فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۶، شماره ۱، پاییز ۱۴۰۳، ص. ۴۱۵۸-۴۱۴۱

مقاله علمی-پژوهشی

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

مسعود محمد حسین میرزایی، کارشناس ارشد، گروه مهندسی حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران

عبدالرضا شیخ‌الاسلامی (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی حمل‌ونقل، 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

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۳۱

چکیده

سیستم‌های حمل‌ونقلی سیستم‌های ناپایداری هستند و این ناپایداری بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم‌های حمل‌ونقل تاثیر گذار است. برای افزایش قابلیت اطمینان می‌توان از استراتژی‌های کنترلی استفاده کرد. یکی از استراتژی‌های کنترلی، توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه‌ها است. پژوهش‌های بسیاری بر روی استراتژی کنترلی اولین توقف و تاثیر آن بر روی زمان انتظار مسافران در گذشته صورت گرفته است. اما در این پژوهش از استراتژی کنترلی توقف در تمام ایستگاه‌های افق زمانی (تمام توقف) تحت تاثیر شرایط سبقت اتوبوس‌ها، که در پژوهش‌های قبلی مورد بررسی قرار نگرفته بود، استفاده می‌شود. سناریوی عدم وجود شرایط سبقت اتوبوس‌ها و سناریوی وجود شرایط سبقت اتوبوس‌ها معرفی‌شده و برای هرکدام یک مدل ریاضی جداگانه ارائه شده است. مدل ریاضی برای هرکدام از سناریوها شامل تابع هدف از نوع کمینه‌سازی و محدودیت‌های مربوط به هرکدام است. در مدل ریاضی ارائه‌شده، تاثیر استراتژی کنترلی تمام توقف تحت تاثیر شرایط سبقت، بر زمان انتظار مسافران داخل اتوبوس و داخل ایستگاه مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه یک مثال فرضی برای حل مدل و یک مطالعه‌ی موردی بر روی خط ۵ BRT تهران انجام شده است و بر روی برخی پارامترهای مدل مانند حداکثر ظرفیت اتوبوس و طول افق زمانی تحلیل حساسیت انجام گرفته است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که با افزایش ظرفیت اتوبوس و کاهش طول افق زمانی زمان انتظار مسافران کاهش می‌یابد. همچنین برای هرکدام از سناریوها زمان توقف اتوبوس‌ها در هر ایستگاه، به‌منظور کمینه‌سازی زمان انتظار مسافران در داخل اتوبوس و داخل ایستگاه مشخص شد. نتایج مطالعه‌ی موردی و مثال فرضی نشان می‌دهند که زمان انتظار مسافران در حالتی که از استراتژی کنترلی استفاده شده است نسبت به حالت بدون استراتژی کنترلی حدود ۳ درصد کاهش‌یافته است.

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

۱. مقدمه

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 درنتیجه 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 اطمینان سیستم‌های حمل‌ونقلی کمک می‌کنند(Turnquist 1981). سیستم‌های حمل‌ونقل شهری مانند اتوبوس‌های شهری، مترو، بی ار 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 موردنظر 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 متشکل از دو یا چند اتوبوس به‌طور 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 درنتیجه کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه می‌گردد(Wang and Sun 2020).

این استراتژی‌ها به دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند:

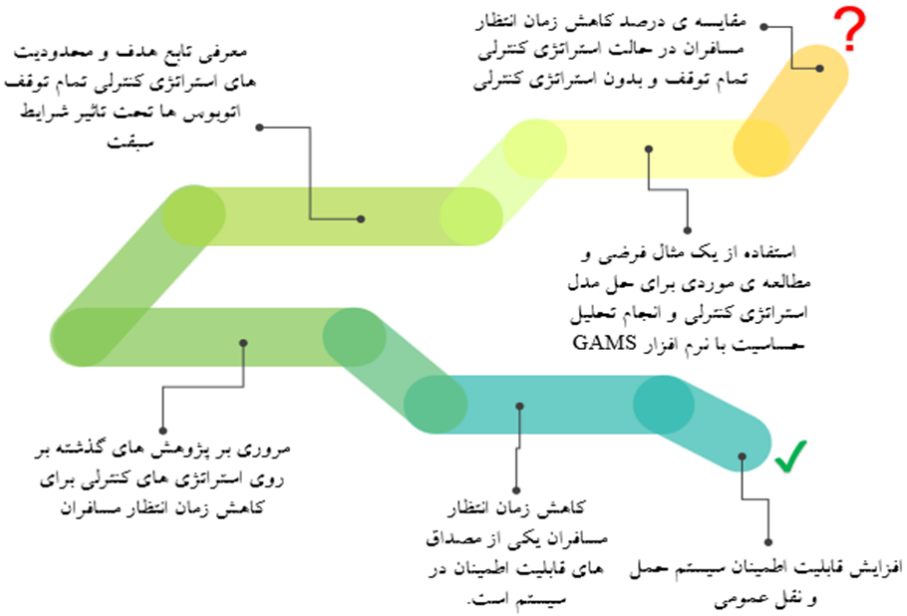
۱- استراتژی‌های کنترلی بلندمدت که به طراحی و برنامه‌ریزی اساسی نیاز دارند.

