

بررسی تاثیر راهبرد کنترل تمام توقف و اولین توقف بر زمان انتظار مسافران

مسعود محمد حسین میرزایی، کارشناس ارشد، گروه مهندسی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران
عبدالرضا شیخ الاسلامی (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران،

ایران

E-mail: Sheikh@iust.ac.ir

میر سامان پیشوایی، دانشیار، گروه مهندسی سیستم‌های هوشمند، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۸

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۶

چکیده

وجود اختلال در سیستم‌های حمل و نقل سبب تغییر در زمان سفر و همچنین ایجاد تغییرات در زمان رسیدن وسایل حمل و نقل عمومی به ایستگاه و سرفاصله‌ی زمانی مطلوب آن‌ها می‌شود که هر کدام از این تغییرات باعث افزایش زمان انتظار مسافران می‌شوند. مدیریت اختلالات در شبکه‌های مسافری، مجموعه روش‌هایی جهت مدیریت و کنترل حرکت اتوبوس‌ها باهدف حفظ سطح خدمت ارائه شده به مسافری است که عمدتاً با تغییر برنامه حرکت اتوبوس‌ها و یا پیاده‌سازی راهبردهای عملیاتی همراه است. یکی از اقدامات برای حل این قبیل مشکلات استفاده از راهبردهای کنترلی است که باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های حمل و نقل شهری و در نتیجه کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه می‌گردد. در این پژوهش بین راهبرد کنترلی توقف در تمام ایستگاه‌های افق زمانی و توقف در اولین ایستگاه افق زمانی مقایسه صورت می‌گیرد. برای راهبرد کنترلی توقف، دو سناریوی عدم وجود شرایط سبقت اتوبوس‌ها و سناریوی وجود شرایط سبقت اتوبوس‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. برای هر کدام از راهبردهای کنترلی تمام توقف و اولین توقف یک مدل ریاضی جداگانه ارائه شده است. در مدل‌های ریاضی ارائه شده، تاثیر راهبرد کنترلی توقف، بر زمان انتظار مسافران داخل اتوبوس و داخل ایستگاه مورد بررسی قرار گرفته است. سپس یک مثال فرضی برای حل مدل تعریف شده است و بر روی برخی پارامترهای مدل تحلیل حساسیت انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که زمان انتظار مسافران در حالتی که از راهبرد کنترلی توقف استفاده شده است نسبت به حالت بدون راهبرد کنترلی به‌طور متوسط ۳/۵ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: راهبرد کنترلی، زمان انتظار مسافران، زمان توقف اتوبوس‌ها

۱. مقدمه

است. راهبرد دیگر راهبرد کنترلی بین ایستگاه‌ها است. به طور مثال اولویت‌دهی در تقاطعات با افزایش زمان فاز سبز چراغ یکی از این راهبردهای کنترلی بین ایستگاه‌ها است که اگرچه باعث کاهش زمان انتظار مسافران می‌شود اما می‌تواند بر روی جریان ترافیک و عملکرد تقاطعات تاثیر منفی گذارد. سایر راهبردها شامل اعزام اتوبوس خالی به یک ایستگاه خاص و اضافه کردن یک اتوبوس رزرو به شبکه می‌باشند. از سیستم‌های موقعیت‌یاب خودکار برای جمع‌آوری اطلاعات مربوط به راهبردهای کنترلی در طول مسیر استفاده می‌شود. در این پژوهش به اطلاعات مختلفی برای حل مسئله نیاز است. این اطلاعات شامل اطلاعات پویا و اطلاعات ثابت می‌باشند. در قسمت (۲) این مقاله مروری بر مطالعات گذشته انجام شده است. در قسمت (۳) تابع هدف و محدودیت‌ها برای راهبرد کنترلی اولین توقف و راهبرد کنترلی تمام توقف در دو سناریوی عدم امکان سبقت اتوبوس‌ها و وجود امکان سبقت در اتوبوس‌ها در نظر گرفته شده است. برای هر کدام از راهبردها یک مدل ریاضی ارائه شده است تا زمان توقف بهینه اتوبوس‌ها در ایستگاه به صورتی مشخص شود که زمان انتظار مسافران کمینه شود و نتایج آن‌ها با حالت بدون راهبرد مقایسه گردیده است. در قسمت (۴) نتایج و تحلیل‌های مربوط به یک مثال فرضی و تحلیل حساسیت مربوط به برخی پارامترها نیز ارائه گردیده است. در قسمت (۵) نیز نتیجه‌گیری نهایی انجام گرفته است.

۲. ادبیات پژوهش

مطالعات زیادی بر روی راهبردهای کنترلی اتوبوس‌ها صورت گرفته است. بر اساس طبقه‌بندی معرفی شده توسط ابرلین و همکاران (X. J. Eberlein, Wilson, and Bernstein 2001) راهبرد توقف اتوبوس‌ها به دسته‌ی راهبردهای داخل ایستگاه تعلق دارند. اولین مطالعات مربوط به اوسونا و نیول (Osuna and Newell 1972) بود که یک روش تحلیلی ارائه کردند که راهبرد توقف بهینه را برای یک مسیر فرضی متشکل از یک ایستگاه با یک یا دو وسیله نقلیه تعیین می‌کرد.

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال شانزدهم / شماره سوم (۶۴) / بهار ۱۴۰۴

قابلیت اطمینان یکی از موضوعات مهم در استفاده از سیستم‌های حمل و نقل است و راهبردهای کنترلی به بالا بردن قابلیت اطمینان سیستم‌های حمل و نقلی کمک می‌کنند (Turnquist 1981). ناپایداری سیستم‌های حمل و نقل بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان مثل زمان سفر، زمان انتظار مسافران و ... تاثیر گذار است (Newell and Potts 1964). در سیستم‌های حمل و نقل عمومی، دسته‌ای شدن اتوبوس‌ها به پدیده‌ای اطلاق می‌شود که در آن گروهی متشکل از دو یا چند اتوبوس به طور هم‌زمان به یک ایستگاه اتوبوس می‌رسند. برای حل این قبیل مشکلات از راهبردهای کنترلی استفاده می‌شود که باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های حمل و نقل شهری و در نتیجه کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه می‌گردد (Wang and Sun 2020). این راهبردها به دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند: دسته اول راهبردهای کنترلی برنامه‌ریزی هستند که معمولاً شامل بهبود زیرساخت‌ها، ایجاد تغییر در جدول زمانی اعزام اتوبوس‌ها و یا افزودن ناوگان جدید به سیستم حمل و نقل مورد نظر است. این نوع راهبرد نیازمند سرمایه‌گذاری کلان در سیستم حمل و نقل مورد نظر است (Asgharzadeh 2017). راهبردهای کنترلی دسته دوم بر اساس اطلاعات پویا هستند که شامل توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه، گردش کوتاه، اعزام اتوبوس خالی و عبور اتوبوس بدون توقف در برخی ایستگاه‌ها است (Turnquist and Blume 1980). کنترل‌های ایستگاه شامل توقف اتوبوس‌ها، عبور اتوبوس بدون توقف در ایستگاه و گردش کوتاه تقسیم می‌شوند. راهبرد توقف اتوبوس‌ها زمانی استفاده می‌شود که یک اتوبوس از برنامه زمانی خود جلوتر باشد. این راهبردها می‌توانند تغییرات سرفاصله زمانی و زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌ها را کاهش دهند. راهبرد عبور اتوبوس بدون توقف، زمان سفر و همچنین زمان انتظار مسافران سوار بر اتوبوس را کاهش می‌دهد. راهبرد گردش کوتاه، گردش اتوبوس قبل از رسیدن به پایانه مقصد برای کاهش سرفاصله زمانی مسیر مخالف

