

مدل مسیریابی خدمات تغذیه‌کننده‌های شبه همگانی با استفاده از خودروهای خودران در معابر شهری

مقاله علمی - پژوهشی

شهریار افندی زاده*، استاد، گروه حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
 درس عزیزجلالی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
 حمید بیگدلی راد، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
 *پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zargari@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

صفحه ۴۴-۲۵

چکیده

اگر از خودروهای خودران در طرح خدمات تماس - سفر استفاده شود، محدودیت‌های مربوط به وجود راننده، مانند محدودیت زمانی رانندگی، از بین می‌روند. مسئله مسیریابی تماس - سفر مطالعه حاضر به دنبال ارائه برنامه‌ریزی مسیریابی ناوگانی از وسایل نقلیه خودران الکتریکی است، که به گروهی از درخواست‌های سفر خدمت‌رسانی می‌کنند. هدف از مسئله تعریف شده، بهینه‌سازی تعداد ناوگان برای خدمت‌رسانی، کمینه کردن هزینه‌های مسیره‌های خودروها و ناراحتی مسافران است. مسئله حاضر علاوه بر محدودیت‌های راحتی سفر کاربران، با چالش‌هایی از جمله مدیریت باتری و انحراف مسیر خودروها به ایستگاه‌های شارژ نیز مواجه است. در پژوهش حاضر ابتدا یک مدل ریاضی چند هدفه مقید متناسب با مسئله مسیریابی مورد نظر بررسی می‌گردد، سپس یک روش حل دو مرحله‌ای مبتنی بر الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک ارائه می‌گردد. ساختار الگوریتم ژنتیک به گونه‌ای معرفی می‌گردد که تعیین تعداد ناوگان و تخصیص مسافران به خودروها را شامل شود. برای حل مسئله و تحلیل نتایج بدست آمده با روش حل پیشنهادی، نمونه داده‌های جدیدی، از طریق پردازش داده‌های خام شرکت اوبر در شهر سانفرانسیسکو آمریکا، ایجاد گردید. نتایج نشان می‌دهند که روش حل پیشنهادی قادر به بدست آوردن جواب‌های با کیفیت در زمانی قابل مقایسه با روش حل دقیق شاخه و برش مطالعه پیشین می‌باشد. همچنین نتایج حل مسئله برای نمونه داده‌های جدید نشان می‌دهد که همواره استفاده از حداقل تعداد ناوگان منجر به جواب‌های برتر و بهینه نمی‌شود. به علاوه نتایج حاکی از آن است که مقصد یکسان برخی مسافران در هنگام فعالیت خدمات تغذیه‌کننده، باعث افزایش میزان همسواری می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، خدمات تغذیه‌کننده، خدمات شبه‌همگانی، خودروهای خودران الکتریکی، مسئله مسیریابی

۱- مقدمه

حمل و نقل همگانی هستند، زیرا مسافران دارای سفرهای مشابه، ممکن است وسیله نقلیه را به اشتراک بگذارند، که باعث صرفه‌جویی در هزینه و کارایی بیشتر این مدل حمل و نقل می‌شود (Gökay et al., 2019). باید توجه داشت که برخی سیستم‌های تماس - سفر موجود نمی‌توانند به اندازه کافی تقاضا را برآورده کنند در حالی که برخی دیگر با افزایش هزینه‌های عملیاتی مواجه هستند و از آنجایی که تقاضا برای

سیستم‌های حمل و نقل شبه همگانی و سواری اشتراکی در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند و ترکیبی از مزایای دو مدل اتومبیل شخصی و حمل و همگانی را دارند. خدمات حمل و نقل مبتنی بر تقاضا یا خدمت تماس - سفر مسافران را در زمان دلخواه خودشان سوار می‌کنند و به مقصد می‌رسانند. این دسته از خدمات، از منظر راحتی، شبیه به مدل وسیله نقلیه شخصی عمل می‌کنند. آنها همچنین شبیه

اختصاصی و سواری اشتراکی را دارند و همچنین می‌توانند با ارائه خدمات تغذیه‌کننده برای دسترسی به ایستگاه‌های حمل‌ونقل همگانی باعث بهبود عملکرد آن‌ها گردند. بنابراین هدف از این مطالعه ارائه برنامه‌ریزی مسیریابی بهینه سیستم تماس - سفر با استفاده از خودروهای خودران الکتریکی به همراه بهینه‌سازی تعداد ناوگان جهت ارائه خدمات با کیفیت مناسب به مسافران می‌باشد.

از جمله تفاوت‌های مطالعه حاضر با مطالعات پیشین در مشخصات عملیاتی و مدل ریاضی مسئله است؛ زیرا مدل ریاضی مطرح شده در مطالعات پیشین یا تک هدفه هستند و یا در صورت چند هدفه بودن در معیارهای تابع هدف و یا محدودیت‌های مسئله محدودتر هستند و هیچکدام از آن‌ها مانند این پژوهش همزمان هر سه هدف حداقل نمودن کل هزینه‌های مسیرها، حداقل نمودن زمان سواری مازاد مسافران و هزینه‌های مالکیت خودروها را به همراه محدودیت‌های ظرفیت وسایل نقلیه، پنجره زمانی مسافران، ماکزیمم زمان سواری مسافران و محدودیت‌های مربوط به مدیریت باتری، توقف در ایستگاه‌های شارژگیری و میزان شارژگیری در مدل خود در نظر نگرفته‌اند؛ بنابراین این پژوهش یک مدل با تابع هدف پیچیده‌تر و با تعداد محدودیت‌های زیاد را بررسی می‌کند. همچنین این پژوهش برای حل مسئله یک روش حل فراابتکاری بر پایه الگوریتم ژنتیک و جستجوی نزدیک‌ترین همسایگی ارائه کرده است و از جمله نوآوری‌های پژوهش حاضر در زمینه روش حل، ایجاد تغییراتی در ساختار الگوریتم ژنتیک با هدف در نظر گرفتن تعداد ناوگان به صورت متغیر، تغییراتی در معیارهای الگوریتم گام‌به‌گام جستجوی نزدیک‌ترین همسایگی و همچنین استفاده از یک الگوریتم درج ایستگاه‌های شارژ در مسیر خودروها است. در جدول (۱) خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته گردآوری شده است.

سیستم‌های مقرون به صرفه قابل اعتماد وجود دارد، تحقیقات عملیاتی می‌تواند به رسیدن به این هدف کمک کند و مدیریت این سیستم‌ها و برنامه‌ریزی برای عملکرد بهینه آن‌ها بسیار حائز اهمیت است (Cordeau and Laporte, 2007). برخی از شرکت‌ها با ایجاد وسایل نقلیه خود را باعث تسریع در این روند شده‌اند. با فرض موفقیت‌آمیز بودن این فناوری‌ها و در دسترس بودن بازار انبوه، وسایل نقلیه خودران امکان تغییر چشمگیر شبکه حمل‌ونقل را دارند. روند تکمیلی اشتراک سواری و وسایل نقلیه ممکن است مسافران را از وسایل نقلیه شخصی به یک سرویس مبتنی بر تقاضا هدایت کند (Fagnant and Kockelman, 2015).

مسئله مسیریابی تماس - سفر یک نوع از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی است که در زمینه سیستم‌های حمل‌ونقل مبتنی بر تقاضا مطرح می‌شود (Afandizadeh and Rad, 2021). در واقع DARP تعمیمی از مسئله بهینه‌سازی فروشنده دوره‌گرد مسئله مسیریابی وسیله نقلیه است و همچنین به عنوان یک مورد خاص از مسئله تحویل و دریافت شناخته می‌شود (Semet et al., 2014). در مسئله تماس - سفر ناوگانی از وسایل نقلیه خدمات سواری اشتراکی را به کاربران ارائه می‌دهند که هر کدام از مسافران دارای مبدأ، مقصد و زمان دلخواه برای رسیدن به مقصد هستند. مسئله DARP به دلیل ترکیب عوامل متضاد یعنی هزینه کم حمل‌ونقل در مقابل سطح بالای خدمات، چالش‌برانگیزتر از مسئله مسیریابی وسایل نقلیه است (Afandizadeh Zargari et al., 2019). این پژوهش به دنبال مسیریابی بهینه خدمات شبه همگانی، شامل خدمات تغذیه‌کننده نوع خانه - مقصد، با استفاده از خودروهای خودران در معابر شهری می‌باشد. سیستم‌های تماس - سفر با استفاده از خودروهای خودران نوعی از خدمات حمل‌ونقل شبه همگانی هستند که قابلیت ارائه خدمت به هر دو نوع سفر

جدول ۱. بخشی از مطالعات انجام گرفته در زمینه مسئله مسیریابی تماس - سفر

ش	محقق (سال)	تابع هدف	الگوریتم حل	نتایج و سایر ملاحظات
۱	کوردنو و همکاران (۲۰۰۳)	کمینه نمودن کل هزینه‌های مسیرها	جستجوی ممنوعه	الگوریتم روی نمونه‌هایی تصادفی با اندازه حداکثر ۱۴۴ مسافر حل شدند و الگوریتم پیشنهادی قادر به پیدا کردن جواب‌های بهینه و با کیفیت بود.
۲	کوردنو و همکاران (۲۰۰۶)	کمینه نمودن کل هزینه‌های مسیرها	ارائه یک الگوریتم دقیق شاخه و برش و نامعادلات معتبر	ارائه یک فرمول ریاضی سه شاخصه پایه برای مسئله تماس - سفر. این رویکرد قادر به حل مسئله با ۴ وسیله نقلیه و ۳۲ مسافر است.
۳	کوردنو و همکاران (۲۰۰۷)	ارائه معتبرترین مدل‌های ریاضی ارائه شده برای حل مسئله DARP	ارائه مهم‌ترین الگوریتم‌های ارائه شده برای حل مسئله DARP	معرفی کارها و الگوریتم‌هایی که سال ۲۰۰۷ ارائه شده‌اند.
۴	روپکه و همکاران (۲۰۰۷)	کمینه نمودن کل هزینه‌های مسیرها	معرفی الگوریتم جدید شاخه و برش برای مسئله مسیریابی با برداشت و تحویل همزمان	این رویکرد قادر به حل مسائل استاندارد تماس - سفر با ۶ وسیله نقلیه و ۹۶ مسافر است.
۵	جورگنسن و همکاران (۲۰۰۷)	حداقل نمودن کل هزینه مسیرها و حداقل نمودن چند معیار مربوط به ناراحتی مسافران از جمله زمان انتظار مسافران داخل وسیله نقلیه و زمان سواری مازاد مسافران	ارائه یک الگوریتم ژنتیک بر اساس رویکرد دو مرحله‌ای خوشه‌بندی و مسیریابی و حل مرحله خوشه‌بندی توسط الگوریتم ژنتیک و حل مرحله مسیریابی توسط الگوریتم ابتکاری مسیریابی	این رویکرد روی نمونه‌هایی با ۱۴۴ مسافر آزمایش شد و نتایج نشان داده است که در زمینه مدت زمان کل مسیر مطالعه پیشین نتایج بهتری بدست آورده است ولی الگوریتم ژنتیک از نظر زمان انتظار و زمان سواری مسافران نتایج بهتری بدست آورده است.
۶	پاراگ و همکاران (۲۰۱۱)	کمینه نمودن کل هزینه‌های مسیرها و زمان انتظار مسافران توسط جریمه	در نظرگیری انواع گوناگون کاربران و به کارگیری الگوریتم دقیق شاخه و برش منطبق با مسئله و معرفی الگوریتم فراابتکاری VNS	این رویکرد قادر به حل مسائلی با اندازه ۴۰ مسافر است.
۷	بریکرز و همکاران (۲۰۱۴)	کمینه نمودن کل هزینه‌های مسیرها	در نظرگیری انواع گوناگون کاربران و وسایل نقلیه و به کارگیری الگوریتم دقیق شاخه و برش منطبق با مسئله و معرفی الگوریتم فراابتکاری DA	این رویکرد قادر به حل مسائلی با اندازه ۴۸ مسافر است.
۸	اشنایدر و همکاران (۲۰۱۴)	کمینه کردن کل مسافت طی شده در مسیرها و جریمه‌های مربوط به محدودیت‌های پنجره زمانی، باتری و ظرفیت وسیله نقلیه	در نظر گرفتن خودروهای برقی و ایستگاه‌های شارژ میانی و ارائه الگوریتم ترکیبی جستجوی همسایگی متغیر و جستجوی ممنوعه VNS/TS	در این مطالعه فرض شارژگیری خودرو تا حد ظرفیت کامل و نرخ ثابت مصرف باتری در نظر گرفته شده است و الگوریتم پیشنهادی قادر به حل نمونه‌هایی با اندازه ۱۰۰ مسافر است.

