهای مورد استفاده) و معادلهٔ (۳) (تعداد ایستگاه‌های تعویض باتری / شارژ)، را کمینه می‌سازند. سپس محدویت‌های این مدل عبارتند از محدودیت (٤) تضمین این که تمام گره‌های مشتریان باید بازدید شود. محدودیت (٥) گره‌های ایستگاه‌های شارژ و گره‌های حذف زیرتور بیش از یکبار در مسیر بازید نشود. محدودیت (٦) بالانس بین ورودی وخروجی کمان‌ها. محدودیت (۷) تعداد ورودی وخروجی به انباررا بین کرانه پایین و بالا این محدویت مجاز می‌داند. محدودیت (۸) مکان ایستگاه‌های شارژ محدود است. محدودیت‌های (۹) و (۱۰) اگر ایستگاه شارژ یا گره‌های حذف زیرتور مکان‌یابی نشده است، پس نمی‌توانند از آن وسیله نقلیه‌ای بگذرد. محدودیت‌های (۱۱) تا (۱۵) کنترل زمان ورود وخروج خودروها در مسیر، حذف زیرتورها و پنجره‌های زمانی هستند. محدودیت (۱۱) اگر جابجایی بین i و j انجام شود، شروع زمان از انبار یا گره مشتری است و سپس زمان ورود به j تعیین می‌گردد، بطوری که مجموع زمان شروع AT_i زمان حرکت از مبدا به j و زمان سرویس از i (زمان سرویس در انبارها صفراست) است. در محدودیت (۱۲) کنترل زمان برای زیرتورها بدون توجه به زمان سرویس تضمین می‌گردد. محدودیت (۱۳) حرکت بین ایستگاه‌های تعویض باتری (براساس نوع باتری) را تضمین می کند. ضمناً مقدار زمان تعویض باتری (SBT) نیز اضافه می‌شود. محدودیت‌های (١٤) و (١٥) پنجره‌های زمانی و با در نظر گرفتن تخطی از ابتدا و انتهای بازه که بازدید شوند را تضمین می‌کند. محدودیت‌های (١٦) تا (١٨) کنترل به انتها رسیدن قدرت باتری را تضمین می‌کنند. محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰) کنترل محموله هروسیله نقلیه را تضمین می‌کند. محدودیت (۱۹) حرکت از مسیری که برای تحویل کالا به مشتری انجام پذیرد وبه مقدار تقاضا بار تخلیه می‌گردد. محدودیت (۲۰) تقاضا از ظرفیت بار وسائط نقلیه کمتر باشد. محدودیت‌های (۲۱) تا (٢٤) شروع و انتهای مسیرهای انبارها را تضمین می‌کنند. محدودیت (٢٥) کمانی که وارد یک انبارمی‌شود باید از همان انبار خارج شود. محدودیت‌های (٢٦) تا (٢٩) نوع متغیرهارا بیان می نماید.

مدل شماره (۲) برای ایستگاه‌های ایستگاه های شارژ بخشی باتری (MOMDHEVLRP-STW-PR) است. لازم به ذکر شد که توابع هدف و برخی محدودیت‌ها در هر دو مدل یکسان است. لذا برای جلوگیری از تکرار فقط محدودیت‌های مشخص کننده مدل (۲) (ایستگاه‌های شارژ بخشی باتری) در ذیل آمده است.

$$\sum_{i\in\{NC\cup NR\}} Y_i \le MN \qquad \forall i \in \{NC \cup NR\} \qquad (۳۰)$$

$$AE_{ik} \le M \cdot Y_i \qquad \forall i \in \{NC \cup NR\} \qquad (۳۱)$$

$$AE_{hk} \le M.Y_i \qquad \forall i \in \{NC \cup NR\}, h \in Sub_i \qquad (۳۲)$$

$$AT_j \ge AT_i + Td_{ijk} \cdot X_{ijk} + RC \cdot AE_{ik} - M \cdot (1 - X_{ijk}) \qquad \forall i \in UT,\ j \in Ub \mid i \ne j,\ k \in K \qquad (۳۳)$$