تأثیر شرایط سبقت اتوبوس ها در استراتژی کنترلی تمام توقف بر زمان انتظار مسافران

که راهبرد توقف به دلیل کاهش قابل توجه زمان انتظار مسافران و تأثیر منفی ناچیز این راهبرد بر مسافران، بهترین نتایج را به همراه دارد. ابرلین و همکاران (X. Eberlein, Wilson, and Bernstein 1999) اصطلاحی به نام "افق زمانی" ارائه کردند که در آن برای هر بهینه‌سازی فقط ایستگاه‌های پایین‌دستی متوالی خاصی از هر اتوبوس در مدل ریاضی در نظر گرفته می‌شود. این به کاهش اندازه مدل، تعداد متغیرها و زمان حل مربوطه کمک می‌کند. به‌عنوان مثال، اگر افق زمانی برابر سه در نظر گرفته شود، تنها سه ایستگاه پایین‌دست هر وسیله نقلیه برای محاسبه زمان انتظار مسافران در نظر گرفته می‌شود. اودل و ویلسون (O'Dell and Wilson 1999) یک راهبرد کنترل پویا برای قطارها در یک موقعیت غیرمنتظره پیشنهاد کردند. هرگونه اختلال در حمل‌ونقل ریلی و تاخیر بیش‌ازحد در ایستگاه‌ها اثرات قابل توجهی بر حرکت قطار دارد. آن‌ها راهبردهای گردش کوتاه و توقف را برای تنظیم حرکت قطار اجرا کردند. آن‌ها زمان توقف را تابعی از کل مبادلات مسافر و برخی عوامل دیگر در نظر گرفتند. آن‌ها همچنین در نظر گرفتند هنگامی که قطار به ظرفیت کامل رسید برخی از مسافران نتوانند سوار شوند. در مورد راهبردهای کنترلی برای افزایش سرعت عملیاتی وسیله نقلیه، سان و هیکمن (Hickman 2001) و فو و همکاران (Fu and Yang 2002) حرکت اتوبوس‌ها بدون توقف در برخی ایستگاه‌ها را پیشنهاد کردند که در آن اگر اتوبوسی از برخی ایستگاه‌ها عبور کند، اتوبوس بعدی برای خدمت به همه آن‌ها به کار گرفته می‌شود. باین‌حال، هیچ‌یک از آن‌ها محدودیت‌های ظرفیت وسیله نقلیه را در نظر نگرفتند. دلگادو و همکاران (Delgado et al. 2009) یک مدل ریاضی برای کمینه‌سازی زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌ها با اعمال زمان توقف و حداکثر محدودیت‌های سوارشدن برای مسافران پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها از راهبرد کنترلی شبیه‌سازی‌شده برای ارزیابی قابلیت مدل خود استفاده کردند. سانچز-مارتینز

تابع هدف آن‌ها کمینه کردن زمان انتظار مسافران بود. در تجزیه‌وتحلیل آن‌ها، نرخ ورود مسافران دارای توزیع یکنواخت بود. بارنت مسیری را با دو پایانه و یک ایستگاه کنترلی در بین آن‌ها در نظر گرفت. برخلاف کار اوسونا و نیول، بارنت (Barnett 1974) یک توزیع دوقطه‌ای، گسسته و تقریبی از تاخیر خودرو را با هدف کاهش پیچیدگی مسئله موردبحث ایجاد کرد. او تابع هزینه را به‌عنوان مجموع زمان انتظار مسافران و زمان تأخیر مسافران داخل وسیله در ایستگاه کنترلی با استفاده از یک متغیر تصمیم برای حداکثر زمان توقف مشخص نمود. کافمن (Koffman 1978) یک مدل شبیه‌سازی برای تجزیه‌وتحلیل یک مسیر اتوبوس یک‌طرفه ایجاد کرد. آن‌ها چندین راهبرد کنترلی برای اتوبوس‌ها را در زمان پویا آزمایش کردند. انگلستین (Engelstein 1983) دریافت که نقطه کنترلی بهینه، که به‌عنوان ایستگاهی که در آن تغییرات سرفاصله زمانی اندازه‌گیری می‌شود، تعریف می‌شود، به نسبت مسافران سوار بر وسیله نقلیه به مسافرانی که در ایستگاه‌های پایین‌دست منتظر هستند، حساس است. آبکوویتز و همکاران (Abkowitz, Eiger, and Engelstein 1986) یک تابع تجربی تغییرات سرفاصله زمانی را با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تخمین زمان انتظار مسافران توسعه دادند. آن‌ها پیشنهاد دادند که نقطه کنترلی باید پیش از ایستگاه‌های پرتقاضا قرار داده شود. ابرلین و همکاران (X. Eberlein, Wilson, and Bernstein 1999) اولین تحقیق را در مورد مسئله کنترلی با داده‌های پویا ارائه کردند. سه نوع راهبرد کنترلی مورد مطالعه قرار گرفت. این راهبردها توقف، اعزام اتوبوس خالی و اتوبوس سریع‌السیر بود. آن‌ها یک شبکه ترانزیت حلقه‌ای یک‌طرفه متشکل از دو پایانه و تعدادی ایستگاه میانی را در نظر گرفتند. در این مسیر، فرض بر این است که وسایل نقلیه با سرفاصله زمانی یکنواخت برنامه‌ریزی شده کار کنند. درنهایت، آن‌ها یک راهبرد ترکیبی را پیشنهاد کردند که شامل هر سه راهبرد بود و به این نتیجه رسیدند (Sánchez-Martínez, Koutsopoulos, and Wilson 2016) به یک راهبرد توقف پویا پرداخت که تغییرات تقاضا و

خط با هم انشعاب دارند و واگرا می‌شوند ارائه کردند. این توقف برای مسافران مختلف در قسمت قبل از جدا شدن دو خط و بعد از آن محاسبه می‌شود. چن و همکاران (Chen et al. 2021) مدت توقف اتوبوس و تعدیل سرعت را باهم ترکیب کردند و تاثیر آن بر کاهش زمان انتظار مسافران را بررسی کردند. لیانگ و همکاران (Liang, Ma, and He 2019) موضوع بهینه-سازی اندازه‌ی ناوگان و راهبرد توقف را با یکدیگر ادغام کردند. آن‌ها از شبیه‌سازی مونت کارلو برای حل مدل خود استفاده کردند. پژوهش‌های گذشته همه بر زمان انتظار مسافران داخل ایستگاه با استفاده از داده‌های پویا تاکید داشتند و تنها شفاهی و همکاران تاثیر زمان انتظار مسافران داخل اتوبوس بر روی زمان انتظار مسافران را در نظر گرفتند. همچنین این پژوهش‌ها شرایط عدم قطعیت مانند حداکثر مدت توقف اتوبوس و حداکثر ظرفیت اتوبوس را در نظر نگرفتند. به دلیل زیاد حل مسئله، نقطه مشترک تمام پژوهش‌های گذشته استفاده از یک روش ابتکاری برای کاهش زمان حل مسئله در شرایط واقعی می‌باشد. در این مقاله بررسی راهبرد کنترلی زمان توقف اتوبوس‌ها و تاثیر آن بر زمان انتظار مسافران بررسی می‌شود. نوآوری‌های صورت گرفته در این پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

- بررسی راهبرد کنترلی توقف اتوبوس‌ها به صورتی که اتوبوس‌ها در تمام ایستگاه‌های افق زمانی توقف کنند.
- مقایسه‌ی تاثیر راهبرد کنترلی توقف در تمام ایستگاه‌های افق زمانی بر روی زمان انتظار مسافران در دو سناریوی عدم وجود شرایط سبقت اتوبوس‌ها و وجود شرایط سبقت اتوبوس‌ها.
- در نظر گرفتن زمان انتظار مسافران داخل اتوبوس، علاوه بر زمان انتظار مسافران داخل ایستگاه در راهبرد کنترلی توقف در تمام ایستگاه‌های افق زمانی.

زمان سفر مسیرها را در نظر می‌گیرد. مقایسه بین راهبرد کنترلی قطعی و راهبرد کنترلی پیش‌بینی ترکیبی در سناریوهای متعدد انجام شد. ایبارا روخاس و همکاران (Ibarra-Rojas et al. 2015) یک مرور ادبیات جامع در مورد مسئله طراحی شبکه حمل‌ونقل، مسئله تنظیم فرکانس، مسئله جدول زمانی شبکه حمل‌ونقل، مسئله زمان‌بندی وسیله نقلیه و راننده، و مسئله راهبرد توقف بر اساس داده‌های پویا انجام دادند. موریرا-مارتینز و همکاران (Moreira-Matias et al. 2016) راهبردهای توقف و حرکت اتوبوس بدون توقف در برخی ایستگاه‌ها را بر اساس پیش‌بینی زمان سفر ترکیب کردند. آن‌ها از روش یادگیری ماشین برای پیش‌بینی زمان سفر استفاده کردند و سپس به توزیع سرفاصله زمانی پی بردند. توزیع سرفاصله زمانی برای تصمیم‌گیری در مورد اینکه کدام راهبرد کنترلی باید در ایستگاه کنترلی اجرا شود، اتخاذ شد. اصغرزاده و همکاران (Asgharzadeh 2017) یک مدل ریاضی برای راهبرد توقف اتوبوس‌ها در نظر گرفتند که در آن تابع هدف شامل کمینه‌سازی زمان انتظار مسافران در داخل ایستگاه‌ها و زمان انتظار مسافران در داخل اتوبوس به دلیل توقف در برخی ایستگاه‌ها بود. کنس و همکاران (Gkiotsalitis 2019) یک رویکرد مبتنی بر پنجره زمانی را معرفی کردند که با آن زمان توقف همه اتوبوس‌ها در پنجره‌های زمانی از پیش تعریف‌شده محاسبه می‌شود و بر اساس به حداقل رساندن زمان سفر مسافران در وسیله نقلیه و محدودیت‌های مربوط به جدول برنامه زمانی بهینه می‌شود. لیانگ و همکاران (Liang et al. 2021) یک الگوریتم محاسبه زمان توقف بهینه با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت اتوبوس برای حل یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی پیشنهاد کردند. جورجیس لاسکاریس و همکاران (Laskaris et al. 2021) یک شاخص توقف را برای یک شبکه که دو