در این مطالعه تاثیر وزن خودرو بر مصرف باتری در نظر گرفته شده است و فرض شارژگیری خودرو تا حد ظرفیت کامل در نظر گرفته شده است. این رویکرد برای حل نمونه با ۱۳ مسافر آزمایش شده است.	از نرم افزار متلب برای حل مسئله استفاده شده است.	کمیته کردن هزینه های مصرف باتری و هزینه زمان سفر راننده و هزینه مدت زمان شارژگیری	لین و همکاران (۲۰۱۶)	۹
در این مطالعه فرض شارژگیری جزئی و نرخ ثابت مصرف باتری اجرا شده است و الگوریتم پیشنهادی قادر به حل نمونه هایی با اندازه ۱۰۰ مسافر است.	ارائه الگوریتم ابتکاری تطبیقی بزرگ جستجوی همسایگی ALNS	کمیته کردن کل مسافت طی شده	کسکین و همکاران (۲۰۱۶)	۱۰
الگوریتم قادر به حل نمونه های مطالعات پیشین با اندازه حداکثر ۱۴۴ مسافر بود.	ارائه الگوریتم ژنتیک ترکیبی به همراه الگوریتم های جستجوی محلی	کمیته نمودن کل هزینه های مسیرها	مسمودی و همکاران (۲۰۱۷)	۱۱
یک تابع مصرف انرژی در هر زمان در هر گره تعریف کردند. الگوریتم قادر به حل نمونه های مطالعات پیشین با اندازه حداکثر ۱۴۴ مسافر بود.	ارائه الگوریتم ابتکاری جستجوی همسایگی متغیر تکاملی EVO-VNS	کمیته نمودن کل هزینه های مسیرها	مسمودی و همکاران (۲۰۱۸)	۱۲
الگوریتم قادر به حل نمونه هایی با اندازه حداکثر ۲۹۵ مسافر بود.	ارزیابی تأثیر پیکربندی مجدد قبل از ورود به مسیر و ابداع یک الگوریتم ابتکاری جستجوی بزرگ همسایگی و یک الگوریتم ابتکاری برای حل قسمت پوشش مجموعه	کمیته نمودن کل هزینه های مسیرها و هزینه مربوط به کل افق زمانی و هزینه های وسایل نقلیه مورد تنظیم	تلز و همکاران (۲۰۱۸)	۱۳
در این مطالعه فرض شارژگیری جزئی و نرخ ثابت مصرف باتری اجرا شده است و الگوریتم پیشنهادی قادر به حل نمونه های با اندازه ۴۰ مسافر بود که در آن تمام درخواست های سفر از قبل رزرو شده است.	ارائه یک الگوریتم دقیق شاخه و برش به همراه تعدادی الگوریتم های ابتکاری برای اجرای نامعادلات جدید تعریف شده	به حداقل رساندن یک تابع هدف وزن دار متشکل از کل زمان سفر همه وسایل نقلیه و زمان سواری کاربران	بونجیوانی و همکاران (۲۰۱۹)	۱۴
الگوریتم قادر به حل نمونه های مطالعات پیشین با اندازه حداکثر ۱۴۴ مسافر بود.	در نظر گرفتن ناوگانی ناهمگن از خودروهای با سوخت متعارف و خودروهای با سوخت جایگزین و ارائه یک الگوریتم ترکیبی جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی ALNS	کمیته نمودن کل هزینه های مسیرهای مربوط به همه انواع ناوگان	مسمودی و همکاران (۲۰۲۰)	۱۵
در این مطالعه فرض شارژگیری جزئی و نرخ ثابت مصرف باتری اجرا شده است و الگوریتم پیشنهادی قادر به حل نمونه های با اندازه ۸ وسیله نقلیه و ۹۶ مسافر بود.	ارائه یک الگوریتم فرآینتکاری جستجوی محلی تیرید قطعی DA شامل چند عملگر ایجاد همسایگی و ترمیم	به حداقل رساندن یک تابع هدف وزن دار متشکل از کل زمان سفر همه وسایل نقلیه و زمان سواری کاربران	سو و همکاران (۲۰۲۱)	۱۶
الگوریتم ALNS پیشنهادی قادر به حل نمونه هایی با اندازه ۱۶۰ مسافر بود.	حل مسئله توسط CPLEX با رویکرد برنامه ریزی پویای ارائه شده و ارائه یک الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی ALNS	حداقل نمودن زمان انتظار مسافران	فایفر و همکاران (۲۰۲۲)	۱۷

۲- روش پژوهش

۲-۱- مدل ریاضی مسئله

مدل مورد استفاده یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط می‌باشد چرا که علاوه بر متغیرهای باینری و عدد صحیح شامل متغیرهای پیوسته مربوط به زمان نیز می‌باشد. علاوه بر محدودیت‌های موجود در مدل پایه، این مدل شامل محدودیت‌های تقدم - تأخر، محدودیت‌های مربوط به پنجره زمانی، محدودیت ظرفیت، محدودیت‌های مربوط به انحراف مسیر خودروها به ایستگاه‌های شارژ، مدیریت باتری خودروها و مدیریت زمان شارژگیری نیز می‌باشد. برای یک تعداد وسیله نقلیه مشخص k ، مسئله مسیریابی تماس - سفر ناوگان خودروان الکتریکی و بهینه‌سازی تعداد ناوگان به عنوان یک برنامه مختلط عدد صحیح بدین صورت فرموله می‌گردد.

در این مطالعه ابتدا مدل ریاضی با توجه به هدف و مشخصات عملیاتی مسئله تعریف می‌شود و در نهایت الگوریتم حل مسئله مورد بررسی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است به دلیل افزایش تقاضا برای خدمات حمل‌ونقل شبه همگانی، ارائه‌دهندگان این دسته از خدمات دیگر قادر به تنظیم و برنامه‌ریزی دستی مسیرهای خودرو نیستند. بنابراین، الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیریابی برای دستیابی به کارایی هرچه بیشتر سیستم‌های تماس - سفر مورد نیاز است. در این پژوهش نیز یک روش حل فراابتکاری به منظور حل کارآمد مسئله مسیریابی تماس - سفر در یک مدت زمان معقول پیشنهاد می‌گردد. امید است با حل مسئله توسط الگوریتم پیشنهادی و تحلیل نتایج بدست آمده، بتوان کمک شایانی در راستای بهبود کارایی سیستم‌های تماس - سفر و به دنبال آن توسعه سیستم حمل‌ونقل شبه‌همگانی نمود.

جدول ۲. معرفی مجموعه‌های مدل

مجموعه‌ها	توضیحات
$P = \{1, \dots, n\}$	مجموعه نقاط سوار شدن
$D = \{n+1, \dots, 2n\}$	مجموعه نقاط پیاده شدن
$N = P \cup D$	مجموعه کلیه نقاط سوار و پیاده شدن
$K = \{1, \dots, m\}$	مجموعه تمامی ماشین‌های حاضر زمانی که m ماشین برای خدمت‌رسانی شبکه مورد نظر است
$O = \{o^1, \dots, o^k\}$	مجموعه انبارهای مبدأ
F	مجموعه انبارهای مقصد
S	مجموعه ایستگاه‌های شارژگیری
$V = N \cup O \cup F \cup S$	مجموعه کل نقاط سیستم

جدول ۳. معرفی متغیرهای مدل

متغیرها	توضیحات
x_{ij}^k	متغیر باینری که در صورتی که i و j در مسیر ماشین k باشند مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار ۰ می‌گیرد.
T_i^k	متغیر مربوط به زمان شروع خدمت‌رسانی ماشین k در گره $i \in V$
L_i^k	متغیر تعداد سرنشینان ماشین k در گره $i \in V$
B_i^k	متغیر میزان باتری ماشین k در گره $i \in V$
E_s^k	متغیر مدت زمان شارژ شدن ماشین k در ایستگاه شارژگیری $s \in S$
ER_i	متغیر زمان مازاد سواری مسافر $i \in P$

$$w_1 \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij}^k x_{ij}^k + w_2 \sum_{i \in P} c_T ER_i + w_3 \sum_{j \in V} f^k x_{0^k j}^k \quad (1)$$

محدودیت‌ها:

$$\sum_{j \in P} x_{0^k j}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i,0^k}^k = 0 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in F} \sum_{i \in D \cup S} x_{ij}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in D \cup S} x_{ij}^k \leq 1 \quad \forall j \in F \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in D} x_{ij}^k \leq 1 \quad \forall j \in S \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{j \in V \\ j \neq i}} x_{ij}^k - \sum_{\substack{j \in V \\ j \neq i}} x_{ji}^k = 0 \quad \forall k \in K, i \in N \cup S \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j}} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in P \quad (8)$$

$$\sum_{\substack{j \in V \\ j \neq i}} x_{ij}^k - \sum_{\substack{j \in V \\ j \neq n+i}} x_{j, n+i}^k = 0 \quad \forall i \in P, k \in K \quad (9)$$

$$T_i^k + t_{i, n+i} + d_i \leq T_{n+i}^k \quad \forall k \in K, i \in P \quad (10)$$

$$arr_i \leq T_i^k \leq dep_i \quad \forall k \in K, i \in V \quad (11)$$

$$T_{n+i}^k - T_i^k - d_i \leq u_i \quad \forall k \in K, i \in P$$

$$T_i^k + t_{ij} + d_i - M_{ij}(1 - x_{ij}^k) \leq T_j^k \quad \forall k \in K, i \in V, j \in V, i \neq j | M_{ij} \max = \left\{ \begin{array}{l} 0, dep_i + \\ t_{ij} + d_i - arr_j \end{array} \right\} \quad (12)$$

$$T_{n+i}^k - T_i^k - d_i - t_{i, n+i} \leq ER_i \quad \forall k \in K, i \in P$$