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

استراتژی‌های کنترلی برنامه‌ریزی معمولا شامل بهبود زیرساخت‌ها، ایجاد تغییر در جدول زمانی اعزام اتوبوس‌ها و یا افزودن ناوگان جدید به سیستم حمل‌ونقل موردنظر است. این نوع استراتژی نیازمند سرمایه‌گذاری کلان در سیستم حمل‌ونقل موردنظر است (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 است(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 است. استراتژی دیگر استراتژی کنترلی بین ایستگاه‌ها است. به‌طور مثال اولویت‌دهی در تقاطعات با افزایش زمان فاز سبز چراغ یکی از این استراتژی‌های 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 استراتژی‌ها 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 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 ٤-حداکثر ظرفیت هر اتوبوس ٥- 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 بی ار تی پرداخته می‌شود. سوالات اساسی که در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد عبارت است از:

- آیا استفاده از استراتژی کنترلی باعث کاهش زمان انتظار مسافران می‌گردد؟
- کاهش زمان انتظار مسافران نسبت به حالت بدون استراتژی کنترلی چه مقداری خواهد بود؟
- درصد کاهش زمان انتظار مسافران در سناریوی وجود شرایط سبقت و عدم وجود شرایط سبقت نسبت به شرایط بدون استراتژی کنترلی چگونه خواهد بود.



شکل ۱. معرفی مراحل روش تحقیق

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 هرکدام 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 (٤) نتایج و تحلیل‌های مربوط به یک مثال فرضی، تحلیل حساسیت مربوط به برخی پارامترها و یک مطالعه موردی نیز ارائه گردیده است. در قسمت (٥) نیز نتیجه‌گیری نهایی انجام گرفته است.

۲. ادبیات پژوهش

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 تعیین می‌کرد. 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. 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 موردمطالعه قرار گرفت. این استراتژی‌ها 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 برنامه‌ریزی‌شده کار کنند. درنهایت، آن‌ها یک استراتژی ترکیبی را پیشنهاد کردند که شامل هر سه استراتژی بود و به این نتیجه رسیدند که استراتژی توقف به دلیل کاهش قابل‌توجه 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 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. به‌عنوان‌مثال، 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 (ODell 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 قابل‌توجهی 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 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. بااین‌حال، 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. ژان و همکاران (Xuan, Argote, and Daganzo 2011) نشان دادند استراتژی‌های توقف پویا مبتنی بر حرکت به‌تنهایی نمی‌تواند به اتوبوس‌ها کمک کند تا به یک برنامه زمانی پایبند باشند. بنابراین، خانواده‌ای از استراتژی‌های توقف پویا که از انحرافات ورود اتوبوس از یک برنامه مجازی در نقاط کنترل استفاده می‌کنند، پیشنهاد شده است. کتس و همکاران (Cats et al. 2012) عملکرد یک خط اتوبوس با فرکانس بالا را تجزیه‌وتحلیل کردند و به این نتیجه رسیدند که بر اساس داده‌های مکان‌یاب خودکار وسیله نقلیه استراتژی کنترلی توقف اتوبوس‌ها در بهبود نظم خدمات در طول خط موثر نبود. 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 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. لاسکاریس و همکاران (G Laskaris et al. 2016) یک مدل تصمیم‌گیری توقف را معرفی کردند که به‌صراحت به هزینه سفر مسافر می‌پردازد. تصمیم برای توقف به توزیع تقاضای مسافر در طول خط بستگی دارد. مدل توقف هزینه مسافر با استفاده از شبیه‌سازی برای یک خط اتوبوس فرکانس بالا آزمایش شد و با یک طرح بدون کنترلی و استراتژی مبتنی بر سرفاصله‌ی زمانی مورد مقایسه قرار گرفت. 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. نشلی و همکاران (Nesheli and Ceder 2017) مطالعه یک روش کنترلی زمان واقعی را برای افزایش قابلیت اطمینان خدمات و بهبود انتقال هماهنگ در یک سیستم پیچیده PT ارائه کردند. هدف روش توسعه‌یافته به حداقل رساندن کل زمان سفر برای مسافران و کاهش عدم قطعیت بین وسایل نقلیه PT 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 (Georgios Laskaris et al. 2021)یک شاخص توقف را برای یک شبکه که دو خط باهم انشعاب دارند و واگرا می‌شوند ارائه کردند. این توقف برای مسافران مختلف در قسمت قبل از جدا شدن دو خط و بعدازآن 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. با اشاره به پژوهش‌های گذشته مشاهده می‌شود که به موضوع بررسی استراتژی تمام توقف و تاثیر شرایط سبقت بر آن، به‌منظور کاهش زمان انتظار مسافران پرداخته نشده است. به دلیل اجرای راحت‌تر استراتژی کنترلی توقف در واقعیت، اعمال هزینه کمتر بر سیستم‌های حمل‌ونقلی و از همه مهم‌تر وجود اختلالات جزئی در حرکت اتوبوس‌ها که به دلیل تغییرات در زمان سفر یا تقاضای مسافران ایجاد می‌گردد، استفاده از استراتژی کنترلی توقف نسبت به سایر استراتژی‌های کنترلی برتری می‌یابد. نوآوری‌های صورت گرفته در این پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

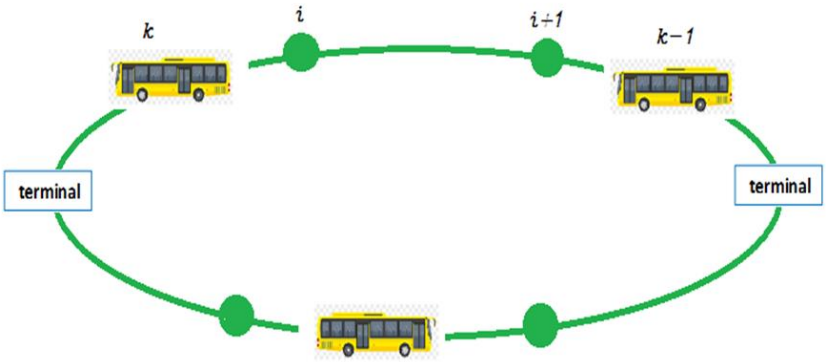
- بررسی استراتژی کنترلی توقف اتوبوس‌ها به صورتی که اتوبوس‌ها در تمام ایستگاه‌های افق زمانی توقف کنند.
- مقایسه‌ی تاثیر استراتژی کنترلی توقف در تمام ایستگاه‌های افق زمانی بر روی زمان انتظار مسافران در دو سناریوی عدم وجود شرایط سبقت اتوبوس‌ها و وجود شرایط سبقت اتوبوس‌ها.