$$EL_{jk} \le EL_{ik} - CapE_k \cdot Di_{ij} \cdot X_{ijk} + M \cdot (1 - X_{ijk}) \qquad \forall i \in Da,\ j \in Ub \mid i \ne j,\ k \in K \qquad (۳٤)$$

$$EL_{jk} \le EL_{ik} + AE_{ik} - CapE_i \cdot Di_{ij} \cdot X_{ijk} + M \cdot (1 - X_{ijk}) \qquad \forall i \in UT,\ j \in Ub \mid i \ne j,\ k \in K \qquad (۳٥)$$

$$EL_{ik} + AE_{ik} \le Capb_k \qquad \forall i \in UT,\ k \in K \qquad (۳٦)$$

$$Y_i \in \{0;1\} \qquad \forall i \in \{NC \cup NR\} \qquad (۳۷)$$

محدودیت (۳۰) تعداد ایستگاه‌های شارژ با توجه به شارژ بخشی امکان شارژ در مکان مشتری نیز وجود دارد. محدودیت‌های (۳۱) و (۳۲) اگر ایستگاه شارژ یا گرهی که امکان شارژ در آن وجودداشته باشد مکان‌یابی نشده باشند نمی‌توان انرژی شارژ را بدست آورد. محدودیت (۳۳) کنترل بیشترین زمان استفاده شده برای شارژ باتری به روش معمول است. محدودیت‌های (۳٤) تا (۳٦) کنترل میزان انرژی موجود در باتری وسیله نقلیه را تضمین می‌نمایند. محدودیت‌های (۳٤) و (۳۵) کنترل شارژتخلیه شده برای شارژ مجدد باتری است. محدودیت (۳٦) حداکثر ظرفیت باتری راتضمین می‌کند. محدودیت (۳۷) نوع متغیر و مجموعه ااای که این متغیر درآن اعمال می‌شود، را بیان می‌نماید.

۵- رویکرد حل مسئله

یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجه با مسائل چند هدفه اپسیلون – محدودیت (ε-constraint) است. این روش با تغییراتی تمامی توابع هدف را به جز یکی از آنها به محدودیت‌های مدل انتقال می‌دهد و سپس آن مدل را حل می‌نماید [Paydar, Mahdavi and Bootaki, 1395،].

استفاده از روش اپسیلون – محدودیت به منظور کاهش مشکلاتی که روش مجموع وزنی در حل مسائل چند هدفه با فضای هدف غیر محدب دارد، پیشنهاد شده‌است.

مدل کلی روش اپسیلون – محدودیت به‌صورت زیر است.

$$Min\ f_\mu(x)$$

s.t.

$$f_m(x) \le \varepsilon_m\ ;\ j = 1,2,\dots,J\ ;\ m = 1,\dots,M$$

$$g_i(x) \ge 0$$

در این مدل کلی، پارامتر ε_m، حد بالای مقدار f_m را نشان می‌دهد. برای حل مدل‌های پیشنهاد شده در این مقاله توابع به ترتیب ذیل تغییریافت. تابع هدف اول با بیشترین الویت به عنوان تابع هدف اصلی و بقیه توابع هدف بعنوان محدودیت به فضای شدنی اضافه می‌شود. معادله (۳۸) جایگزین تابع هدف هزینه با اعمال روش اپسیلون- محدودیت و معادله‌های (۳۹) و (٤۰) با تبدیل شدن به محدودیت به‌جای معادله‌های (۲) و (۳) قرارگرفته‌اند.

