

استراتژی کنترلی توقف اتوبوس‌ها در تمام ایستگاه‌های افق زمانی در شرایط امکان سبقت و عدم امکان سبقت برای اتوبوس‌ها

مقاله علمی-پژوهشی

عبدالرضا شیخ‌الاسلامی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
مسعود میرزایی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Sheikh@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

صفحه ۵۰۶-۴۹۳

چکیده

سیستم‌های حمل‌ونقلی سیستم‌های ناپایداری هستند و این ناپایداری بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم‌های حمل‌ونقل تاثیر می‌گذارد. برای افزایش قابلیت اطمینان می‌توان از استراتژی‌های کنترلی استفاده کرد. یکی از استراتژی‌های کنترلی، توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها می‌باشد. در این پژوهش از استراتژی کنترلی توقف در تمام ایستگاه‌های افق زمانی استفاده شده است. برای استراتژی کنترلی توقف، سناریوی عدم وجود شرایط سبقت اتوبوس‌ها و سناریوی وجود شرایط سبقت اتوبوس‌ها مورد بررسی قرار گرفته است و برای هر کدام یک مدل ریاضی جداگانه ارائه شده است. در مدل ریاضی ارائه شده، تاثیر استراتژی کنترلی توقف، بر زمان انتظار مسافران داخل اتوبوس و داخل ایستگاه مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه یک مثال فرضی برای حل مدل تعریف شده است و بر روی برخی پارامترهای مدل تحلیل حساسیت انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که زمان انتظار مسافران در حالتی که از استراتژی کنترلی استفاده شده است نسبت به حالت بدون استراتژی کنترلی بین ۳ تا ۴/۵ درصد کاهش یافته است.

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

۱-مقدمه

اطمینان سیستم‌های حمل‌ونقلی کمک می‌کند (Turnquist 1981). سیستم‌های حمل‌ونقل شهری مانند اتوبوس‌های شهری، مترو، بی آر تی و... ذاتا سیستم‌های ناپایداری هستند و این ناپایداری بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان مثل زمان سفر، زمان انتظار مسافران و ... تاثیر گذار است (Newell and Potts 1964). وجود اختلال در سیستم‌های حمل‌ونقل، زمان سفر، زمان رسیدن وسایل حمل‌ونقل عمومی به ایستگاه و سرفاصله‌ی زمانی مورد نظر و مطلوب را دست‌خوش تغییر می‌کند و نتایج آن می‌تواند افزایش زمان انتظار مسافران را به همراه داشته باشد. در سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، دسته‌ای شدن اتوبوس‌ها به پدیده‌ای اطلاق می‌شود که در آن گروهی

در بسیاری از شهرها وجود ترافیک باعث مشکلاتی مانند آلودگی هوا، افزایش زمان سفر، افزایش زمان تاخیر و ... می‌شود و هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم زیادی را به کاربران تحمیل می‌کند. افزایش کارایی سیستم‌های حمل‌ونقل شهری باعث کاهش زمان تاخیر وارد بر مسافران و افزایش رضایت عمومی از این سیستم‌ها و در نتیجه افزایش میزان استفاده‌ی کاربران از سیستم حمل‌ونقل شهری به‌جای استفاده از خودروی شخصی است. قابلیت اطمینان یکی از موضوعات مهم در استفاده از سیستم‌های حمل‌ونقل است و همواره آژانس‌های حمل‌ونقلی برای رسیدن به سطح مطلوبی از قابلیت اطمینان در تلاش هستند و استراتژی‌های کنترلی به بالا بردن قابلیت

اتوبوس رزرو به شبکه می‌باشند. از سیستم‌های موقعیت‌یاب خودکار برای جمع‌آوری اطلاعات مربوط به استراتژی‌های 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. اطلاعات پویا شامل: ۱- زمان حرکت اتوبوس از آخرین ایستگاه ۲- تعداد مسافران سوار بر اتوبوس در هنگام حرکت از آخرین ایستگاه. اطلاعات ثابت شامل: ۱- نرخ رسیدن مسافر به هر ایستگاه ۲- درصد پیاده شدن مسافران در هر ایستگاه ۳- زمان سفر برای هر اتوبوس بین دو ایستگاه متوالی ۴- حداکثر ظرفیت هر اتوبوس ۵- زمان توقف اتوبوس در هر ایستگاه. در این مقاله به بررسی استراتژی توقف اتوبوس‌ها در تمام ایستگاه‌های افق زمانی و تاثیر آن بر زمان انتظار مسافران در یک خط بی‌ار تی پرداخته می‌شود. در قسمت (۲) این مقاله مروری بر مطالعات گذشته انجام شده است. در قسمت (۳) تابع هدف و محدودیت‌ها در استراتژی کنترلی توقف اتوبوس‌ها، برای دو سناریوی عدم امکان سبقت اتوبوس‌ها و وجود امکان سبقت در اتوبوس‌ها در نظر گرفته شده است. برای هر کدام از سناریوها 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 استراتژی مقایسه گردیده است. سپس به بررسی محدودیت مربوط به حداکثر زمان توقف اتوبوس‌ها در شرایط عدم قطعیت (محدودیت نرم) و تاثیر آن بر روی تابع هدف پرداخته شده است. در قسمت (۴) نتایج و تحلیل‌های مربوط به یک مثال فرضی، تحلیل حساسیت مربوط به برخی پارامترها و یک مطالعه موردی نیز ارائه گردیده است. در قسمت (۵) نیز نتیجه‌گیری نهایی انجام گرفته است.