$$L_i^k + l_j - W_{ij}^k(1 - x_{ij}^k) \leq L_j^k \quad \forall k \in K, i \in V, j \in V, i \neq j | W_{ij}^k = \min\{C^k, C^k + l_i\} \quad (13)$$

$$L_i^k + l_j + W_{ij}^k(1 - x_{ij}^k) \geq L_j^k \quad \forall k \in K, i \in V, j \in V, i \neq j | W_{ij}^k = \min\{C^k, C^k + l_i\} \quad (14)$$

$$L_i^k \geq \max(0, l_j) \quad \forall k \in K, i \in N \quad (15)$$

$$L_i^k \leq \min(C^k, C^k + l_i) \quad \forall k \in K, i \in N \quad (16)$$

$$L_i^k = 0 \quad \forall k \in K, i \in o^k \cup F \cup S \quad (17)$$

$$B_i^k = B_0^k \quad \forall k \in K, i \in o^k \quad (18)$$

$$B_j^k \leq B_i^k - \beta_{ij} + BQ(1 - x_{ij}^k) \quad \forall k \in K, i \in V \setminus S, j \in V \setminus O^k, i \neq j \quad (19)$$

$$B_j^k \geq B_i^k - \beta_{ij} - BQ(1 - x_{ij}^k) \quad \forall k \in K, i \in V \setminus S, j \in V \setminus O^k, i \neq j \quad (20)$$

$$B_j^k \leq B_s^k + \alpha_s E_s^k - \beta_{sj} + BQ(1 - x_{sj}^k) \quad \forall k \in K, s \in S, j \in P \cup F, s \neq j \quad (21)$$

$$B_j^k \geq B_s^k + \alpha_s E_s^k - \beta_{sj} - BQ(1 - x_{sj}^k) \quad \forall k \in K, s \in S, j \in P \cup F, s \neq j \quad (22)$$

$$BQ \geq B_s^k + \alpha_s E_s^k \quad \forall k \in K, s \in S \quad (23)$$

$$B_i^k \geq rBQ \quad \forall k \in K, i \in F \quad (24)$$

$$E_s^k \leq T_s^k - t_{is} - T_i^k + M_{is}(1 - x_{is}^k) \quad \forall k \in K, s \in S, i \in D, s \neq i \quad (25)$$

$$E_s^k \geq T_s^k - t_{is} - T_i^k - M_{is}(1 - x_{is}^k) \quad \forall k \in K, s \in S, i \in D, s \neq i \quad (26)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V, j \in V, k \in K \quad (27)$$

$$B_i^k \geq 0 \quad \forall k \in K, i \in V \quad (28)$$

$$E_s^k \geq 0 \quad \forall k \in K, s \in S \quad (29)$$

جدول ۴. معرفی پارامترهای مدل

پارامترها	توضیحات
arr_i	زودترین زمانی که خدمت‌رسانی در گره $i \in V$ می‌تواند آغاز گردد (حد پایینی پنجره زمانی)
dep_i	دیرترین زمانی که خدمت‌رسانی در گره $i \in V$ می‌تواند آغاز گردد (حد بالایی پنجره زمانی)
d_i	مدت زمان خدمت‌رسانی در گره $i \in V$
t_{ij}	زمان سفر از گره $i \in V$ به گره $j \in V$
u_i	حداکثر زمان سواری مسافر گره $i \in P$
C^k	ظرفیت خودرو $k \in K$
l_i	تقاضای هر گره (میزان تغییر در تعداد سرنشینان در هر گره) $i \in V$
$B_0^k = BQ$	ظرفیت باتری = سطح باتری اولیه برای هر خودرو $k \in K$
r	نسبت حداقل سطح باتری موردنیاز در انتهای مسیر
c	میزان مصرف باتری در هر دقیقه سفر
β_{ij}	میزان باتری مصرفی بین هر گره $i \in V$ و هر گره $j \in V$
α_s	نرخ شارژ باتری در واحد زمان برای هر ایستگاه شارژ‌گیری $s \in S$
c_T	ضریب هزینه زمان سواری مازاد (زمان مازاد سواری را به مقدار هزینه معادل آن تبدیل می‌کند).
c_{TP}	ضریب هزینه جریمه زمانی (جریمه زمانی مربوط به مسافران را به مقدار هزینه معادل آن تبدیل می‌کند).
f^k	هزینه مالکیت هر خودرو $k \in K$
T_h	افق زمانی مسئله

(۲۴) میزان باتری را در گره‌ای که بلافاصله بعد از گره ایستگاه شارژگیری قرار دارد تعیین می‌کند. محدودیت (۲۵) حداکثر مقدار مجاز باتری در هنگام شارژگیری در ایستگاه شارژ را تعیین می‌کند و محدودیت (۲۶) حداقل مقدار مجاز باتری را در هنگام رسیدن به انبار مقصد مشخص می‌کند. محدودیت‌های (۲۷) و (۲۸) مدت زمان شارژگیری خودرو در ایستگاه شارژ را محاسبه می‌کند. محدودیت (۲۹) نامنفی بودن متغیرها را کنترل می‌کنند.

۲-۲- روش حل مسئله

برای حل مسئله مسیریابی تماس - سفر حاضر از دو بخش خوشه‌بندی و مسیریابی استفاده می‌شود. در بخش خوشه‌بندی ابتدا تعداد وسایل نقلیه تعیین می‌شود و سپس به تعداد وسایل نقلیه موجود، گروه‌هایی از مسافران ایجاد می‌شود. یک خوشه مجاز نیست فقط دارای انبار مبدا و مقصد باشد و هیچ مسافری نداشته باشد، زیرا این به معنی عدم استفاده از وسیله نقلیه است و این حالت برای به حداقل رساندن تعداد وسایل نقلیه مناسب نیست. هر مسافر فقط می‌تواند متعلق به یک گروه باشد و فقط یک گروه مسافر می‌تواند به هر وسیله نقلیه اختصاص یابد. خوشه‌بندی مسافران با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل می‌شود. وقتی همه خوشه‌های مربوط به وسایل نقلیه مشخص شد، در مرحله مسیریابی یک مسیر برای هر وسیله نقلیه ساخته می‌شود. مسیریابی شامل تصمیم‌گیری در مورد ترتیب بازدید هر وسیله نقلیه از گره‌های مسافران خوشه مربوط به آن و تعیین زمان بازدید از هر گره است، به این معنی که مسافران متعلق به آن گروه خاص به چه ترتیبی و در چه ساعتی باید سوار و پیاده شوند. مسیریابی با استفاده از نسخه تغییر یافته نزدیکترین همسایگی از نظر مکانی-زمانی حل شده است. سپس در قسمت تابع درج ایستگاه شارژ، در صورت نیاز خودرو به شارژگیری، ایستگاهی در موقعیت مناسب در مسیر درج می‌گردد و زمان بازدید از ایستگاه شارژ مشخص می‌شود. سپس هزینه هر خوشه براساس ترتیب گره‌ها در مسیر بدست آمده برای خوشه محاسبه می‌شود.

۲-۳- مرحله مسیریابی

پس از آنکه در مرحله خوشه‌بندی مسئله، خوشه‌های مسافران متناظر با خودروها توسط الگوریتم ژنتیک مشخص گردید؛ در مرحله مسیریابی با استفاده از الگوریتم ابتکاری گام به گام جستجوی نزدیکترین همسایگی مکانی - زمانی رشته مسیر اولیه برای هر کدام از خوشه‌ها ساخته می‌شود، سپس در

مطابق با محدودیت (۲) همه خودروها باید از انبار مبدأ خود خارج شوند و به یک گره سوارکردن از مجموعه P سفر کنند. محدودیت (۳) بیان می‌کند که هیچ خودرویی نمی‌تواند از هیچ گره‌ای به انبار مبدأ خود سفر کند. محدودیت (۴) تضمین می‌کند که هر خودرویی به یک انبار مقصد بازمی‌گردد. محدودیت (۵) و (۶) حاکی از آنند که هر کدام از گره‌های F و S حداکثر یکبار می‌توانند در مسیر خودروها قرار گیرند و از برخی از ایستگاه‌ها شارژ و یا انبارهای مقصد ممکن است بازدید نشود. محدودیت (۷) از منطقی بودن جریان رشته مسیر مطمئن می‌شود بدین صورت که اگر به گره‌ای کمائی وارد شود باید از آن گره یک کمان خارج شود. به هر مسافر تنها یکبار توسط یک وسیله نقلیه خدمت‌رسانی می‌شود و محدودیت (۸) این نکته را کنترل می‌کند. طبق محدودیت (۹) هر دو گره‌های سوار و پیاده شدن متعلق به یک مسافر تنها توسط یک خودرو باید خدمت‌رسانی گردند. محدودیت (۱۰) از طریق تعیین حداقل زمان شروع سرویس در گره مقصد یک مسافر، با توجه به زمان شروع سرویس در گره مبدأ و زمان سفر بین دو گره و مدت زمان سرویس، تضمین می‌کند که گره مبدأ مسافر قبل از گره مقصد بازدید می‌شود. محدودیت (۱۱) پنجره زمانی را کنترل می‌نماید و محدودیت (۱۲) برای عدم تخطی از حداکثر زمان مجاز سواری نوشته شده است. محدودیت (۱۳) مقدار حداقلی برای زمان شروع سرویس در هر گره را مشخص می‌نماید. توجه شود که زمان انتظار در هر گره پس از حل مدل قابل محاسبه است و متغیری در مدل برای آن در نظر گرفته نشده است. محدودیت (۱۴) زمان مازاد سواری را با مقایسه زمان سواری واقعی و زمان سواری ایده‌آل برای هر مسافر محاسبه می‌کند. محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) تعداد سرنشینان خودرو را در هنگام رسیدن به هر گره با توجه به این مقدار در گره قبلی و تعداد تقاضای گره جدید محاسبه و به روزرسانی می‌کند. محدودیت (۱۷) و (۱۸) با توجه به ظرفیت خودرو حد پایینی را برای تعداد سرنشینان تعیین می‌کند و طبق محدودیت (۱۹) هر خودرویی در هنگام بازدید از ایستگاه‌های شارژ و انبارهای مقصد خالی از سرنشین است. محدودیت (۲۰) مقدار باتری هر خودرو در ابتدا مسیر را برابر با مقدار ظرفیت باتری اعلام کرده است. محدودیت (۲۱) و (۲۲) مقدار سطح باتری یک خودرو را در مسیرش از گره $i \in V \setminus S$ به گره $j \in V \setminus O^k$ و محدودیت‌های (۲۳) و

مجموعه داده خام توسط اوبر در سال ۲۰۱۱ به اشتراک گذاشته شده است و شامل ۱۱۲۸۶۶۳ میلیون سیاهه GPS از جمعاً ۲۵۰۰۰ سفر سواری اشتراکی در شهر سانفرانسیسکو ایالات متحده آمریکا می‌باشد که در طول یک هفته از روی فعالیت خودروهای در حال کار اوبر ثبت شده‌اند. این داده‌ها در درگاه گیت هاب (uber-gps-analysis/gpsdata at master) دسترس عموم قرار دارند. این مجموعه داده خام قبل از تحلیل توسط مدل، با استفاده از الگوریتمی پاکسازی گردیده است؛ داده‌های اشتباه و زائد از آن حذف گردیده است و موقعیت مکانی و زمانی گره‌های مبدأ و مقصد از آن گرفته شده است. داده‌های پردازش شده شامل تقریباً ۲۵۰۰۰ سفر سواری اشتراکی در طی یک هفته می‌باشد. قسمت مختصری از داده‌های پاکسازی شده شرکت اوبر در جدول (۵) مشاهده می‌شود.