۳. تعریف مسئله

متغیر تصمیم به صورتی تعیین شود که مجموع زمان انتظار مسافران داخل اتوبوس و زمان انتظار مسافران داخل ایستگاه کمینه شود. زمان سفر در بین ایستگاه ها و نرخ رسیدن مسافران در هر ایستگاه در طول دوره مورد نظر ثابت فرض می شود. زمان توقف هر اتوبوس در ایستگاه مورد نظر ثابت فرض می شود. مسیر مورد نظر یک مسیر حلقه ای شکل است که از دو پایانه تشکیل شده است. حرکت اتوبوس ها در مسیر حلقه ای شکل، پادساعت گرد است. در سناریوی عدم وجود شرایط سبقت، زمان حرکت اتوبوس i از ایستگاه k نسبت به اتوبوس قبلی اش یعنی $i-1$ حداقل یک دقیقه باهم اختلاف دارند.

۴. مدل ریاضی

در ادامه مدل ریاضی که شامل تابع هدف و محدودیت های مربوط به هر کدام از راهبردهای اولین توقف و تمام توقف (سناریوی اول و دوم) است معرفی شده است و در مورد قسمت های مختلف تابع هدف و هر کدام از محدودیت ها به اختصار توضیح داده شده است.

۴-۱ نمادها

پارامترها و متغیرهای به کاررفته در مدل به صورت زیر هستند:

• مجموعه ها

I : مجموعه اندیس اتوبوس ها

K : مجموعه اندیس ایستگاه ها

• اندیس ها

i : اندیس اتوبوس ها $i = 1, \dots, I$

k : اندیس ایستگاه ها $k = 1, \dots, K$

i^i : اندیس آخرین ایستگاه که اتوبوس i از آن حرکت کرده است.

• پارامترها

T_k : نرخ رسیدن مسافر در ایستگاه k

Q_k : درصد مسافرانی که در ایستگاه k پیاده می شوند.

N^i : تعداد ایستگاه های افق زمانی

RR_k : زمان سفر پیش بینی شده بین ایستگاه k و $k-1$

چالش اصلی مسئله در انتخاب راهبردهای مدیریت اختلال و نیز بهینه سازی متغیرهای کنترلی مربوطه است (Yaghini et al. 2016). سه راهبرد توقف توسط اودل و ویلسون (ODell and Wilson 1999) پیشنهاد شده است. در راهبرد "تمام توقف"، اتوبوس ها را می توان در همه ایستگاه های افق زمانی نگه داشت. در راهبرد "یکبار توقف"، اتوبوس ها را می توان فقط در یک ایستگاه در افق زمانی نگه داشت. در نهایت، در راهبرد «اولین توقف»، اتوبوس ها را می توان در اولین ایستگاه در افق زمانی نگه داشت. تعریف افق زمانی برای محدود کردن اندازه مسئله و کاهش زمان حل به کار گرفته شده است. در پژوهش های گذشته معمولاً به بررسی راهبرد اولین توقف پرداخته شده است. همچنین در بسیاری از پژوهش ها تنها به زمان انتظار مسافران در ایستگاه اشاره شده است و به زمان انتظار مسافران داخل اتوبوس کمتر پرداخته شده است. نکته ی دیگری که باید برای توقف اتوبوس ها در نظر گرفته شود این است که آیا اتوبوس ها در مسیر مربوط به اتوبوس امکان سبقت از یکدیگر را در صورتی که باهم تداخل یابند دارند یا خیر. به همین دلیل به راهبرد تمام توقف که در آن توقف می تواند در همه ی ایستگاه های افق زمانی اتفاق بیفتد، در شرایط وجود سبقت و عدم وجود سبقت برای اتوبوس ها پرداخته می شود. در این مقاله راهبرد کنترلی تمام توقف و تأثیر آن بر زمان انتظار مسافران ارزیابی شده است که در آن i اتوبوس و k ایستگاه در نظر گرفته شده است. مسیر مورد نظر یک مسیر حلقوی است که دارای تعدادی ایستگاه در طول مسیر خود است. در طول مسیر با توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها تعدادی از مسافران پیاده یا سوار می شوند و یا به مسیر خود ادامه می دهند. همان طور که اشاره شد راهبرد مورد نظر برای راهبرد کنترلی اولین توقف و راهبرد کنترلی تمام توقف برای دو سناریو وجود شرایط سبقت و عدم وجود شرایط سبقت بررسی شده است و برای هر کدام از راهبردها، باید زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه به عنوان

ایستگاه و زمان انتظار مسافران در داخل وسیله نقلیه تشکیل شده است. تابع هدف مربوط به راهبرد کنترلی اولین توقف به صورت زیر است:

در فرمول (۱) قسمت اول تابع هدف زمان انتظار مسافرانی است که به طور تصادفی در فاصله زمانی بین دو اتوبوس i و $i-1$ به ایستگاه k می‌رسند و همچنین زمان انتظار اضافی مسافرانی که به دلیل تکمیل ظرفیت اتوبوس i در ایستگاه k منتظر اتوبوس $i+1$ می‌مانند. قسمت دوم تابع هدف نیز زمان انتظار مسافران سوار بر اتوبوسی است که باید به مدت H توقف داشته باشد. هر زمانی که اتوبوس مجبور به توقف باشد زمان انتظار مسافران داخل اتوبوس افزایش می‌یابد. در بیشتر پژوهش‌ها، راهبردهای توقف بدون توجه به زمان انتظار مسافران داخل اتوبوس عمل می‌کنند و به همین دلیل یک پارامتر θ که بین صفر و یک است در قسمت دوم تابع هدف در نظر گرفته شده است. θ زمانی که برابر با یک باشد نمایانگر این است که زمان انتظار برای مسافران در داخل وسیله نقلیه با زمان انتظار مسافران در خارج وسیله نقلیه دارای یک ارزش یکسان است و هر چه این ضریب به سمت صفر میل کند نشان می‌دهد که ارزش زمان انتظار مسافران داخل وسیله نقلیه نسبت به زمان انتظار مسافران داخل ایستگاه کمتر است.

M_{hold} : ماکزیمم زمان توقف قابل قبول

L_{max} : ظرفیت اتوبوس

$dwell_k$: زمان توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه k بر حسب دقیقه

M : عدد بزرگ

θ : ضریب زمان انتظار مسافران داخل وسیله نقلیه

• متغیرها

• متغیر باینری

V_{ik} : اگر ۱ باشد اتوبوس i هنگام حرکت از ایستگاه k

ظرفیتش تکمیل است در غیر این صورت صفر است.

D_{ik} مجموع تقاضای مسافر برای اتوبوس i در ایستگاه k

H_{ik} زمان توقف بهینه برای اتوبوس i در ایستگاه k

L_{ik} تعداد مسافران سوار بر اتوبوس i وقتی که از ایستگاه

k حرکت می‌کند.

P_{ik} تعداد مسافران جامانده از اتوبوس i در ایستگاه k به

دلیل تکمیل ظرفیت اتوبوس.

dt_{ik} زمان حرکت اتوبوس i از ایستگاه k

۲-۴ راهبرد کنترلی اولین توقف (First Holding)

(Strategy)

تابع هدف در این پژوهش کمینه‌سازی زمان انتظار مسافران است. این زمان انتظار از دو بخش زمان انتظار مسافران در

$$\min Z = \sum_{i=1}^I \sum_{k=l^i+1}^{k=l^i+N^i} \left[\frac{r_k (dt_{ik} - dt_{i-1,k})^2}{2} + P_{ik} (dt_{i+1,k} - dt_{ik}) \right] + \sum_{i=1}^I \theta (L_{i,k-1}) (1 - Q_{k-1}) H_i \quad (1)$$

$$L_{ik} \leq D_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (2)$$

$$L_{ik} \leq L_{max} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (3)$$

$$L_{ik} \geq L_{max} V_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (4)$$

$$L_{ik} \geq D_{ik} - M \cdot V_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (5)$$

$$dt_{i,k+1} = dt_{ik} + RR_{k+1} + dwell_{i,k} + H_i \quad \forall i \in I, k \in K ; k = l^i \quad (6)$$

$$dt_{i,k+1} = dt_{ik} + RR_{k+1} + dwell_{i,k} \quad \forall i \in I, k \in K ; k = l^i \quad (7)$$

$$H_i \leq M_{hold} \quad \forall i \in I \quad (8)$$

تأثیر شرایط سبقت اتوبوس ها در استراتژی کنترلی تمام توقف بر زمان انتظار مسافران

$$D_{i,k} = (1 - Q_k)L_{i,k-1} + r_k(dt_{ik} - dt_{i-1,k}) + P_{i-1,k} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (9)$$

$$P_{i,k} = D_{ik} - L_{max} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (10)$$

$$P_{ik}, L_{ik}, dt_{ik}, H_{ik}, D_{ik} \geq 0 \quad V_{ik} \in [0,1] \quad \forall i \in I, k \in K \quad (11)$$