۲-پیشینه تحقیق

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

متشکل از دو یا چند اتوبوس به طور هم‌زمان به یک ایستگاه اتوبوس می‌رسند. برای حل این قبیل مشکلات از استراتژی‌های کنترلی استفاده می‌شود که باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های حمل‌ونقل شهری و در نتیجه کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه می‌گردد (Wang and Sun 2020).

این استراتژی‌ها به دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند:

۱- استراتژی‌های کنترلی بلندمدت که به طراحی و برنامه‌ریزی اساسی نیاز دارند.

۲- استراتژی‌های کنترلی کوتاه‌مدت که بر اساس اطلاعات پویا و در زمان بهره‌برداری از سیستم به کار می‌روند.

استراتژی‌های کنترلی برنامه‌ریزی معمولاً شامل بهبود زیرساخت‌ها، ایجاد تغییر در جدول زمانی اعزام اتوبوس‌ها و یا افزودن ناوگان جدید به سیستم حمل‌ونقل مورد نظر می‌باشد. این نوع استراتژی نیازمند سرمایه‌گذاری کلان در سیستم حمل‌ونقل مورد نظر می‌باشد (Asgharzadeh 2017).

استراتژی‌های کنترلی بر اساس اطلاعات پویا شامل توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه، چرخش کوتاه، اعزام اتوبوس خالی و عبور اتوبوس بدون توقف در برخی ایستگاه‌ها می‌باشد

(Turnquist and Blume 1980). استراتژی‌های کنترلی

بر اساس اطلاعات پویا به سه دسته‌ی کنترل‌های ایستگاه، بین ایستگاه‌ها و سایر تقسیم می‌شوند (X. Eberlein et al.

1998). کنترل‌های ایستگاه شامل توقف اتوبوس‌ها، عبور

اتوبوس بدون توقف در ایستگاه و چرخش کوتاه تقسیم می‌شوند. استراتژی توقف اتوبوس‌ها زمانی استفاده می‌شود که

یک اتوبوس از برنامه زمانی خود جلوتر باشد. این استراتژی‌ها می‌توانند تغییرات سرفاصله زمانی و زمان انتظار مسافران در

ایستگاه‌ها را کاهش دهند. استراتژی عبور اتوبوس بدون توقف، زمان سفر و همچنین زمان انتظار مسافران سوار بر اتوبوس را

کاهش می‌دهد. استراتژی چرخش کوتاه، چرخش اتوبوس قبل از رسیدن به پایانه مقصد برای کاهش سرفاصله زمانی مسیر

مخالف می‌باشد. استراتژی دیگر استراتژی کنترلی بین ایستگاه‌ها است. به طور مثال اولویت‌دهی در تقاطعات با

افزایش زمان فاز سبز چراغ یکی از این استراتژی‌های کنترلی بین ایستگاه‌ها می‌باشد که اگرچه باعث کاهش زمان انتظار

مسافران می‌شود اما می‌تواند بر روی جریان ترافیک و عملکرد تقاطعات تاثیر منفی گذارد. سایر استراتژی‌ها شامل اعزام

اتوبوس خالی به یک ایستگاه خاص و اضافه کردن یک

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 استراتژی 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 استراتژی‌های 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 استراتژی‌های کنترلی برای افزایش سرعت عملیاتی وسیله نقلیه، سان و هیکن (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. با این حال، 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 استراتژی کنترلی شبیه‌سازی‌شده برای ارزیابی قابلیت مدل خود استفاده کردند. سانچز-مارتینز (Sánchez-Martínez, Koutsopoulos, and Wilson 2016) به یک استراتژی توقف پویا پرداخت که تغییرات تقاضا و زمان سفر مسیرها را در نظر می‌گیرد. مقایسه بین استراتژی کنترلی قطعی و استراتژی 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 استراتژی توقف بر اساس داده‌های پویا انجام دادند. موریرا-مارتینز و همکاران (Moreira-Matias et al. 2016) استراتژی‌های توقف و حرکت اتوبوس بدون توقف در