صورت نیاز با توجه به محدودیت ماکزیمم زمان سواری مسافران، مسیرها اصلاح می‌شوند، در مرحله بعدی توسط تابع درج ایستگاه‌های شارژ وضعیت باتری خودروها در حین مسیرشان بررسی گردیده و در صورت نیاز به شارژگیری ایستگاه شارژی در موقعیت مناسب در مسیر خودرو درج می‌گردد. در نهایت هزینه مربوط به مسیرهای خودروها محاسبه می‌شود که این هزینه محاسبه شده، به عنوان مقدار برآوردنگی کروموزوم متناظر با مسیرها، در الگوریتم ژنتیک به کار می‌رود.

۳- داده‌های مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از پردازش داده‌های خام ارائه شده توسط شرکت اوبر بدست آمده است. ایده استفاده از داده‌های شرکت اوبر از مطالعه بونجیوانی و همکاران (Bongiovanni et al., 2019) گرفته شده است. این

جدول ۵. خلاصه‌ای از داده‌های پاکسازی و پردازش شده اوبر

شماره رکورد	زمان انجام سفر	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱	۰۷-۰۱-۲۰۰۷T۱۰:۵۴:۵۰+۰۰:۰۰	۳۷,۷۸۲۵۵۱	-۱۲۲,۴۴۵۳۶۸
۱	۰۷-۰۱-۲۰۰۷T۱۰:۵۶:۵۸+۰۰:۰۰	۳۷,۷۸۶۹۵۶	-۱۲۲,۴۴۰۲۷۹
۲	۰۶-۰۱-۲۰۰۷T۰۶:۲۲:۳۵+۰۰:۰۰	۳۷,۸۰۰۲۲۴	-۱۲۲,۴۳۳۵۲۰
۲	۰۶-۰۱-۲۰۰۷T۱۰:۲۵:۰۳+۰۰:۰۰	۳۷,۸۰۰۰۶۶	-۱۲۲,۴۳۶۱۶۷
۳	۰۲-۰۱-۲۰۰۷T۰۵:۵۹:۰۲+۰۰:۰۰	۳۷,۷۸۴۳۴۵	-۱۲۲,۴۲۲۹۲۲
۳	۰۲-۰۱-۲۰۰۷T۰۶:۰۱:۳۲+۰۰:۰۰	۳۷,۷۸۵۲۹۲	-۱۲۲,۴۱۶۲۵۷



۲۴۹۹۸	۰۳-۰۱-۲۰۰۷T۱۵:۲۸:۳۷+۰۰:۰۰	۳۷,۷۷۲۳۸۲	-۱۲۲,۴۲۹۰۴۴
۲۴۹۹۸	۰۳-۰۱-۲۰۰۷T۱۵:۴۴:۰۰+۰۰:۰۰	۳۷,۷۶۹۲۷۰	-۱۲۲,۴۲۰۱۷۰
۲۴۹۹۹	۰۵-۰۱-۲۰۰۷T۲۲:۲۷:۲۸+۰۰:۰۰	۳۷,۷۷۴۳۰۵	-۱۲۲,۴۱۴۰۵۶
۲۴۹۹۹	۰۵-۰۱-۲۰۰۷T۲۲:۲۹:۴۸+۰۰:۰۰	۳۷,۷۶۹۹۶۹	-۱۲۲,۴۱۳۲۰۴
۲۵۰۰۰	۰۶-۰۱-۲۰۰۷T۰۲:۳۳:۳۶+۰۰:۰۰	۳۷,۷۶۷۶۸۷	-۱۲۲,۴۱۷۷۹۰
۲۵۰۰۰	۰۶-۰۱-۲۰۰۷T۰۲:۳۸:۴۰+۰۰:۰۰	۳۷,۷۶۶۱۰۳	-۱۲۲,۴۳۰۰۱۷

مسافران به تعداد موردنظر برسد. موقعیت ایستگاه‌های شارژگیری با استفاده از موقعیت‌یاب ایستگاه‌های سوخت جایگزین از بخش مجموعه داده‌های سوخت‌های جایگزین دپارتمان انرژی ایالات متحده آمریکا (<https://afdc.energy.gov/stations/#/find/nearest>) بدست آمده است. در نهایت با استفاده از کتابخانه او.اس.ام.ان.ایکس

در مرحله بعدی داده‌ها بر اساس زمان خدمت‌رسانی اوبر برای سفر مرتب شدند و داده‌های مربوط به مرکز شهر، که منطقه سیویک سنتر نام دارد، جداسازی گشتند. داده‌های بدست آمده از سه روز که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند بر اساس ساعت شروع سفرها مرتب می‌شوند و از بین آن‌ها هر ۴، ۳ دقیقه یکبار یک مسافر انتخاب می‌گردد تا زمانی که تعداد

جدول ۶. اطلاعات داده‌ها

عنوان نمونه داده	تعداد مسافران	تعداد حداقل تعداد خودروها	حداکثر تعداد خودروها
um2-3-18	۱۸	۲	۳
um2-4-24	۲۴	۲	۴
um3-5-32	۳۲	۳	۵
um3-5-40	۴۰	۳	۵
um4-5-50	۵۰	۴	۵
um5-6-60	۶۰	۵	۶
um6-8-70	۷۰	۶	۸
um6-8-80	۸۰	۶	۸
umf2-3-24	۲۴	۲	۳
umf3-5-32	۳۲	۳	۵
umf4-5-50	۵۰	۴	۵

(Boeing, 2017) به همراه برنامه نوشته شده گراف مربوط به منطقه مورد مطالعه تعریف گردید و با اعمال الگوریتم دایکسترا به کمک کتابخانه‌های نتورک.ان.ایکس تکسی.کب (<https://pypi.org/project/Taxicab/#description>) و برنامه نوشته شده در پایتون، کوتاه‌ترین فاصله بین هر دو گره محاسبه شد. با توجه به آنکه خودروهای خودران می‌توانند به صورت پیوسته و بدون توقف در سیستم سفر کنند، سرعت ثابت و برابر با ۳۵ کیلومتر بر ساعت فرض گردید و با در دست داشتن کوتاه‌ترین فاصله بین گره‌ها و سرعت، زمان سفر بین هر دو گره بر حسب دقیقه بدست آمد. برای در نظر گرفتن خدمت شبه همگانی به عنوان تغذیه‌کننده‌های فرست - مایل، که مسافران را از خانه‌هایشان سوار می‌کنند و در ایستگاه مترو پیاده می‌کنند، نمونه داده‌هایی تعریف شده است.

۳-۱- مشخصات فایل‌های داده‌ها

داده‌های مورد تحلیل در این مطالعه به دو دسته تقسیم می‌شوند: فایل‌های داده‌های مربوط به خدمت عادی شبه همگانی و داده‌های حاوی خدمات تغذیه‌کننده‌ها. فایل‌های مربوط به دسته اول داده‌ها بدین صورت نام‌گذاری می‌شوند: تعداد مسافر- حداکثر تعداد خودروها - حداقل تعداد خودرو. به عنوان مثال عنوان نمونه داده با ۱۸ مسافر و حداقل ۲ خودرو و حداکثر ۳ خودرو، um2-3-18 می‌باشد؛ موقعیت مکانی گره‌های این نمونه داده در شکل (۴-۱) نشان داده شده است که موقعیت گره‌ها با استفاده از کتابخانه فلیوم (<https://python-visualization.github.io/folium/>) پایتون روی نقشه شبکه خیابانی نشان‌گذاری شده است. نام فایل داده‌های دسته دوم بدین صورت است: تعداد مسافر- حداکثر تعداد خودرو- حداقل تعداد خودرو. UMF. نمونه‌های داده مورد استفاده به همراه مشخصاتشان در جدول (۶) نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت گره‌های مثال um2-3-18

نوشته شده‌اند و اجرای الگوریتم حل بر روی یک دستگاه رایانه با مشخصات Intel Core i7 CPU 2.59 GHz RAM.

۴-۳- مقایسه نتایج مربوط به روش‌های حل ژنتیک و شاخه و برش

برای اثبات عملکرد روش حل پیشنهادی ژنتیک، مسئله مسیریابی تماس - سفر خودروهای خودران الکتریکی با تابع هدف تعریف شده توسط بونجیوانی و همکارانش (Bongiovanni et al., 2019)، با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه شده برای برخی نمونه داده‌های مطالعه پیشین حل می‌گردد و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از الگوریتم دقیق شاخه و برش بونجیوانی و همکارانش مقایسه می‌گردد. توجه شود که در اینجا تابع هدف (۱-۴) به عنوان تابع برازندگی مطرح می‌شود و مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف کمینه کردن زمان‌های سفر کل مسیرهای خودروها، زمان سواری مازاد مسافران و جریمه‌های مربوط به محدودیت پنجره زمانی و ماکزیمم زمان سواری مسافران است. واحد تابع هدف بر حسب دقیقه می‌باشد.

(۳۰)

$$F_{new}(S) = f_{time-cost}(s) + f_{penalty-new}(s) \\ = w'_1 \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} t_{ij} x_{ij}^k + w'_2 \sum_{i \in P} ER_i \\ + w'_3 \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \max(0, arr_i - T_i^k, dep_i - T_i^k) \\ + w'_4 \sum_{k \in K} \sum_{i \in P} \max(0, T_{n+i}^k - T_i^k - d_i - u_i)$$

الگوریتم ژنتیک به کار رفته با ساختار مسئله این بخش تطبیق داده شده است، زیرا در این قسمت دیگر بهینه‌سازی ناوگان به عنوان هدف مسئله مطرح نیست، بلکه تنها بهینه‌سازی زمان کل سفر و زمان سواری مازاد مسافران هدف مسئله می‌باشد. بنابراین ساختار کروموزوم‌ها به گونه‌ای است که قسمت اول کروموزوم، که مربوط به تعیین تعداد ناوگان بود، حذف می‌گردد و تنها قسمت دوم کروموزوم نماینده کروموزوم خواهد بود. بدین ترتیب تمامی کروموزوم‌ها برای یک تعداد خودرو ثابت، که این تعداد قبل از حل مسئله مشخص شده است، تعریف می‌گردند و طول آن‌ها در سراسر اجرای مدل ثابت است. شکل (۲) نمونه توصیفی از کروموزوم استفاده شده برای نمونه داده u2-16، با ۱۶ مسافر و ۲ وسیله نقلیه، در مسئله اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.