$$Min\ Z_1 = \sum_{i\in Ua}\sum_{j\in Ub}\sum_{k\in K}(Ce_k + Cd_{ijk})Td_{ijk}\cdot X_{ijk} + \sum_{i\in R}Cc_i\cdot Y_i + \sum_{i\in UT}CP\cdot(e_i^- + l_i^+) - eps\cdot\left((s_2/r_2)+(s_3/r_3)\right) \quad (۳۸)$$

$$UB + s_2 = \varepsilon_2 \quad (۳۹)$$

$$\sum_{i\in R}Y_i + s_3 = \varepsilon_3 \quad (٤۰)$$

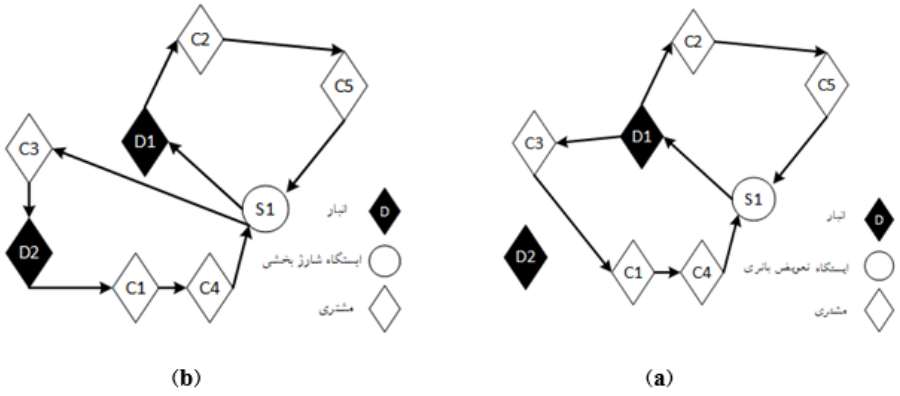
نتایج محاسباتی

برای حل مدل‌ها، بنابه ادبیات موجود در بسیاری موارد از نمونه‌های تولید شده بهره گرفته شد. لذا برای بررسی مدل‌ها در سایز کوچک تعداد ده مسئله بصورت تصادفی تولید گردیده است. نتایج حاصل از حل دقیق با نرم افزار تجاری گمز در جدول (۲) آمده‌است. هر نمونه شامل مشتری، انبار، ایستگاه شارژ یا تعویض باتری است. نوع خودروها ناهمگن، دارای ظرفیت باری و باتری متفاوت اند. ایستگاه‌های شارژ باتری در مکان مشتری نیز امکان پذیر بوده است. درجدول (۲) علاوه بر نتایج توابع هدف زمان حل برحسب ثانیه آورده شده است.

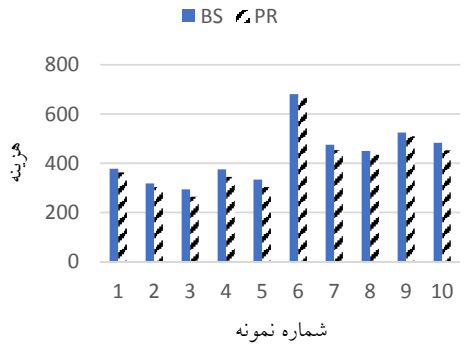
بطور مثال برای نمونه دوم موقعیت انبارها- ایستگاه‌ها و مشتریان در شکل (۱) آورده شده است. شکل (۱a) مربوط به مدل چند هدفه چند انباره مسیریابی ومکان‌یابی با پنجره زمانی – ایستگاه‌های تعویض باتری MOMDEVLRPTW-BS. و شکل (۱b) مربوط به مدل چند هدفه چند انباره مسیریابی ومکان‌یابی با پنجره زمانی – ایستگاه‌های شارژ بخشی MOMDEVLRPTW-PR است.