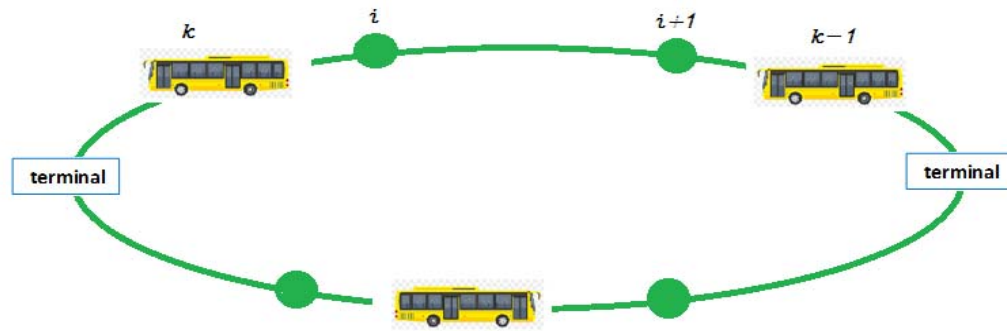
تعیین می‌کرد. تابع هدف آن‌ها کمینه کردن زمان انتظار مسافران بود. در تجزیه و تحلیل آن‌ها، نرخ ورود مسافران دارای توزیع یکنواخت بود. بارنت مسیری را با دو پایانه و یک ایستگاه کنترلی در بین آن‌ها در نظر گرفت. برخلاف کار اوسونا و نیول، بارنت (Barnett 1974) یک توزیع دونقطه‌ای، گسسته و تقریبی از تاخیر خودرو را با هدف کاهش پیچیدگی مسئله مورد بحث 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 تجزیه و تحلیل یک مسیر اتوبوس یک‌طرفه ایجاد کرد. آن‌ها چندین استراتژی 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 مونت کارلو 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 استراتژی کنترلی مورد مطالعه قرار گرفت. این استراتژی‌ها توقف، اعزام اتوبوس خالی و اتوبوس سریع‌السير 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. در نهایت، آن‌ها یک استراتژی ترکیبی را پیشنهاد کردند که شامل هر سه استراتژی بود و به این نتیجه رسیدند که استراتژی توقف به دلیل کاهش قابل توجه زمان انتظار مسافران و تأثیر منفی ناچیز این استراتژی 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

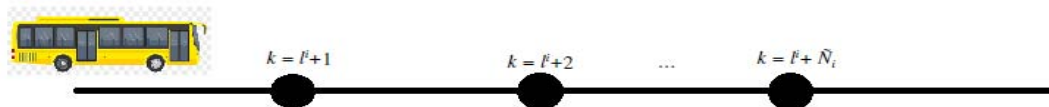
مسافران مختلف در قسمت قبل از جدا شدن دو خط و بعد از آن محاسبه می‌شود. چن و همکاران (Chen et al. 2021) مدت توقف اتوبوس و تعدیل سرعت را باهم ترکیب کردند و تاثیر آن بر کاهش زمان انتظار مسافران را بررسی کردند. لیانگ و همکاران (Liang, Ma, and He 2019) موضوع بهینه‌سازی اندازه‌ی ناوگان و استراتژی توقف را با یکدیگر ادغام کردند. آن‌ها از شبیه‌سازی مونت کارلو برای حل مدل خود استفاده کردند. در این مقاله بررسی استراتژی کنترل‌ی زمان توقف اتوبوس‌ها و تاثیر آن بر زمان انتظار مسافران انجام می‌شود. نوآوری‌های صورت گرفته در این پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

- بررسی استراتژی کنترل‌ی توقف اتوبوس‌ها به صورتی که اتوبوس‌ها در تمام ایستگاه‌های افق زمانی توقف کنند.
- مقایسه‌ی تاثیر استراتژی 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 استراتژی کنترل‌ی توقف در تمام ایستگاه‌های افق زمانی.