در نظر گرفتن زمان انتظار مسافران داخل اتوبوس، علاوه بر زمان انتظار مسافران داخل ایستگاه در استراتژی کنترلی توقف در تمام

ایستگاه‌های افق زمانی. با توجه به ویژگی‌های استراتژی‌های کنترلی در ادامه به تعریف مسئله موردنظر پرداخته می‌شود. همان‌طور که اشاره شد استفاده از استراتژی‌های کنترلی توسط ادل و ویلسون (ODell and Wilson 1999) برای سیستم حمل‌ونقل ریلی معرفی گردید. سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی و سیستم اتوبوس‌های سریع‌السیر ازنظر ماهیت و عملکرد دارای ویژگی‌های مشترک بسیاری می‌باشند و یکی از دلایل استفاده از استراتژی کنترلی معرفی شده در این پژوهش برای اتوبوس‌های سریع‌السیر این موضوع است. بنابراین مدل ریاضی و استراتژی کنترلی تمام توقف در این مقاله را می‌توان برای اتوبوس‌های معمولی نیز مورداستفاده قرارداد اما باید به این نکته توجه نمود که عملکرد سیستم اتوبوس‌های سریع‌السیر به دلیل اهمیت موضوع سرفاصله‌ی زمانی، قابلیت اطمینان سیستم، زمان انتظار مسافران، تعداد مسافران سوار بر اتوبوس و از همه مهم‌تر نوع زیرساخت‌های سیستم اتوبوس‌های سریع‌السیر که معمولا دارای مسیر کانالیزه و جدا هستند با اتوبوس‌های معمولی متفاوت است و در صورت استفاده از این مقاله برای اتوبوس‌های معمولی باید به نکات اشاره‌شده توجه نمود و در تابع هدف و محدودیت‌های پژوهش تغییراتی ایجاد کرد. باید توجه کرد که برای استفاده‌ی این استراتژی در شرایط واقعی و در کلان‌شهرهای کشور، باید مسئله زمان سفر و زمان توقف اتوبوس‌ها که در فرضیات مسئله ثابت در نظر گرفته شده‌اند، در شرایط واقعی با استفاده از سیستم‌های موقعیت‌یاب AVL که همان استفاده از داده‌های پویا و در لحظه است به دست آیند.

۳. تعریف مسئله

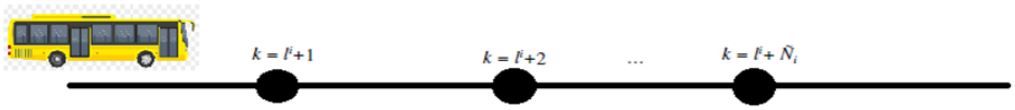
چالش اصلی مسئله در انتخاب استراتژی‌های مدیریت اختلال و نیز بهینه‌سازی متغیرهای کنترلی مربوطه است (Yaghini et al. 2016). سه استراتژی توقف توسط اودل و ویلسون (ODell and Wilson 1999) پیشنهاد شده است. در استراتژی "تمام توقف"، اتوبوس‌ها را می‌توان در همه ایستگاه‌های افق زمانی نگه داشت. در استراتژی "یک‌بار توقف"، اتوبوس‌ها را می‌توان فقط در یک ایستگاه در افق زمانی نگه داشت. درنهایت، در استراتژی «اولین توقف»، اتوبوس‌ها 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 پژوهش‌های گذشته معمولا 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 مسیر مربوط به اتوبوس امکان سبقت از یکدیگر را درصورتی‌که باهم تداخل یابند دارند یا خیر. به همین دلیل به استراتژی تمام توقف که در آن توقف می‌تواند 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 است. 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.



شکل ۲. مدل سیستم حمل‌ونقل

۳-۱ افق زمانی

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 روی‌هم در نظر گرفته می‌شود. این موضوع به کوچک‌تر شدن مسئله نیز کمک شایانی می‌کند. افق زمانی از دو واژه تشکیل شده است. زمان که به مفهوم دوره‌ی زمانی محدود اشاره می‌کند و افق که به معنی پیشروی اتوبوس‌ها به سمت جلو با گذشت زمان است (X. Eberlein, Wilson, and Bernstein 1999). به‌طور مثال اگر افق زمانی برابر با ۳ در نظر گرفته شده باشد به این معنی است که اگر اتوبوسی از ایستگاه ٤ شروع به حرکت کند، ایستگاه‌های پایین‌دست اتوبوس که در افق زمانی می‌باشند ایستگاه‌های ٦،٥ و ۷ می‌باشند. در استراتژی تمام توقف اتوبوس‌ها در تمام ایستگاه‌های موجود در افق زمانی می‌توانند توقف داشته باشند. برخلاف استراتژی اولین توقف که اتوبوس‌ها فقط در اولین ایستگاه افق زمانی مذکور توقف خواهند داشت.



