روشی برای مسیریابی بهینه
در حمل و نقل همگانی یکپارچه شبکه اتوبوس و اتوبوس تندرو

سید شهاب حسنی‌نسب (مسئول مکاتبات)، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
محمود صفارزاده، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
امیر رضا ممدوحی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
E-mail: s_hasani@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۲/۰۶

چکیده

از جمله روشهای بهبود اتوبوسرانی ایجاد سامانه اتوبوس تندرو است. تقاضای حمل و نقل همگانی، شبکه خیابانی، و تعداد ناوگان اتوبوس و اتوبوس تندرو ورودیهای مسأله هستند. هدف این مقاله توسعه روشی در تعیین مسیر بهینه برای یک شبکه اتوبوسرانی یکپارچه با یک خط اتوبوس تندرو است. برای افزودن یک خط اتوبوس تندرو به شبکه حمل و نقل همگانی، یک مسأله بهینه‌سازی مسیر در شبکه حل می‌شود که با استفاده از الگوریتم سرد و گرم کردن مجازی و سریع ترین فرود بهترین مسیر و سرفاصله زمانی را برای سیستم اتوبوسرانی جستجو می‌کند. کل زمان سفر استفاده‌کنندگان شبکه اتوبوس تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. بر اساس نتایج برای ۲۰ درصد کاهش زمان سفر اتوبوس تندرو نسبت به اتوبوس در سه سناریو با مسیر و تعداد ناوگان اولیه متفاوت، کل زمان سفر استفاده‌کنندگان ۲۷/۱، ۵۴/۱، و ۴۳/۱ درصد نسبت به حالت بدون وجود اتوبوس تندرو، در شرایط ناوگان مشترک برای کل سیستم اتوبوسرانی کاهش می‌یابد. این تغییرات در شرایط ناوگان مستقل برای سامانه اتوبوس تندرو برای سه سناریو به ترتیب ۸۷/۱، ۸۰/۱، و ۸۱/۱ درصد است. آهنگ این تغییرات برای ۳۰ و ۴۰ درصد کاهش زمان سفر نسبت به ۲۰ درصد، به ترتیب، برابر ۳ و ۱ درصد است.

واژه‌های کلیدی: حمل و نقل همگانی، بهینه‌سازی مسیر، سامانه اتوبوس تندرو، هزینه سفر استفاده‌کننده

۱. مقدمه

راه‌اندازی و بهره‌برداری از سیستمهای حمل‌ونقل همگانی، هزینه‌های گزافی برای ارائه‌کننده سیستم، و معمولاً دولت، دارد. به همین دلیل ارائه‌کننده سیستم سعی در بهینه‌سازی هزینه‌های خود دارد. از سوی دیگر هدف از راه‌اندازی سیستم حمل‌ونقل همگانی، ایجاد امکان حمل‌ونقل سریع و ارزان برای کلیه اقشار جامعه و در عین حال کاهش اثرات منفی حمل و نقل مانند آلودگی هوا، ازدحام، آلودگی صوتی، و نظایر آن است. معمولاً کمینه‌سازی کل زمان سفر استفاده‌کنندگان به عنوان تابع هدف مسأله بهینه‌سازی شبکه حمل‌ونقل همگانی انتخاب می‌شود. در بهینه‌سازی شبکه حمل‌ونقل همگانی، شامل بهینه‌سازی مسیر و بهینه‌سازی ناوگان، در واقع هزینه‌های ناشی از سرویس‌دهی حمل و نقل همگانی محاسبه می‌شود که در عمل شامل دو هزینه است: هزینه‌های عملکردی و هزینه‌های استفاده‌کننده. در عمل طراحی بهینه شبکه حمل و نقل همگانی بهینه‌ای جهانی در فضایی امکان‌پذیر را جستجو می‌کند. تابع هدف در این مسئله بهینه‌سازی، کل زمان سفر استفاده‌کنندگان و کاهش تعداد تغییر وسیله‌نقلیه برای استفاده‌کنندگان و مهم ترین محدودیت مسئله از دیدگاه اقتصادی هزینه‌های ارائه‌کنندگان است [Zhao, 2006].

در یک سیستم حمل و نقل همگانی، پارامترهایی چون زمان سفر، راحتی و نظایر آن به طور مستقیم تحت تاثیر سطح پوشش شبکه حمل و نقل همگانی، تناوب و سرویس‌دهی آن، در برابر سایر خدمات و ویژگیهای ترافیک مربوط به آنها هستند. در ضمن محیط پیاده‌روی نیز از سایر عوامل مهم در انتخاب وسیله‌نقلیه همگانی است. کیفیت شبکه حمل و نقل همگانی، بر اساس عواملی مانند مستقیم بودن مسیرها، پوشش سرویس‌دهی، هزینه عملکردی، هزینه حمل و نقل همگانی استفاده‌کنندگان (شامل زمان انتظار در ایستگاه، زمان داخل وسیله و زمان تغییر وسیله) و نیز متوسط تعداد تغییر وسیله تعیین می‌گردد. تغییر وسیله نقلیه یکی از عوامل مهم در عدم مطلوبیت حمل و نقل همگانی است. براساس یک مطالعه در امریکا، بیش از ۵۸ در صد پتانسیل تقاضا، تنها به علت یک تغییر وسیله نقلیه در طول سفر کاهش می‌یابد [Stern, 1996]. بنابراین کاهش تعداد تغییر وسائل نقلیه، هدفی برای افزایش مطلوبیت سیستم حمل و نقل همگانی است. کاهش تعداد تغییر وسیله نقلیه می‌تواند با بهینه‌سازی شبکه حمل‌ونقل همگانی انجام گیرد، یا مسیرهای حمل و نقل همگانی حتی‌الامکان به طور بهینه و مستقیم طراحی شوند تا تعداد تغییر وسیله‌ها کمینه شود. بهینه‌سازی شبکه حمل و نقل همگانی باید شبکه را به سمت کمترین هزینه عملکردی، کمترین تعداد تغییر وسیله و کمترین زمان سفر استفاده‌کنندگان هدایت کند.

برنامه‌ریزی حمل و نقل همگانی بر اساس داده‌های زیر انجام می‌شود: تقاضای حمل و نقل همگانی، ناحیه با مشخصات گره‌ها وکمانها و همچنین توابع زمان سفر– حجم مشخص، مجموعه‌ای از اتوبوسها، و مجموعه‌ای از رانندگان. هدف از برنامه‌ریزی، معرفی مجموعه‌ای از خطوط اتوبوسرانی و جدول زمان‌بندی آنهاست که در آن کلیه اتوبوسها و رانندگان به مسیرها تخصیص یافته باشند. مطالعات برنامه‌ریزی حمل و نقل همگانی شامل پنج مرحله: ۱)طراحی شبکه، ۲) سرفاصله زمانی، ۳)جدول زمان‌بندی، ٤)زمان‌بندی ناوگان و ٥)زمان‌بندی رانندگان است [Ceder and Wilson, 1986]. در شرایط ایده‌آل، بهتر است کلیه مراحل فوق همزمان و با تأثیرات متقابل آنها دریکدیگر در نظر گرفته شوند، ولی به علت مشکلات موجود در حل مسئله، عملاً هر یک جداگانه حل می‌شوند. به این ترتیب، حل مرحله‌ای مسئله، امکان دستیابی به بهینه جهانی را دور از دسترس کرده‌است [Guihaire and Hao, 2008].

به منظور بهبود مشخصات شبکه حمل و نقل همگانی، می‌توان برخی از خطوط اتوبوس را به اتوبوس تندرو تبدیل کرد. این عمل طبیعتاً باعث افزایش هزینه‌های ارائه‌کننده می‌شود و از سوی دیگر می‌تواند هزینه استفاده‌کنندگان را بهبود دهد. برای انتخاب بهترین گزینه‌های ایجاد و راه‌اندازی سامانه اتوبوس تندرو[1] و نیز مسیریابی بهینه برای این سامانه می‌توان از روشی یکپارچه در بهینه‌سازی حمل و نقل همگانی استفاده کرد.