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 استراتژی کنترل‌ی باید در ایستگاه کنترل‌ی اجرا شود، اتخاذ شد. اصغرزاده و همکاران (Asgharzadeh 2017) یک مدل ریاضی برای استراتژی 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. کتس 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 خط با هم انشعاب دارند و واگرا می‌شوند ارائه کردند. این توقف برای



شکل ۱. مدل سیستم حمل‌ونقل



شکل ۲. مفهوم افق زمانی

۳-تعریف مسئله

در همه‌ی ایستگاه‌های افق زمانی اتفاق بیفتد، در شرایط وجود سبقت و عدم وجود سبقت برای اتوبوس‌ها پرداخته می‌شود. در این مقاله استراتژی کنترلی تمام توقف و تاثیر آن بر زمان انتظار مسافران ارزیابی شده است که در آن i اتوبوس و k ایستگاه در نظر گرفته شده است (شکل ۱). مسیر موردنظر یک مسیر حلقوی است که دارای تعدادی ایستگاه در طول مسیر خود می‌باشد. در طول مسیر با توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها تعدادی از مسافران پیاده یا سوار می‌شوند و یا به مسیر خود ادامه می‌دهند. همان‌طور که اشاره شد استراتژی موردنظر برای دو سناریو وجود شرایط سبقت و عدم وجود شرایط سبقت بررسی شده است و برای هرکدام از سناریوها، باید زمان توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه به‌عنوان متغیر تصمیم به صورتی تعیین شود که مجموع زمان انتظار مسافران داخل اتوبوس و زمان انتظار مسافران داخل ایستگاه کمینه شود.

سه استراتژی توقف توسط اودل و ویلسون (Odell and Wilson 1999) پیشنهاد شده است. در استراتژی "تمام توقف"، اتوبوس‌ها را می‌توان در همه ایستگاه‌های افق زمانی نگه داشت. در استراتژی "یک‌بار توقف"، اتوبوس‌ها را می‌توان فقط در یک ایستگاه در افق زمانی نگه داشت. در نهایت، در استراتژی «اولین توقف»، اتوبوس‌ها را می‌توان 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 پژوهش‌های گذشته معمولاً به بررسی استراتژی اولین توقف پرداخته شده است. همچنین در بسیاری از پژوهش‌ها تنها به زمان انتظار مسافران در ایستگاه اشاره شده است و به زمان انتظار مسافران داخل اتوبوس کمتر پرداخته شده است. نکته‌ی دیگری که باید برای توقف اتوبوس‌ها در نظر گرفته شود این است که آیا اتوبوس‌ها در مسیرمربوط به اتوبوس امکان سبقت از یکدیگر را در صورتی که باهم تداخل یابند دارند یا خیر. به همین دلیل به استراتژی تمام توقف که در آن توقف می‌تواند

۳-۱-افق زمانی

اولین توقف که اتوبوس‌ها فقط در اولین ایستگاه افق زمانی مذکور توقف خواهند داشت.

همان‌طور که اشاره کردیم مدل از تعدادی اتوبوس و ایستگاه در یک مسیر حلقوی تشکیل شده است. در هنگام بررسی مسئله موردنظر تنها در تعداد مشخصی از ایستگاه‌های پایین‌دست تاثیر اختلالات اتوبوس‌ها بر روی هم در نظر گرفته می‌شود. این موضوع به کوچک‌تر شدن مسئله نیز کمک شایانی می‌کند. افق زمانی از دو واژه تشکیل شده است.

۳-۲-مفروضات مسئله

-زمان سفر در بین ایستگاه‌ها و نرخ رسیدن مسافران در هر ایستگاه در طول دوره موردنظر ثابت فرض می‌شود.

زمان که به مفهوم دوره‌ی زمانی محدود اشاره می‌کند و افق که به معنی پیشروی اتوبوس‌ها به سمت جلو با گذشت زمان می‌باشد (X. Eberlein, Wilson, and Bernstein

-مسیر موردنظر یک مسیر حلقه‌ای شکل است که از دو پایانه تشکیل شده است.

1999). به‌طور مثال اگر افق زمانی برابر با ۳ در نظر گرفته

-حرکت اتوبوس‌ها در مسیر حلقه‌ای شکل، پادساعت‌گرد است.

شده باشد به این معنی است که اگر اتوبوسی از ایستگاه ۴ شروع به حرکت کند، ایستگاه‌های پایین‌دست اتوبوس که در افق زمانی می‌باشند ایستگاه‌های ۵، ۶ و ۷ می‌باشند.

-در سناریوی عدم وجود شرایط سبقت، زمان حرکت اتوبوس i از ایستگاه k نسبت به اتوبوس قبلی‌اش یعنی $i-1$ حداقل یک دقیقه باهم اختلاف دارند.

در استراتژی تمام توقف اتوبوس‌ها در تمام ایستگاه‌های موجود در افق زمانی می‌تواند توقف داشته باشند. برخلاف استراتژی

۴-مدل ریاضی

۴-۱-نمادها

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

مجموعه‌ها

I مجموعه اندیس اتوبوس‌ها

K مجموعه اندیس ایستگاه‌ها

اندیس‌ها

$i = 1, \dots, I$ اندیس اتوبوس‌ها

$k = 1, \dots, K$ اندیس ایستگاه‌ها

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

-پارامترها

r_k نرخ رسیدن مسافر در ایستگاه k

زمان حرکت اتوبوس i از ایستگاه k

dt_{ik}

تعداد مسافران جامانده از اتوبوس i در ایستگاه k به دلیل تکمیل ظرفیت اتوبوس.