شکل ۳. مفهوم افق زمانی

۳-۲ مفروضات مسئله

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

۲- زمان توقف هر اتوبوس در ایستگاه موردنظر ثابت فرض می‌شود.

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

٤- حرکت اتوبوس‌ها در مسیر حلقه‌ای شکل، پادساعت‌گرد است.

۵- 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.

٤. مدل ریاضی

مدل ریاضی در این پژوهش شامل تابع هدف و محدودیت‌های مربوط به آن است که یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی است. به دلیل این‌که هدف در این پژوهش کاهش زمان انتظار مسافران در کل سیستم شامل زمان انتظار مسافران داخل ایستگاه و سوار بر اتوبوس، است بنابراین تابع هدف از نوع کمینه‌سازی است. محدودیت‌های مربوط به هرکدام از سناریوهای استراتژی

کنترلی تمام توقف و دلیل وجود آن محدودیت نیز در ادامه توضیح داده خواهد شد. برای حل مدل‌های ریاضی مسئله موردنظر از نرم‌افزار GAMS استفاده شده است. این نرم‌افزار شامل یک زبان کامپایلر و تعدادی Solver با عملکرد بالا است و برای مدل‌سازی برنامه‌های کاربردی پیچیده و گسترده طراحی شده است. این نرم‌افزار به‌طور خاص برای مدل‌سازی بهینه‌سازی عددی خطی، غیرخطی و ترکیبی طراحی شده است .به‌طورکلی به دلیل سادگی پیاده‌سازی مسئله، کاهش زمان حل مسئله و راحتی بروز رسانی به دلیل ترکیب الگوریتم‌های جدید از این نرم‌افزار برای حل مدل استفاده گردیده است.

٤-١ نمادها

پارامترها و متغیرهای به‌کاررفته در مدل به‌صورت زیر هستند:

- مجموعه‌ها

I: مجموعه اندیس اتوبوس‌ها

K: مجموعه اندیس ایستگاه‌ها

- اندیس‌ها

I: اندیس اتوبوس‌ها $i = ۱،...,I$

K: اندیس ایستگاه‌ها $k = ۱،...,k$

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

- پارامترها

r_k: نرخ رسیدن مسافر در ایستگاه k

Q_k : درصد مسافرانی که در ایستگاه k پیاده می‌شوند.

N^i: تعداد ایستگاه‌های افق زمانی

RR_k: زمان سفر پیش‌بینی‌شده بین ایستگاه k و $k-1$

M_{hold}: ماکزیمم زمان توقف قابل قبول

L_{max}: ظرفیت اتوبوس

$dwell_k$: زمان توقف اتوبوس‌ها در ایستگاه K برحسب دقیقه

M: عدد بزرگ

θ: ضریب زمان انتظار مسافران داخل وسیله نقلیه

- متغیرها

dt_{ik} زمان حرکت اتوبوس i از ایستگاه

P_{ik} تعداد مسافران جامانده از اتوبوس i در ایستگاه k به دلیل تکمیل ظرفیت اتوبوس.

L_{ik} تعداد مسافران سوار بر اتوبوس i وقتی‌که از ایستگاه k حرکت می‌کند.

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

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

- متغیر باینری

V_{ik} اگر ۱ باشد اتوبوس i هنگام حرکت از ایستگاه k ظرفیتش تکمیل است در غیر این صورت صفر است.

٤-٢ تابع هدف

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 قبلا 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 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 θکه 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

$$min\, Z = \sum_{i=1}^{I} \sum_{k=l^i+1}^{k=l^i+N^i} \left[\frac{r_k \left(dt_{ik} - dt_{i-1,k}\right)^2}{2} + P_{ik}\left(dt_{i+1,k} - dt_{ik}\right) \right] + \sum_{i=1}^{I} \sum_{k=l^i}^{k=l^i+N^i-1} \theta(L_{ik})\,(1 - Q_{k+1})\,(H_{i,k+1}) \quad (۱)$$

$$L_{ik} \le D_{ik}\ \forall i \in I, k \in K \quad (۲)$$

$$L_{ik} \ge L_{max}\ \forall i \in I, k \in K \quad (۳)$$

$$L_{ik} \le L_{max} V_{ik} \qquad \forall i \in I, k \in K \quad (٤)$$

$$L_{ik} \ge D_{ik} - M.V_{ik} \qquad \forall i \in I, k \in K \quad (٥)$$

$$dt_{i,k+1} = dt_{ik} + RR_{k+1} + dwell_{k+1} + H_{i,k+1}\ \forall i \in I, k \in K; l^i \le k \le l^i + N^i - 1 \quad (٦)$$

$$\sum_k H_{ik} \le M_{hold} \qquad \forall i \in I \quad (٧)$$

$$D_{i,k} = (1 - Q_k) L_{i,k-1} + r_k\left(dt_{ik} - dt_{i-1,k}\right) + P_{i-1,k} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (٨)$$

$$P_{i,k} = D_{ik} - L_{max} \qquad \forall i \in I, k \in K \quad (٩)$$

$$P_{ik}, L_{ik}, dt_{ik}, H_{ik}, D_{ik} \ge 0 \quad V_{ik} \in [0,1] \qquad \forall i \in I, k \in K \quad (١٠)$$

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.

٤-٣ محدودیت‌های سناریو اول (وجود شرایط سبقت)

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 (٦) 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 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 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 (۹) 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.