افزایش سرعت اتوبوس تندرو نسبت به اتوبوس، دست‌کم باعث کاهش زمان داخل وسیله برای استفاده‌کنندگان از اتوبوس

تندرو می‌شود. در سامانه اتوبوس تندرو، تغییرات دیگری نیز در پارامترهای زمانی مسیر، مانند زمان انتظار و برنامه‌ریزی، مشاهده می‌شود. به این ترتیب، در مراحل حل مسأله مسیریابی زمان سفر در شبکه، وابسته به تندرو یا معمولی بودن خطوط اتوبوس می‌شود. از سوی دیگر، ناوگان اتوبوسرانی برای اتوبوس تندرو می‌تواند مجزا از ناوگان اتوبوس معمولی باشد. در صورتی که تقاضای همگانی متغیر و وابسته به زمان سفر باشد، جذابیت سامانه اتوبوس تندرو افزایش می‌یابد. اما در صورتی که تغییرات تقاضا در تحلیل منظور نشود، بررسی تأثیر ناوگان مستقل برای اتوبوس تندرو قابل بحث خواهد بود. از طرف دیگر، به منظور افزایش کارآیی اتوبوس تندرو، ناوگان اتوبوسرانی با ظرفیت بیشتر در این مسیر استفاده می‌شود. این امر، در صورت وجود پتانسیل کافی تقاضا، باعث افزایش کارآیی سیستم و در نتیجه بهبود زمان سفر استفاده‌کنندگان می‌شود.

دشواری مسئله بهینه‌سازی شبکه حمل و نقل همگانی با استفاده از روشهای ریاضی بهینه‌سازی، مورد سنجش قرار گرفته و مشخص شده‌است که طراحی بهینه شبکه حمل ونقل همگانی (با وجود کلیه ساده‌سازی‌ها) یک بهینه‌سازی نامحدب است که می‌توان با یک روش ریاضی به یک بهینه محلی درآن دست یافت [Ne – ell, 1979]. درحل مسئله شبکه حمل و نقل همگانی، معمولاً مسئله بهینه‌سازی بسیار دشوار[2] و برنامه‌ریزی اعداد مختلط (شامل اعداد صحیح و حقیقی) است که با تکنیکهای معمول حل ریاضی مسائل بهینه–سازی قابل حل نیست. مشکلات متعددی در حل مسأله بهینه‌سازی حمل و نقل همگانی وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به غیر خطی بودن، نامحدب بودن، چند تابع هدفی بودن و نظایر آنها اشاره کرد [Baaj and Mahmassani, 1991]. این ملاحظات توسط پژوهشگران دیگری نیز بیان شده است و بر همین اساس تاکنون حل مسأله بهینه‌سازی شبکه در مقیاس بزرگ معمولاً با روشهای ابتکاری انجام شده است [Ceder and Wilson, 1986, Chakroborty and Dwivedi, 2002, Zhao and Ubaka, 2004].

یک روش ابتکاری برای حل مسأله بهینه‌سازی مسیر در شبکه حمل و نقل همگانی توسط مندل ارائه شده که از دو مرحله تشکیل گردیده است. در مرحله اول، یک شبکه امکان پذیر اولیه ایجاد می‌شود و در مرحله بعدی، تابع هدفی به صورت کل زمان سفر استفاده‌کنندگان، شامل زمان سفر داخل وسیله و زمان انتظار کمینه می‌شود. این الگوریتم تقاضا را در مرحله ساخت شبکه امکان‌پذیر منظور نمی‌کند. در الگوریتم مندل، تأکید بر روی پوشش‌دهی شبکه و مستقیم بودن مسیر است [Mandl, 1979]. در رویکردی دیگر برای این مسأله، الگوریتمی ابتکاری وابسته به محاسبات یارانه ای بنا شد که برای ارزیابی روش از شبکه سوییس (پیشنهادی مندل) استفاده شد. روش پیشنهادی این پژوهش چهار مرحله دارد: مرحله ایجاد مسیر، مرحله تحلیل شبکه، مرحله تعیین مرکز حمل‌ونقل همگانی، مرحله بهبود شبکه [Shih and Mahmassani, 1994].

روش مندل توسط بسیاری افراد مورد استفاده قرار گرفته که الگوریتم مندل را برای شبکه‌های مختلف آزمایش کرده و نیز اصلاحاتی در آن انجام دادند. در واقع شبکه سویس به عنوان یک مسأله پایه برای ارزیابی روشها در مسائلی از این دست مورد استفاده قرار گرفته است [Zhao and Gan, 2003].

در مطالعات ژائو به همراه افراد مختلف، هدف، کمینه‌سازی زمان سفر و تعداد تغییر وسیله در شبکه بوده است. در این راستا از الگوریتم سرد و گرم کردن مجازی[3] به منظور بهینه‌سازی مسیر و از روش سریع ترین کاهش برای تعیین بهترین سرفاصله زمانی استفاده شده‌است. الگوریتمهای دیگری نیز با کارآییهای متفاوت در پژوهشهای این پژوهشگران دیده می‌شود [Zhao and Ubaka, 2004, Zhao, and Gan, 2003, Zhao, 2006, Zhao and Zheng, 2008].

در کلیه مطالعات فوق، مقدار تقاضا و نیز زمان سفر در طول دوره تحلیل، ثابت فرض شده‌است. در پژوهشی با فرض طبیعت فازی، مسأله شبکه حمل و نقل همگانی از جمله طبیعت فازی تقاضا و زمان سفر کمانها، مسأله‌ای در زمینه طراحی شبکه حمل و نقل همگانی حل شده است. بر اساس فرضیات این پژوهش، مسأله طراحی شبکه حمل و نقل همگانی یک مسأله جریان در شبکه

باهزینه کمینه[4] است که تابع هدف و محدودیتها به صورت خطی در نظر گرفته می‌شوند. در عمل این مسأله از محدودیتهای خطی فازی و فضای امکان پذیر محدب استفاده می‌کند [Ghatee and Hashemi, 2008].

در رویکردهای حل مسئله بهینه‌سازی مسیر، معمولاً ناوگان حمل و نقل همگانی یکسان است و زمان سفر اتوبوسها برای هر کمان شبکه ثابت فرض شده است. با استفاده از پژوهشهای نامبرده می‌توان بهینه‌سازی مسیر را انجام داد، اما امکان بهینه‌سازی شبکه اتوبوس و اتوبوس تندرو به طور همزمان وجود ندارد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی شبکه اتوبوس معمولی و اتوبوس تندرو به طور همزمان است. در این مسأله، ویژگیهایی مانند کاهش تداخل حرکت با سایر وسایل‌نقلیه برای اتوبوس تندرو، افزایش سرعت متوسط اتوبوس تندرو در طول مسیر، و در نتیجه کاهش زمان داخل وسیله برای استفاده‌کنندگان از اتوبوس تندرو، منظور می‌شود. بر همین اساس، میزانهای متفاوت کاهش زمان سفر اتوبوس تندرو نسبت به اتوبوس در نظر گرفته‌شده و مسأله مسیریابی حل می‌شود. حل مسأله برای شرایطی که ناوگان اتوبوس تندرو مستقل از سیستم حمل و نقل همگانی باشد و در شرایط ناوگان مشترک برای کل سیستم انجام می‌شود.فرض می‌شود نتایج حاصل، از بررسی غیر همزمان اتوبوس و اتوبوس تندرو نتایج بهتری داشته باشد.

در ادامه فرمول‌بندی مسأله معرفی می‌شود. سپس الگوریتم پیشنهادی برای در نظر گرفتن تغییر زمان سفر و تغییر در ناوگان ارائه شده و سرانجام مسأله‌ای جهت آزمون (شبکه سویس، مورد استفاده پژوهشگران) برای سنجش ارزش مسئله بکاربرده شده، نتایج عددی به دست می‌آید.

۲. فرمول‌بندی مسأله

در فرمول‌بندی این مسأله از تابع هدف و محدودیتهای مطالعات ژائو [Zhao, 2006, Zhao and Zheng, 2008] بهره‌برداری شده که بنا به نیاز مسأله تغییرات لازم در آن اعمال می‌شود. در این راستا برخی فرضیات برای حل مسأله در نظر گرفته شده‌اند.

برای در نظر گرفتن اتوبوس تندرو در حل مسأله، به ویژه در مسأله تخصیص ترافیک همگانی، روندی خاص مورد استفاده قرارگرفته‌است که در ادامه این بخش به آنها اشاره خواهد شد و سپس فرمول‌بندی مسأله تکمیل خواهد گردید.

