فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۶، شماره ۱، پاییز ۱۴۰۳، ص. ۴۱۷۵-۴۱۵۹

مقاله علمی-پژوهشی

تحلیل حساسیت شاخص‌های ارزیابی حمل و نقل در صورت تغییرات سرفاصله اتوبوس تندرو

محمودرضا کی‌منش (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه عمران راه و ترابری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

E-mail: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

امیرمحمد پروینی، دانشجوی دکتری، گروه عمران راه و ترابری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

چکیده

اتوبوس تندرو به عنوان یکی از شیوه‌های نسبتا انبوه‌بر حمل و نقل همگانی همواره مورد توجه بسیاری از مدیران و برنامه‌ریزان شهری بوده است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این شیوه و همچنین تمامی شیوه‌های حمل و نقل همگانی، سرفاصله آن‌ها است. هر چه سرفاصله کمتر باشد زمان انتظار کاربران در ایستگاه کمتر می‌شود و از دیدگاه کاربران شرایط مطلوب‌تر است اما از دیدگاه گردانندگان سیستم هزینه‌ها افزایش خواهد یافت. در پژوهش‌های پیشین توجه کمتری به تحلیل حساسیت سرفاصله اتوبوس‌تندرو شده است، در این پژوهش تحلیل حساسیت شاخص‌ها در صورت تغییرات سرفاصله با استفاده از نتایج مدل کلان‌نگر و برازش رگرسیون خطی (نسبت به پارامترها یا ضرایب) مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین با استفاده از نتایج آن، شاخصی ساده اما کاربردی جهت تعیین بهترین سرفاصله ارائه و از اطلاعات طرح جامع حمل و نقل شهر کرج (ماتریس تقاضا و برداشت‌های ترافیکی سال پایه ۱۳۹۵) استفاده می‌شود. نتیجه دیگر آن که به ازای هر یک درصد افزایش سرفاصله، تعداد مسافران اتوبوس تندرو ۵۸ مسافر کاهش می‌یابد. همچنین به ازای هر یک دقیقه افزایش سرفاصله، متوسط زمان سفر ، حدود ۱۰ ثانیه افزایش می‌یابد. نتایج بیان‌گر افزایش ۱۲۲۸/۷ کیلوگرمی آلاینده‌ها در یک ساعت اوج صبح، در صورت افزایش یک دقیقه‌ای سرفاصله است. در نهایت بر اساس شاخص پیشنهادی، سرفاصله بهینه، ۵ دقیقه خواهد بود؛ زیرا برای کاهش سرفاصله از ۶ دقیقه به ۵ دقیقه به ازای هر ناوگان جدید خریداری شده، به طور متوسط ۸۸۵ مسافر جدید جذب آن می‌شوند که این تعداد مسافر به نسبت سایر سرفاصله‌های بررسی شده، بیشترین است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، سرفاصله، اتوبوس تندرو، BRT، شاخص سرفاصله بهینه

۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین و حیاتی‌ترین زیرساخت‌ها در کلان‌شهرهای دنیا شبکه حمل و نقل همگانی آن‌ها است که حجم قابل توجهی از سفرهای درون‌شهری توسط آن‌ها سرویس‌دهی می‌شوند. به طور معمول سیستم حمل و نقل همگانی در شهرهای بزرگ از شیوه‌های مختلفی همچون اتوبوس، مترو، اتوبوس تندرو و قطارهای سبک شهری تشکیل می‌گردند. برای طراحی هر یک از شیوه‌های حمل و نقل همگانی، الزامات منحصر به فردی باید در نظر گرفته شود اما به طور کلی در فرآیند طراحی آن‌ها به شاخص‌هایی همچون هزینه ساخت، تقاضای جذب شده، پوشش بخش‌های مختلف شهر، نحوه ایجاد دسترسی بین بخش‌های مهم شهر توجه می‌شود.

یکی از مهم‌ترین شیوه‌های حمل و نقل همگانی در شهرهای بزرگ دنیا، شیوه حمل و نقل اتوبوسرانی تندرو است. در واقع می‌توان گفت سامانه اتوبوسرانی تندرو، غالب منافع و مزایای سیستم اتوبوسرانی سنتی و قطارهای سبک شهری را به صورت همزمان دارد. به بیان ساده‌تر می‌توان گفت سامانه اتوبوسرانی تندرو هزینه کم و انعطاف پذیری سیستم اتوبوسرانی سنتی را دارد، در حالی که کارایی و امکانات رفاهی آن شبیه به قطارهای سبک شهری است. به دلیل آنکه خطوط اتوبوسرانی تندرو در غالب مسیر از ترافیک معابر جدا شده‌اند، سرفاصله آن‌ها به نسبت خطوط اتوبوسرانی عادی کمتر است (دارای تعداد اعزام ناوگان بیشتر) و می‌توانند تعداد مسافران بیشتری را به خود جذب نمایند [Texas A&M Transportation Institute,2022].