٤-٤ محدودیت‌های سناریو دوم (عدم وجود شرایط سبقت)

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

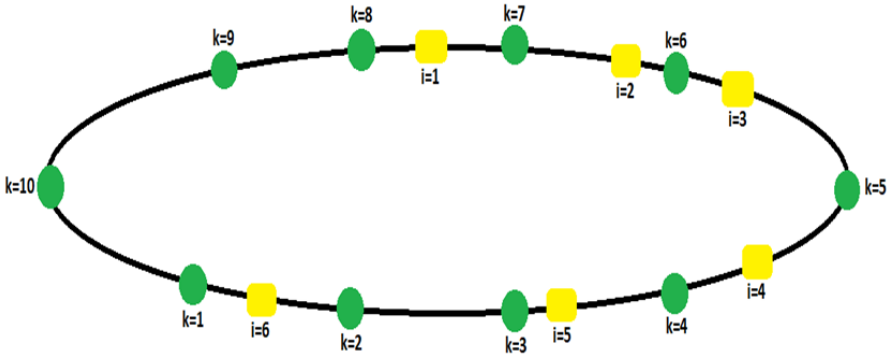
و تمام محدودیت‌ها نیز مشترک هستند. تنها تفاوتی که ایجاد می‌شود اضافه شدن یک محدودیت جدید در حالت دوم است. محدودیت (۱۱) به این معناست که هیچ دو اتوبوسی نه‌تنها نمی‌توانند از هم سبقت بگیرند بلکه زمان حرکت اتوبوس i از ایستگاه k نسبت به اتوبوس قبلی‌اش یعنی $i\text{-}1$ حداقل یک دقیقه باهم اختلاف دارند.

$$dt_{ik} \geq dt_{i-1,k} + 1 \qquad (۱۱)$$

۵. نتایج و تحلیل

یک مسیر فرضی شامل ۱۰ ایستگاه و ٦ اتوبوس در نظر گرفته شده است که ایستگاه شماره ۵ و ۱۰ به‌عنوان پایانه‌های مسیر موردنظر انتخاب شده‌اند. افق زمانی مسئله موردنظر ۳، حداکثر زمان توقف اتوبوس‌ها برابر با ٤ دقیقه و ضریب θ برابر با یک در نظر گرفته شده است. نحوه قرارگیری اولیه‌ی اتوبوس‌ها در شکل زیر نشان داده 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 ۲۵,۱,۲ شبیه‌سازی شده است. برای حل مدل از حل‌کننده lindo استفاده شده است. در جدول زیر بعد نتایج مربوط به زمان انتظار مسافران به‌دست‌آمده است:



شکل ٤. نحوه قرار گیری اتوبوس ها

جدول ۱. اطلاعات ثابت مسئله

شماره ایستگاه	۱	۲	۳	٤	۵	٦	۷	۸	۹	۱۰
نرخ رسیدن مسافر به هر ایستگاه(r_k)	۲	۱/۵	۲	۱/۵	٤	۲	۱/۵	۱/۵	۱/۵	٤
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	٤	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

نوع استراتژی کنترلی			بدون استراتژی کنترلی
زمان حل مسئله	سناریو اول	زمان حل مسئله	
زمان انتظار مسافران (دقیقه)	٤۰۷۰	زمان انتظار مسافران (دقیقه)	٤۲٦۵
مقدار زمان انتظار کاهش‌یافته (دقیقه)	۱۹۵	مقدار زمان انتظار کاهش‌یافته (دقیقه)	
درصد بهبود زمان انتظار مسافران نسبت به حالت بدون کنترل	٤/۵	درصد بهبود زمان انتظار مسافران نسبت به حالت بدون کنترل	

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 ٤٢٦٥ دقیقه گزارش شده است. در سناریوی اول استراتژی کنترلی (وجود شرایط سبقت) زمان انتظار مسافران ٤٠٧٠ دقیقه و در سناریوی دوم (عدم وجود شرایط سبقت)٤١٣٣ دقیقه به‌دست‌آمده است. همان‌طور که مشخص است در سناریوی اول استراتژی کنترلی زمان انتظار مسافران ١٩٥ دقیقه و در سناریوی دوم استراتژی کنترلی ١٣٢ دقیقه نسبت به حالت بدون استراتژی کنترلی کاهش‌یافته است که به ترتیب برابر با ٤,٥ درصد و ٣ درصد بهبود زمان انتظار مسافران مشاهده می‌شود. درمجموع مشاهده می‌شود که کاربرد استراتژی کنترلی باعث کاهش زمان انتظار مسافران و بهبود عملکرد سیستم بی ار تی 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 کاهش‌یافته است. در جدول ٣ 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. در جدول ٣ خانه‌هایی که مشخص شده‌اند ایستگاه‌هایی هستند که اتوبوس i در آن‌ها به میزان Hتوقف کرده است. اتوبوس ٢ در ایستگاه ٧ به مدت ١,٦ دقیقه و در ایستگاه ٨ به مدت ٠,٤دقیقه توقف داشته است. این مقادیر همان H_{ik} هستند. در جدول ٤ زمان حرکت اتوبوس‌ها در افق زمانی برای سناریوی دوم استراتژی کنترلی نشان داده شده است. در جدول ٤ نیز خانه‌هایی که مشخص شده‌اند ایستگاه‌هایی هستند که اتوبوس i در آن‌ها توقف کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اتوبوس ٢ در ایستگاه ٧ به مدت ٣ دقیقه و اتوبوس ٤ در ایستگاه ٥ به مدت ١,٥دقیقه توقف داشته‌اند. همان‌طور که مشخص است در سناریوی اول(وجود شرایط سبقت) توقف برای اتوبوس ٢ می‌تواند در ایستگاه‌های ٨و٩ هرکدام به‌تنهایی اتفاق بیفتد یا اینکه زمان توقف بین سه ایستگاه پخش شود که این زمان توقف برای ایستگاه‌های ٧و٨ در نظر گرفته شده است. برخلاف سناریوی اول در سناریوی دوم (عدم وجود شرایط سبقت) زمان توقف فقط به ایستگاه ٧ اختصاص داده شده است. علاوه بر این در سناریوی دوم برای اتوبوس ٤ در ایستگاه ٥ نیز یک زمان توقف در نظر گرفته شده است.