۲-۱ فرضیات مسأله

- مقدار تقاضای حمل و نقل در دوره تحلیل ثابت است.
- معیار هزینه استفاده‌کنندگان کل زمان سفر استفاده‌کنندگان است و از زمان پیاده‌روی صرف‌نظر می‌شود.
- ظرفیت نشستن در ناوگان یکسان است.
- افراد به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت به ایستگاه می‌رسند، بنابراین امید ریاضی زمان انتظار برابر نصف سرفاصله زمانی است.
- سرعت اتوبوس تندرو بیشتر، و در نتیجه زمان سفر در کمان مربوطه ۲۰ درصد (مقادیر ۳۰ و ۴۰ درصد نیز منظور شده است) کمتر از زمان سفر در کمان اتوبوس معمولی است.
- برای خط اتوبوس تندرو می‌توان از ناوگان، مستقل از کل سیستم استفاده کرد.
- ایستگاههای حمل و نقل همگانی منطبق بر گره‌های شبکه خیابانی است.
- شبکه خیابانی کاملاً پیوسته است، یعنی هر دو گره خیابان در نهایت توسط یک مسیر شبکه به یکدیگر متصل می‌شوند.

۲-۲ در نظر گرفتن تفاوت زمان سفر برای خطوط اتوبوس و اتوبوس تندرو

برای منظور کردن خط اتوبوس تندرو در شبکه حمل و نقل همگانی، یک متغیر صفر یا یک معرفی می‌شود که مقدار آن ۱ است، اگر کمان، مربوط به اتوبوس تندرو باشد و در غیر این‌صورت صفر منظور می‌شود. به منظور سادگی کار در هر تکرار حل مسأله، ابتدا مسیر اتوبوس تندرو مشخص شده، زمان سفر هر کمان روی این مسیر کاهش داده شده و سایر مشخصات اتوبوس تندرو مانند اتوبوس معمولی منظور می‌شود. در اتوبوس تندرو علاوه بر زمان

سفر، عوامل دیگری از جمله زمان انتظار و برنامه‌ریزی نیز بهبود می‌یابد در این پژوهش تنها به زمان سفراشاره می‌شود.

برای حل مسأله تخصیص ترافیک همگانی، می‌توان از روش اسپایس استفاده کرد که به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود [Spiess, 1993]. در این مسأله، تابع زمان سفر- حجم می‌تواند خطی یا غیر خطی باشد و تقاضا در دوره تحلیل ثابت فرض می‌شود.

$$Min \sum_{a\in A}\int_{\cdot}^{y_a} u_a(x)dx + \sum_{i\in N}\sum_{r\in P} w_i^r \qquad (۱)$$

St.

$$y_a = \sum_{r\in P} y_a^r \quad a \in A \qquad (۲)$$

$$y_a^r \le f_a w_i^r \quad i \in N, r \in P \qquad (۳)$$

$$\sum_{A_i^+} y_a^r - \sum_{A_i^-} y_a^r = o_{ij} \quad i \in N, r \in P \qquad (٤)$$

$$y_a^r \ge \cdot \qquad a \in A, r \in P \qquad (٥)$$

که در آن:

فرمول‌بندی این مسأله در شرایط ثابت بودن تابع زمان سفر- حجم برای هر کمان به صورت زیر خواهد بود [Spiess, 1993] :

$$Min \sum_{a\in A} u_a y_a + \sum_{i\in N} w_i \qquad (٦)$$

St.

(۵) و (٤) و (۳) و (۲)

اگر اتوبوس با جریان ترافیک به صورت مختلط حرکت کند، دارای زمان سفر متغیر خواهد بود. در صورتی که مسیر حرکت اتوبوس مجزا باشد، این زمان می‌تواند ثابت فرض شود. به‌این ترتیب، زمان سفر اتوبوس تندرو ثابت و اتوبوس معمولی غیرخطی خواهد بود. اگر برای یک شبکه حمل و نقل همگانی، زمان سفر کلیه وسایل‌نقلیه در هر کمان مقداری ثابت فرض شود، می‌توان از الگوریتم استراتژی بهینه[۶] برای تخصیص ترافیک به‌خطوط استفاده کرد و در صورتی که تابع زمان سفر غیرخطی باشد، باید از روش فرانک- ولف[۷] بهره‌برداری کرد. الگوریتم استراتژی بهینه یک الگوریتم برچسب‌گذاری با سرعت زیاد است. اغلب از شرایط خطی برای حل مسأله تخصیص ترافیک استفاده می‌شود [Spiess, 1993].

برای یک شبکه حمل و نقل همگانی، زمان سفر کلیه وسایل نقلیه در هر کمان مقداری ثابت فرض می‌شود. در این پژوهش زمان سفر اتوبوس تندرو، درصدی کمتر از زمان سفر اتوبوس فرض شده است. این امر در تخصیص ترافیک و نیز حل مسأله مسیریابی حایز اهمیت خواهد بود. در مسیریابی، از آنجا که کمانهای اتوبوس تندرو هنوز مشخص نشده‌اند باید سازوکاری برای پیش بینی آن در مسأله در نظر گرفت.

در مسأله تخصیص ترافیک، از آنجا که اگر کمانی در یک گام حل مسأله به عنوان کمان اتوبوس و در گام بعدی کمان اتوبوس تندرو باشد، دو زمان سفر متفاوت در دو گام مختلف خواهد داشت، می‌توان مسأله تخصیص ترافیک در این شرایط را به‌صورت زیر نوشت:

$$Min \sum_{a\in A}(۱ - x_a k)u_a y_a + \sum_{i\in N} w_i \qquad (۷)$$

St.

(۵) و (٤) و (۳) و (۲)

متغیر صفر و یک، در محدودیت وارد نمی‌شود و در نتیجه مسأله فوق همچنان یک مسأله خطی است که با الگوریتم استراتژی بهینه قابل حل است. در این مسأله تنها کمان‌هایی که تغییر زمان داده‌اند مشخص می‌شود. متغیرهای صفر ویک در این مسأله متغیرهای تصمیم‌گیری به شمار نمی‌روند و از حل بخش بهینه‌سازی مسیر به دست می‌آیند. در عمل متغیرهای صفر و یک مشخص‌کننده کمانهای اتوبوس تندرو هستند. تصمیم‌گیری در مورد انتخاب این کمانها به تخصیص ترافیک باز نمی‌گردد و از حل مسأله اصلی نتیجه می‌شود، اما تغییر آنها در طول مدت تحلیل باید در مسأله تخصیص ترافیک به شکل فوق درنظر گرفته شود

۲-۳ تعریف شبکه و فضای جستجو

یکی از مراحل مهم حل مسأله مسیریابی شبکه حمل و نقل همگانی تعیین فضایی است که جستجوی مسیر بهینه در آن انجام می‌شود. در این پژوهش، برای تعیین فضای جستجو از رویکرد ژائو استفاده شده است [Zhao, 2006, Zhao and Zheng 2008]. ایده اساسی این رویکرد انتخاب گره‌های اصلی روی مسیر اولیه و سپس انتخاب گره‌هایی است که با یک، دو، سه

و تعداد بیشتری کمان به گره‌های مسیر اصلی مرتبط می‌شوند. بااستفاده از این گره‌ها، مسیرهای جدید با محوریت مسیر اصلی تولید می‌شود که این مسیرها در بهینه‌سازی مسیر نقشی اساسی ایفا می‌کنند. شبکه حمل و نقل همگانی $T=T[t_{ij}]$ ماتریس کمانهایی است که در هر سطر آن کمانهای روی یک مسیر حمل و نقل همگانی مشخص می‌شوند.

۲-٤ معرفی محدودیتهای مسأله

برای یک بهینه‌سازی ناپیوسته، به علت دشواری مسئله و جلوگیری از بزرگ شدن ابعادمسأله، تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری کمتر انتخاب می‌شود. از سوی دیگر محدودیتها باید تا حد امکان، نیازها و دیدگاه‌های مورد نظر مسأله را تأمین کنند. با همین دیدگاه در این پژوهش محدودیتهای زیر منظور شده است:

– محدودیت تداوم یک گزینه حمل و نقل مانند اتوبوس تندرو یا اتوبوس در یک مسیر.

– محدودیت حداکثر زمان سفر داخل وسیله (یا طول مسیر) برای مسیرهای حمل و نقل همگانی مشخص: در مسیرهای طولانی خستگی رانندگان دشواری‌هایی ایجاد می‌کند و مسیرهای کوتاه مشکلات برنامه‌ریزی اتوبوس را به دنبال دارد.

– محدودیت ابعاد ناوگان در هر خط: از آنجا که تعداد ناوگان حمل و نقل همگانی بر هزینه عملکردی تاثیر دارد این تعداد به عنوان هزینه ارائه‌کننده تلقی می‌شود. مسئله بهینه‌سازی شبکه باید قادر باشد بهترین مسیر و بهترین سرفاصله زمانی را با کمینه کردن زمان استفاده‌کننده تعیین کند و محدودیت‌های بودجه ارائه‌دهنده را نیز منظور بدارد.