جدول ۲. نتایج حل مدل‌ها ومقایسه آنها

نمونه ها	نوع خودرو	MOMDEVLRPTW-BS				MOMDEVLRPTW-PR			
		هزینه	تعداد خودروهای استفاده شده.	تعداد ایستگاه‌های تعویض باتری .	زمان(s)	هزینه	تعداد خودروهای استفاده شده.	تعداد ایستگاه‌های شارژبخشی	زمان(s)
(۵,۱,۱)	۲	۳۷۸	۱	۱	۱۵/۸	۳۶۳	۱	۱	۱۵/۶۱
(۵,۲,۱)	۲	۳۱۸	۱	۱	۱۶/۰۲	۳۰۳	۲	۲	۱۶/۱۱
(۵,۳,۲)	۳	۲۹۴	۲	۱	۱۶/۲۷	۲۶۴	۱	۲	۱۶/۳۹
(۵,۱,۲)	۲	۳۷۵	۱	۲	۱۵/۷۱	۳۴۵	۲	۲	۱۵/۶۱
(۵,۲,۲)	۳	۳۳۳	۱	۲	۱۶/۵	۳۰۳	۲	۱	۱۶/۴
(۱۰,۱,۱)	۲	۶۸۱	۱	۱	۱۵/۸	۶۶۶	۱	۱	۱۶/۳۴
(۱۰,۲,۱)	۲	۴۷۵	۲	۲	۹۴/۳۲	۴۵۴	۲	۲	۹۹/۴۹
(۱۰,۳,۲)	۳	۴۵۰	۱	۱	۱۶/۴۶	۴۳۵	۲	۱	۱۶/۸۹
(۱۰,۱,۲)	۲	۵۲۵	۱	۲	۱۶/۲۸	۵۱۰	۲	۱	۱۶/۵۱
(۱۰,۲,۲)	۳	۴۸۳	۱	۲	۱۹/۶۹	۴۵۳	۱	۱	۲۱/۵۸
میانگین		۴۳۱/۲	۱/۲	۱/۵	۲۴/۲۹	۴۰۹/۶	۱/۶	۱/۴	۲۵/۰۹



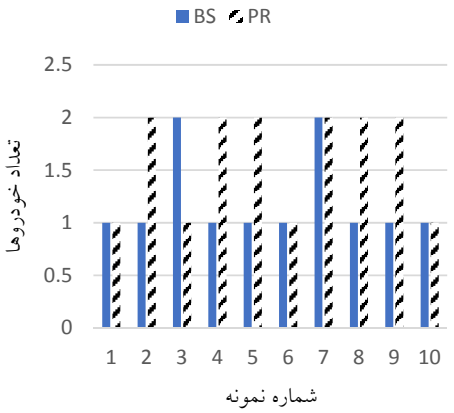
شکل ۱. موقعیت انبارها- ایستگاه‌ها و مشتریان در نمونه ۲



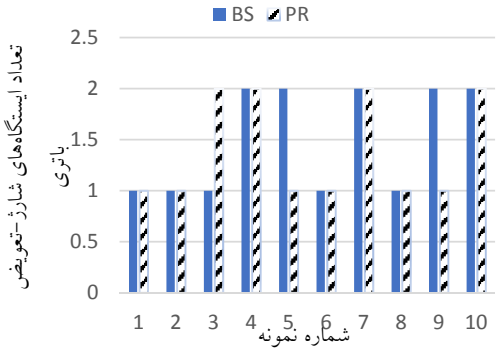
نمودار ۱. نمودار هزینه

نتایج مطابق نمودارهای (۱) تا (۳) به ترتیب هزینه، تعداد ایستگاه‌ها و تعداد خودروهای استفاده شده که مورد بررسی قرارگرفت. بنابه نمودار (۱) هزینه مدل مدل چند هدفه چند انباره مسیریابی و مکان‌یابی با پنجره‌های زمانی – ایستگاه‌های تعویض باتری (مدل شماره ۱) بیشتر از مدل چند هدفه چند انباره مسیریابی و مکان‌یابی با پنجره‌های زمانی – ایستگاه‌های شارژ بخشی (مدل شماره ۲) نشان داده می‌شود.