جدول ٣. زمان حرکت اتوبوس‌ها در افق زمانی (سناریو اول)

$dt_{i,k}$	شماره ایستگاه (k)									
شماره اتوبوس(i)	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠
١							٢٥	٢٨	٣٢	٣٥
٢						٢٠	٢٤/٦	٢٨	٣١	
٣					٢١	٢٦	٢٩	٣٢		
٤				١٩	٢٣	٢٨	٣١			
٥			٢٢	٢٥	٢٩	٣٤				
٦	٢٠	٢٤	٢٧	٣٠						

جدول ٤. زمان حرکت اتوبوس‌ها در افق زمانی (سناریو دوم)

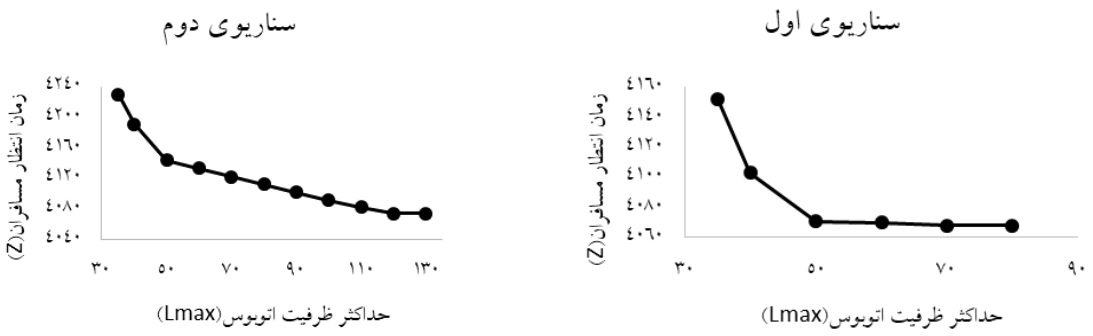
$dt_{i,k}$	شماره ایستگاه (k)									
شماره اتوبوس(i)	١	٢	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	١٠

۱						۲۵	۲۸	۳۲	۳۵
۲					۲۰	۲۶	۲۹	۳۳	
۳				۲۱	۲۶	۲۹	۳۲		
٤			۱۹	۲٤/۵	۲۹/۵	۳۲/۵			
۵		۲۲	۲۵	۲۹	۳٤				
٦	۲۰	۲٤	۲۷	۳۰					

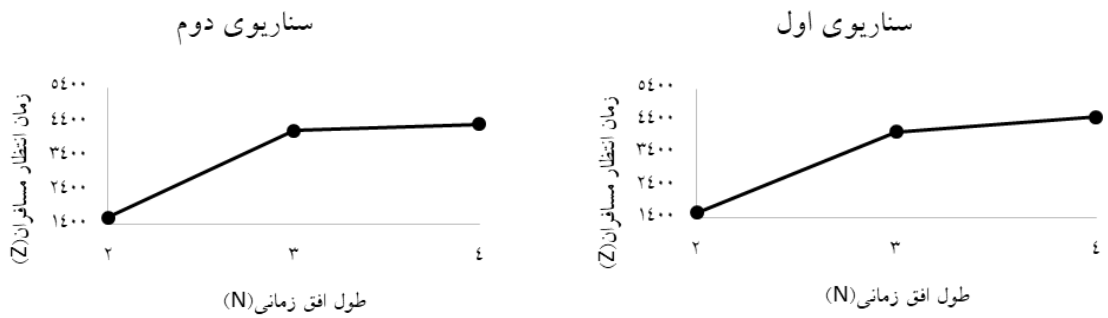
۵-۱ تحلیل حساسیت

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 مطرح‌شده 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 ٤ 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 مسافران کاهش می‌یابد.