جدول ۷. مقادیر نهایی برای پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامترها	مقادیر کاندید برای آزمایش
تعداد تکرار	۷۰۰ (برای نمونه داده‌های کوچک تا متوسط)
	۱۰۰۰ (برای نمونه داده‌های متوسط تا بزرگ)
اندازه جمعیت	۷۰
درصدی از جمعیت که با اعضای برتر جمعیت قبلی جایگزین می‌شوند	۴۰
عملگر جهش	تابع جهش نوع ۱
صدور مجوز جهش روی قسمت اول کروموزوم	در تکرارهای زوج (هر دو تکرار یکبار)
اندازه رقابت در تابع انتخاب رقابتی	۶ عضو

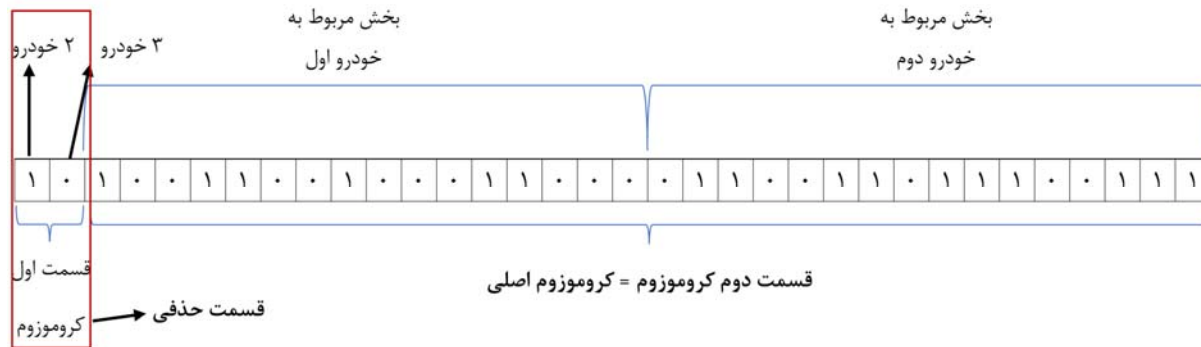
۴- تحلیل نتایج

۴-۱- نتایج تحلیل حساسیت

با توجه به نتایج آزمون‌های انجام شده در مورد هریک از توابع و پارامترهای الگوریتم ژنتیک و تحلیل هر کدام از آن‌ها، تابع انتخاب رقابتی برای قسمت انتخاب والدین در الگوریتم ژنتیک و تابع ترکیب دو نقطه‌ای به عنوان عملگر ترکیب انتخاب گردیدند. برای پارامترهای الگوریتم ژنتیک نیز از مقادیر نهایی در جدول (۷) استفاده خواهد شد. همچنین نسبت سطح باتری نهایی به مقدار ۰,۷ در نظر گرفته می‌شود، بدین معنی که سطح باتری خودروها در هنگام بازگشت به انبار مقصدشان نباید کمتر از ۷۰ درصد کل ظرفیت باتری باشد.

۴-۲- اعتبارسنجی

در این قسمت ابتدا عملکرد روش حل پیشنهادی با استفاده از برخی نمونه داده‌های مطالعه پیشین اخیر اعتبارسنجی می‌گردد. سپس حل مسئله مطالعه حاضر برای نمونه داده‌های جدید، تعریف شده، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی صورت می‌گیرد و نتایج تحلیل و بررسی می‌شوند. لازم به ذکر است که همه برنامه‌های مربوط به روش حل پیشنهادی در محیط پایتون



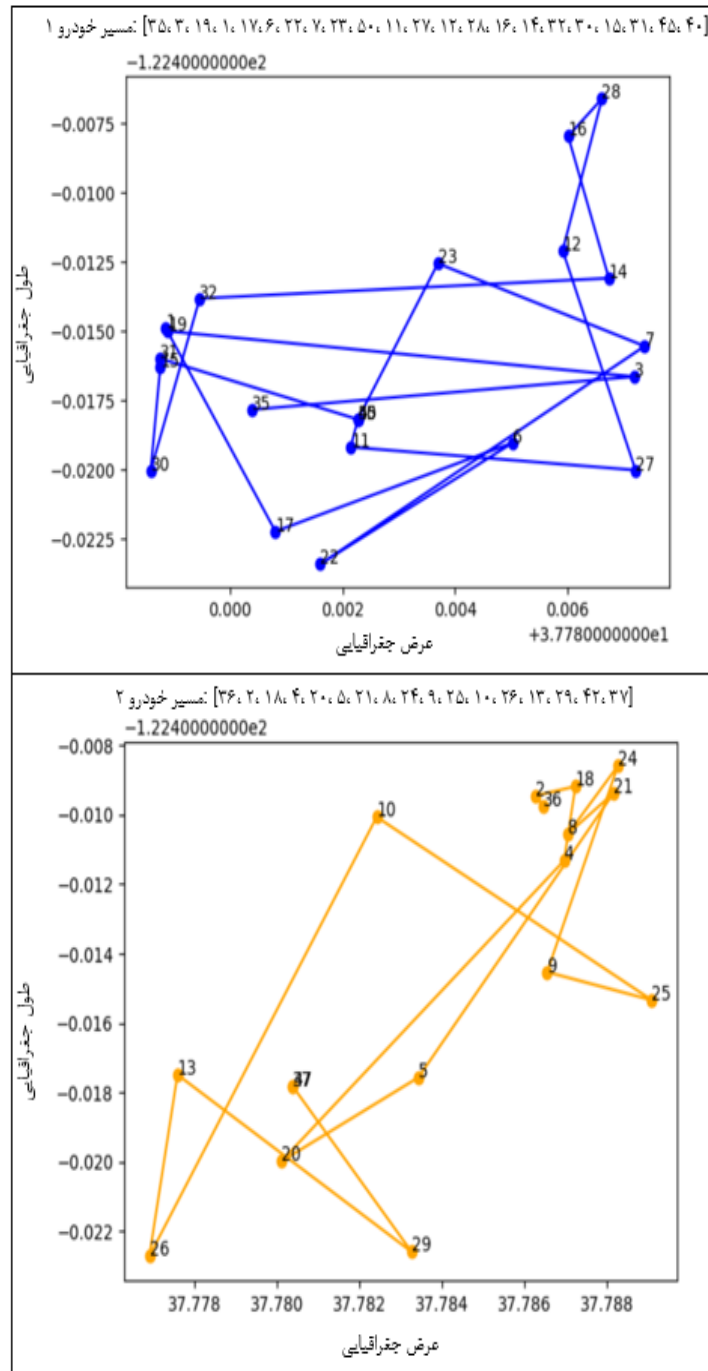
شکل ۲. نمایش کروموزوم‌های مربوط به مسئله اعتبارسنجی برای ۲ وسیله نقلیه

نشان‌دهنده عرض جغرافیایی نقاط است. توجه شود که خطوط بین گره‌ها در این شکل‌ها، تنها نشان‌دهنده ترتیب بازدید از گره‌ها هستند و مسیر واقعی خودرو در شبکه خیابانی را نشان نمی‌دهند. مشاهده می‌شود که خودرو اول در مسیر خود به ۹ مسافر و خودرو دوم به ۷ مسافر خدمت‌رسانی می‌کنند و محدودیت خدمت‌رسانی به هر مسافر توسط یک خودرو رعایت گردیده است. همچنین مشاهده می‌شود که هر خودرو سفر خود را از انبار مبدأ مربوط به خود آغاز کرده و در نزدیکترین انبار مقصد، نسبت به آخرین گره مسیر، به پایان رسانده است. رعایت محدودیت تقدم گره مبدأ مسافران نسبت به گره‌های مقصد آن‌ها نیز در شکل‌های (۳) و (۴) ملاحظه می‌گردد. خودرو اول از یک ایستگاه شارژگیری در میانه مسیر خود بازدید می‌کند و برای رعایت محدودیت حداقل سطح باتری در انبار مقصد در انتهای مسیر نیز در یک ایستگاه شارژ دیگر (همان انبار مقصد) عملیات شارژگیری را انجام می‌دهد. خودرو دوم تنها از یک ایستگاه شارژ در انتهای مسیر خود بازدید می‌کند. نمونه داده u3-18 شامل ۳ وسیله نقلیه، ۱۸ مسافر، ۳ انبار مبدأ، ۵ انبار مقصد و ۵ ایستگاه شارژ نیز بررسی گردیده است. با توجه به جدول (۸)، در مورد مثال u3-18 نیز مقدار تابع هدف در مورد بهترین جواب حاصل از روش حل الگوریتم ژنتیک و الگوریتم دقیق شاخه و برش، یکسان و برابر با ۵۰,۹۹۱۳ دقیقه است.

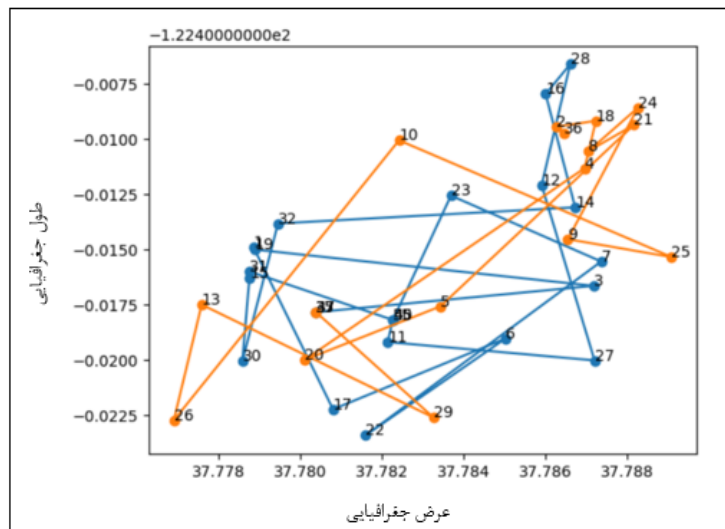
در ادامه دو نمونه داده که بونجیوانی و همکارانش با استفاده از روش حل دقیق موفق به حل آن‌ها شده‌اند، با الگوریتم ژنتیک و جستجوی نزدیکترین همسایگی حل می‌شوند و نتایج مقایسه می‌شوند.

ضرایب المان‌های اصلی تابع هدف در مطالعه بونجیوانی و همکارانش بدین صورت $\{w'_1: 0.75, w'_2: 0.25\}$ تعریف شده‌اند. ضرایب مربوط به پناهی‌ها در اینجا بدین صورت $\{w'_3: 20, w'_4: 20\}$ در نظر گرفته شده‌اند. ابتدا نمونه داده u2-16 که از داده‌های پردازش شده بونجیوانی و همکارانش (Bongiovanni et al., 2019) گرفته شده است حل می‌شود. این نمونه داده شامل ۲ وسیله نقلیه، ۱۶ مسافر، ۲ انبار مبدأ، ۵ انبار مقصد و ۵ ایستگاه شارژ می‌باشد.