سامانه اتوبوسرانی تندرو به طول معمول در مسیرهای اتصال دهنده مناطق پیرامونی به منطقه مرکزی شهر سرویس‌دهی می نمایند. در برخی شهرهای بزرگ سامانه اتوبوسرانی تندرو به عنوان تکمیل کننده شبکه حمل و نقل همگانی و به جای سرویس‌های ریلی پر هزینه مورد استفاده قرار می‌گیرد [Texas A&M Transportation Institute,2022].

تعیین سرفاصله مناسب برای اتوبوس تندرو مساله‌ای بسیار مهم و پیچیده‌ای است. به طور کلی می‌توان گفت هر چه سرفاصله اتوبوس تندرو کمتر باشد، به تعداد ناوگان بیشتری نیاز است و منجر به افزایش مطلوبیت آن برای کاربران خواهد شد؛ زیرا مطلوبیت یک شیوه برای کاربران آن به هزینه‌های کلی[1] آن (شامل هزینه سفر، زمان سفر، زمان دسترسی، زمان انتظار در ایستگاه و...) بستگی دارد. از آنجا که کاهش سرفاصله باعث کاهش زمان انتظار در ایستگاه و در نتیجه کاهش هزینه‌های کلی می‌شود، مطلوبیت را می‌تواند افزایش دهد [Ortuzar & Willumsen, 2011]. به این مساله از دو رویکرد متفاوت می‌توان نگاه نمود. در رویکرد اول از دیدگاه گردانندگان سیستم می‌توان گفت آن‌ها مجبور هستند برای کاهش سرفاصله، ناوگان جدید خریداری کنند و در کل هزینه‌های خرید و تعمیر و نگهداری به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد. از سوی دیگر در رویکرد دوم از دیدگاه کاربران می‌توان گفت با کاهش سرفاصله و در نتیجه افزایش تعداد ناوگان، زمان انتظار سوار شدن در ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد و همچنین راحتی مسافران در داخل ناوگان افزایش می‌یابد که این موارد منجر به افزایش مطلوبیت این شیوه خواهد شد.

در این پژوهش هدف اصلی تحلیل حساسیت شاخص‌های ارزیابی حمل و نقل همگانی همانند تعداد مسافران سوار شده به سیستم، متوسط تعداد مسافر به ازای هر ناوگان، زمان سفر در کل شبکه و... در برابر تغییرات سرفاصله اتوبوس تندرو است. در واقع این مطالعه به دنبال آن است تا تاثیر تغییرات سرفاصله را بر شاخص‌های ارزیابی حمل و نقلی بررسی نمایند. همچنین با توجه به نتایج تحلیل حساسیت سعی بر آن است تا یک شاخص ساده اما کاربردی و عملی جهت تعیین سرفاصله بهینه (با لحاظ نمودن هر دو رویکرد کاربران و گردانندگان) از بین تمامی سرفاصله‌های بررسی شده، ارائه گردد.

در این مطالعه از اطلاعات طرح جامع حمل و نقل شهری و حومه کرج (شامل ماتریس تقاضا، متغیرهای اقتصادی اجتماعی

نواحی ترافیکی و...) برداشت شده در سال پایه ۱۳۹۵ و برآورد شده برای سال افق طرح (۱٤۱۰) استفاده می‌شود [مشاوران اندیشکار، ۱۳۹۵ – ۱۳۹۷]. در بخش بعدی مرور ادبیات تخصصی و پس از آن روش‌شناسی پژوهش ارائه می‌گردد. تحلیل نتایج در بخش چهارم و نتیجه‌گیری و پیشنهادها به ترتیب در بخش‌های پنجم و ششم آورده شده‌اند.

۲. ادبیات پژوهش

هدف از مرور مطالعات پیشین، بررسی آن‌ها و در نهایت یافتن شکاف پژوهشی است. از این‌رو در بخش حاضر به بررسی مطالعات پیشین انجام شده پرداخته می‌شود. حسنی نسب و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهش خود مدل برنامه‌ریزی ریاضی جهت طراحی مسیر بهینه در شبکه یکپارچه اتوبوس و اتوبوس تندرو ارائه نمودند. آن‌ها در مدل خود سعی بر بهینه کردن سرفاصله زمانی و مسیر به صورت هم‌زمان با استفاده از الگوریتم سرد و گرم کردن داشتند [حسنی‌نسب، صفارزاده، ممدوحی، ۱۳۹۰].