– محدودیت حداقل و حداکثر سرفاصله زمانی در یک مسیر داده شده: سرفاصله زمانی مسیر باید به دلایل عملکردی نه چندان کم و نه چندان زیاد باشد که زمان‌های انتظار زیاد برای استفاده‌کنندگان ایجاد کند. سرفاصله زمانی با ضریب پری وسائل نقلیه نیز ارتباط دارد که با تعداد مسافرین داخل وسیله‌نقلیه مرتبط است.

– محدودیت مستقیم بودن مسیر: مستقیم بودن مسیر باید از مقدار کمینه بیشتر باشد. در حمل و نقل همگانی برای استفاده‌کنندگان لزوماً امکان استفاده از کوتاه ترین مسیر بین مبدأ – مقصد وجود ندارد. به منظور برآورد پیروی نکردن مسیر حمل و نقل همگانی از این مسیر، معیار مستقیم بودن مسیر معرفی می‌شود. این معیار به‌صورت $d(r)=\sum_{i=1}^{q-1}\sum_{j=1}^{q} w_{ij}\left(\frac{u_{ij}^{(S)}}{u_{ij}^{(R)}}\right)$ تعریف می‌گردد. محدودیتهای مسئله بهینه‌سازی شبکه را می‌توان به صورت تفصیلی به شکل زیرنوشت:

$$R_{min}^{c} \le R_{L}^{q_c} \le R_{max}^{c}, c \in C, q_c = 1,2,\dots l_C \quad (8)$$

$$h_{min}^{c} \le h_{q_c} \le h_{max}^{c}, c \in C, q_c = 1,2,\dots l_C \quad (9)$$

$$\frac{h_{q_c}.q_{max}^{q_c}}{V_{seat}^{q_c}} \le L_{max}^{q_c}, c \in C, q_c = 1,2,\dots l_C \quad (10)$$

$$d_{q_c} \ge d_{min}^{c}, c \in C, q_c = 1,2,\dots l_C \quad (11)$$

$$\sum_{c\in C} x_{ij}^{c} \le 1, ij \in A \quad (12)$$

$$x_{i_1 j_1}^{c} = x_{j_1 i_2}^{c}, c \in C, i_1 j_1, j_1 i_2 \in p_{q_c} \quad (13)$$

$$\sum_{q_c}^{l_c} R_{Fleet}^{q_c} \le N_{Fleet}^{c}, c \in C \quad (14)$$

۲-۵ تعریف تابع هدف

در این پژوهش تابع هدف، کل هزینه سفر استفاده‌کنندگان است که مقدار آن از مجموع کل زمان سفرهای مبدأ- مقصد در محدوده خدمت دهی حمل و نقل همگانی به دست می‌آید. در ضمن، زمان تغییر وسیله نقلیه به صورت وزن‌دار در تابع هدف گنجانده می‌شود:

$$U(T,O,h) = \sum_{i,j=1}^{n}[o_{ij}.U_{ij}(T,h)] \quad (15)$$

از آنجا که یکی از عوامل مهم عدم مطلوبیت حمل و نقل همگانی تعداد تغییر وسیله توسط مسافرین است، از تابع هدف ژائو و ملاحظات مربوط به تغییر خط در آن استفاده شده‌است [Zhao, 2006]. بر اساس این پژوهش، تابع هدف و مسأله نهایی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود.

$$\text{Minimize} U^{k}(\boldsymbol{T},\boldsymbol{O},\boldsymbol{h}) = \sum_{i,j=1,i\neq j}^{n}\left[o_{ij}U_{ij}^{k}\ (\boldsymbol{T},\boldsymbol{h})\right] \quad (16)$$

St.

$$R_{min}^{c} \le R_{L}^{q_c} \le R_{max}^{c}, c \in C, q_c = 1,2,\dots l_C$$
$$h_{min}^{c} \le h_{q_c} \le h_{max}^{c}, c \in C, q_c = 1,2,\dots l_C$$
$$\frac{h_{q_c}.q_{max}^{q_c}}{V_{seat}^{q_c}} \le L_{max}^{q_c}, c \in C, q_c = 1,2,\dots l_C$$
$$d_{q_c} \ge d_{min}^{c}, c \in C, q_c = 1,2,\dots l_C$$
$$\sum_{c\in C} x_{ij}^{c} \le 1, ij \in A$$
$$x_{i_1 j_1}^{c} = x_{j_1 i_2}^{c}, c \in C, i_1 j_1, j_1 i_2 \in p_{q_c}$$
$$\sum_{q_c}^{l_c} R_{Fleet}^{q_c} \le N_{Fleet}^{c}, c \in C$$

۲-۵-۱ الگوریتم حل مسأله

در این پژوهش سه مرحله برای حل مسأله در نظر گرفته شده‌است.

- استفاده از الگوریتم SA برای حل مسأله بهینه‌سازی همراه با در نظر گرفتن کاهش زمان سفر برای اتوبوس تندرو
- اعمال تغییرات زمان سفر اتوبوس تندرو بر روی شبکه حمل‌ونقل همگانی و حل مسأله تخصیص ترافیک بر همین مبنا
- استفاده از الگوریتم سریع ترین کاهش که برای بهینه‌سازی سرفاصله زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در ادامه هریک از این الگوریتم‌ها و ارتباط آنها بیان می‌شوند.

برای یک مسأله طراحی بهینه شبکه حمل و نقل همگانی، روش SA یک شبکه حمل و نقل همگانی T را از شبکه اولیه T۰ (داده‌شده) می‌سازد. شبکه T درصورتی انتخاب می‌شود که تابع هدف فعلی از تابع هدف اولیه بهتر باشد یا به عبارتی U (T, O, h) < U (T۰, O, h) . در غیر این‌صورت، شبکه T با احتمال زیر در ادامه جستجو وارد می‌شود:

$$p = \exp(-\Delta/t) \cdot \Delta = [U(\boldsymbol{T},\boldsymbol{O},\boldsymbol{h}) - U(\boldsymbol{T_0},\boldsymbol{O},\boldsymbol{h})] \quad (۱۷)$$

در این الگوریتم پارامتر t دمای تحلیل به شمار می‌رود. پارامتر دما معنایی فیزیکی ندارد. مقدار این پارامتر نشان دهنده این است که یک همسایگی از بهینه محلی پیدا شده بررسی می‌شود. مقدار بزرگ t احتمال رسیدن به جواب بهتر را بیشتر می‌کند در حالی که مقدار کمتر این شانس راپایین می‌آورد. در عمل مقدار بزرگ t انتخاب می‌شود تا خطر گرفتار شدن در یک بهینه محلی بوجود نیاید. مقدار این احتمال با فاکتور τ ، پارامتر سرد شدن، کاهش می یابد تا مسأله به جواب بهینه برسد.

در مراحل الگوریتم SA بردار سرفاصله زمانی h به عنوان یک پارامتر باقی می‌ماند و نقش یک متغیر فعال در بهینه‌سازی را ایفا نمی‌کند. بردار سرفاصله زمانی درشبکه حمل و نقل همگانی تنها زمانی بهبود می‌یابد که محدودیتهای مربوط به خود را مانند (۹) و (۱۰) رعایت کند. جستجوی بردار سرفاصله زمانی بهتر در مراحل دیگری به عنوان جستجوی سریع ترین کاهش (FD) امکان پذیر است. مراحل جستجوی (FD) برای حل مسأله بهترین سرفاصله زمانی به شرح زیر است:

۱. اگر محدودیت حداکثر تعداد ناوگان به طور تساوی برقرار نیست، مسیری را بیابید (جزء FD) که در آن با کاهش سرفاصله زمانی، زمان سفر کل استفاده‌کنندگان نیز کاهش می‌یابد (کاهش سرفاصله زمانی از افزایش تعداد ناوگانی که به مسیر خدمات می‌دهند نتیجه می‌-شود). سرفاصله زمانی در مسیر را بهنگام سازی کنید. این گام را ادامه دهید تا محدودیت تعداد ناوگان به‌صورت تساوی برقرار شود. به گام ۲ بروید.

۲. دو مسیر درشبکه مسیرها بیابید به طوری که تحت تأثیر استفاده از روش FD و کاهش کل زمان سفر استفاده‌کنندگان، سرفاصله زمانی در یکی از آنها (به دلیل افزایش تعداد ناوگان در مسیر) کاهش می‌یابد و سرفاصله زمانی برای مسیر دیگر (به علت کاهش تعداد همان تعداد وسیله‌نقلیه در این مسیر) افزایش می‌یابد. سرفاصله زمانی جدید را برای این شرایط بهنگام کنید. این گام را تا آنجا ادامه دهید تا به یک بهینه محلی در کل زمان سفر استفاده‌کنندگان دست پیدا کنید. یک بار الگوریتم SA را برای بهینه‌سازی مسیربکار بگیرید.