P_{ik}

تعداد مسافران سوار بر اتوبوس i وقتی که از ایستگاه k حرکت می‌کند.

L_{ik}

مجموع تقاضای مسافر برای اتوبوس i در ایستگاه k

D_{ik}

زمان توقف بهینه برای اتوبوس i در ایستگاه k

H_{ik}

۴-۲-تابع هدف

توقف باشد زمان انتظار مسافران داخل اتوبوس افزایش می‌یابد. در بیشتر پژوهش‌ها، استراتژی‌های 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. همان‌طور که اشاره شد مسئله در دو حالت وجود شرایط سبقت و عدم وجود شرایط سبقت بررسی خواهد شد.

تابع هدف در این پژوهش کمینه‌سازی زمان انتظار مسافران است. این زمان انتظار از دو بخش زمان انتظار مسافران در ایستگاه و زمان انتظار مسافران در داخل وسیله نقلیه تشکیل شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد استراتژی موردنظر در دو سناریو وجود شرایط سبقت و عدم وجود شرایط سبقت بررسی خواهد شد. برای هر دو حالت یک تابع هدف وجود دارد. در فرمول (۱) قسمت اول تابع هدف زمان انتظار مسافرانی است که به‌طور 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. هرزمانی که اتوبوس مجبور به

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

۴-۳- محدودیت‌های سناریو اول (وجود شرایط سبقت)

حرکت اتوبوس i از ایستگاه $k+1$ را نشان می‌دهد. محدودیت (۷) نیز مشخص می‌کند که مجموع زمان‌های توقف در ایستگاه‌هایی که در افق زمانی قرار دارند نباید از M_{hold} بیشتر باشد. محدودیت (۸) برای محاسبه تقاضای اتوبوس i در ایستگاه k می‌باشد. 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 (۹) نیز برای محاسبه تعداد مسافرانی است که در ایستگاه k از اتوبوس i جا مانده‌اند و از تفاضل تقاضای اتوبوس i در ایستگاه k از ظرفیت اتوبوس به دست می‌آید.

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) برای محاسبه زمان رسیدن اتوبوس i به ایستگاه k خواهد بود. این محدودیت 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

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

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

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

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

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

$$\sum_k H_{ik} \leq M_{hold} \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$D_{i,k} = (1 - Q_k) L_{i,k-1} + r_k (dt_{ik} - dt_{i-1,k}) + P_{i-1,k} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (8)$$

$$P_{i,k} = D_{ik} - L_{max} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (9)$$

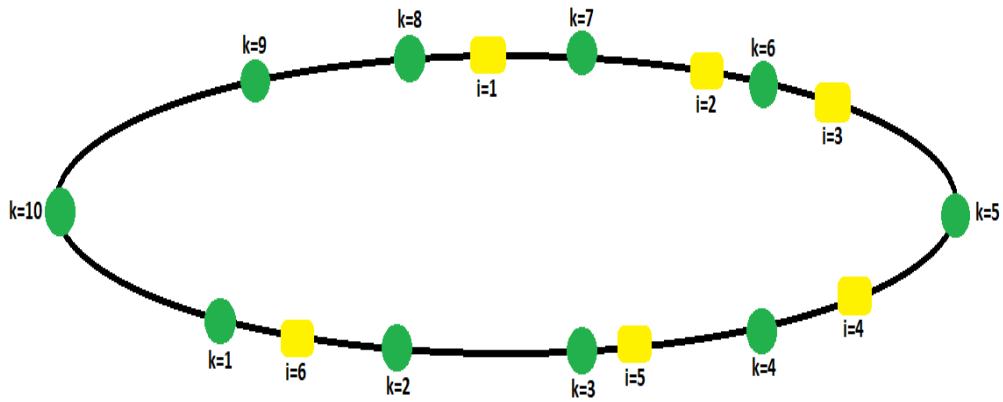
$$P_{ik}, L_{ik}, dt_{ik}, H_{ik}, D_{ik} \geq 0 \quad V_{ik} \in [0,1] \quad \forall i \in I, k \in K \quad (10)$$

۴-۱- محدودیت‌های سناریو دوم (عدم وجود شرایط سبقت)

تفاوتی که ایجاد می‌شود اضافه شدن یک محدودیت جدید در حالت دوم است. محدودیت (۱۱) 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.