کاهش سرفاصله زمانی با لحاظ کردن محدودیت تعداد ناوگان با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی مختلط عدد صحیح توسط افندی‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. آن‌ها در مطالعه خود یک روش فراابتکاری جهت حل مدل پیشنهادی ارائه نمودند [افندی‌زاده، بیگدلی‌راد، شاکر، ۱۳۹۸]. سلیمی و ریاحی سامانی (۱۳۹۷) در مطالعه خود به اندازه گیری قابلیت اطمینان اتوبوس‌های با سرفاصله کوتاه با کمک داده های AVL[۲] با مطالعه موردی اتوبوسرانی اصفهان پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود قابلیت اطمینان ۱۵ خط شهر اصفهان آنالیز نمودند که خطوط با قابلیت اطمینان پایین را مشخص کردند. نتایج حاکی از آن بود که خط BRT باوجود عملکرد مناسب در شاخص های زمان سفر و وفاداری به زمان‌بندی، در ساعات اوج عصر نیازمند توجه بیشتر از سوی گرداننده به منظور بهبود قابلیت اطمینان است [سلیمی و ریاحی، ۱۳۹۷].

ارزیابی و پیش بینی پایداری سرفاصله‌ی اتوبوس‌های شهری با هدف برنامه‌ریزی شهری بر اساس داده‌های مسیر GPS موضوعی دیگری است که توسط متین و همکاران (۱٤۰۰) بررسی گردید. آنها در مطالعه خود یک روش پیش بینی سرفاصله‌ی اتوبوس برای خدمات حمل ونقل در آینده، با استفاده از رگرسیون تقویت شده‌ی گرادیان ارائه نمودند. روش پیش‌بینی ارائه شده با داده‌های مسیر اتوبوس ۱۱ یزد، ارزیابی گردید که پارامترهای میانگین قدرمطلق خطا و میانگین خطای درصد مطلق متقارن برای رگرسیون تقویت شده‌ی گرادیان به ترتیب ۲۵۰۲۱ و ۱۱/٤۸ درصد، اندازه گیری شده است [متین، جهانگرد، کاظم‌زاده، ۱٤۰۰].

سون و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه خود به بهینه‌سازی زمان‌بندی و سرفاصله اتوبوس‌های تندرو پرداختند. آن‌ها در مدل برنامه‌ریزی ریاضی خود هزینه‌های سفر مسافران و هزینه‌های بهره‌برداری خط را کمینه نمودند [Sun, Wei and Wang، ۲۰۰۸]. سمان و همکاران (۲۰۲۱) مدل برنامه‌ریزی ریاضی جهت فورمول‌بندی مساله تعیین سرفاصله اتوبوس‌هایی با توالی خود کار ارائه نمودند. گاهی اقداماتی مانند سبقت گرفتن انجام می شود که ترتیب اتوبوس‌ها را در خط تغییر می‌دهد. برای بررسی چنین موضوعی، این مقاله یک فرمول‌بندی کلی برای اتوبوس‌های توالی خودکار در استراتژی های کنترل سرفاصله ارائه می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که فرمول پیشنهادی می‌تواند رویدادهای تغییر نظم در یک خط BRT را کنترل کند و در عین حال، فاصله بین اتوبوس‌ها را نیز کنترل کرده و زمان انتظار مسافران را کاهش دهد [Seman et al، ۲۰۲۱]. چن و همکاران (۲۰۱۵) به موضوع بهینه‌سازی سرفاصله اتوبوس‌های تندرو با فرض پرش از برخی ایستگاه‌ها با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود استراتژی ارائه شده به نسبت سایر استراتژی‌ها عملکرد بهتری از لحاظ هزینه‌های عملیاتی کل و زمان داخل وسیله دارد [Chen et al، ۲۰۱۵].

به کارگیری اتوبوس تندرو در یک مسیر بلند اتوبوس عادی مطالعه دیگر است که توسط ثیلاکاراتنه و ویراسینگ (۲۰۱۶) انجام گردید. آن‌ها در مطالعه خود مدل برنامه‌ریزی ریاضی جهت بهینه‌سازی سرفاصله اتوبوس عادی و اتوبوس عادی ارائه نمودند. نتایج مطالعه آنها حاکی از آن بود در صورتی که در محاسبه هزینه‌های کل، هزینه خرید ناوگان و تجهیزات اولیه، هزینه‌های بهره‌برداری، هزینه زمان داخل وسیله مسافران و همچنین هزینه زمان انتظار مسافران در نظر گرفته شود، اتوبوس تندرو به مراتب هزینه کمتری نسبت به اتوبوس عادی دارد [Thilakaratne and Wirasinghe، ۲۰۱۶]. تاثیر اولویت عبور اتوبوس تندرو در تقاطعات چراغدار بر سرفاصله آن‌ها، توسط مکفارلین و همکاران (۲۰۲۱) بررسی گردید که نتایج آن‌ها حاکی از تاثیر بسزای این امر در سرفاصله اتوبوس‌ها دارد [Macfarlane et al، ۲۰۲۱].