بخش زمان انتظار مسافران در ایستگاه و زمان انتظار مسافران در داخل وسیله نقلیه تشکیل شده است. تابع هدف مربوط به راهبرد کنترلی تمام توقف در ادامه آورده شده است. در فرمول (۱۲) مانند تابع هدف راهبرد اولین توقف قسمت اول تابع هدف زمان انتظار مسافرانی است که به طور تصادفی در فاصله زمانی بین دو اتوبوس i و $i-1$ به ایستگاه k می‌رسند و همچنین زمان انتظار اضافی مسافرانی که به دلیل تکمیل ظرفیت اتوبوس i در ایستگاه k منتظر اتوبوس $i+1$ می‌مانند. قسمت دوم تابع هدف نیز زمان انتظار مسافران سوار بر اتوبوسی است که باید به مدت H توقف داشته باشد. همچنین پارامتر θ که بین صفر و یک است در قسمت دوم تابع هدف در نظر گرفته شده است. θ زمانی که برابر با یک باشد نمایانگر این است که زمان انتظار برای مسافران در داخل وسیله نقلیه با زمان انتظار مسافران در خارج وسیله نقلیه دارای یک ارزش یکسان است و هر چه این ضریب به سمت صفر میل کند نشان می‌دهد که ارزش زمان انتظار مسافران داخل وسیله نقلیه نسبت به زمان انتظار مسافران داخل ایستگاه کمتر است. تفاوت اصلی تابع هدف در راهبرد اولین توقف با راهبرد تمام توقف در قسمت دوم تابع هدف است. در تابع هدف راهبرد کنترلی تمام توقف H باید برای اتوبوس i در تمام ایستگاه‌های افق زمانی محاسبه گردد در حالیکه در تابع هدف راهبرد کنترلی اولین توقف H تنها برای اولی ایستگاه افق زمانی محاسبه می‌گردد. محدودیت (۱۳) تا (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) مانند محدودیت‌های راهبرد کنترلی اولین توقف از مدل پیشنهادی ذوالفقاری و همکاران (Zolfaghari, Azizi, and Jaber 2004) اقتباس شده است و تعداد مسافران سوار بر اتوبوس را به تقاضای مسافر و ظرفیت اتوبوس محدود می‌کند. و همان‌طور که اشاره شد اگر اتوبوس ظرفیتش کامل باشد محدودیت (۱۶) حذف و تعداد

محدودیت (۲) تا (۵)، (۸) و (۹) از مدل پیشنهادی ذوالفقاری و همکاران (Zolfaghari, Azizi, and Jaber 2004) اقتباس شده است. محدودیت (۲) تا (۵) تعداد مسافران سوار بر اتوبوس را به تقاضای مسافر و ظرفیت اتوبوس محدود می‌کند. بر این اساس اگر اتوبوس ظرفیتش کامل باشد محدودیت (۵) حذف و تعداد مسافران برابر با L_{max} می‌شود. اگر ظرفیت اتوبوس تکمیل نباشد آنگاه تعداد مسافران برابر با D_{ik} خواهد بود. محدودیت (۶) و (۷) برای محاسبه زمان حرکت اتوبوس i به ایستگاه $k+1$ خواهد بود. این محدودیت شامل زمان حرکت اتوبوس i از ایستگاه k ، زمان سفر ایستگاه بعدی، زمان توقف اتوبوس در ایستگاه k و H_i در صورتی که موجود باشد از محدودیت (۶) و در غیر این صورت از محدودیت (۷) استفاده می‌شود. مجموع آن‌ها در نهایت زمان حرکت اتوبوس i از ایستگاه $k+1$ را نشان می‌دهد. محدودیت (۸) نیز مشخص می‌کند که زمان توقف اتوبوس i نباید از M_{hold} بیشتر باشد که این محدودیت در شرایط عدم قطعیت (محدودیت نرم) بررسی می‌شود. محدودیت (۹) برای محاسبه تقاضای اتوبوس i در ایستگاه k است. این تقاضا از جمع مسافران سوار بر اتوبوس از ایستگاه قبلی، مسافرانی که در بین سرفاصله‌ی زمانی دو اتوبوس می‌رسند و مسافران جامانده از اتوبوس قبلی در همان ایستگاه به دست می‌آید. محدودیت (۱۰) نیز برای محاسبه تعداد مسافرانی است که در ایستگاه k از اتوبوس i جامانده‌اند و از تفاضل تقاضای اتوبوس i در ایستگاه k از ظرفیت اتوبوس به دست می‌آید.

۳-۴ راهبرد کنترلی تمام توقف (سناریو اول) (All)

(Holding Strategy)

همان‌طور که اشاره کردیم تابع هدف در این پژوهش کمینه‌سازی زمان انتظار مسافران است. این زمان انتظار از دو

بررسی می‌شود. محدودیت (۱۹) و (۲۰) نیز مانند راهبرد کنترلی اولین توقف می‌باشند و همان‌طور که اشاره شد محدودیت (۱۹) برای محاسبه تقاضای اتوبوس i در ایستگاه k است. این تقاضا از جمع مسافران سوار بر اتوبوس از ایستگاه قبلی، مسافرانی که در بین سرفاصله‌ی زمانی دو اتوبوس می‌رسند و مسافران جامانده از اتوبوس قبلی در همان ایستگاه به دست می‌آید. محدودیت (۲۰) نیز برای محاسبه تعداد مسافرانی است که در ایستگاه k از اتوبوس i جامانده‌اند و از تفاضل تقاضای اتوبوس i در ایستگاه k از ظرفیت اتوبوس به دست می‌آید.

مسافران برابر با L_{max} می‌شود. اگر ظرفیت اتوبوس تکمیل نباشد آنگاه تعداد مسافران برابر با D_{ik} خواهد بود. محدودیت (۱۷) برای محاسبه زمان حرکت اتوبوس i به ایستگاه $k+I$ خواهد بود. این محدودیت نیز شامل زمان حرکت اتوبوس i از ایستگاه k ، زمان سفر ایستگاه بعدی، زمان توقف اتوبوس در ایستگاه بعدی و $H_{i,k+1}$ در صورت وجود است که مجموع آن‌ها زمان حرکت اتوبوس i از ایستگاه $k+I$ را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۸) نیز مشخص می‌کند که مجموع زمان‌های توقف در ایستگاه‌هایی که در افق زمانی قرار دارند نباید از M_{hold} بیشتر باشد و در شرایط عدم قطعیت (محدودیت نرم)

$$\min Z = \sum_{i=1}^I \sum_{k=l^i+1}^{k=l^i+N^i} \left[\frac{r_k(dt_{ik} - dt_{i-1,k})^2}{2} + P_{ik}(dt_{i+1,k} - dt_{ik}) \right] + \sum_{i=1}^I \sum_{k=l^i}^{k=l^i+N^i-1} \theta(L_{ik})(1 - Q_{k+1})(H_{i,k+1}) \quad (12)$$

$$L_{ik} \leq D_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (13)$$

$$L_{ik} \geq L_{max} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (14)$$

$$L_{ik} \leq L_{max} V_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (15)$$

$$L_{ik} \geq D_{ik} - M \cdot V_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (16)$$

$$dt_{i,k+1} = dt_{ik} + RR_{k+1} + dwell_{k+1} + H_{i,k+1} \quad \forall i \in I, k \in K; l^i \leq k \leq l^i + N^i - 1 \quad (17)$$

$$\sum_k H_{ik} \leq M_{hold} \quad \forall i \in I \quad (18)$$

$$D_{i,k} = (1 - Q_k)L_{i,k-1} + r_k(dt_{ik} - dt_{i-1,k}) + P_{i-1,k} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (19)$$

$$P_{i,k} = D_{ik} - L_{max} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (20)$$

$$P_{ik}, L_{ik}, dt_{ik}, H_{ik}, D_{ik} \geq 0 \quad V_{ik} \in [0,1] \quad \forall i \in I, k \in K \quad (21)$$

$$dt_{ik} \geq dt_{i-1,k} + 1 \quad (22)$$

محدودیت (۲۲) به این معناست که هیچ دو اتوبوسی نه تنها نمی‌توانند از هم سبقت بگیرند بلکه زمان حرکت اتوبوس i از ایستگاه k نسبت به اتوبوس قبلی‌اش یعنی $i-1$ حداقل یک دقیقه باهم اختلاف دارند.