همانگونه که در جدول (۱۷) و در مورد مثال u2-16 مشاهده می‌شود، بهترین جواب مربوط به روش حل ژنتیک با جواب حاصل از الگوریتم شاخه و برش بونجیوانی و همکارانش (Bongiovanni et al., 2019) یکسان هستند و مقدار تابع هدف در هر دو روش یکی و برابر با ۵۸,۱۷ دقیقه می‌باشد. رشته مسیر بدست آمده هر کدام از خودروها در نمونه داده u2-16 در شکل (۲) به صورت جداگانه و در شکل (۳) ترتیب بازدید از گره‌ها در رشته مسیر هر دو خودرو با هم در سیستم مختصاتی ترسیم شده‌اند؛ در این نمودارها محور عمودی نشان‌دهنده طول جغرافیایی نقاط و محور افقی



شکل ۳. مسیر خودرو اول و دوم به صورت جداگانه در نمونه داده u2-16



شکل ۴. مسیر خودرو اول و دوم در نمونه داده u2-16

جدول ۸. مقایسه نتایج روش حل ژنتیک و روش حل دقیق شاخه و برش

نمونه داده	مقدار تابع هدف الگوریتم شاخه و برش	زمان اجرای روش حل دقیق (دقیقه)	مقدار تابع هدف روش حل ژنتیک		زمان اجرای الگوریتم ژنتیک (دقیقه)
			بهترین	میانگین	
u2-16	۵۸,۱۷۴۸	۲۵,۷۶	۵۸,۱۷۴۸	۵۹,۴۱۵۹	۶,۶۱۹
u3-18	۵۰,۹۹۱۳	۸,۰۲	۵۰,۹۹۱۳	۵۱,۶۶۹۱	۶,۳۵۵

همچنین مقدار تابع هدف بهترین جواب پیدا شده برای هر تعداد خودرو، بر حسب دلار، در ستون سوم آورده شده است. هر کدام از ستون‌های چهارم، پنجم و ششم به ترتیب نشان‌دهنده کل زمان سفر مسیره‌ها بر حسب دقیقه، مجموع زمان سواری مازاد مسافران بر حسب دقیقه و مجموع هزینه مالکیت خودروها بر حسب دلار می‌باشند. لازم به ذکر است که المان‌های چهارم و پنجم تابع هدف که همان جریمه‌ها هستند، در طی حل برابر با صفر شده‌اند و در جدول مشاهده نمی‌شوند. در هر نمونه داده از میان تعداد خودروهای مختلف بهترین نتیجه به صورت مشخص شده نشان داده شده است که جواب مسئله برای همان نمونه داده نیز می‌باشد. در ستون هفتم و هشتم کمترین و همچنین میانگین زمان اجرای روش حل آورده شده است. در نمونه داده‌های مختلف مشاهده می‌شود که با بزرگتر شدن ابعاد مسئله و با افزایش تعداد درخواست‌های سفر، زمان حل مسئله افزایش می‌یابد. در ادامه جواب‌های بدست آمده برای برخی از نمونه داده‌ها مورد تحلیل قرار

۴-۴- تحلیل نتایج مربوط به حل مسئله در نمونه

داده‌های مختلف جدید

مسئله مسیریابی تماس - سفر خودروهای خودران الکتریکی برای نمونه داده‌های مختلف با استفاده از روش حل پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک حل گردید و نتایج در جدول (۹) ارائه شده‌اند. همانگونه که توضیح داده شد، برخی نمونه داده‌ها، که نام آن‌ها با پیشوند um آغاز شده است، مربوط به خدمات عادی شبه همگانی هستند و برخی نمونه داده‌ها، که نام آن‌ها با پیشوند umf آغاز شده است، دارای هر دو نوع خدمات شبه همگانی و خدمات تغذیه‌کننده نوع فرست مایل هستند، بدین معنی که در این نمونه داده‌ها مقصد برخی مسافران یکسان است و یک ایستگاه مترو معین می‌باشد. هر نمونه داده در ۴ بار اجرای الگوریتم حل شده است. ستون ۱ جدول نشان‌دهنده اطلاعات داده‌ها و تعداد خودروهای مورد بررسی در آن‌ها است، در ستون دوم مقدار میانگین تابع هدف در ۴ بار حل مسئله برای هر نمونه داده بر حسب دلار و

توجه داشت که افق زمانی این مسئله حدوداً ۳ ساعت است و حتی تفاوت ۱ دلار هزینه می‌تواند در طول روز و در طی چندین افق زمانی با مشخصات مشابه در طول روزهای هفته، مقدار قابل توجهی گردد. به علاوه اگر این خدمات در برخی مناطق دیگر شهر با مشخصات مشابه نیز اتفاق بیفتد باعث تجمع این اختلاف هزینه‌ها می‌گردد.

در نمونه داده 32-5-3 um در مقایسه بهترین جواب‌ها هزینه ۵ خودرو ۵٫۴ درصد کمتر از هزینه ۳ خودرو و هزینه ۴ خودرو ۱٫۵ درصد کمتر از هزینه ۵ خودرو است و روند مشابهی در مقادیر میانگین نیز مشاهده می‌شود. بدین ترتیب در این نمونه داده تعداد بهینه خودروها برابر است با ۴ خودرو.

با مقایسه بهترین جواب‌های بدست آمده در نمونه داده 3-um 40-5، هزینه بدست آمده برای ۴ خودرو ۳٫۵ درصد کمتر از هزینه ۳ خودرو و هزینه ۵ خودرو ۱٫۷ درصد کمتر از هزینه ۴ خودرو است. بنابراین بهترین تعداد خودرو برای این نمونه داده ۵ خودرو می‌باشد.

در نمونه داده 24-4-2 umf که شامل خدمات تغذیه‌کننده نیز است، هزینه بهترین جواب در ۴ خودرو در مقایسه با ۳ و ۲ خودرو به ترتیب ۰٫۱ و ۵٫۱۴ درصد کمتر است. از آنجایی که تفاوت جواب ۳ و ۴ خودرو تقریباً ۰٫۱ درصد است می‌توان هر دو تعداد خودرو را به عنوان جواب بهینه پذیرفت. توجه شود که این نمونه داده با نمونه داده 24-4-2 um از نظر مشخصات مسافران و طول افق زمانی نیز کاملاً متفاوت است.

برای نمونه داده 32-5-3 umf در مقایسه بهترین جواب‌های بدست آمده، کمترین هزینه مربوط به ۴ خودرو می‌باشد. توجه شود که تفاوت این نمونه داده با نمونه 3-um 32-5 در مقصد برخی مسافران می‌باشد. با مقایسه دو نمونه داده از نظر زمان سواری مازاد در حالات ۴ و ۵ خودرو، مشاهده می‌گردد که با ادغام خدمات تغذیه‌کننده زمان سواری مازاد مسافران تقریباً ۲۴ درصد افزایش یافته است یعنی همسواری مسافران بیشتر شده است که به دلیل مقصد یکسان آن‌ها است.

در نمونه داده 50-5-4 um بهترین جواب بدست آمده مربوط به ۴ خودرو می‌باشد که مقدار هزینه کل آن ۱٫۱ درصد کمتر از هزینه ۵ خودرو است. مقدار زمان سفر مسیرها در ۴ خودرو ۰٫۳ درصد بیشتر از ۵ خودرو می‌باشد ولی هزینه مالکیت ۴ خودرو ۱۹٫۱ درصد کمتر از ۵ خودرو است. همچنین مشاهده

می‌گیرد. توجه شود که مطابق جدول هزینه مالکیت یک تعداد خودرو مشخص در نمونه داده‌های مختلف متفاوت است زیرا مدت افق زمانی مسئله در انواع نمونه‌ها متفاوت می‌باشد و هزینه مالکیت خودرو برای آن مدت افق زمانی محاسبه می‌شود. مطابق جدول (۹)، با بزرگتر شدن نمونه داده‌ها و داشتن مسافران بیشتر، مقدار هزینه کل بدست آمده برای هر تعداد خودرو افزایش می‌یابد که این امری منطقی است زیرا با بالا رفتن تعداد مسافران، تعداد گره‌های تحت خدمت‌رسانی خودروها افزایش می‌یابد و در نتیجه کل مسافت‌های طی شده نیز بیشتر می‌شود. شکل (۵) نیز هزینه‌های جواب‌های حالات مختلف تعداد خودرو را به صورت مقیاس شده برای انواع داده‌ها نشان می‌دهد. با توجه به اینکه با بزرگتر شدن داده‌ها، هزینه کل مربوط به هر تعداد خودرو افزایش می‌یابد، برای بهتر نشان دادن اختلافات بین هزینه‌های تعداد خودروها مختلف در یک نمونه داده، در عین حال که نتایج تمامی نمونه داده‌ها در کنار هم نشان داده شوند، می‌توان هزینه‌های بدست آمده را مقیاس کرد. بدین منظور تمامی هزینه‌ها در هر نمونه داده، تقسیم بر مجذور ماکزیمم تعداد خودرو در آن نمونه داده گردیده است. شکل (۵) هزینه‌های مقیاس شده بهترین جواب‌های متناظر با هر تعداد خودرو را در هر نمونه داده نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵) و جدول (۹) می‌توان نتایج زیر را برداشت کرد:

همانطور که مشاهده می‌شود، در نمونه داده 18-3-2 um مقادیر هزینه جواب‌های ۲ خودرو و ۳ خودرو بسیار به هم نزدیک هستند و فاصله مقادیر هزینه‌ها کمتر از ۰٫۱ درصد است و می‌توان هر دو حالت را به عنوان جواب بهینه پذیرفت. در مقایسه مقادیر اجزای تابع هدف ۲ خودرو نسبت به ۳ خودرو مشاهده می‌شود که زمان سفر مسیرها ۲٫۸ درصد کمتر است ولی زمان سواری مازاد در هر دو حالت با هم برابرند و هزینه مالکیت خودرو در افق زمانی مسئله ۳۴ درصد بیشتر است.

در نمونه داده 24-4-2 um مقدار بهترین جواب ۳ خودرو تقریباً ۱ درصد کمتر از ۲ خودرو و ۱٫۳ درصد کمتر از ۴ خودرو است. بنابراین تعداد خودرو بهینه برای این نمونه داده ۳ خودرو است. الگوی مشابهی در میانگین جواب‌ها نیز مشاهده می‌شود با این تفاوت که درصد اختلاف میانگین هزینه‌ها بیشتر از اختلاف کمترین هزینه‌ها است. همچنین باید

کمتر است، بدین ترتیب تعداد ۸ خودرو برای خدمت‌رسانی به مسافران این نمونه داده انتخاب می‌گردد. زمان سواری مازاد و زمان سفر مسیرها در مورد ۸ خودرو کمتر از مقادیر متناظر با ۶ و ۷ خودرو است.

برای نمونه داده umf4-5-50، در مقایسه بهترین جواب‌های بدست آمده، هزینه بهترین جواب متناظر با ۴ خودرو ۲,۵۳ درصد کمتر از هزینه بهترین جواب متناظر با ۵ خودرو است، بدین ترتیب ۴ خودرو برای خدمت‌رسانی به مسافران مناسب می‌باشد.