در این پژوهش، روشهای SA وFD به طور یکپارچه در یک الگوریتم تکراری استفاده می‌شوند. در عمل مراحل الگوریتم FD برای سرفاصله زمانی بهتر و الگوریتم SA برای مسیر بهتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با در نظر گرفتن ملاحظات فوق برای در نظرگیری اثر اتوبوس تندرو درمسأله، دستور حل نهایی این مسأله به صورت زیر در می‌آید:

گام (۰): مسیر اتوبوس تندرو را به عنوان یک مسیر اولیه معرفی کنید.

گام(۱): زمان سفر در کمان‌های روی مسیر اتوبوس تندرو را با کاهش درصدی از زمان سفر اولیه بهنگام کنید. زمان سفر سایر مسیرها را تغییر ندهید.

گام(۲): مسأله SA و FD را با زمان سفرهای بهنگام شده حل کنید. در هر مرحله در صورت تغییر یک کمان از اتوبوس تندرو به اتوبوس، زمان سفر آن کمان را به حالت اولیه برگردانید و در صورت تبدیل یک کمان از اتوبوس تندرو به اتوبوس معمولی زمان سفر در آن کمان را کاهش دهید.

گام (۳): اگر شرایط پایانی رعایت شده توقف کنید. در غیر اینصورت به گام (۱) بروید.

٤. حل مسأله و تحلیل نتایج

٤-١ معرفی شبکه سویس

مندل، الگوریتمی ابتکاری برای طراحی شبکه حمل و نقل همگانی معرفی کرد که بر اساس شبکه‌ای واقعی در سویس گسترش داده شده است [Mandl, 1979]. این شبکه، شبکه‌ای کوچک و چگال است که از ۱۵ گره با تقاضای همگانی ۱۵۵۷۰ سفر در روز تشکیل شده‌است. در این شبکه، کمانهای همگانی زمان سفر ثابتی دارند. ماتریس تقاضا تعداد سفرهای همگانی را که در یک روز بین هر دو گره انجام می‌شود نمایش می‌دهد. شکل(۱) شبکه سویس را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد . باج و مهمسانی، شیه و مهمسانی و ژائو، الگوریتم مندل را گسترش داده و از این مسأله به عنوان یک پایه جهت ارزیابی روشهای خود استفاده کرده‌اند [Zhao, 2006, Shih and Mahmassani, 1994, Baaj and Mahmassani, 1991]. در مطالعات مذکور سه سناریو برای تعداد خطوط تعداد ناوگان و جواب اولیه مورد استفاده قرار گرفته‌است. درمسأله مورد بحث در این پژوهش نیز جهت ارزیابی روش پیشنهادی از این شبکه پایه استفاده شده است. در روند حل مسأله در پژوهش حاضر ابتدا تغییر زمان سفر کمانها با ناوگان مشترک برای کل سیستم اتوبوسرانی مورد مطالعه قرار گرفته، سپس شرایط ناوگان مستقل برای اتوبوس تندرو بررسی می‌شود.

٤-٢ حل مسأله در شرایط عدم تغییر ناوگان (ایجاد مسیر ویژه) و تغییر ناوگان

فرض می‌شود ایجاد یک خط اتوبوس تندرو که زمان سفر هر کمان همگانی را ۲۰ درصد کاهش می‌دهد در شبکه امکان پذیر باشد. مسأله در شبکه سویس برای ۲۰ درصد کاهش زمان سفر کمانهای اتوبوس تندرو نسبت به اتوبوس معمولی حل شده است. سپس این مسأله برای ۳۰ و ٤۰ درصد کاهش زمان سفر در کمان‌های اتوبوس تندرو حل می‌شود. نتایج حاصل از این تحلیل در ادامه می‌آید. به منظور بررسی تغییرات ایجاد شده، نتایج پژوهش با مطالعات ژائو [Zhao, 2006] در این زمینه مقایسه می‌شود.

در صورتی که ناوگانی با ابعاد اتوبوس یکسان، بر حسب نیاز، براساس مسأله بهینه‌سازی به اتوبوس تندرو و اتوبوس معمولی اختصاص داده شود، ناوگان مشترک برای اتوبوس و اتوبوس تندرو خواهیم داشت.در شرایط ناوگان مستقل برای اتوبوس تندرو فرض می‌شود ۱۵ دستگاه اتوبوس از ناوگان با ظرفیت ۱/۵ برابر اتوبوس معمولی به ناوگان اتوبوس تندرو اختصاص یابد و در محدودیت ابعاد ناوگان، تعداد ناوگان نسبت به حالت ناوگان مشترک برای کل سیستم تغییر نکند.

در جدول (۱) ویژگیهای مختلف شبکه برای شرایط مختلف بررسی شده‌اند. سناریوهای ۱ تا ۳، شبکه‌های اولیه تعریف شده‌اند که هر یک در تعداد ناوگان، تعداد خطوط اتوبوس و مسیرهای اصلی اولیه با یکدیگر متفاوتند. در سناریو اول ٦ مسیر اصلی اولیه، در سناریو دوم ۸ مسیر اصلی و در سناریو سوم ۷ مسیر اصلی در نظر گرفته شده‌اند و همچنین مسیرهای اولیه آنها نیز بایکدیگر متفاوت است. نتایج حاصل از پژوهش با نتایج حاصل از مطالعات ژائو [Zhao, 2006] در جدول (۱) مقایسه شده است.

در جدول (۱) میزان سفرهای بدون تغییر وسیله نقلیه، با یک و با دو تغییر وسیله نقلیه آمده است. مقادیر کل زمان سفر در روز، برحسب دقیقه برای کلیه سناریوها خلاصه شده است. تعداد ناوگان اتوبوس در شرایط ناوگان مشترک برای کل سیستم و شرایط ناوگان مستقل برای اتوبوس تندرو خروجی دیگر است. متوسط تغییر وسیله‌نقلیه‌ها و میزان تغییر کل زمان سفر استفاده‌کنندگان نسبت به مطالعات ژائو آمده است.

در ردیف ششم جدول (۱) تعداد کل ناوگان مورد نیاز اتوبوس آمده است. این سطر در شرایط ناوگان مشترک برای کل سیستم، تعداد کل اتوبوسها و در شرایط ناوگان مستقل برای سامانه اتوبوس تندرو، تعداد اتوبوس معمولی را در بر می گیرد. در ردیف هفتم تعداد ناوگان اتوبوس تندرو آمده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود تنها در حالت اتوبوس تندرو با ناوگان مستقل ۱۵ اتوبوس به این سطر تخصیص داده شده است. در حالت ناوگان مشترک تعداد اتوبوسها بر اساس حل مسأله بهینه‌سازی

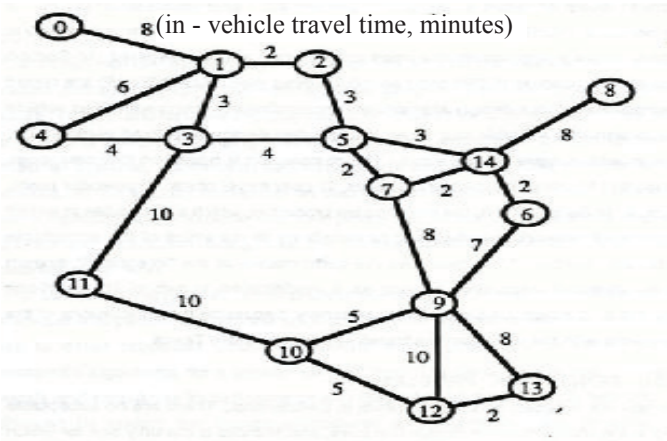
سرفاصله زمانی تعیین می‌شوند. در ردیف هشتم تعداد مسیرهای هر سناریو شامل خط اتوبوس تندرو مشخص شده است. در شرایط استفاده از ناوگان مستقل برای اتوبوس تندرو هزینه ارائه‌کننده سیستم افزایش می‌یابد. همان گونه که مشاهده می‌شود مجموع تعداد صندلیهای ناوگان اتوبوس تندرو و معمولی در این حالت بیشتر از حالت ناوگان مشترک است. در شرایط ناوگان مستقل تناوب خط اتوبوس تندرو از طول مسیر و تعداد ناوگان به دست می‌آید و مقدارآن ثابت و بهتر از شرایط ناوگان مشترک است. در نتیجه این امر می‌تواند باعث بهبود تابع هدف و کاهش کل زمان سفر استفاده‌کنندگان شود.