در یکی دیگر مطالعات به موضوع کنترل سرفاصله در کریدورهای اتوبوس تندرویی است که همزمان به چند خط اتوبوس تندرو سرویس‌دهی می‌نمایند که توسط سمان و همکاران (۲۰۱۹) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها در مطالعه خود یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای بهینه نمودن شرایط و کنترل سرفاصله خطوط اتوبوس تندرو عبوری از یک کریدور ارائه نمودند [Seman et al، ۲۰۱۹]. بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی اتوبوس‌های تندرو با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسط لیانگ و همکاران (۲۰۱۱) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها در مطالعه خود به دنبال یافتن سرفاصله بهینه با کمینه کردن زمان سفر مسافران و هزینه بهره‌برداری اتوبوس تندرو بوده‌اند. آن‌ها برای مطالعه یک خط اتوبوس تندرو در گوانگژو چین را مورد مطالعه قرار دادند که نتایج حاکی از آن بود الگوریتم پیشنهادی می‌تواند سرفاصله اتوبوس‌ها را به شکل کارایی بهینه نماید [Liang, He and Sha، ۲۰۱۱].

به طور کلی می‌توان گفت در پژوهش‌های بسیاری بر اساس مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی به دنبال بهینه کردن سرفاصله اتوبوس‌ها هستند. در این قبیل مطالعات به طور معمول کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری سیستم و زمان سفر مسافران هدف اصلی مدل‌ها است. همچنین برای حل مدل‌های پیشنهادی از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری بسیار مختلفی استفاده شده است [Zhao et al، ۲۰۱۸] [Hawkins, Wirasinghe and Hunt، ۲۰۲۱] [Liang, Ma and He، ۲۰۱۹] [Chen et al، ۲۰۱۹] [Wang et al، ۲۰۲۲] [Zhang et al، ۲۰۲۱] [Schmaranzer, Braune and Doerner، ۲۰۱۸].

بر اساس بررسی‌های انجام شده مشخص می‌گردد، در مطالعات پیشین، بیشتر سعی بر آن بوده است تا با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی سرفاصله یا تعداد ناوگان مورد نیاز برای خطوط اتوبوسرانی عادی یا تندرو را بهینه نمایند. اما در این مطالعه سعی بر آن است تا با استفاده از تغییر سرفاصله تاثیر آن بر سایر شاخص‌های ارزیابی حمل و نقلی بررسی گردد. به بیان دیگر می‌توان گفت در مطالعه حاضر سرفاصله به عنوان یک متغیر ورودی در نظر گرفته شده است در حالی که در قالب پژوهش‌های پیشین این حوزه، سرفاصله (یا تعداد ناوگان) به عنوان خروجی نهایی مدل برنامه‌ریزی ریاضی بوده است. برای بررسی اثر تغییر سرفاصله بر شاخص‌های ارزیابی، تمامی ورودی‌های مدل ثابت فرض شده و تنها سرفاصله تغییر می‌نماید. همچنین با توجه به آنکه شاخص‌های ارزیابی حمل و نقلی در سرفاصله‌های مختلفی مورد بررسی قرار می‌گیرند، سعی بر آن است تا شاخصی ساده اما کاربردی و عملی ارائه گردد تا مهندسان و برنامه‌ریزان در مطالعات آتی بتوانند با استفاده از آن، یک معیاری برای تعیین سرفاصله مناسب داشته باشند.

۳. روش پژوهش

سامانه اتوبوسرانی تندرو در بسیاری از شهرهای بزرگ دنیا به عنوان یکی از شیوه‌های مهم و اساسی حمل و نقل همگانی محسوب می‌شوند و تعیین سرفاصله مناسب برای آن یکی از پایه‌ای‌ترین مسائل این شیوه محسوب می‌گردد. اگر سرفاصله بیش اندازه کم باشد، می‌تواند هزینه‌های گردانندگان سیستم را به

طور چشمگیری افزایش دهد و اگر سرفاصله آن بیش اندازه زیاد باشد، منجر به کاهش قابل توجه مطلوبیت آن خواهد شد. از این‌رو در پژوهش جاری سعی بر آن است تا با تحلیل حساسیت شاخص‌های ارزیابی حمل و نقل همگانی در صورت تغییرات سرفاصله علاوه‌بر تحلیل تغییرات شاخص‌ها، شاخصی ساده اما کاربردی و عملی جهت تعیین سرفاصله بهینه ارائه گردد.