۵. نتایج و تحلیل

یک مسیر فرضی شامل ۱۰ ایستگاه و ۶ اتوبوس در نظر گرفته شده است که ایستگاه شماره ۵ و ۱۰ به‌عنوان پایانه‌های مسیر

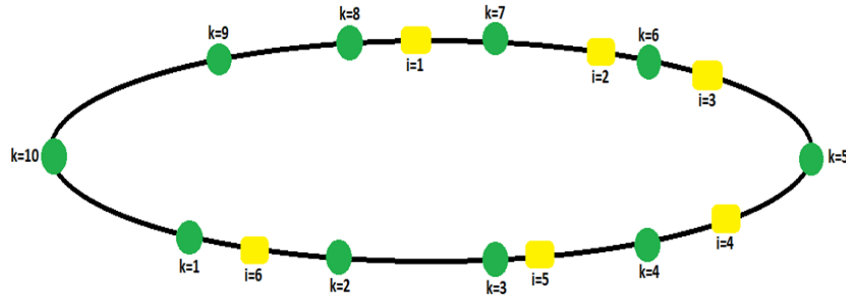
۴-۴ راهبرد کنترلی تمام توقف (سناریو دوم)

در حالت قبل اتوبوس‌ها شرایط سبقت از هم را داشتند. حالت دیگر در شرایطی است که اتوبوس‌ها نتوانند سبقت بگیرند و علاوه بر آن هیچ دو اتوبوسی هم‌زمان باهم به ایستگاه k نرسند. همان‌طور که اشاره شد تابع هدف در هر دو سناریو یکسان است که در فرمول (۱۲) در قسمت قبل به آن اشاره شد. تمام محدودیت‌های (۱۳) تا (۲۱) نیز بین دو سناریو مشترک هستند. تنها تفاوتی که ایجاد می‌شود اضافه شدن یک محدودیت جدید در سناریوی دوم است.

تأثیر شرایط سبقت اتوبوس ها در استراتژی کنترلی تمام توقف بر زمان انتظار مسافران

موردنظر انتخاب شده‌اند. افق زمانی مسئله موردنظر ۳، حداکثر زمان توقف اتوبوس‌ها برابر با ۴ دقیقه و ضریب θ برابر با یک در نظر گرفته شده است. نحوه قرارگیری اولیه‌ی اتوبوس‌ها در شکل زیر نشان داده شده است.

در نظر گرفته شده است. نحوه قرارگیری اولیه‌ی اتوبوس‌ها در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۱. نحوه قرارگیری اتوبوس‌ها

در جدول زیر اطلاعات ثابت مربوط به مسئله موردنظر آورده شده است. با توجه به اطلاعات اولیه، مدل موردنظر برای هر دو سناریو در نرم‌افزار GAMS نسخه ۲، ۱، ۲۵ شبیه‌سازی شده است.

در جدول زیر اطلاعات ثابت مربوط به مسئله موردنظر آورده شده است. با توجه به اطلاعات اولیه، مدل موردنظر برای هر دو سناریو در نرم‌افزار GAMS نسخه ۲، ۱، ۲۵ شبیه‌سازی شده است.

جدول ۱. اطلاعات ثابت مسئله

شماره ایستگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
نرخ رسیدن مسافر به هر ایستگاه (η_k)	۲	۱/۵	۲	۱/۵	۴	۲	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۴
درصد مسافران پیاده شده در هر ایستگاه (Q_k)	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۱	۰/۲	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۱
زمان سفر بین دو ایستگاه (RR_k)	۳	۳	۲	۲	۳	۴	۲	۲	۳	۲
زمان توقف در هر ایستگاه ($dwell_k$)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول ۲. مقایسه زمان انتظار مسافران برای سناریوهای مختلف

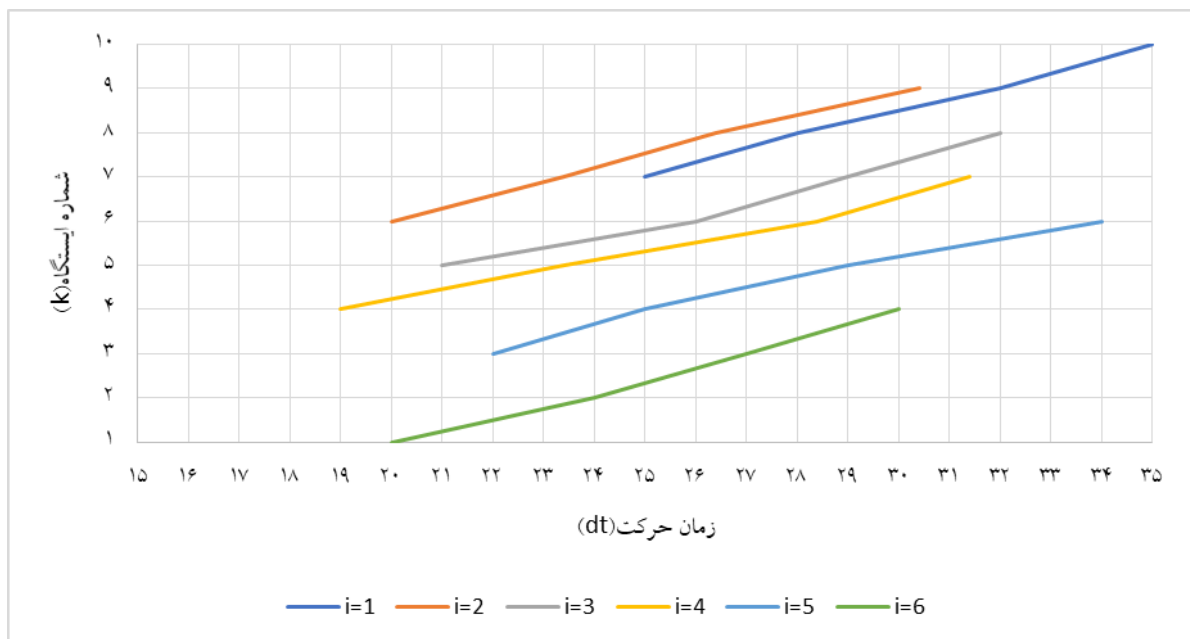
بدون راهبرد کنترلی	نوع راهبرد کنترلی			زمان حل مسئله
	تمام توقف (سناریو اول)	تمام توقف (سناریو دوم)	اولین توقف	
	۴۰۷۰	۴۱۳۳	۴۱۲۸	زمان انتظار مسافران (دقیقه)
۴۲۶۵	۱۹۵	۱۳۲	۱۳۷	مقدار زمان انتظار کاهش یافته (دقیقه)
	۴/۵	۳	۳/۲	درصد بهبود زمان انتظار مسافران نسبت به حالت بدون کنترل

همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌کنید زمان انتظار مسافران در حالت‌های مختلف توسط نرم‌افزار GAMS محاسبه شده است. در حالتی که هیچ راهبرد برای حرکت اتوبوس‌ها در نظر گرفته نشده است زمان انتظار مسافران ۴۲۶۵ دقیقه گزارش شده است. در راهبرد کنترلی اولین توقف زمان

انتظار مسافران ۴۱۲۸ دقیقه، در سناریوی اول راهبرد کنترلی تمام توقف (وجود شرایط سبقت) زمان انتظار مسافران ۴۰۷۰ دقیقه و در سناریوی دوم راهبرد کنترلی تمام توقف (عدم وجود شرایط سبقت) ۴۱۳۳ دقیقه به دست آمده است. همان‌طور که مشخص است در راهبرد کنترلی اولین توقف زمان انتظار