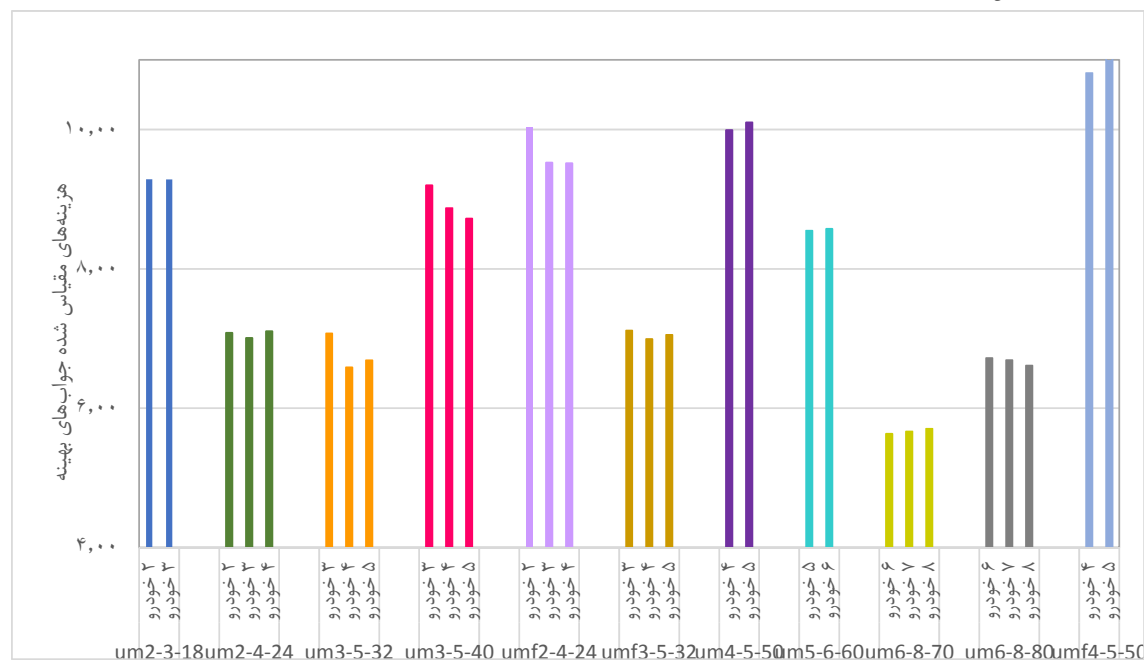
توجه شود که تفاوت این نمونه داده با نمونه um4-5-50 در مقصد برخی مسافران می‌باشد. با توجه به موقعیت یکسان مقصد برخی مسافران انتظار می‌رود همسواری در هنگام استفاده از خدمات تغذیه‌کننده افزایش یابد. با مقایسه دو نمونه داده از نظر زمان سواری مازاد در هر تعداد خودرو، مشاهده می‌گردد که با ادغام خدمات تغذیه‌کننده زمان سواری مازاد مسافران در هنگام خدمت ۴ و ۵ خودرو به ترتیب ۴۸,۵ و ۲۵ درصد افزایش یافته است که این به معنای افزایش همسواری مسافران است.

می‌شود زمان سواری مازاد مسافران هنگام استفاده از ۴ خودرو ۱۸,۶ درصد بیشتر از این زمان در هنگام استفاده از ۵ خودرو است که این به معنی هم‌پیمایی بیشتر مسافران در هنگام استفاده از ۴ خودرو است.

در نمونه داده um5-6-60 استفاده از ۵ خودرو کمترین هزینه کلی را در مقایسه با ۶ خودرو به دنبال دارد، اگرچه در حالت ۵ خودرو زمان سواری مازاد مسافران و مدت زمان کل مسیر به ترتیب ۴,۲ درصد و ۱,۲ درصد بیشتر از مقادیر متناظر با ۶ خودرو است، ولی هزینه مالکیت ۵ خودرو ۱۶,۷ درصد کمتر از هزینه مالکیت ۶ خودرو است.

در نمونه داده um6-8-70، هزینه کل متناظر با ۷ خودرو ۰,۷ درصد کمتر از هزینه کل ۸ خودرو و هزینه ۶ خودرو ۱,۲۵ درصد کمتر از ۸ خودرو است، بدین ترتیب تعداد ۶ خودرو برای خدمت‌رسانی به مسافران این نمونه داده انتخاب می‌گردد. زمان سواری مازاد در هر دو تعداد ۶ و ۷ خودرو تقریباً ۲۲,۵ درصد کمتر از زمان سواری مازاد در حالت ۸ خودرو بدست آمده است اما زمان سفر مسیرهای ۶ و ۷ خودرو به ترتیب ۲,۵ و ۱,۵ درصد بیشتر از ۸ خودرو است.

در نمونه داده um6-8-80، هزینه کل متناظر با ۸ خودرو در مقایسه با هزینه کل ۶ و ۷ خودرو به ترتیب ۱,۱۷ و ۱,۶ درصد



شکل ۵. هزینه بهترین جواب‌های بدست آمده و مقیاس شده برای هر تعداد خودرو در هر نمونه داده

جدول ۹. جواب‌های حل مسئله مسیریابی تماس - سفر برای خودروهای خودران الکتریکی در نمونه داده‌های مختلف

نتایج	اطلاعات مسئله	مقدار هزینه کل		مقدار هزینه کل مسیرها	ارزش مالی هزینه مدت زمان سواری	هزینه مالکیت خودروها در افق زمانی مسئله	مدت زمان اجرای روش حل پیشنهادی (دقیقه)		تعداد تکرار اجرای الگوریتم حل
		بهترین	میانگین				بهترین	میانگین	
um2-3-18	خودرو ۲	۸۳,۵۹۲	۸۳,۷۱۹	۶۹,۵۵۴	۴,۹۷۹	۴,۲۷۴	۱۰,۴۸۱	۱۰,۷۰۴	۷۰۰ تکرار
	خودرو ۳	۸۳,۵۳۶	۸۳,۷۳۸	۶۷,۵۸۶	۴,۹۷۹	۶,۴۱۱			
um2-4-24	خودرو ۲	۱۱۳,۳۰۶	۱۱۵,۲۰۳	۸۹,۳۲۶	۲۲,۵۶۲	۵,۴۲۹	۱۴,۸۶۹	۱۵,۰۲۱	
	خودرو ۳	۱۱۲,۱۰۵	۱۱۳,۶۷۴	۸۸,۶۳۴	۱۴,۱۰۷	۸,۱۴۳			
	خودرو ۴	۱۱۳,۶۷۶	۱۱۷,۳۱۶	۹۰,۸۲۵	۴,۴۶۷	۱۰,۸۵۸			
um3-5-32	خودرو ۳	۱۷۶,۷۸۰	۱۷۹,۰۰۷	۱۴۸,۴۰۷	۹,۵۸۸	۷,۹۲۷	۲۵,۳۵۱	۲۶,۱۴۸	
	خودرو ۴	۱۶۴,۶۵۸	۱۶۶,۶۹۰	۱۳۵,۱۴۹	۹,۵۸۸	۱۰,۵۶۹			
	خودرو ۵	۱۶۷,۱۶۱	۱۶۸,۲۸۶	۱۳۵,۳۵۸	۹,۵۸۸	۱۳,۲۱۱			
um3-5-40	خودرو ۳	۲۲۹,۹۳۲	۲۳۲,۶۷۱	۱۹۴,۰۸۸	۱۲,۴۴۲	۹,۱۴۰	۳۶,۷۹۸	۳۷,۹۸۳	
	خودرو ۴	۲۲۱,۷۸۵	۲۲۳,۵۳۹	۱۸۲,۹۹۳	۱۵,۵۷۰	۱۲,۱۸۶			
	خودرو ۵	۲۱۸,۰۴۳	۲۲۱,۷۶۴	۱۷۶,۸۹۸	۱۵,۵۷۰	۱۵,۲۳۳			
umf2-4-24	خودرو ۲	۱۶۰,۴۹۵	۱۶۲,۰۳۴	۱۳۲,۴۱۷	۱۹,۵۴۷	۵,۷۴۷	۱۶,۷۳۰	۱۷,۲۲۱	
	خودرو ۳	۱۵۲,۳۹۷	۱۵۳,۸۸۶	۱۲۳,۳۲۳	۱۷,۲۸۰	۸,۶۲۰			
	خودرو ۴	۱۵۲,۲۳۹	۱۵۲,۸۴۳	۱۲۱,۱۸۷	۱۷,۲۸۰	۱۱,۴۹۳			
umf3-5-32	خودرو ۳	۱۷۷,۸۱۷	۱۸۴,۹۶۸	۱۴۹,۵۷۴	۸,۸۸۰	۷,۹۲۷	۲۶,۶۶۳	۲۷,۳۵۷	
	خودرو ۴	۱۷۴,۷۸۸	۱۷۷,۲۳۰	۱۴۳,۲۷۵	۱۲,۴۹۴	۱۰,۵۶۹			
	خودرو ۵	۱۷۶,۳۰۳	۱۷۸,۶۵۸	۱۴۲,۲۴۱	۱۲,۵۵۸	۱۳,۲۱۱			
um4-5-50	خودرو ۴	۲۴۹,۷۹۴	۲۵۳,۶۵۱	۲۰۶,۳۳۹	۹,۶۳۱	۱۶,۴۰۲	۷۱,۶۴۴	۷۳,۴۱۴	
	خودرو ۵	۲۵۲,۵۲۱	۲۵۴,۷۳۵	۲۰۵,۷۰۱	۷,۸۴۹	۲۰,۵۰۳			
um5-6-60	خودرو ۵	۳۰۷,۶۹۷	۳۱۱,۵۵۲	۲۴۹,۲۴۳	۱۹,۲۱۲	۲۲,۹۵۸	۱۰۱,۶۸۹	۱۰۳,۷۵۶	
	خودرو ۶	۳۰۸,۶۵۱	۳۱۳,۵۸۳	۲۴۶,۲۴۳	۱۸,۴۱۵	۲۷,۵۴۹			
um6-8-70	خودرو ۶	۳۶۰,۵۵۲	۳۶۸,۰۸۶	۲۸۸,۳۴۴	۱۸,۳۸۰	۳۲,۵۷۴	۱۱۸,۷۶۳	۱۲۱,۷۶۱	
	خودرو ۷	۳۶۲,۵۲۲	۳۶۸,۴۲۸	۲۸۵,۳۰۰	۱۸,۱۹۵	۳۸,۰۰۳			
	خودرو ۸	۳۶۵,۱۲۱	۳۷۲,۴۳۵	۲۸۰,۹۷۸	۲۳,۵۲۷	۴۳,۴۳۲			
um6-8-80	خودرو ۶	۴۳۰,۰۰۸	۴۳۷,۰۹۳	۳۴۲,۳۷۸	۳۶,۳۷۰	۳۴,۰۴۷	۱۵۵,۸۸۰	۱۶۱,۳۲۸	
	خودرو ۷	۴۲۸,۱۷۳	۴۳۵,۵۲۸	۳۳۴,۰۰۳	۴۱,۲۵۵	۳۹,۷۲۱			
	خودرو ۸	۴۲۳,۱۷۸	۴۳۳,۷۸۰	۳۳۰,۰۶۷	۲۴,۳۵۴	۴۵,۳۹۵			
umf4-5-50	خودرو ۴	۲۷۰,۲۸۵	۲۸۰,۳۶۴	۲۲۱,۷۰۸	۱۸,۷۰۳	۱۶,۴۰۲	۷۷,۳۳۹	۷۸,۶۳۷	
	خودرو ۵	۲۷۷,۲۰۱	۲۸۰,۵۸۱	۲۲۶,۹۹۴	۱۰,۴۴۱	۲۰,۵۰۳			

۵- نتیجه گیری

یک ایستگاه مترو در منطقه مورد مطالعه فرض گردید و موقعیت جغرافیایی برای آن در نظر گرفته شد. سپس خدمات تغذیه‌کننده از نوع فرست‌مایل بررسی گردید، یعنی درخواست سفر برخی از مسافران به صورت جابه‌جایی از نقاط مبدأ متفاوت به یک ایستگاه مترو ثابت تعریف شد و درخواست‌های سفر مربوط به خدمات تغذیه‌کننده با درخواست‌های سفر خدمات شبه‌همگانی تماس - سفر ادغام گردید. تلاش‌هایی برای تعیین مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم ژنتیک، توابع مناسب برای انتخاب والدین و تعیین عملگر ترکیب الگوریتم ژنتیک صورت گرفت. به عنوان نمونه مشاهده گردید که در مسئله مسیریابی، که نوعی مسئله کمینه‌سازی است، تابع انتخاب رقابتی در مقایسه با تابع انتخاب چرخ رولت در حالت کلی عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. همچنین با حل یک مسئله نمونه به ازای مقادیر مختلف پارامتر مربوط به نسبت نهایی سطح باتری خودروها، تأثیر این پارامتر بر تعداد ایستگاه‌های شارژ بازدید شده در انتهای مسیر خودروها بررسی گردید. مشاهده شد که با کاهش پارامتر نسبت باتری نهایی، تعداد ایستگاه‌های شارژ بازدید شده در انتهای همه مسیرها کاهش می‌یابد. روش حل پیشنهادی با استفاده از نمونه داده‌های مطالعه پیشین مربوط به سال‌های اخیر اعتبارسنجی گردید. نتایج نشان داده است که روش حل پیشنهادی قادر به بدست آوردن جواب‌های با کیفیت در زمانی قابل مقایسه با روش دقیق شاخه و برش می‌باشد.