بنابه نمودار (۲) تعداد خودروهای استفاده شده در مدل شماره (۱) کمتر از مدل شماره (۲) است. در نمودار (۳) نشان می‌دهد تعداد ایستگاه‌ها در مدل شماره (۲) کمتراز مدل شماره (۱) است. بطور مثال نمونه ۳ که دارای ۵ مشتری، ۳ انبار، ۲ ایستگاه شارژ بخشی/تعویض باتری و ۳ نوع خودرو در ابتدا در نظر گرفته شد؛ پس از اجرا مدل شماره (۱) یعنی در نظر گرفتن ایستگاه تعویض باتری زمان توقف در ایستگاه کمتر و نهایتاً از ۲ خودرو و ۱ ایستگاه بهره برداری شد. و پس از اجرا مدل شماره (۲) تنها ۱ خودرو مورد استفاده قرارگرفت، ولیکن از ۲ ایستگاه شارژ بخشی برای رسیدن به مشتریان، استفاده شد.



نمودار ۲. نمودار تعداد خودروهای استفاده شده



نمودار ۳. نمودار تعداد ایستگاه‌ها

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، دو مدل ریاضی چندهدفه و چندانباره مسئله مسیریابی مکان‌یابی ایستگاه‌های شارژ بخشی / تعویض باتری خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن پنجره‌های زمانی نرم ارائه گردید. اعمال جریمه تخطی از پنجره زمانی برای نزدیک شدن مسئله به واقعیت و همچنین رضایت مشتریان در نظر گرفته شد. نتایج حل مدل شماره (۱) یعنی در مسیر فقط ایستگاه‌های

تعویض باتری وجود دارد؛ تعداد خودرو کمتری مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین برای حل این مدل زمان حل کمتری توسط کامپیوتر صرف می‌گردد. و از حل مدل شماره (۲) با توجه به استفاده از شارژ بخشی بطور میانگین تعداد ایستگاه‌ها وهزینه‌های کل کمتری حاصل می‌شود. در واقع استفاده از شارژ بخشی به صرفه‌تر خواهد بود. نهایتاً، بنابه نظر تصمیم‌گیرندگان استفاده از هر مدل برتری خود را دارد.

عدم قطعیت در پارامترهایی مانند زمان شارژ، زمان صف در ایستگاه‌های شارژ و تعویض باتری و همچنین درنظر گرفتن عوامل محیطی وجاده‌ای مانند نوسانات دما و مسیر کوهستانی و حل مدل‌ها با روش‌ها فراابتکاری به عنوان پیشنهادات آتی است.

٦-پی‌نوشت‌ها

1. EV: Electric Vehicle
2. BEV: Battery Electric Vehicle
3. EFV: Electric Freight Vehicle
4. ECV: Electric Commercial Vehicle
5. EVRP: Electric Vehicle Routing Problem
6. EVBRSLRP: Electric Vehicles Battery Recharge Station Location-Routing Problem
7. Electric Vehicle Battery Swap Station Location-Routing Problem
8. E-VRP-TW: EVRP Time Window
9. E-VRP-STW: EVRP Soft Time Window
10. PR: Partial Recharge
11. FR: Full Recharge
12. EVRP-PR: EVRP Partial Recharge
13. LRP: Location-Routing Problem
14. BSS: Battery Swap Station
15. BSS-EVLRP: Battery Swap Station Electric Vehicle Location-Routing Problem
16. ICEV: Internal Combustion Engine Vehicles
17. ITF: International transport forum
18. PRB: Population Reference Bureau
19. EC: Electrification Coalition
20. NYSERDA: New York State Energy Research and Development Authority
21. AFV: Alternative Fuel Vehicle

۷- مراجع

-Amiri, S. S., Jadid, S., & Saboori, H. (2018). Multi-objective optimum charging management of electric vehicles through battery swapping stations. *Energy*, Vol. 165, 549-562.

-Artmeier, A., Haselmayr, J., Leucker, M., & Sachenbacher, M. (2010). The optimal routing problem in the context of battery-powered electric vehicles. In *CPAIOR Workshop on Constraint Reasoning and Optimization for Computational Sustainability (CROCS)*.

-Ataei, E., Sadeghian, R., Hamedi, M. (2019). Presenting a Multi-Objective Model for Locating Distribution Centers and Routing of Blood Distribution Vehicles in Disaster Conditions. *Journal of Transportation Research*, 16(4), 147-164. (in Persian)

-AustriaTech. (2014). Electric fleets in urban logistics: Improving urban freight efficiency in small and medium-sized historic towns. Published as part of the Enclose project, funded by Intelligent Energy Europe (IEE), Vienna. http:// www. austriatech. at/files/get.