به طور خلاصه پژوهش جاری دارای سه گام مختلف است که در گام اول با استفاده از مدل کلان‌نگر نتایج شاخص‌ها در سرفاصله‌های مختلف استخراج می‌شود. سپس در گام دوم با استفاده از مدل رگرسیون خطی (نسبت به پارامترها یا ضرایب) تحلیلی کمی و توصیفی بر روی نتایج استخراج شده انجام می‌گردد. در نهایت در گام سوم با استفاده از شاخص پیشنهادی سرفاصه بهینه در بین تمامی سرفاصله‌های بررسی شده تعیین می‌شود.

لازم به ذکر است برای تحلیل حساسیت شاخص‌ها در برابر تغییر سرفاصله، تمامی ورودی‌های مدل به جز سرفاصله، بدون تغییر لحاظ می‌گردند و تنها تغییری که در مدل کلان‌نگر ایجاد می‌شود مقادیر مختلف سرفاصله خط اتوبوس تندروی خیابان بهشتی کرج است. به منظور مدلسازی از اطلاعات طرح جامع حمل و نقل شهری و حومه کرج (ماتریس تقاضا، اطلاعات اقتصادی اجتماعی نواحی ترافیکی و...) برداشت شده در سال ۱۳۹۵ استفاده می‌گردد که این مقادیر برای سال ۱٤۱۰ پیش‌بینی شده و نتایج ارائه شده مدل کلان‌نگر بر اساس خروجی‌های سال افق طرح یعنی سال ۱٤۱۰ است [مشاوران اندیشکار، ۱۳۹۵ – ۱۳۹۷].

به منظور بررسی تحلیل حساسیت شاخص‌ها در صورت تغییر سرفاصله از مدل رگرسیون خطی (نسبت به پارامترها) که با استفاده از روش کمینه مربعات خطا[3] برازش شده است، استفاده می‌گردد (رابطه ۱). همچنین برای بررسی نیکی برازش از معیار نکویی برازش مطابق با رابطه (۲) و برای بررسی معناداری پارامترهای (ضرایب) مدل از آماره t مطابق با رابطه (۳) استفاده می‌شود [Wooldridge، ۲۰۱۹].

$$\min\left(\sum_i \left(y_i - y_i\right)^2\right) \qquad (۱)$$

$$R^2 = \frac{\sum_i \left(y_i - \bar{y}\right)^2}{\sum_i \left(y_i - \bar{y}\right)^2} \qquad (۲)$$

$$t = \frac{p}{se(p)} \qquad (۳)$$

شایان ذکر است که در روابط فوق، y_i مقدار متغیر وابسته مشاهده iام، y_i مقدار برآورد شده برای متغیر وابسته iام، $\bar{y}$ مقدار میانگین متغیر وابسته، p پارامتر (ضریب) مدل و se(p) مقدار خطای معیار[4] پارامتر p است.