در جدول (۲) برای سناریوهای ۱ تا ۳، تمامی مسیرها با نمایش گره‌های روی آن مسیرها نشان داده شده‌اند. جدول (۳) به ازاء تغییرات مختلف زمان سفر اتوبوس تندرو نسبت به اتوبوس معمولی، تغییرات کل زمان سفر استفاده‌کنندگان را نشان می‌دهد. در این جدول میزان تغییرات کل زمان سفر استفاده‌کنندگان به ازاء میزانهای مختلف کاهش زمان سفر اتوبوس تندرو نسبت به اتوبوس معمولی تعیین می‌شود. شکلهای (۲) تا (٤) آهنگ تغییرات کل زمان سفر کل استفاده‌کنندگان را در سناریوهای ۱ تا ۳ برای ۲۰، ۳۰ و ٤۰ درصد کاهش زمان سفر اتوبوس تندرو نسبت به اتوبوس معمولی، درمقایسه با شرایط نبودن اتوبوس تندرو بیان می‌کند. در این نمودارها میزان تغییرات برای شرایط با ناوگان مشترک در کل سیستم و ناوگان مستقل برای اتوبوس تندرو نمایش داده شده است. از آنجا که تعداد داده‌ها کافی نیست نمی‌توان نموداری پیوسته برای اعداد حاصل و تغییرات زمان سفر ترسیم کرد. بر اساس نتایج حاصل می‌توان تغییرات را صعودی، اما با روندی کاهشی، بخصوص پس از ۳۰ درصد تغییر زمان سفر اتوبوس تندرو نسبت به زمان سفر اتوبوس معمولی در نظر گرفت. این امر می‌تواند نشان دهنده درصد مناسب برای تغییر زمان سفر اتوبوس تندرو باشد.

جدول۱. نتایج برای ۲۰ درصد تغییر زمان سفر در موارد مختلف

ردیف	پارامتر ها	سناریو۱			سناریو۲			سناریو۳		
		Zhao	ISMV*	ISMF**	Zhao	ISMV*	ISMF**	Zhao	ISMV*	ISMF**
۱	سفر بدون تغییر وسیله (٪)	۹۵/۱۸	۹٤/٦۵	۹٤/۰٤	۹۵/٤٤	۹۵/۱۲	۹۵/۰۲	۹۲/٤۹	۹۳/٦۱	۹٤/۱۲
۲	سفر با یک تغییر وسیله(٪)	٤/۸۲	۵/۳۵	۵/۹٤	٤/۵٦	٤/۸۸	٤/۹۸	۷/۵۱	٦/۹۳	۵/۸۸
۳	سفر با دوتغییر وسیله (٪)	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
٤	کل زمان سفر استفاده‌کنندگان (min)	۱۹۰۹۹۸	۱۸۸۵٦٤	۱۸۷٤۱۷	۱۹۵٤٦٦	۱۹۲٤۵۲	۱۹۱۹۵۰	۱۹۰٤۷۸	۱۸۷۷۵٤	۱۸۷۰۲۳
۵	کل ناوگان اتوبوس	۸۹	۸۵	٦۳	۷۷	۷۵	۵۲	۸۲	۷۹	۵۸
٦	کل ناوگان BRT	-	-	۱۵	-	-	۱۵	-	-	۱۵
۷	تعداد مسیر ها	٦	٦	٦	۸	۸	۸	۷	۷	۷
۸	متوسط تغییر وسیله	۱/۰٤۸	۱/۰۵۳	۱/۰۵۰	۱/۰٤٦	۱/۰٤۸	۱/۰۵۰	۱/۰۷۵	۱/۰٦۹	۱/۰۵۹
۹	کل کاهش زمان سفر از حالت بدون اتوبوس تندرو (٪)	۰	۱/۲۷	۱/۸۷	۰	۱/۵٤	۱/۸۰	۰	۱/٤۳	۱/۸۱

*ISMV : شرایط ناوگان مشترک برای کل سیستم اتوبوسرانی **ISMF : شرایط ناوگان مستقل برای اتوبوس تندرو



Transit Demand Matrix in List Form:

(0 400 200 60 80 150 75 75 30 160 30 25 35 0 0)
(400 0 50 120 20 180 90 90 15 130 20 10 10 5 0)
(200 50 0 40 60 180 90 90 15 45 20 10 10 5 0)
(60 120 40 0 50 100 50 50 15 240 40 25 10 5 0)
(80 20 60 50 0 50 25 25 10 120 20 15 5 0 0)
(150 180 180 100 50 0 100 100 30 880 60 15 15 10 0)
(75 90 90 50 25 100 0 50 15 440 35 10 10 5 0)
(75 90 90 50 25 100 50 0 15 440 35 10 10 5 0)
(30 15 15 15 10 30 15 15 0 140 20 5 0 0 0)
(160 130 45 240 120 880 440 440 140 0 600 250 500 200 0)
(30 20 20 40 20 60 35 35 20 600 0 75 95 15 0)
(25 10 10 25 15 15 10 10 5 250 75 0 70 0 0)
(35 10 10 10 5 15 10 10 0 500 95 70 0 45 0)
(0 5 5 5 0 10 5 5 0 200 15 0 45 0 0)
(0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0)

شکل۱. نمایش شماتیک شبکه سویس و تقاضای سفر در این شبکه

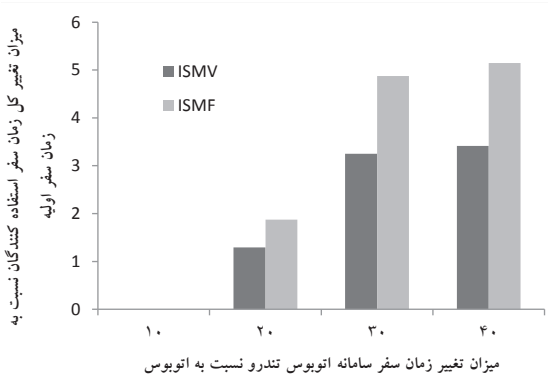
جدول۲. جزییات شبکه در حالت حل مسأله اتوبوس تندرو

مسأله		روش یکپارچه در شرایط ناوگان مشترک برای کل سیستم اتوبوسرانی	روش یکپارچه در شرایط ناوگان مستقل برای سامانه اتوبوس تندرو
جزییات ساختار مسیرهای شبکه	سناریو۱	(۳,۱,۲,۵,۷,۹,۱۰)*	(۳,۱,۲,۵,۷,۱٤,٦,۹,۱۰)*
		(۰,۱,۲,۵,۱٤)	(۰,۱,۲,۵)
		(٤,۱,۲,۵,۱٤,۸)	(٤,۱,۲,۵,۱٤,۸)
		(۹,۱۰,۱۱)	(۹,۱۰,۱۱)
		(٦,۱٤,۵,۳,۱۱)	(٦,۱٤,۵,۳,۱۱)
		(۱۳,۱۲,۱۰,۹,٦,۱٤,۷)	(۱۳,۱۲,۱۰,۹,۷)
	سناریو۲	(۱,۲,۵,۷,۱٤,٦,۹,۱۰,۱۱)*	(۱,۲,۵,۷,۱٤,٦,۹,۱۰)*
		(۸,۱٤,٦,۹)	(۸,۱٤,٦,۹)
		(۰,۱,۲,۵,۷,۱٤)	(۰,۱,۲,۵,۷)
		(۹,۱۲,۱۳)	(۹,۱۲,۱۳)
		(٤,۳,۵,۷,۹)	(٤,۳,۵,۷,۹)
		(۹,۱۰,۱۱)	(۹,۱۰,۱۱)
		(٤,۱,۲,۵,۱٤,٦)	(٤,۱,۲,۵,۱٤,٦)
		(۷,۵,۲,۱,۳,۱۱)	(۷,۵,۲,۱,۳,۱۱)
	سناریو۳	(٤,۳,۱,۲,۵,۷,۹,۱۰,۱۲)*	(٤,۳,۱,۲,۵,۱٤,٦,۹,۱۰,۱۲)*
		(۸,۱٤,۷,۹)	(۸,۱٤,۷,۹)
		(۰,۱,۲,۵,۷)	(۰,۱,۲,۵,۷)
		(۹,۱۲,۱۳)	(۹,۱۲,۱۳)
		(٤,۳,۵,۱٤,٤)	(٤,۳,۵,۷)
		(۹,۱۰,۱۱)	(۹,۱۰,۱۱)
		(۱,۲,۵,۷,۱٤)	(۱,۲,۵,۷,۱٤)