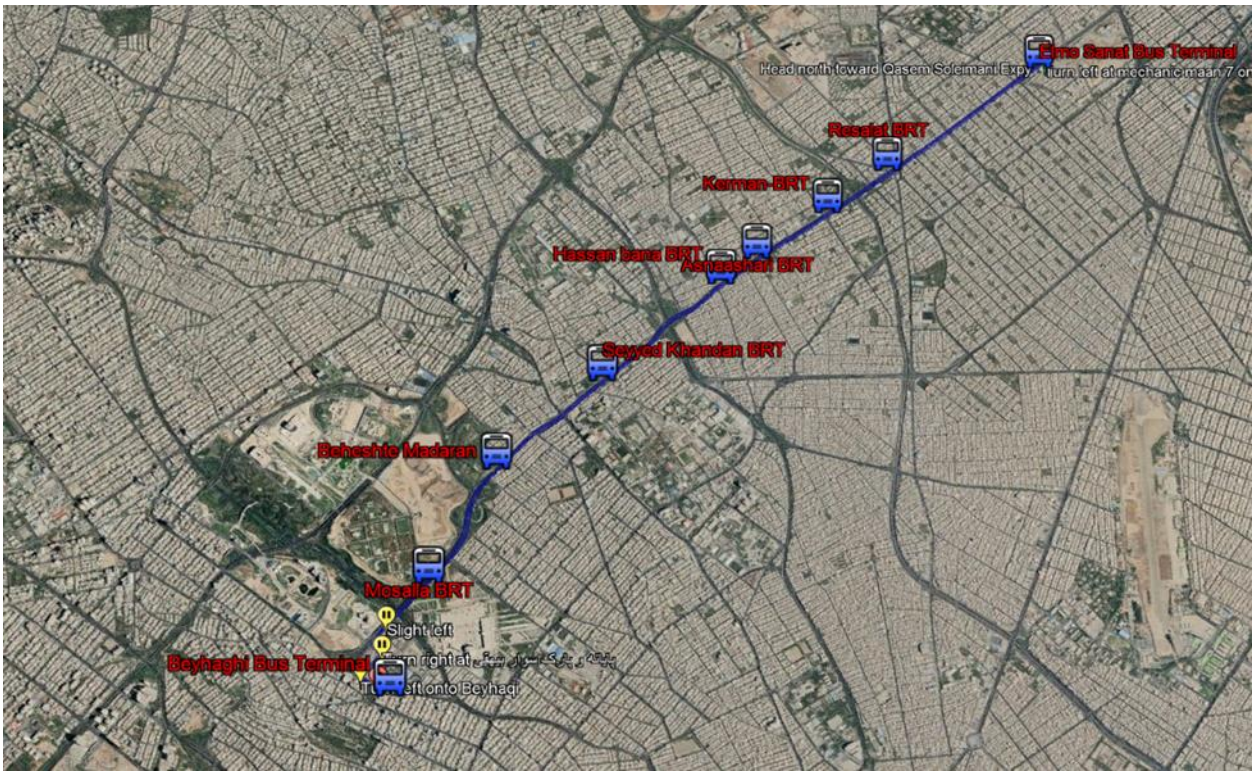
در نمودار مربوط به سناریوی اول(وجود شرایط سبقت) بعدازاینکه ظرفیت اتوبوس به ۵۰ نفر رسید، با افزایش ظرفیت اتوبوس، تغییرات چندانی در زمان انتظار مسافران مشاهده نمی‌شود. اما در نمودار مربوط به سناریوی دوم(عدم وجود شرایط سبقت) تا ظرفیت ۱۲۰ نفر کاهش زمان انتظار مسافران مشاهده می‌شود و پس از آن تغییرات چندانی در کاهش زمان انتظار مسافران پدید نمی‌آید. در شکل ۵ نمودار تاثیر تغییرات طول افق زمانی بر روی زمان انتظار مسافران نشان داده شده است. زمان انتظار مسافران در سه افق زمانی با طول‌های۳،۲و٤ بررسی شده است. همان‌طور که مشخص است در نمودار مربوط به هر دو سناریو با افزایش طول افق زمانی، زمان انتظار مسافران افزایش یافته است.



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



شکل ٦. نمودار تاثیر تغییرات طول افق زمانی بر روی زمان انتظار مسافران



شکل ۷. خط ۵ مترو تهران

۲-۵ مطالعه‌ی موردی

در ادامه، استراتژی مربوط به سناریوی اول(وجود شرایط سبقت) که قبلا در یک مثال فرضی استفاده شده بود، در خط ۵ اتوبوس سریع السیر تهران(BRT) نیز تست شده است. این خط یکی از خطوط ده‌گانه BRT تهران است. خط پنج اتوبوس‌های تندرو تهران از کوتاه‌ترین خطوط این سامانه است. خط ۵ اتوبوس‌های تندرو مرسوم به (BRT) از پایانه علم و صنعت در شرق تهران آغاز و به پایانه بیهقی در میدان آرژانتین ختم می‌شود. طول این خط ۹,۵ کیلومتر(۵,۹ مایل) است. این خط دارای ۱۰ ایستگاه اتوبوس است که بیشتر مسیر آن در بزرگراه رسالت تعبیه شده است. ایستگاه‌های این خط عبارت‌اند از: پایانه علم و صنعت، آیت، رسالت، کرمان، اثنی عشر، استاد حسن بنا، سید خندان، بهشت مادران، مصلی و پایانه بیهقی. این خط با هیچ یک از خطوط دیگر ایستگاه مشترک ندارد و تنها از میان خط ۹ اتوبوس‌های تندرو عبور می‌کند. داده‌های واقعی توسط مشاهده‌های انجام‌شده جمع آوری شده است. داده‌های

به‌دست‌آمده شامل زمان حرکت اتوبوس‌ها، فاصله‌ی بین ایستگاه‌ها و تعداد مسافرانی است که در هر ایستگاه سوار یا پیاده می‌شوند که با استفاده از آن می‌توانیم نرخ مسافران ورودی به هر ایستگاه را محاسبه کنیم. به دلیل اینکه در مسیر BRT خط۵ امکان سبقت وجود دارد بنابراین تنها می‌توان از مدل مربوط به سناریوی اول استفاده کرد. در جدول زیر زمان انتظار مسافران برای $0.5 \leq \theta \leq 1$ نشان داده شده است. هر چه θ به یک نزدیک‌تر باشد بیانگر این نکته است که ارزش زمان انتظار در داخل وسیله نقلیه به زمان انتظار خارج از وسیله نقلیه نزدیک‌تر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمان انتظار مسافران در حالتی که استراتژی مربوط به سناریوی اول مورداستفاده قرار می‌گیرد نسبت به حالت بدون استراتژی کنترلی کاهش یافته است. همچنین با کاهش مقدار θ زمان انتظار مسافران کاهش یافته است. همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده شده است با استفاده از استراتژی کنترلی مربوط به سناریوی اول زمان انتظار مسافران بین ۳ تا ۳/٦ درصد کاهش یافته است. بیشترین کاهش زمان انتظار مسافران(۳/٦ درصد) نیز مربوط به زمانی است که θ برابر با ۰/۵ است. همان‌طور که از مقایسه‌ی نتایج مطالعه‌ی موردی با مثال فرضی مشاهده می‌شود استفاده از استراتژی کنترلی تمام توقف باعث کاهش زمان انتظار مسافران می‌گردد.