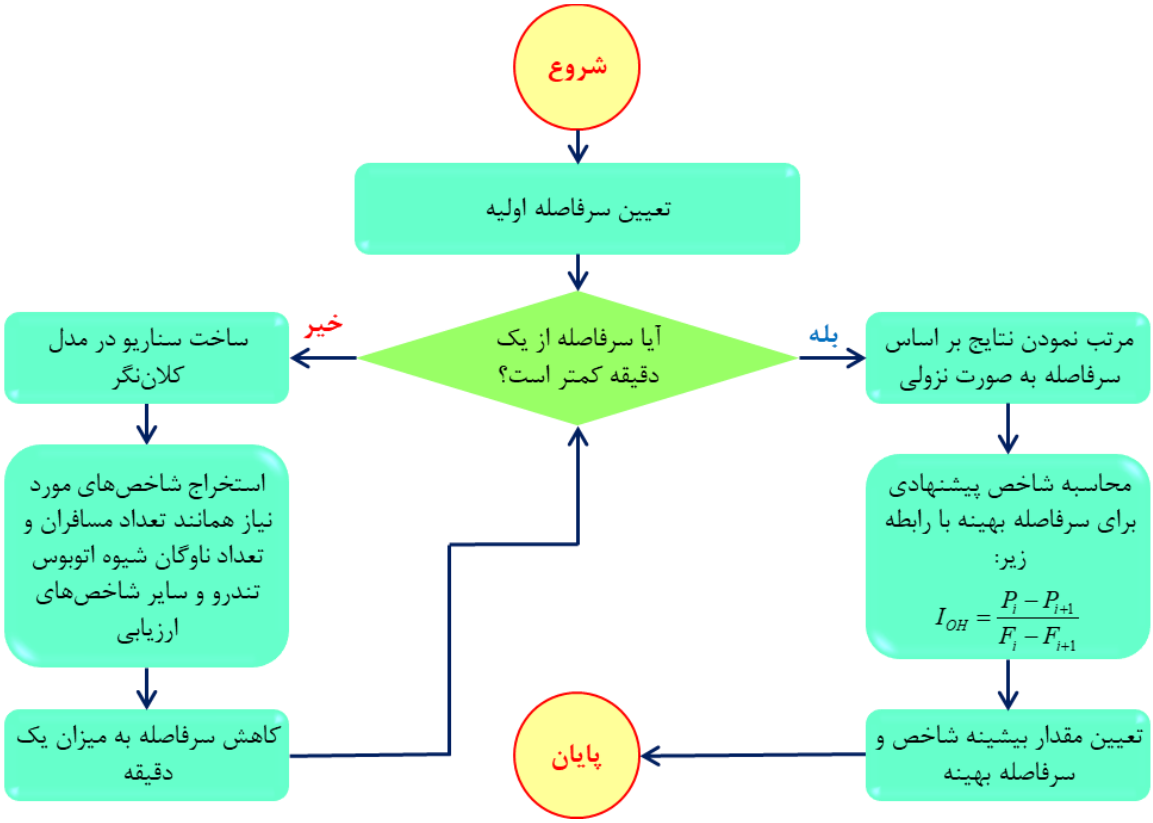
یکی از مهم‌ترین و بارزترین ویژگی‌های خطوط حمل و نقل همگانی، سرفاصله آن‌ها است. به طور کلی می‌توان گفت هر چه سرفاصله آن‌ها کمتر باشد، از دیدگاه کاربران مطلوبیت آن شیوه‌ها افزایش می‌یابد. اما شایان ذکر است کاهش سرفاصله برای گردانندگان سیستم هزینه‌های بسیاری همچون خرید ناوگان و تجهیزات جدید، طراحی برنامه بهره‌برداری مخصوص و... را به همراه دارد. از این‌رو با توجه به اهمیت ویژه این موضوع، در این پژوهش توجه ویژه‌ای آن به شده است. در این مطالعه با استفاده از کدنویسی در نرم افزار Transcad با زبان GISDK شاخص پیشنهادی تعیین سرفاصله بهینه خطوط در مدل اعمال می‌گردد. برای این منظور تعداد ۱٦ سناریو با سرفاصله ۱٦ دقیقه تا ۱ دقیقه ساخته می‌شود؛ زیرا در مراجع اصلی حداکثر سرفاصله مناسب برای خطوط اتوبوس تندرو ۱۵ دقیقه بیان شده است [Vucic, 2007]. از این‌رو برای آنکه بتوان شاخص‌پیشنهادی را در تمامی سرفاصله‌های ذکر شده در کتب مرجع را پوشش داد، حداکثر سرفاصله ۱٦ دقیقه در مدلسازی‌ها لحاظ شده است. مبنای این روش بدین صورت است که با کاهش سرفاصله مطلوبیت شیوه اتوبوس تندرو افزایش می‌یابد و بر این اساس تعداد مسافران آن افزایش می‌یابد. اما برای کاهش سرفاصله نیاز است تا ناوگان

جدید تهیه گردد که این موضوع هزینه‌هایی را برای گردانندگان سیستم به همراه دارد. به بیان دیگر در شاخص ارائه شده سعی بر آن بود تا به نوعی هم هزینه‌های گردانندگان (تعداد ناوگان جدید خریداری شده) و هم مطلوبیت کاربران (تعداد مسافران جدید جذب شده) لحاظ گردد. در این رابطه فرض بر آن است که گردانندگان سیستم وقتی ناوگان جدید خریداری می‌نمایند که به نسبت مسافر بیشتری جذب سیستم گردد. شاخصی که برای تعیین سرفاصله بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد به شرح زیر است:

$$I_{OH} = \frac{P_i - P_{i+1}}{F_i - F_{i+1}} \qquad (٤)$$

در رابطه (٤)، I_{OH} شاخص تعیین سرفاصله بهینه، P_i و P_{i+1} به ترتیب تعداد مسافر در سرفاصله i و i+1 و F_i و F_{i+1} به ترتیب تعداد ناوگان مورد نیاز برای سرفاصله i و i+1 است. سرفاصله بهینه زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار I_{OH} بیشینه گردد. برای بیان بهتر نحوه محاسبه سرفاصله بهینه شبکه اتوبوسرانی تندرو، روش انجام کار در شکل ۱به تصویر کشیده شده است. در نهایت با استفاده از الگوریتم پیشنهادی زیر و همچنین مدل کلان‌نگر شهر کرج، سرفاصله بهینه تعیین می‌گردد.