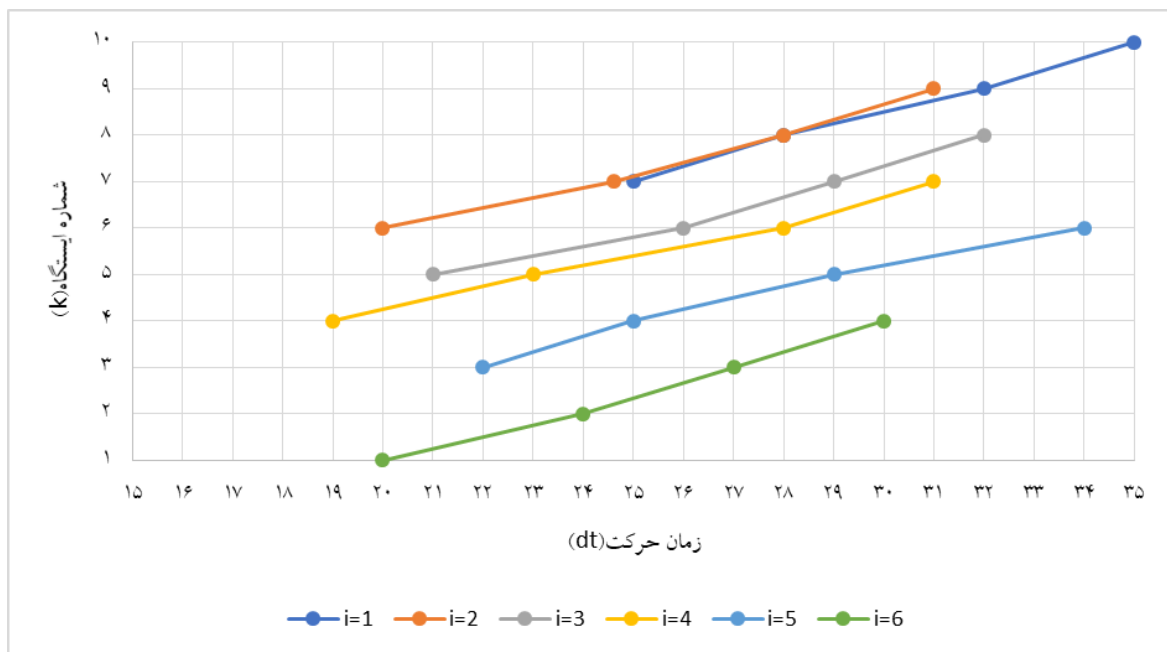
سناریوی دوم راهبرد کنترلی تمام توقف و راهبرد کنترلی اولین توقف تقریباً یکسان است. زمان حرکت اتوبوس‌ها در افق زمانی برای راهبرد کنترلی اولین توقف برداشت شده است. این اعداد نمایانگر dt_{ik} می‌باشند. اولین زمان حرکت برای هر اتوبوس i در شرایط واقعی باید از سیستم‌های موقعیت‌یاب خودکار (AVL) استخراج شود. اتوبوس ۲ در ایستگاه ۷ به مدت ۰,۴ دقیقه و اتوبوس ۴ در ایستگاه ۵ به مدت ۰,۴ دقیقه توقف داشته است. این مقادیر همان H_{ik} می‌باشند. گراف حرکتی هر کدام از اتوبوس‌ها در شکل زیر برای راهبرد کنترلی اولین توقف نشان داده شده است. همان‌طور که در گراف زیر هم مشخص است اتوبوس‌ها هیچ‌گونه تداخلی با یکدیگر ندارند و هیچ اتوبوسی از اتوبوس دیگر سبقت نمی‌گیرد.

مسافران ۱۳۷ دقیقه، در سناریوی اول راهبرد کنترلی تمام توقف زمان انتظار مسافران ۱۹۵ دقیقه و در سناریوی دوم راهبرد کنترلی تمام توقف ۱۳۲ دقیقه نسبت به حالت بدون راهبرد کنترلی کاهش یافته است که به ترتیب ۳,۲ درصد، ۴,۵ درصد و ۳ درصد بهبود زمان انتظار مسافران نسبت به حالت بدون راهبرد کنترلی مشاهده می‌شود. در مجموع مشاهده می‌شود که کاربرد راهبرد کنترلی باعث کاهش زمان انتظار مسافران و بهبود عملکرد سیستم BRT می‌گردد و در سناریوی اول راهبرد کنترلی تمام توقف، نسبت به راهبرد کنترلی اولین توقف و سناریوی دوم راهبرد کنترلی تمام توقف، این کاهش زمان انتظار بیشتر است و حدود یک و نیم درصد زمان انتظار مسافران بیشتر کاهش یافته است. در صد بهبود زمان انتظار مسافران در



شکل ۲. گراف حرکتی اتوبوس‌ها برای راهبرد اولین توقف

تأثیر شرایط سبقت اتوبوس‌ها در استراتژی کنترلی تمام توقف بر زمان انتظار مسافران

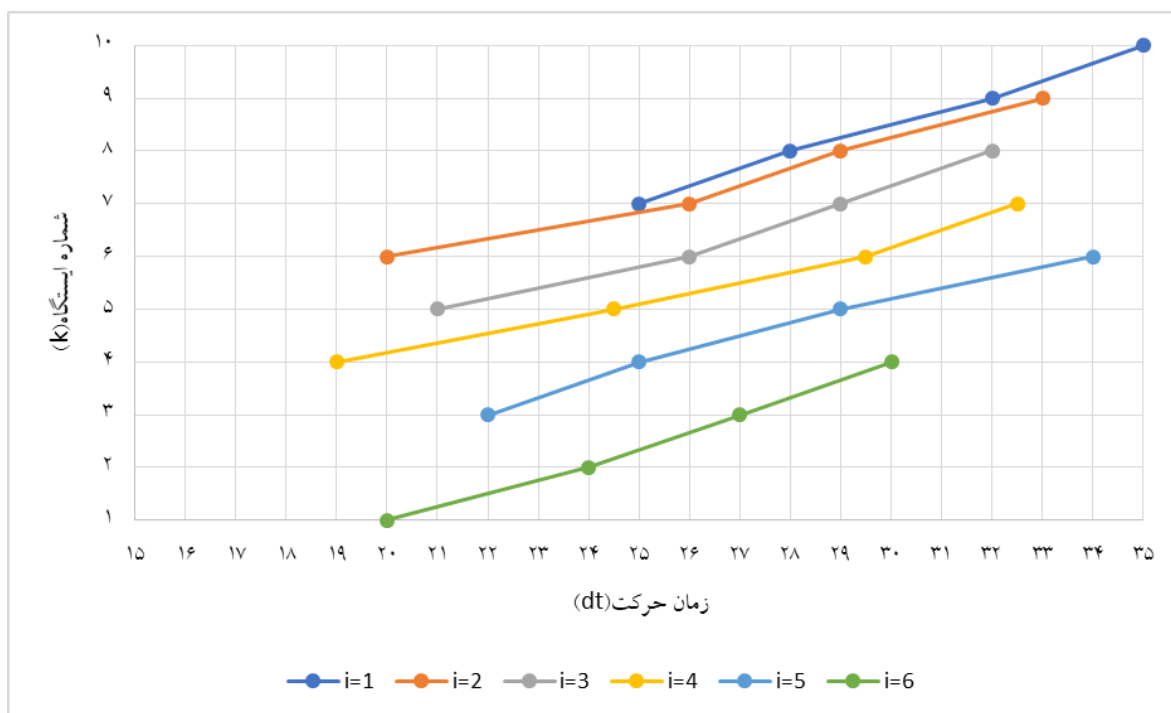


شکل ۳. گراف حرکتی اتوبوس‌ها برای راهبرد تمام توقف (سناریوی اول)

اول (وجود شرایط سبقت) توقف برای اتوبوس ۲ می‌تواند در ایستگاه‌های ۸،۷ و ۹ هرکدام به‌تنهایی اتفاق بیفتد یا اینکه زمان توقف بین سه ایستگاه پخش شود که این زمان توقف برای ایستگاه‌های ۷ و ۸ در نظر گرفته شده است. برخلاف سناریوی اول در سناریوی دوم (عدم وجود شرایط سبقت) زمان توقف فقط به ایستگاه ۷ اختصاص داده شده است. علاوه بر این در سناریوی دوم برای اتوبوس ۴ در ایستگاه ۵ نیز یک زمان توقف در نظر گرفته شده است. گراف حرکتی هرکدام از اتوبوس‌ها در نمودار زیر برای سناریوی دوم نشان داده شده است. همان‌طور که در گراف زیر هم مشخص است اتوبوس‌ها هیچ‌گونه تداخلی باهم ندارند و هیچ اتوبوسی از اتوبوس دیگر سبقت نمی‌گیرد.

زمان حرکت اتوبوس‌ها در افق زمانی برای سناریوی اول راهبرد کنترلی تمام توقف برداشت شده است. این اعداد نمایانگر dt_{ik} می‌باشند. اتوبوس ۲ در ایستگاه ۷ به مدت ۱،۶ دقیقه و در ایستگاه ۸ به مدت ۰،۴ دقیقه توقف داشته است. این مقادیر همان H_{ik} می‌باشند.