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 حالت یکسان است و تمام محدودیت‌ها نیز مشترک هستند. تنها

$$dt_{ik} \geq dt_{i-1,k} + 1 \quad (11)$$



شکل ۳. نحوه قرار گیری اتوبوس‌ها

نتایج و تحلیل

اطلاعات ثابت مربوط به مسئله موردنظر آورده شده است. با توجه به اطلاعات اولیه، مدل موردنظر برای هر دو سناریو در نرم‌افزار GAMS نسخه ۲۵,۱,۲ شبیه‌سازی شده است. برای حل مدل از حل کننده lingo استفاده شده است. در جدول صفحه‌ی بعد نتایج مربوط به زمان انتظار مسافران به دست آمده است.

یک مسیر فرضی شامل ۱۰ ایستگاه و ۶ اتوبوس در نظر گرفته شده است که ایستگاه شماره ۵ و ۱۰ به‌عنوان پایانه‌های مسیر موردنظر انتخاب شده‌اند. افق زمانی مسئله مورد نظر 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 بالا نشان داده شده است. در جدول زیر

جدول ۱. اطلاعات ثابت مسئله

شماره ایستگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
نرخ رسیدن مسافر به هر ایستگاه (r_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 استراتژی کنترلی	نوع استراتژی کنترلی		زمان حل مساله
	سناریو دوم	سناریو اول	
	۴۱۳۳	۴۰۷۰	زمان انتظار مسافران (دقیقه)
	۱۳۲	۱۹۵	مقدار زمان انتظار کاهش یافته (دقیقه)
۴۲۶۵	۳	۴/۵	درصد بهبود زمان انتظار مسافران نسبت به حالت بدون کنترل

در جدول ۳ خانه‌هایی که مشخص شده‌اند ایستگاه‌هایی هستند که اتوبوس i در آن‌ها به میزان H توقف کرده است. 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} هستند.

در جدول ۴ زمان حرکت اتوبوس‌ها در افق زمانی برای سناریوی دوم استراتژی کنترلی نشان داده شده است. در جدول ۴ نیز خانه‌هایی که مشخص شده، ایستگاه‌هایی هستند که اتوبوس i در آن‌ها توقف کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اتوبوس ۲ در ایستگاه ۷ به مدت ۳ دقیقه و اتوبوس ۴ در ایستگاه ۵ به مدت ۱,۵ دقیقه توقف داشته‌اند. همان‌طور که مشخص است در سناریوی اول (وجود شرایط سبقت) توقف برای اتوبوس ۲ می‌تواند در ایستگاه‌های ۷، ۸ 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.

همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود زمان انتظار مسافران در حالت‌های مختلف توسط نرم‌افزار GAMS محاسبه شده است. در حالتی که هیچ استراتژی برای حرکت اتوبوس‌ها در نظر گرفته نشده است زمان انتظار مسافران ۴۲۶۵ دقیقه گزارش شده است. در سناریوی اول استراتژی کنترلی (وجود شرایط سبقت) زمان انتظار مسافران ۴۰۷۰ دقیقه و در سناریوی دوم (عدم وجود شرایط سبقت) ۴۱۳۳ دقیقه به دست آمده است. همان‌طور که مشخص است در سناریوی اول استراتژی کنترلی زمان انتظار مسافران ۱۹۵ دقیقه و در سناریوی دوم استراتژی کنترلی ۱۳۲ دقیقه نسبت به حالت بدون استراتژی کنترلی کاهش یافته است که به ترتیب برابر با ۴,۵ درصد و ۳ درصد بهبود زمان انتظار مسافران مشاهده می‌شود. در مجموع مشاهده می‌شود که کاربرد استراتژی کنترلی باعث کاهش زمان انتظار مسافران و بهبود عملکرد سیستم بی‌ارتی می‌گردد و در سناریوی اول نسبت به سناریوی دوم این کاهش زمان انتظار بیشتر است و حدود یک و نیم درصد زمان انتظار مسافران بیشتر کاهش یافته است. در جدول ۳ زمان حرکت اتوبوس‌ها در افق زمانی برای سناریوی اول استراتژی کنترلی نشان داده شده است. این اعداد نمایانگر dt_{ik} می‌باشند. اولین زمان حرکت برای هر اتوبوس i در شرایط واقعی باید از سیستم‌های موقعیت‌یاب خودکار استخراج شود.