جدول ۵. مقایسه زمان انتظار مسافران باθ مختلف در استراتژی کنترلی تمام توقف

θ	۱	۰,۹	۰,۸	۰,۷	۰,٦	۰,۵
زمان انتظار بدون استراتژی کنترلی	۳۹۷۱	۳۹۷۱	۳۹۷۱	۳۹۷۱	۳۹۷۱	۳۹۷۱
زمان انتظار در استراتژی مربوط به سناریوی اول	۳۸۵۲	۳۸٤۷	۳۸٤۱	۳۸۳٦	۳۸۳۱	۳۸۲۷
مقدار زمان انتظار کاهش یافته	۱۱۹	۱۲٤	۱۳۰	۱۳۵	۱٤۰	۱٤٤
درصد بهبود زمان انتظار مسافران نسبت به حالت بدون کنترل	۳	۳,۱	۳,۳	۳,٤	۳,۵	۳,٦

٦. نتیجه‌گیری

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 گرفت و تاثیر آن بر روی تابع هدف ارزیابی شد. مشاهده شد که با افزایش ظرفیت اتوبوس و کاهش طول افق زمانی زمان انتظار مسافران کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از مثال فرضی نشان داد که استفاده از استراتژی کنترلی توقف اتوبوس‌ها باعث می‌شود زمان انتظار مسافران نسبت به حالت بدون استراتژی کنترلی بین ۳ تا ٤/۵ درصد کاهش یابد. بدون استراتژی کنترلی تمام توقف زمان انتظار مسافران ٤۲٦۵ دقیقه گزارش شد. همچنین در سناریوی اول استراتژی کنترلی(وجود شرایط سبقت) زمان انتظار مسافران ٤۰۷۰ دقیقه و در سناریوی دوم(عدم وجود شرایط سبقت) ٤۱۳۳ دقیقه به‌دست‌آمد. در ادامه خط ۵ بی ار تی تهران برای تست مدل انتخاب شد و پارامترهای ثابت برای هرکدام از ایستگاه‌ها با روش‌های میدانی برداشت و در مدل استفاده گردید. درنهایت زمان انتظار مسافران در حالت استراتژی کنترلی در سناریو اول با حالت بدون استراتژی کنترلی مقایسه شد. این مقایسه در $0.5 \leq \theta \leq 1$ انجام‌گرفته که θ بیانگر نسبت ارزش زمان انتظار در داخل وسیله نقلیه به زمان انتظار خارج از وسیله نقلیه

است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که استفاده از استراتژی کنترلی توقف اتوبوس‌ها باعث می‌شود زمان انتظار مسافران نسبت به حالت بدون استراتژی کنترلی بین ۳ تا ۳,٦ درصد کاهش یابد. این استراتژی کنترلی درصورتی‌که با دیگر استراتژی‌های کنترلی به‌طور هماهنگ اجرا شود می‌تواند تاثیر به سزایی 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 فرا ابتکاری 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.

۷. مراجع

– نایبی، ذگردی، امین ناصری، یقینی، (۱۳۹۵). "بهینه‌سازی استراتژی‌های مدیریت اختلال در خطوط راه‌آهن شهری با استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر"، مهندسی حمل‌ونقل، 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.

– 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, 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.

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

– Cats, Oded et al. 2012. “Bus Holding Control Strategies: A Simulation-Based Evaluation and Guidelines for Implementation.” Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board 2274: 100–108.

– 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.

Review.” Transportation Research Part B: Methodological 77: 38–75. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261515000454.

– Laskaris, G, O Cats, E Jenelius, and F Viti. 2016. “A Real-Time Holding Decision Rule Accounting for Passenger Travel Cost.” In 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), , 2410–15.

– 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.

– Nesheli, Mahmood Mahmoodi, and Avishai – 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, 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.

– 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.

– Ibarra-Rojas, O J, F Delgado, R Giesen, and J C Muñoz. 2015. “Planning, Operation, and Control of Bus Transport Systems: A Literature

(Avi) Ceder. 2017. “Real-Time Public Transport Operations: Library of Control Strategies.” Transportation Research Record 2647(1): 26–32. https://doi.org/10.3141/2647-04.

– 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.

– Xuan, Yiguang, Juan Argote, and Carlos F Daganzo. 2011. “Dynamic Bus Holding Strategies for Schedule Reliability: Optimal Linear Control and Performance Analysis.” Transportation Research Part B: Methodological 45(10): 1831–45. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261511001093.

– 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.

میر سامان پیشوایی، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را به ترتیب در سال‌های 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. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه ایشان مدیریت زنجیره تأمین و لجستیک و طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌ها بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشد.

عبدالرضا شیخ الاسلامی، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران را به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۷٤ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۸۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران از دانشگاه تهران گردید. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه 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 می‌باشد.

مسعود محمد حسین میرزایی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی خط و سازه را در سال ۱۳۹۸ از دانشگاه علم و صنعت ایران أخذ 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 بهینه‌سازی در حمل و نقل است.