گراف حرکتی هرکدام از اتوبوس‌ها در نمودار بالا برای سناریوی اول نشان داده شده است. همان‌طور که در گراف زیر هم مشخص است اتوبوس ۲ بعد از ایستگاه ۸ از اتوبوس ۱ سبقت می‌گیرد. دیگر اتوبوس‌ها هیچ‌گونه تداخلی با یکدیگر ندارند. در زمان حرکت اتوبوس‌ها در افق زمانی برای سناریوی دوم راهبرد کنترلی اتوبوس ۲ در ایستگاه ۷ به مدت ۳ دقیقه و اتوبوس ۴ در ایستگاه ۵ به مدت ۱،۵ دقیقه توقف داشته‌اند. در سناریوی



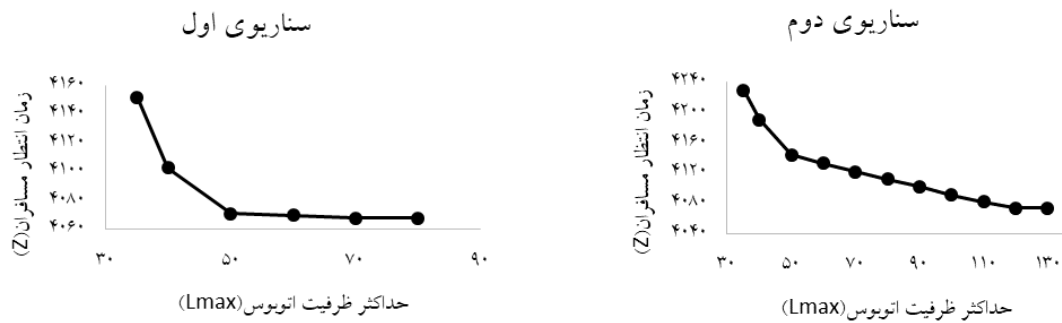
شکل ۴. گراف حرکتی اتوبوس‌ها برای راهبرد تمام توقف (سناریوی دوم)

۱-۵ تحلیل حساسیت

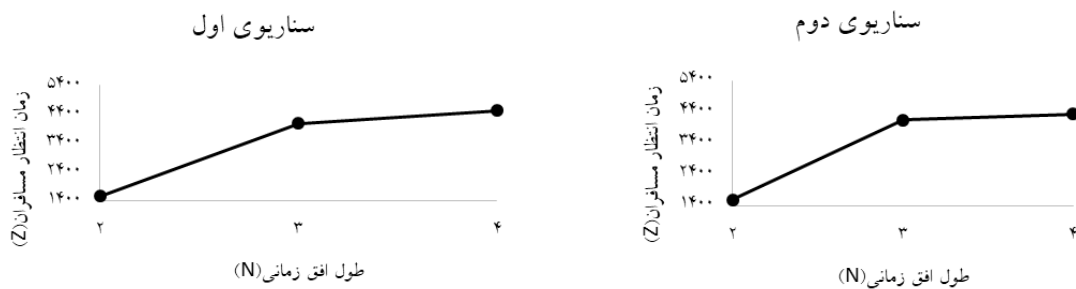
یک تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای ورودی در مثال فرضی انجام شده است و تاثیر آن بر روی تابع هدف مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مثال فرضی مطرح شده تغییراتی در حداکثر ظرفیت اتوبوس و طول افق زمانی صورت گرفته است و تاثیر آن بر روی تابع هدف در نمودارهایی بررسی شده است. در شکل ۵ نمودار تاثیر تغییرات حداکثر ظرفیت اتوبوس بر روی زمان انتظار مسافران نشان داده شده است. تاثیر این تغییرات جداگانه در هر کدام از سناریوهای راهبرد تمام توقف مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشخص است در هر دو نمودار برای دو سناریوی مختلف، با افزایش ظرفیت اتوبوس زمان انتظار مسافران کاهش می‌یابد. در نمودار مربوط به سناریوی اول

(وجود شرایط سبقت) بعد از اینکه ظرفیت اتوبوس به ۵۰ نفر رسید، با افزایش ظرفیت اتوبوس، تغییرات چندانی در زمان انتظار مسافران مشاهده نمی‌شود. اما در نمودار مربوط به سناریوی دوم (عدم وجود شرایط سبقت) تا ظرفیت ۱۲۰ نفر کاهش زمان انتظار مسافران مشاهده می‌شود و پس از آن تغییرات چندانی در کاهش زمان انتظار مسافران پدید نمی‌آید. در شکل ۶ نمودار تاثیر تغییرات طول افق زمانی بر روی زمان انتظار مسافران نشان داده شده است. زمان انتظار مسافران در سه افق زمانی با طول‌های ۲، ۳ و ۴ بررسی شده است. همان‌طور که مشخص است در نمودار مربوط به راهبرد کنترلی تمام توقف برای هر دو سناریو با افزایش طول افق زمانی، زمان انتظار مسافران افزایش یافته است.

تاثیر شرایط سبقت اتوبوس ها در استراتژی کنترلی تمام توقف بر زمان انتظار مسافران



شکل ۵. نمودار تاثیر تغییرات حداکثر ظرفیت اتوبوس بر روی زمان انتظار مسافران



شکل ۶. نمودار تاثیر تغییرات طول افق زمانی بر روی زمان انتظار مسافران

به حالت‌های دیگر بیشتر است و افزایش ظرفیت اتوبوس در سناریوی دوم راهبرد تمام توقف در کاهش زمان انتظار مسافران مؤثرتر واقع شده است. پس‌از آن به ترتیب راهبرد اولین توقف و سناریوی اول راهبرد تمام توقف نسبت به افزایش ظرفیت اتوبوس در بهبود زمان انتظار مسافران حساس هستند. در شکل ۸ نمودار تاثیر تغییرات طول افق زمانی بر روی زمان انتظار مسافران در راهبرد کنترلی اولین توقف نشان داده شده است. زمان انتظار مسافران در سه افق زمانی با طول‌های ۲، ۳ و ۴ بررسی شده است. همان‌طور که مشخص است در نمودار مربوطه با افزایش طول افق زمانی، زمان انتظار مسافران همانند نمودارهای مربوط به راهبرد کنترلی تمام توقف برای هر دو سناریو، در اینجا نیز افزایش یافته است.

در شکل ۷ نمودار تاثیر تغییرات حداکثر ظرفیت اتوبوس بر روی زمان انتظار مسافران برای راهبرد کنترلی اولین توقف نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص با افزایش ظرفیت اتوبوس زمان انتظار مسافران کاهش می‌یابد. در نمودار مربوطه بعدازاینکه ظرفیت اتوبوس به ۹۰ نفر رسید، با افزایش ظرفیت اتوبوس، تغییری در زمان انتظار مسافران مشاهده نمی‌شود. همان‌طور که اشاره شد در نمودار مربوط به راهبرد تمام توقف در سناریوی اول (وجود شرایط سبقت) بعدازاینکه ظرفیت اتوبوس به ۵۰ نفر رسید، با افزایش ظرفیت اتوبوس، تغییرات چندانی در زمان انتظار مسافران مشاهده نشد و در نمودار مربوط به راهبرد تمام توقف سناریوی دوم (عدم وجود شرایط سبقت) تا ظرفیت ۱۲۰ نفر کاهش زمان انتظار مسافران مشاهده شد و پس‌از آن تغییرات چندانی در کاهش زمان انتظار مسافران پدید نمی‌آید. در واقع تاثیر افزایش ظرفیت اتوبوس در راهبرد کنترلی تمام توقف در سناریوی دوم بر روی مقدار کاهش زمان انتظار مسافران نسبت

ظرفیت اتوبوس و طول افق زمانی صورت گرفت و تاثیر آن بر روی تابع هدف در نمودارهایی بررسی شد. در تاثیر تغییرات حداکثر ظرفیت اتوبوس بر روی زمان انتظار مسافران، تاثیر این تغییرات جداگانه در هر کدام از سناریوها مورد بررسی قرار گرفت و در هر دو نمودار برای دو سناریوی مختلف، با افزایش ظرفیت اتوبوس زمان انتظار مسافران کاهش یافت و در تاثیر تغییرات طول افق زمانی بر روی زمان انتظار مسافران در سه افق زمانی با طولهای ۲، ۳ و ۴ با افزایش طول افق زمانی، زمان انتظار مسافران افزایش یافت. در ادامه تاثیر تغییرات حداکثر ظرفیت اتوبوس بر روی زمان انتظار مسافران برای راهبرد کنترلی اولین توقف نشان داده شد که مشخص شد با افزایش ظرفیت اتوبوس زمان انتظار مسافران کاهش می یابد و در نمودار مربوط به افزایش طول افق زمانی، زمان انتظار مسافران همانند نمودارهای مربوط به راهبرد کنترلی تمام توقف برای هر دو سناریو، در آن جا نیز افزایش یافت.

۷. مراجع

– نایبی، ذگردی، امین ناصری، یقینی، (۱۳۹۵). "بهینه سازی راهبردهای مدیریت اختلال در خطوط راه آهن شهری با استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر"، مهندسی حمل و نقل، سال نهم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۷.