جدول ۳. زمان حرکت اتوبوس‌ها در افق زمانی (سناریو اول)

$dt_{i,k}$	شماره ایستگاه (k)										
	شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
اتوبوس (۱)											
۱								۲۵	۲۸	۳۲	۳۵
۲							۲۰	۲۴/۶	۲۸	۳۱	
۳						۲۱	۲۶	۲۹	۳۲		
۴				۱۹	۲۳	۲۸	۳۱				
۵			۲۲	۲۵	۲۹	۳۴					
۶	۲۰	۲۴	۲۷	۳۰							

تحلیل حساسیت

است. در شکل ۴ نمودار تاثیر تغییرات حداکثر ظرفیت اتوبوس بر روی زمان انتظار مسافران نشان داده شده است. تاثیر این تغییرات جداگانه در هرکدام از سناریوها مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشخص است در هر دو نمودار برای دو سناریوی مختلف، با افزایش ظرفیت اتوبوس زمان انتظار

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 مطرح‌شده تغییراتی در حداکثر ظرفیت اتوبوس و طول افق زمانی صورت گرفته است و تاثیر آن بر روی تابع هدف در نمودارهایی بررسی شده

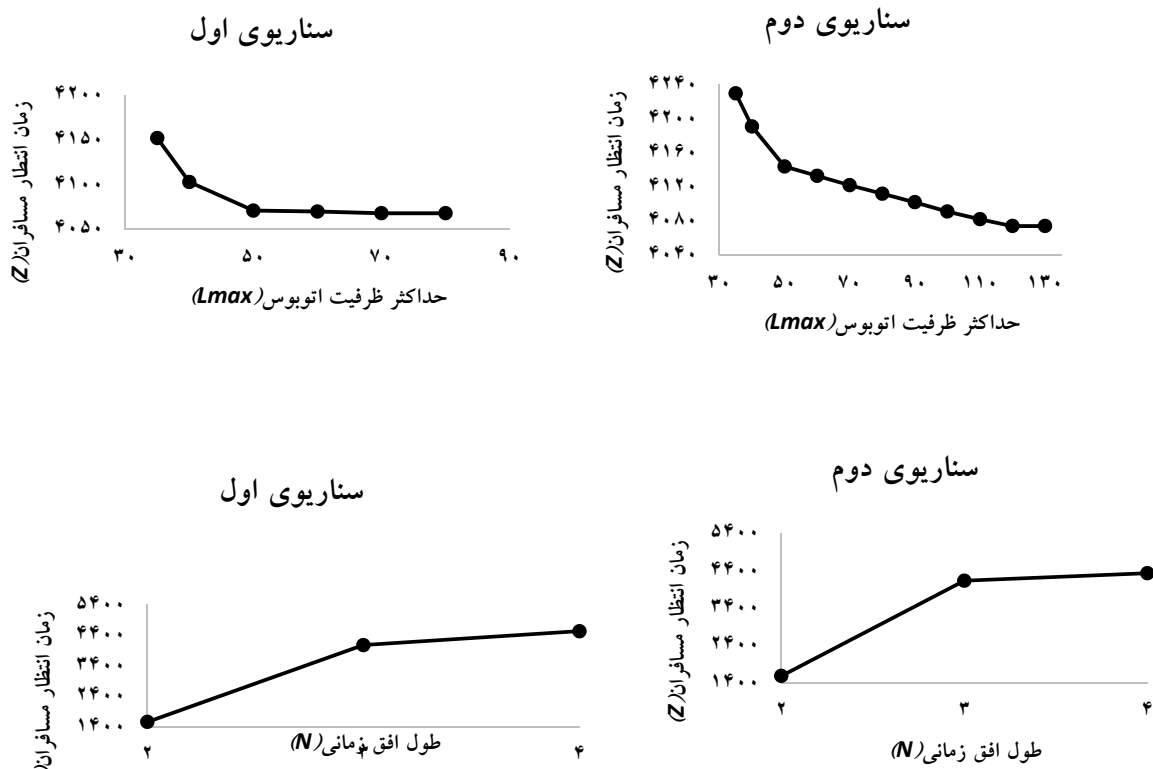
سناریوی دوم (عدم وجود شرایط سبقت) تا ظرفیت ۱۲۰ نفر کاهش زمان انتظار مسافران مشاهده می‌شود و پس از آن تغییرات چندانی در کاهش زمان انتظار مسافران پدید نمی‌آید.

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

جدول ۴. زمان حرکت اتوبوس‌ها در افق زمانی (سناریو دوم)

$dt_{i,k}$	شماره ایستگاه (k)										
	شماره اتوبوس (i)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱								۲۵	۲۸	۳۲	۳۵
۲							۲۰	۲۶	۲۹	۳۳	
۳						۲۱	۲۶	۲۹	۳۲		
۴				۱۹	۲۴/۵	۲۹/۵	۳۲/۵				
۵			۲۲	۲۵	۲۹	۳۴					
۶	۲۰	۲۴	۲۷	۳۰							

شکل ۴. نمودار تاثیر تغییرات حداکثر ظرفیت اتوبوس بر روی زمان انتظار مسافران



شکل ۵. نمودار تاثیر تغییرات طول افق زمانی بر روی زمان انتظار مسافران

که مشخص است در نمودار مربوط به هر دو سناریو با افزایش طول افق زمانی، زمان انتظار مسافران افزایش یافته است.