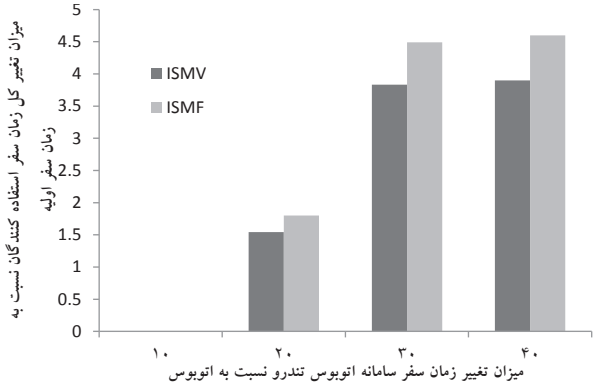
*خط اتوبوس تندرو

جدول ۳. تغییرات کل زمان سفر برای میزان‌های مختلف تغییر سرعت

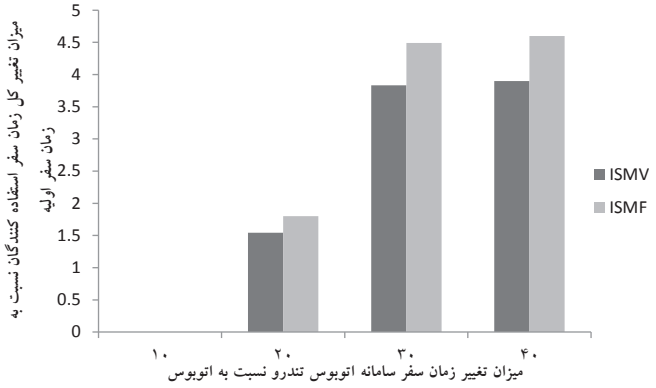
مسأله	کاهش زمان سفر در سامانه اتوبوس تندرونسبت به اتوبوس معمولی(٪)	سناریو۱		سناریو۲		سناریو۳	
		کل زمان سفر استفاده کنندگان (min)	میزان تغییرات(٪)	کل زمان سفر استفاده کنندگان (min)	میزان تغییرات(٪)	کل زمان سفر استفاده کنندگان (min)	میزان تغییرات(٪)
ISMV	۰	۱۹۰۹۹۸	۰	۱۹۵٤٦٦	۰	۱۹۰٤۷۸	۰
	۲۰	۱۸۸۵٦٤	۱/۲۷۸	۱۹۲٤۵۲	۱/۵٤۲	۱۸۷۷۵٤	۱/٤۳۰
	۳۰	۱۸٤۹۸۹	۳/۲٤۸	۱۸۷۹۷٦	۳/۸۳۲	۱۸۳۸٦۵	۳/٤۷۲
	٤۰	۱۸٤٦۹٦	۳/٤۱۲	۱۸۷۸٤۸	۳/۸۹۷	۱۸۳٦۳۳	۳/۵۹٤
ISMF	۰	۱۹۰۹۹۸	۰	۱۹۵٤٦٦	۰	۱۹۰٤۷۸	۰
	۲۰	۱۸۷٤۱۷	۱/۸۷۵	۱۹۱۹۵۰	۱/۷۹۹	۱۸۷۰۲۳	۱/۸۱٤
	۳۰	۱۸۱۸٦۳	٤/۸۷٤	۱۸٦٦۸۷	٤/٤۹۱	۱۸۱۷٦۷	٤/۵۷۳
	٤۰	۱۸۱٦۳۸	۵/۱٤۷	۱۸٦٤۷۹	٤/۵۹۸	۱۸۱۵٤۵	٤/٦۹۰



شکل۲. میزان تغییرات کل زمان سفر استفاده کنندگان در سناریو۱ برای شرایط ناوگان مستقل و غیر مستقل



شکل۳. میزان تغییرات کل زمان سفر استفاده کنندگان در سناریو۲ برای شرایط ناوگان مستقل و غیر مستقل



شکل٤. میزان تغییرات کل زمان سفر استفاده کنندگان در سناریو۳ برای شرایط ناوگان مستقل و غیر مستقل

$N = \{1,2,3,..,n\}$: مجموعه گره‌ها

$A = \{a_1, a_2, ... a_m\}$: مجموعه کمان‌ها

$a_i = a_i(i_1, i_2), i_1, i_2 \in N$: بخش خیابانی یا یک کمان

o_{ij}: تعداد سفرها با مبدأ i و مقصد j

$O = [o_{ij}]_{d\times d}$: ماتریس تقاضا

y_a^r : حجم مسافر در کمان a در مسیر r

$w_i^r = \frac{\alpha}{\sum_{a\in A^+} f_a},\ \alpha > 0,\ r \in P$: زمان انتظار

f_a : تناوب کمان a

A_i^+ : مجموعه کمان‌های خروجی از گره i

A_i^- : مجموعه کمان‌های ورودی به گره i

$u_a(x)$: تابع هزینه سفر در کمان a

R_{min}^c and R_{max}^c : حداقل و حداکثر طول مسیر برای انتخاب c

$R_L^{q_c}$: طول مسیر q_c در انتخابc

h_{min}^c and h_{max}^c : حداقل و حداکثر سرفاصله زمانی برای هر مسیر برای انتخاب c

h_{q_c}: سرفاصله زمانی مسیر q_c در انتخابc

$q_{max}^{q_c}$: تعداد مسافر در مسیر q_c در انتخابc

$V_{seat}^{q_c}$: تعدا صندلی در مسیر q_c در انتخابc

$L_{max}^{q_c}$: حداکثرضریب پری در مسیر q_c در انتخابc

d_{q_c} : مستقیمی مسیر q_c در انتخابc

d_{min}^c: حداقل مستقیمی مسیر q_c در انتخابc

$u_{ij}^{(S)}$: هزینه سفر بین گره ni وnj در طول مسیر

$u_{ij}^{(R)}$: هزینه سفر استفاده کنندگان در کوتاهترین مسیر روی شبکه خیابانی بین دو گره

w_{ij} : ضریب وزنی

$x_{ij}^c = 1$ اگر ij روی مسیر روش c باشد درغیر اینصورت $x_{ij}^c = 0$

N_{Fleet}^c : تعداد ناوگان برای هر انتخاب

$R_{Fleet}^{q_c}$: تعداد اتوبوسهای مسیر q_c در انتخابc

$l_c,\ c \in C$: تعداد مسیر ها در هر مورد مطالعه

$C = \{1(BRT), 2(Bus)\}$: مجموعه انتخاب استفاده کنندگان از سیستم همگانی

$P = P(P_1, P_2, ..., P_n)$: یک مسیر یا خط

$U_{ij}(\boldsymbol{T}, \boldsymbol{h})$: زمان سفر استفاده‌کنندگان بین i and j در شبکه همگانیT

oij : تعداد سفر ها با مبدأ i و مقصد j

$O = [o_{ij}]_{d\times d}$: ماتریس تقاضا

T : ماتریس شبکه حمل و نقل همگانی

$\boldsymbol{h} = (h_1, h_2, ... h_l)$: بردار سرفاصله زمانی

$\boldsymbol{l}$: تعدا مسیر ها شبکه حمل و نقل همگانی

$U(T, O, h)$:کل زمان سفر استفاده‌کنندگان در شبکه حمل و نقل همگانی T با ماتریس تقاضای O و بردار سرفاصله زمانی $\boldsymbol{h}$

K : درصدی از زمان صفر اتوبوس که در اتوبوس تندرو کاهش می‌یابد

$$x_a = \begin{cases} 1 & \text{اگرکمان روی سامانه اتوبوس تندرو باشد}, \quad a \in A \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$T = T[t_{ij}]$، t_{ij}: ضریب اتصال خط i و گره j، T : ماتریس اتصال شبکه حمل و نقل همگانی،

$$t_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{اگرگره } j \text{ روی مسیر } i \text{ باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