همچنین نتایج حل مسئله برای نمونه داده‌های جدید گردآوری شده نشان داد که همواره استفاده از حداقل تعداد ناوگان منجر به جواب‌های برتر و بهینه نمی‌شود و در برخی شرایط استفاده از حداکثر تعداد ناوگان ممکن با جواب‌های بهتری همراه است. علاوه بر این نتایج نشان داده است که هنگام استفاده از خدمات تغذیه‌کننده، با توجه به مقصد یکسان برخی مسافران، میزان همسواری مسافران افزایش می‌یابد.

۶- مراجع

- Afandizadeh, S., & Rad, H. B. (2021). Developing a model to determine the number of vehicles lane changing on freeways by Brownian motion method. *Nonlinear Engineering*, 10(1), 450-460.
- Afandizadeh Zargari, S., Bigdeli Rad, H., & Shaker, H. (2019). Using optimization and metaheuristic method to reduce the bus headway (Case study: Qazvin Bus Routes). *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 10(4), 833-849.

در این مطالعه مسئله مسیریابی تماس - سفر خدمات شبه‌همگانی و تغذیه‌کننده‌های خودروهای خودران الکتریکی به همراه بهینه‌سازی ناوگان بررسی گردید. هدف از این پژوهش ارائه برنامه‌ریزی مسیریابی به گونه‌ای است که منجر به مسیریابی با حداقل هزینه و ارائه خدمات با کیفیت به مسافران در عین استفاده از تعداد ناوگان مناسب گردد. برای مسئله حاضر یک مدل ریاضی چند هدفه مقید ارائه گردید که تابع هدف آن به صورت حداقل‌سازی هزینه‌های مسیریابی خودروها، زمان سواری مازاد مسافران و هزینه مالکیت ناوگان تعریف شد. در مدل ریاضی علاوه بر محدودیت‌های مسیریابی، ظرفیت وسایل نقلیه، محدودیت‌های تعیین‌کننده راحتی مسافران مانند پنجره‌های زمانی و حداکثر زمان سواری مجاز مسافران، محدودیت‌های جدیدی نیز در نظر گرفته شد. این دسته از محدودیت‌ها مربوط به چالش‌های جدید مسئله، مانند ناهمگنی انبارهای مبدأ، بازگشت به یکی از انبارهای مقصد به صورت اختیاری، مدیریت باتری خودروها، مراجعه خودروها به ایستگاه‌های شارژ و مدیریت مدت زمان شارژ‌گیری می‌باشند. از جمله تفاوت‌های مطالعه حاضر با مطالعات پیشین در مشخصات عملیاتی و مدل ریاضی مسئله است؛ زیرا مدل ریاضی مطرح شده در مطالعات پیشین یا تک هدفه هستند و یا در صورت چند هدفه بودن در معیارهای تابع هدف و یا محدودیت‌های مسئله محدودتر هستند و هیچکدام از آن‌ها مانند این پژوهش همزمان هر سه هدف حداقل نمودن کل هزینه‌های مسیریابی، حداقل نمودن زمان سواری مازاد مسافران و هزینه‌های مالکیت خودروها را به همراه تمامی محدودیت‌های ذکر شده در مدل خود در نظر نگرفته‌اند، بنابراین این پژوهش یک مدل با تابع هدف پیچیده‌تر و با تعداد محدودیت‌های زیاد را بررسی می‌کند. برای حل مسئله و برنامه‌ریزی مسیریابی روش حلی دو مرحله‌ای با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و الگوریتم گام‌به‌گام جستجوی نزدیکترین همسایگی پیشنهاد گردید. از جمله نوآوری‌های این پژوهش تغییراتی در معیارهای الگوریتم گام‌به‌گام جستجوی نزدیکترین همسایگی و همچنین استفاده از یک الگوریتم گام‌به‌گام درج ایستگاه‌های شارژ در مسیر خودروها، به منظور مدیریت باتری‌ها و شارژ‌گیری مجدد، است.

با استفاده از پردازش و آماده‌سازی داده‌های خام شرکت اوبر در شهر سانفرانسیسکو ایالات متحده آمریکا، نمونه داده‌های جدیدی مطابق با مشخصات مسئله گردآوری شد. به علاوه به منظور در نظر گرفتن خدمات شبه‌همگانی به عنوان تغذیه‌کننده نمونه داده‌های دیگری نیز با تغییر داده‌های اوبر تعریف شد:

- Masmoudi, M. A., Hosny, M., Demir, E., & Pesch, E. (2020). Hybrid adaptive large neighborhood search algorithm for the mixed fleet heterogeneous dial-a-ride problem. *Journal of Heuristics*, 26(1), 83-118.
- Masmoudi, M. A., Hosny, M., Demir, E., Genikomsakis, K. N., & Cheikhrouhou, N. (2018). The dial-a-ride problem with electric vehicles and battery swapping stations. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 118, 392-420.
- Parragh, S. N., Doerner, K. F., & Hartl, R. F. (2008). A survey on pickup and delivery problems. *Journal für Betriebswirtschaft*, 58(1), 21-51.
- Pfeiffer, C., & Schulz, A. (2022). An ALNS algorithm for the static dial-a-ride problem with ride and waiting time minimization. *OR Spectrum*, 44(1), 87-119.
- Ropke, S., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2007). Models and branch-and-cut algorithms for pickup and delivery problems with time windows. *Networks: An International Journal*, 49(4), 258-272.
- S. N. Parragh. (2011). Introducing heterogeneous users and vehicles into models and algorithms for the dial-a-ride problem, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, Vol. 19, No. 5, 912-930.
- Schneider, M., Stenger, A., & Goeke, D. (2014). The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation science*, 48(4), 500-520.
- Semet, F., Toth, P., & Vigo, D. (2014). Chapter 2: Classical exact algorithms for the capacitated vehicle routing problem. In *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*, Second Edition, 37-57. *Society for Industrial and Applied Mathematics*.
- Su, Y., Puchinger, J., & Dupin, N. (2021). A Deterministic Annealing Local Search for the Electric Autonomous Dial-a-Ride Problem.
- Taxicab 0.0.3 description <https://pypi.org/project/Taxicab/#description>, visited in November 2021.
- Tellez, O., Vercaene, S., Lehuédé, F., Péton, O., & Monteiro, T. (2018). The fleet size and mix dial-a-ride problem with reconfigurable vehicle capacity. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 91, 99-123.
- Uber gps data, [uber-gps-analysis/gpsdata at master dima42/uber-gps-analysis · GitHub](https://github.com/dima42/uber-gps-analysis), visited in February 2021.
- Bongiovanni, C., Kaspi, M., & Geroliminis, N. (2019). The electric autonomous dial-a-ride problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 436-456.
- Braekers, K., Caris, A., & Janssens, G. K. (2014). Exact and meta-heuristic approach for a general heterogeneous dial-a-ride problem with multiple depots. *Transportation Research Part B: Methodological*, 67, 166-186.
- Cordeau, J. F. (2006). A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem. *Operations Research*, 54(3), 573-586.
- Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2003). A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(6), 579-594.
- Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2007). The dial-a-ride problem: models and algorithms. *Annals of Operations Research*, 153(1), 29-46.
- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, 167-181.
- Gökay, S., Heuvels, A., & Krempels, K. H. (2019). A High-level Category Survey of Dial-a-Ride Problems. In *VEHITS*, 594-600.
- <https://afdc.energy.gov/stations/#/find/nearest>, visited in November 2021.
- <https://python-visualization.github.io/folium/>, visited in June 2022.
- Jorgensen, R. M., Larsen, J., & Bergvinsdottir, K. B. (2007). Solving the dial-a-ride problem using genetic algorithms. *Journal of the Operational Research Society*, 58(10), 1321-1331.
- Keskin, M., & Çatay, B. (2016). Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 65, 111-127.
- Lin, J., Zhou, W., & Wolfson, O. (2016). Electric vehicle routing problem. *Transportation research procedia*, 12, 508-521.
- Masmoudi, M. A., Braekers, K., Masmoudi, M., & Dammak, A. (2017). A hybrid genetic algorithm for the heterogeneous dial-a-ride problem. *Computers & operations research*, 81, 1-13.

Optimal Routing for Shared Autonomous Vehicles Feeder Services in Urban Networks

Shahriar Afandizadeh, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Dorsa Aziz Jalali, M.Sc. Student., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Hamid Bigdeli Rad, Ph. D. Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: zargari@iust.ac.ir

Received: September 2003 Accepted: January 2024

ABSTRACT

The Complexities of Operating DAR Services Mean That Computerized Planning and Scheduling Is Necessary for Systems of Realistic Size. This Research Studies an Electric Autonomous Fleet Size with Mix Dial-A-Ride Problem. The Goal of The Problem Is to Minimize a Weighted Objective Function Consisting of The Total Travelling Costs of All Vehicles, Users' Excess Ride Time Costs and Vehicles' Acquisition Costs While Satisfying Customer Service Level Constraints Along with Battery Level Management and Recharge Times Management Constraints. In This Variant of The Dial-A-Ride Problem, Recharging at Any of The Available Charging Stations Is Allowed. A Cluster-First, Route-Second Genetic Algorithm Is Proposed to Solve the Problem, Where the Clustering Is Performed by Choosing the Fleet Size and Assigning the Customers to The Fleet Using a Genetic Algorithm (GA), Then the Primary Routes Are Developed by A Routing Heuristic, Finally the Charging Stations Will Be Inserted to The Algorithm Using an Insertion Technique. The Performance of The Proposed Method Is Tested by Using Benchmark Instances of a Related Problem from The Recent Literature. The Proposed Method Has Achieved Solutions Comparable with The Current State-Of-Art Methods. The Computational Results Show That the Proposed Method Is Effective in Finding Comparable Solutions with The Current State-Of-Art Method. New Instances, Some of Which Include First-Mile Feeder Services, Are Generated Based on The Data from Uber Technologies Inc. Tests Performed on New Instances Demonstrate That the Minimum Possible Fleet Size Does Not Always Result in Minimum Costs. Moreover, The Tests Show That Integration of The Feeder Services into Dial-A-Ride Services Increases Ride-Sharing Ridership.

Keywords: Dial-A-Ride Problem, Electric Autonomous Vehicles, Feeder Services, Genetic Algorithm