-Azi, N., Gendreau, M. and Potvin,J., (2007). An exact algorithm for a single-vehicle routing problem with time windows and multiple routes. *European Journal of Operational Research*, Vol. 178, 755-766.

-Desaulniers, G., Errico, F., Irnich, S., & Schneider, M. (2016) Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows. Operations Research, Vol. 64, No. 6, 1388-1405.

-Eghbali, H., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). Solving a New Mathematical Model for a Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery by a Multi-Objective Differential Algorithm. *Journal of Transportation Research*, 15(3), 53-65. (in Persian)

-Electrification Coalition (2013). State of the plug-in electric vehicle market. http://www. electrification coalition. org /sites /default /files /EC State of PEV Market.

-Fallah, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Salamatbakhsh-Varjovi, A., & Alinaghian, M. (2019). A green competitive vehicle routing problem under uncertainty solved by an improved differential evolution algorithm. *International Journal of Engineering*, Vol. 32, No. 7, 976-981.

-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 Vol. 26, 135-145.

Port-Hinterland Freight Network by Locating Distribution Centers (Case Study: Iran). *Journal of Transportation Research*, 16(3), 111-125. (in Persian)

-Negarestani, S., Fotuhi-Firuzabad, M., Rastegar, M., & Rajabi-Ghahnavieh, A. (2016). Optimal sizing of storage system in a fast charging station for plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 2, No. 4, 443-453. (in Persian)

-New York State Energy Research and Development Authority. (2015). New York truck voucher incentive program - NYSEVVIF all-electric vehicle eligibility list. Accessed June 15. https://truck-vip. ny. gov/NYSEV-VIF-vehicle-list. php.

-Paydar, M M., Mahdavi, I. Bootaki, B. (1395). Multi-objective optimization methods. Babol, Olomrayaneh. (in Persian).

-Pelletier, S., Jabali, O., & Laporte, G. (2016). 50th anniversary invited article - goods distribution with electric vehicles: Review and research perspectives. *Transportation Science*, Vol. 50, No. 1, 3-22.

-Plötz, P., Gnann, T., Jochem, P., Yilmaz, H. Ü., & Kaschub, T. (2019). Impact of electric trucks powered by overhead lines on the European electricity system and CO2 emissions. Energy policy, Vol. 130, 32-40.

-Population Reference Bureau. (2010). World Population Data Sheet [Internet]. [cited 2010 July 28]. Available from: http://www.prb.org/pdf10/10wpds_eng.pdf

-Sadeghi-Velni, K., Tavakkoli-Moghaddam, R., Jolai, F., (1397). New mathematical modelling for an electric vehicle inventory-routing problem. *International Journal of Transportation Engineering*. [online], (in Persian)

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

-Schneider, M., Stenger, A., & Hof, J. (2015). An adaptive VNS algorithm for vehicle routing problems with intermediate stops. Or Spectrum, Vol. 37, No. 2, 353-387.

-Schneider, M., Stenger, A., and Goeke, D., (2014). The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. Transportation Sci., Vol. 48, No. 4, 500–520.

-Singh, M. (2016). Uber Eyes Uber Commute Expansion in India, Mashable.

-Goeke, D. & Schneider, M. (2015). Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research,* Vol. 245, No. 1, 81-99.

-Hannisdahl, O. H., Malvik, H. V. & Wensaas, GB. (2013). The future is electric! The EV revolution in Norway Explanations and lessons learned. *World Electric Vehicle Symposia. Exhibition (EVS27)* (IEEE, Piscataway, N.J.), 1-13.

-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, 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, 102-112.

-Hu, J. L., Chang, M. C., & Tsay, H. W. (2018). Disaggregate energy efficiency of regions in Taiwan. *Management of Environmental Quality: An International Journal,* Vol. 29, No. 1, 34-48.