جدول ٤. پارامترهای موجود در مقاله

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله با توجه به پژوهشهای پیشین، روشی برای طراحی سیستم اتوبوس تندرو و اتوبوس معمولی به صورت یکپارچه پیشنهاد شد. برای افزودن یک خط اتوبوس تندرو به شبکه حمل و نقل همگانی، یک مسأله بهینه‌سازی مسیر در شبکه حل شد که از الگوریتم سرد و گرم کردن مجازی و سریع ترین فرود برای جستجوی بهترین مسیر و سرفاصله زمانی سیستم اتوبوسرانی استفاده می‌کند. کل زمان سفر استفاده‌کنندگان شبکه اتوبوس و اتوبوس تندرو به صورت یک شبکه اتوبوسرانی یکپارچه، به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. این مسأله برای یک شبکه نمونه در شرایط ناوگان مشترک برای کل سیستم اتوبوسرانی و نیز شرایط استفاده از ناوگان مستقل برای اتوبوس تندرو بررسی شد. کاهش کل زمان سفر استفاده‌کنندگان در صورت تغییر سرعتهای مختلفی برای سامانه اتوبوس تندرو نسبت به اتوبوس مورد توجه قرار گرفته و الگویی برای حل مسأله مسیریابی در این شرایط ارائه شد. در مطالعات پیشین سه سناریو برای تعداد خطوط، تعداد ناوگان و جواب اولیه مورد استفاده قرار گرفته است که به طور خلاصه سناریوهای ۱ تا ۳ نامیده شده‌اند. در سناریو اول ٦ مسیر اصلی اولیه در سناریو دوم ۸ مسیر اصلی و در سناریو سوم ۷ مسیر اصلی در نظر گرفته شده‌اند و همچنین مسیرهای اولیه آنها نیز بایکدیگر متفاوت است. در این پژوهش نیز این سه سناریو مورد استفاده قرار گرفت و خلاصه نتایج به شرح زیر می‌آید.

۱- برای ۲۰ درصد کاهش زمان سفر در کمان‌های اتوبوس تندرو، کل زمان سفر استفاده‌کنندگان در ناوگان مشترک برای کل سیستم اتوبوسرانی برای سناریوهای ۱ تا ۳ به ترتیب ۱/۲۷ ، ۱/٥٤ ، و ۱/٤۳ درصد کاهش می‌یابد.

۲- در شرایط ناوگان مشترک برای کل سیستم اتوبوسرانی در هر یک از سناریوها تعداد ناوگان مورد نیاز نسبت به حالت بدون اتوبوس تندرو کاهش می‌یابد. در سناریو ۱، تعداد ناوگان مورد نیاز ٤ وسیله نقلیه کاهش می‌یابد. در سناریوهای ۲ و ۳، تعداد ناوگان ۳ وسیله نقلیه کاهش می‌یابد. در عمل تعداد صندلیهای ناوگان، معیاری برای هزینه ارائه‌دهنده سیستم است. به نظر می‌رسد خط اتوبوس تندرو که زمان سفر کمتری نسبت به اتوبوس دارد، باید سرفاصله زمانی بهینه کمتری نسبت به همان مسیر با خط اتوبوسرانی معمولی داشته باشد، اما در این حالت مقدار بهینه سرفاصله زمانی اتوبوس تندرو کمتر از حد پایینی سرفاصله زمانی است و نهایتاً محدودیت حد پایینی سرفاصله زمانی به صورت تساوی برقرار می‌شود. در نتیجه سرفاصله زمانی بهینه افزایش یافته، تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز کاهش می‌یابد.

۳- در شبکه با ناوگان مستقل برای خط اتوبوس تندرو، برای ۲۰ درصد کاهش زمان سفر در کمان‌های اتوبوس تندرو، کل زمان سفر استفاده‌کنندگان در سناریو ۱ تا ۳ به ترتیب، ۱/۸۷، ۱/۸۰ و ۱/۸۱ درصد کاهش می‌یابد. در واقع در این مسأله محدودیت تعداد ناوگان برای اتوبوس تندرو از سایر ناوگان حمل و نقل همگانی جدا می‌شود که با انتخاب تعداد نسبتاً زیاد ناوگان برای این سامانه عملاً این محدودیت برای اتوبوس تندرو یک محدودیت آزاد شده تلقی می‌شود و در نتیجه جواب بهتری بر ای مسأله امکان پذیر می‌شود.

٤- در هر سه سناریو در حالت ناوگان مشترک برای کل سیستم اتوبوسرانی، با کاهش زمان سفر اتوبوس تندرو از ۲۰ درصد به ۳۰ درصد زمان سفر اتوبوس معمولی، بیش از ۲ درصد از کل زمان سفر استفاده‌کنندگان کاسته می‌شود. در حالت ناوگان مستقل برای اتوبوس تندرو این تغییر به حدود ۳ درصد می‌رسد. در کاهش زمان سفر اتوبوس تندرو از ۳۰ درصد به ٤۰ درصد زمان سفر اتوبوس معمولی، در هر دو حالت ناوگان مشترک برای کل سیستم و ناوگان مستقل برای سامانه اتوبوس تندرو، کل زمان سفر استفاده‌کنندگان تنها ۱ درصد کاهش می‌یابد.

یکی از تغییراتی که در اثر احداث اتوبوس تندرو در حمل و نقل همگانی به وجود می‌آید، افزایش تقاضای استفاده از حمل و نقل همگانی به ویژه اتوبوس تندرو است. افزایش تقاضای بخشی از سیستم حمل و نقل همگانی می‌تواند بر روی مسأله بهینه‌سازی مسیر مؤثر باشد و مسأله جدیدی در این زمینه ایجاد کند. از سوی دیگر اتوبوس تندرو علاوه بر افزایش سرعت و کاهش زمان سفر داخل وسیله نقلیه اتوبوس بر عوامل دیگر از جمله زمان انتظار و برنامه‌ریزی تأثیر دارد. این موارد قابل بررسی در پژوهش‌های آینده هستند.

٦. پی نوشتها

1- Bus Rapid Transit (BRT)
2- NP-hard
3- Simulated Annealing
4- Minimal Cost Flow Problem
5- Fastest Descent
6- Optimal Strategy
7- Frank-Wolfe

٧. مراجع

- Baaj, M.H. and Mahmassani, H.S. (1991) "An AI based approach for transit route system planning and design", Journal of Advanced Transportation, Vol. 25 No.2, pp. 187–210.

- Ceder, A. and Wilson, N. H. M. (1986) "Bus network design", Transportation Research Part B Vol.20, pp. 331–344.

- Chakroborty, P. and Dwivedi, T. (2002) "Optimal route network design for transit systems using genetic algorithms", Engineering Optimization, Vol. 34 No.1, pp. 83–100.

- Chen, A. and Kasikitwiwat, P. (2011) "Modeling capacity flexibility of transportation networks", Transportation Research Part A, No.45, pp. 105-117.

- Cortés, E.C., Jara-Díaz, S. and Tirachini, A. (2011) "Integrating short turning and deadheading in the optimization of transit services", Transportation Research Part A, No.45, pp. 419-434.

- Guihaire, V. and Hao, J. K. (2008) "Transit network design and scheduling: A global review", Transportation Research Part A, No.42, pp. 1251–1273.

- Ghatee, M. and Hashemi, S. M. (2008) "Generalized minimal cost flow problem in fuzzy nature: an application in bus network planning problem", Applied Mathematical Modelling, No.32, pp. 2490-2508.

- Mandl, C. E. (1979) "Evaluation and optimization of urban public transportation networks", European Journal of Operational Research, Vol. 5, pp. 396–404.

- Newell, G. F. (1979) "Some issues related to the optimal design of bus routes", Transportation Science, No.13, pp. 20–35.

- Shafahi, Y. and Khani, A. (2010) "A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions", Transportation Research Part A, No.44, pp. 377-389.

- Shih, M. and Mahmassani, H. S. (1994) "A design methodology for bus transit networks with coordinated operations", Tech. Rep. SWUTC/94/60016-1, Center for Transportation Research, University of Texas, Austin.

- Spiess, H. (1993) "Transit equilibrium assignment based on optimal strategies: An implementation in EMME/2", EMME/2 Support Center, Switzerland.

- Stern, R. (1996) "Passenger transfer system review", Synthesis of Transit Practice 19, Transportation Research Board.

- Zhao, F. and Ubaka, I. (2004) "Transit network optimization – minimizing transfers and optimizing route directness", Journal of Public Transportation, Vol. 7, No.1, pp. 67–82.

- Zhao, F. and Gan, A. (2003) "Optimization of transit network to minimize transfers: methodologies for route network optimization", Technical Report for the Florida Department of Transportation, Department of Civil and Environmental Engineering, Florida International University, Miami, FL.

- Zhao, F. (2006) "Large-scale transit network optimization by minimizing user cost and transfers", Journal of Public Transportation, Vol. 9, No. 2, pp. 107-129.

- Zhao, F. and Zheng, X. (2008) "Optimization of transit route network, vehicle headways and timetables for large-scale transit networks", European Journal of Operational Research, No.186, pp. 841-855.