در انتها لازم به ذکر است که نتایج مدل کلان‌نگر شهر کرج برای یک ساعت اوج صبح یک روز معمولی ارائه می‌گردد. همچنین برای ساخت مدل‌های رگرسیون خطی از نرم افزار Excel استفاده می‌شود.



شکل ۱. الگوریتم پیشنهادی جهت تعیین سرفاصله بهینه از بین سرفاصله‌های بررسی شده

٤. تحلیل داده‌ها

کرج مرکز استان البرز، مرکز شهرستان کرج، به عنوان یکی از کلان‌شهرهای ایران شناخته می‌شود. مطابق با نتایج سر شماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ این شهر با بیش از یک میلیون ۵۹۰ هزار نفر جمعیت چهارمین شهر پرجمعیت ایران و بیست و دومین کلان‌شهر پرجمعیت خاورمیانه است.

کرج در کوهپایه‌های البرز مرکزی با وسعت ۱۶۰ کیلومتر مربع قرار دارد. کرج تا قبل از تشکیل استان البرز در سال ۱۳۸۹ جزو استان تهران بود که با تشکیل استان البرز کرج به عنوان مرکز استان البرز قرار گرفت. این شهر به علت موقعیت جغرافیایی مناسب، داشتن شهرک‌های صنعتی، موقعیت اقتصادی و همجواری با کلانشهر تهران بسیار مهاجرپذیر است. کرج پس از تهران بزرگ‌ترین شهر مهاجرپذیر ایران است و به همین دلیل به آن لقب «ایران کوچک» داده شده‌است. همچنین جمعیت این شهر نسبت به سایر شهرهای بزرگ ایران جوان‌تر است، و بالاترین میزان رشد موالید یا زاد و ولد را به خود اختصاص داده‌است. مطابق با نتایج سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵، این شهر در میان کلان‌شهرهای ایران با رشد جمعیت سالانه ٤/٧ درصد بالاترین رشد جمعیت را دارد. در شکل ۲ نقشه شهر کرج و حومه آن به همراه خط اتوبوس تندرو در محدوده خیابان بهشتی شهر کرج به تصویر کشیده شده است. شایان ذکر است مطالعات این خط انجام شده و اکنون آماده اجرا است. در جدول ۱ مقدار شاخص‌های ارزیابی حمل و نقلی و در جدول ۲ مقدار شاخص‌های آلاینده‌های زیست‌محیطی آورده شده است. با توجه به نتایج آلاینده‌ها از آنجا که تغییرات تعداد ناوگان اتوبوس تندرو در مقایسه با تعداد خودروهای سنگین شهر کرج بسیار کم است (کمتر از یک دهم درصد وسایل نقلیه سنگین) تغییرات سرفاصله تاثیر بسیار کمی بر مجموع آلاینده‌های تولید شده توسط خودروهای سنگین همانند PM، HC، NOx و SO_2 دارد. لازم به ذکر است که تعداد مسافران سوار شده حمل و نقل همگانی برآورد مدل کلان‌نگر از مسافران سوارشده تمامی خطوط حمل و نقل همگانی (شامل مترو، اتوبوس عادی و تندرو) است و سهم مسافران اتوبوس تندرو از تقسیم مسافران این شیوه بر مسافران کل حمل و نقل همگانی بدست می‌آید. همچنین از تقسیم تعداد کل مسافران شیوه اتوبوس تندرو به تعداد کل ناوگان مورد نیاز برای اتوبوس تندرو، متوسط مسافران هر ناوگان محاسبه می‌شود. برای محاسبه تعداد مسافران جدید جذب شده به ازای هر ناوگان جدید خریداری شده نیز از شاخص پیشنهادی استفاده گردیده است.

شکل ۲. نقشه شهر کرج و حومه به همراه خط اتوبوس تندرو خیابان بهشتی

جدول ۱. نتایج شاخص‌های ارزیابی حمل و نقلی در مقابل تغییرات سرفاصله اتوبوس تندرو خیابان بهشتی