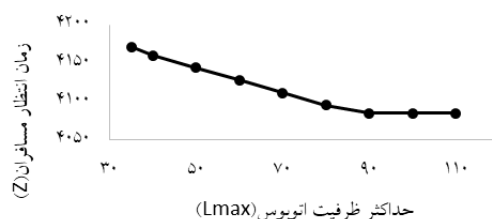
– Abkowitz, Mark, Amir Eiger, and Israel Engelstein. 1986. "Optimal Control of Headway Variation on Transit Routes." *Journal of Advanced Transportation* 20(1): 73–88. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/atr.5670200106>.

– Asgharzadeh, Mohamad Amin. 2017. Real-Time Bus Holding Control Strategy to Reduce Passenger Waiting Time.

– Barnett, Arnold. 1974. "On Controlling Randomness in Transit Operations." *Transportation Science* 8(2): 102–16. <https://doi.org/10.1287/trsc.8.2.102>.

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال شانزدهم / شماره سوم (۶۴) / بهار ۱۴۰۴

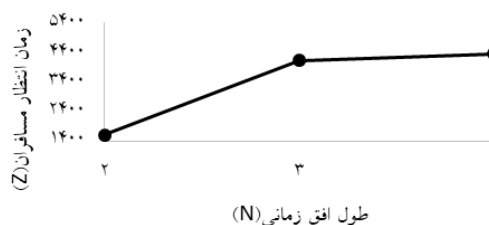
راهبرد اولین توقف



شکل ۷. نمودار تاثیر تغییرات حداکثر ظرفیت اتوبوس بر زمان

انتظار مسافران در راهبرد کنترلی اولین توقف

راهبرد اولین توقف



شکل ۸. نمودار تاثیر تغییرات طول افق زمانی بر زمان انتظار

مسافران در راهبرد کنترلی اولین توقف

۶. نتیجه گیری

در ابتدای نتایج این پژوهش زمان انتظار مسافران در حالت های مختلف توسط نرم افزار GAMS محاسبه شده است. در حالت بدون راهبرد برای حرکت اتوبوس ها زمان انتظار مسافران ۴۲۶۵، در راهبرد کنترلی اولین توقف زمان انتظار مسافران ۴۱۲۸ دقیقه، در سناریوی اول راهبرد کنترلی تمام توقف (وجود شرایط سبقت) زمان انتظار مسافران ۴۰۷۰ دقیقه و در سناریوی دوم راهبرد کنترلی تمام توقف (عدم وجود شرایط سبقت) ۴۱۳۳ دقیقه به دست آمده است. همان طور که از نتایج مشخص است کاربرد راهبرد کنترلی باعث کاهش زمان انتظار مسافران می گردد و در سناریوی اول راهبرد کنترلی تمام توقف، نسبت به راهبرد کنترلی اولین توقف و سناریوی دوم راهبرد کنترلی تمام توقف، این کاهش زمان انتظار بیشتر است.

همان طور که گفته شد تحلیل حساسیت بر روی پارامتر حداکثر

- Ibarra-Rojas, O J, F Delgado, R Giesen, and J C Muñoz. 2015. “Planning, Operation, and Control of Bus Transport Systems: A Literature Review.” *Transportation Research Part B: Methodological* 77: 38–75. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261515000454>.
- Koffman, David. 1978. “A Simulation Study of Alternative Real-Time Bus Headway Control Strategies.” *Transportation Research Record* 663: 41–46.
- Laskaris, Georgios et al. 2021. “A Holding Control Strategy for Diverging Bus Lines.” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 126: 103087. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X2100108X>.
- Liang, Shidong, Shengxue He, Hu Zhang, and Minghui Ma. 2021. “Optimal Holding Time Calculation Algorithm to Improve the Reliability of High Frequency Bus Route Considering the Bus Capacity Constraint.” *Reliability Engineering & System Safety* 212: 107632. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832021001733>.
- Liang, Shidong, Minghui Ma, and Shengxue He. 2019. “Multiobjective Optimal Formulations for Bus Fleet Size of Public Transit under Headway-Based Holding Control” ed. Dongjoo Park. *Journal of Advanced Transportation* 2019: 2452348. <https://doi.org/10.1155/2019/2452348>.
- Moreira-Matias, Luís et al. 2016. “An Online Learning Approach to Eliminate Bus Bunching in Real-Time.” *Applied Soft Computing* 47: 460-82. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494616303118>.
- Chen, Weiya, Hengpeng Zhang, Chunxiao Chen, and X Wei. 2021. “An Integrated Bus Holding and Speed Adjusting Strategy Considering Passenger’s Waiting Time Perceptions.” *Sustainability* 13: 5529.
- Delgado, Felipe, Juan Carlos Muñoz, Ricardo Giesen, and Aldo Cipriano. 2009. “Real-Time Control of Buses in a Transit Corridor Based on Vehicle Holding and Boarding Limits.” *Transportation Research Record* 2090(1): 59–67. <https://doi.org/10.3141/2090-07>.
- Eberlein, Xu Jun, Nigel H M Wilson, and David Bernstein. 2001. “The Holding Problem with Real-Time Information Available.” *Transportation Science* 35(1): 1–18. <https://doi.org/10.1287/trsc.35.1.1.10143>.
- Eberlein, Xujun, Nigel H M Wilson, and David Bernstein. 1999. “Modeling Real-Time Control Strategies in Public Transit Operations.” *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*: 325–46.
- Engelstein, I. 1983. “METHODS FOR MAINTAINING BUS SERVICE REGULARITY.”
- Fu, Liping, and Xuhui Yang. 2002. “Design and Implementation of Bus-Holding Control Strategies with Real-Time Information.” *Transportation Research Record* 1791(1): 6–12. <https://doi.org/10.3141/1791-02>.
- Gkiotsalitis, Konstantinos. 2019. *Bus Holding Control of Running Buses in Time Windows*.
- Hickman, Mark D. 2001. “An Analytic Stochastic Model for the Transit Vehicle Holding Problem.” *Transportation Science* 35(3): 215–37. <https://doi.org/10.1287/trsc.35.3.215.10150>.

Strategy in Public Transit Systems with Real-Time Information.” *International Journal of Transport Management* 2(2): 99–110. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1471405105000030>.

– Newell, Gordon Frank, and Renfrey Burnard Potts. 1964. “Maintaining a Bus Schedule.” In *Australian Road Research Board (ARRB) Conference, 2nd, 1964, Melbourne.*

– O_Dell, Susan W, and Nigel H M Wilson. 1999. “Optimal Real-Time Control Strategies for Rail Transit Operations during Disruptions.” *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems: 299–323.*

– Osuna, E E, and G F Newell. 1972. “Control Strategies for an Idealized Public Transportation System.” *Transportation Science* 6(1): 52–72. <https://doi.org/10.1287/trsc.6.1.52>.

– Sánchez-Martínez, G E, Haris Koutsopoulos, and N H M Wilson. 2016. “Real-Time Holding Control for High-Frequency Transit with Dynamics.” *Transportation Research Part B: Methodological* 83: 1–19.

– Turnquist, Mark A. 1981. “STRATEGIES FOR IMPROVING RELIABILITY OF BUS TRANSIT SERVICE.” *Transportation Research Record.*

– Turnquist, Mark A, and Steven W Blume. 1980. “EVALUATING POTENTIAL EFFECTIVENESS OF HEADWAY CONTROL STRATEGIES FOR TRANSIT SYSTEMS.” *Transportation Research Record.*

– Wang, Jiawei, and Lijun Sun. 2020. “Dynamic Holding Control to Avoid Bus Bunching: A Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Framework.” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 116: 102661. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X20305763>.

– Zolfaghari, Saeed, Nader Azizi, and Mohamad Y Jaber. 2004. “A Model for Holding

تأثیر شرایط سبقت اتوبوس ها در استراتژی کنترلی تمام توقف بر زمان انتظار مسافران

مسعود محمد حسین میرزایی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی خط و سازه را در سال ۱۳۹۸ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. ایشان در سال ۱۴۰۱ موفق به کسب درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- حمل و نقل از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، ایمنی جاده ای، مدلسازی و بهینه سازی در حمل و نقل است.



عبدالرضا شیخ الاسلامی، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران را به ترتیب در سال- های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۴ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۸۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران از دانشگاه تهران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان حمل و نقل هوایی، دریایی و لجستیک بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه علم و صنعت ایران می باشد.



میر سامان پیشوایی، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را به ترتیب در سال های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۷ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر اخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۹۱ موفق به کسب درجه دکتری در رشته صنایع از دانشگاه تهران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت زنجیره تأمین و لجستیک و طراحی و بهینه سازی سیستم ها بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه علم و صنعت ایران می باشد.