در شکل ۵ نمودار تاثیر تغییرات طول افق زمانی بر روی زمان انتظار مسافران نشان داده شده است. زمان انتظار مسافران در سه افق زمانی با طول‌های ۳، ۲ و ۴ بررسی شده است. همان‌طور

۵- نتیجه‌گیری

گرفت و تاثیر آن بر روی تابع هدف ارزیابی شد. نتایج به‌دست‌آمده از مثال فرضی نشان می‌دهد که استفاده از استراتژی کنترلی توقف اتوبوس‌ها باعث می‌شود زمان انتظار مسافران نسبت به حالت بدون استراتژی کنترلی بین ۳ تا ۴/۵ درصد کاهش یابد. این استراتژی کنترلی در صورتی که با دیگر استراتژی‌های کنترلی به‌طور هماهنگ اجرا شود می‌تواند تاثیر به‌سزایی در کاهش زمان انتظار مسافران داشته باشد. به دلیل زیاد بودن زمان حل مسئله در نرم‌افزار GAMS پیشنهاد می‌شود برای پژوهش‌های آینده از یک روش فراابتکاری استفاده شود تا زمان حل مسئله کاهش یابد. در صورت کاهش زمان حل مسئله می‌توان با استفاده از داده‌های واقعی بلادرنگ به‌دست‌آمده از سیستم‌های موقعیت‌یاب خودکار مدل را در لحظه حل کرد.

سیستم‌های حمل‌ونقل سیستم‌هایی ناپایدار هستند که این ناپایداری می‌تواند منجر به کاهش قابلیت اطمینان سیستم موردنظر شود. یکی از مصادیق قابلیت اطمینان در سیستم‌های حمل‌ونقلی زمان انتظار مسافران است. در این مطالعه استراتژی کنترلی توقف اتوبوس‌ها در سناریوهای وجود شرایط سبقت و عدم وجود شرایط سبقت مطرح شد و برای هرکدام یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی جداگانه معرفی شد. سپس یک مثال فرضی ارائه شد. برای حل مدل پیشنهادی از نرم‌افزار GAMS استفاده گردید. در هرکدام از سناریوها مشخص شد که هرکدام از اتوبوس‌ها در کدام ایستگاه‌ها و به چه مدتی باید متوقف شوند تا زمان انتظار مسافران در داخل اتوبوس و داخل ایستگاه کمینه شود. یک تحلیل حساسیت بر روی برخی پارامترهای مدل مانند حداکثر ظرفیت اتوبوس و طول افق زمانی انجام

۶- مراجع

-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. doi.org/10.1287/trsc.35.1.1.10143

-Eberlein, Xujun, Nigel H M Wilson, Cynthia Barnhart, and David Bernstein (1998). The Real-Time Deadheading Problem In Transit Operations Control. *Transportation Research Part B-methodological* 32: 77-100.

-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. doi.org/10.3141/1791-02

-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. doi.org/10.1287/trsc.8.2.102

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. doi.org/10.3141/2090-07

- 47: 460–82.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494616303118>.
- Newell, Gordon Frank, and Renfrey Burnard Potts (1964). Maintaining a Bus Schedule. In *Australian Road Research Board (ARRB) Conference*, 2nd, 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.
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 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>.
- 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.
doi.org/10.1287/trsc.35.3.215.10150
- 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*, 2452348.
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*

Bus Holding Control Strategy at All the Rolling Horizon Stops under Possible and Impossible Overtaking Conditions

*Abdolreza Sheikholeslami, Assistant Professor, School of Civil Engineering,
Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Masoud Mirzaei, M.Sc., Grad., School of Civil Engineering, Iran University of Science
and Technology, Tehran, Iran.*

E-mail: Sheikh@iust.ac.ir

Received: February 2024- Accepted: June 2024

ABSTRACT

Transportation systems tend to be unstable and this instability affects the reliability indices of transportation systems. To improve reliability, control strategies can be used. One of the control strategies is holding the buses at the stops. In this study, the holding control strategy in all rolling horizon stops is used. For holding control strategy, two scenarios of possible overtaking and impossible overtaking for the buses are studied. For each of these scenarios, an exclusive mathematical model is presented. In these mathematical models, the effect of holding control strategy on passengers' waiting time on the bus and at the station is analyzed. Afterward, an example is assumed in order to solve the model, and sensitivity analysis is conducted on some of the model's parameters. According to the results, employing control strategy leads to a 3-4.5 percent decline in passengers' waiting time, compared to the state in which no control strategy is implemented.

Keywords: Control Strategy, Passengers', Waiting Time, Buses' Holding Time