-ITF. International transport forum (ITF) transport outlook (2017), *OECD Publishing 2017*.

doi.org/10.1787/9789282108000-en

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

-Keskin, M., Laporte, G., & Çatay, B. (2019). Electric vehicle routing problem with time-dependent waiting times at recharging stations. *Computers & Operations Research*, Vol. 107, 77-94.

-Margaritis, D., Anagnostopoulou, A., Tromaras, A., & Boile, M. (2016). Electric commercial vehicles: Practical perspectives and future research directions. Research in Transportation Business & Management, Vol. 18, 4-10.

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

-Mohammadpour Omran, M., Ghousi, R., Taherkhani Kadkhodaei, A. (2019). A Model of

http://www.nrel.gov/transportation/fleettest electric smith navistar.html.
-U. S. EPA Environmental Protection Agency, (2012). Available from URL: http://www. epa. gov.
-Van Duin, J. H. R., Tavasszy, L. A., & Quak, H. J. (2013). Towards E (lectric)-urban freight: first promising steps in the electric vehicle revolution.

-Wang, Y., Bi, J., Guan, W., & Zhao, X. (2018). Optimising route choices for the travelling and charging of battery electric vehicles by considering multiple objectives. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 64, 246-261.
-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.
-Xiao, Y., Zuo, X., Kaku, I., Zhou, S., & Pan, X. (2019). Development of energy consumption optimization model for the electric vehicle routing problem with time windows. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 225, 647-663.
-Sperling, D. (2018). Three revolutions: steering automated, shared, and electric vehicles to a better future. *Island Press*.
-Świąder, M. (2018). The implementation of the concept of environmental carrying capacity into spatial management of cities: A review. *Management of Environmental Quality: An International Journal,* Vol. 29, No. 6, 1059-1074.
-Taefi, T.T., Kreutzfeldt, J., Held, T., Konings, R., Kotter, R., Lilley, S. & Baster, H. (2015). Comparative analysis of European examples of freight electric vehicles schemes. A systematic case study approach with examples from Denmark, Germany, the Netherlands, Sweden and the UK. Dynamics in Logistics, *Springer*, Cham, 495-504.
-Thangiah, S., Nygard, R., K. and Juell, P., (1991). GIDEON: A genetic algorithm system for vehicle routing problems with time windows. *Proceedings of the Seventh IEEE Conference on Artificial Intelligence Applications,* Miami, Florida, 322-328.
-U. S. Department of Energy. (2013b). Smith and Navistar electric and plug-in hybrid electric vehicle testing. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*. Accessed June 13, 2015.

Multi-Objective Mathematical Modeling for a Charging Stations Location-Routing Problem of Heterogeneous Electric Vehicles with Time Windows

Azra Ghobadi, Ph.D., Grad., Department of Industrial Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Reza Tavakkoli Moghaddam, Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
Mohammad Fallah, Professor, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Hamed Kazemipoor, Assistant Professor, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

Received: March 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT
An effective approach to tackling climate change is to replace electric vehicles with their diesel counterparts. Although this replacement has many challenges, it is not impossible. In this paper, two multi-objective mathematical models - multiple deposit problem routing - charging station location and battery replacement of heterogeneous freight electric vehicles were presented. In addition, to increase customers' satisfaction, fines for violating time windows were applied in the models. Each of these two models pursues three goals. The first goal is to minimize (the total cost of routing, the cost of constructing charging stations or replacing the battery, and the cost of breaking time windows); the second goal is to minimize the number of used cars and the third goal is to minimize the number of charging or battery replacement stations. The models were solved by CPLEX solver with GAMS software in small size. Examination of the results shows that in the first proposed model, battery replacement stations were used. Fewer cars were used. Also, in the second proposed model that the stations offer partial charging; the total cost was reduced. Also, in both models, the cost decreases with increasing the number of depots.

Keywords: Location-Routing Problem, Freight Electric Vehicles, Multi-Objectives Model, Soft Time Windows