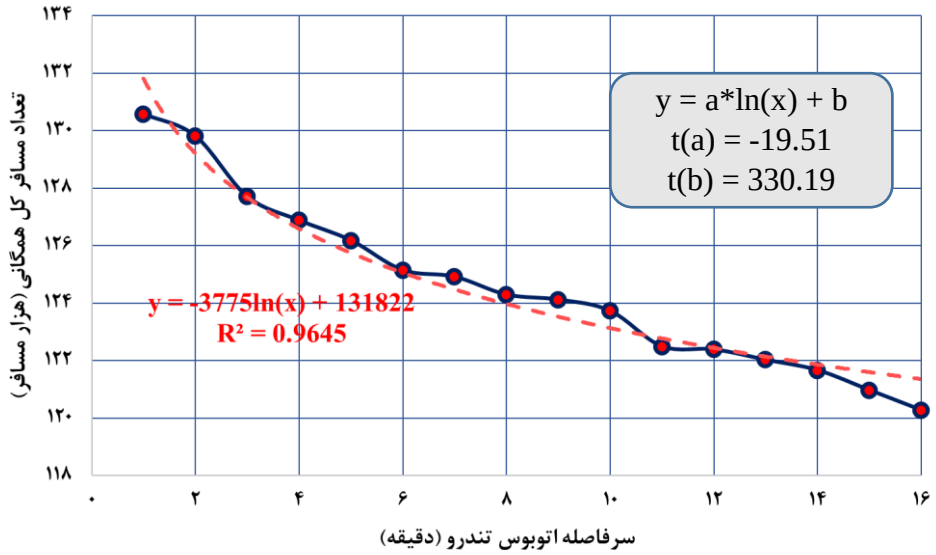
سرفاصله (دقیقه)	تعداد مسافران کل حمل و نقل همگانی	تعداد مسافر سوار شده اتوبوس تندرو	سهم اتوبوس تندرو از کل همگانی (٪)	تعداد ناوگان اتوبوس تندرو	متوسط تعداد مسافر اتوبوس تندرو به ازای هر ناوگان	متوسط تعداد مسافر اتوبوس تندرو به ازای هر ناوگان جدید	مسافر ساعت پیموده شده در سیستم اتوبوس سریع شهری	متوسط زمان سفر هر مسافر با اتوبوس تندرو (دقیقه)
۱۶	۱۲۰۲۹۰	۹۰۱۲	۷.۵٪	۶	۱۵۰۲	-	۲۳۰۹	۱۵.۴
۱۵	۱۲۰۹۸۵	۹۸۵۴	۸.۱٪	۸	۱۲۳۲	۴۲۱	۲۴۹۶	۱۵.۲
۱۴	۱۲۱۶۷۸	۱۰۴۹۵	۸.۶٪	۹	۱۱۶۶	۶۴۱	۲۶۸۳	۱۵.۳
۱۳	۱۲۲۰۴۰	۱۱۱۹۰	۹.۲٪	۱۰	۱۱۱۹	۶۹۵	۲۷۸۰	۱۴.۹
۱۲	۱۲۲۴۰۰	۱۱۶۸۵	۹.۵٪	۱۱	۱۰۶۲	۴۹۵	۲۸۷۱	۱۴.۷
۱۱	۱۲۲۵۰۴	۱۲۰۵۶	۹.۸٪	۱۲	۱۰۰۵	۳۷۱	۲۹۰۳	۱۴.۴
۱۰	۱۲۳۷۴۱	۱۳۱۵۱	۱۰.۶٪	۱۴	۹۳۹	۵۴۸	۳۱۰۰	۱۴.۱
۹	۱۲۴۱۳۱	۱۳۵۶۱	۱۰.۹٪	۱۵	۹۰۴	۴۱۰	۳۱۴۰	۱۳.۹
۸	۱۲۴۳۰۶	۱۳۹۹۵	۱۱.۳٪	۱۶	۸۷۵	۴۳۴	۳۱۸۵	۱۳.۷
۷	۱۲۴۹۲۷	۱۴۸۰۶	۱۱.۹٪	۱۷	۸۷۱	۸۱۱	۳۳۹۰	۱۳.۷
۶	۱۲۵۱۵۶	۱۶۳۸۳	۱۳.۱٪	۱۹	۸۶۲	۷۸۹	۳۶۳۴	۱۳.۳
۵	۱۲۶۱۹۲	۱۸۱۵۳	۱۴.۴٪	۲۱	۸۶۴	۸۸۵	۴۰۶۵	۱۳.۴
۴	۱۲۶۸۸۹	۱۹۲۵۱	۱۵.۲٪	۲۳	۸۳۷	۵۴۹	۴۲۹۷	۱۳.۴
۳	۱۲۷۷۱۸	۱۹۹۳۰	۱۵.۶٪	۲۵	۷۹۷	۳۴۰	۴۳۷۸	۱۳.۲
۲	۱۲۹۸۲۳	۲۳۳۶۷	۱۸.۰٪	۴۳	۵۴۳	۱۹۱	۵۱۷۷	۱۳.۳
۱	۱۳۰۵۸۴	۲۴۱۵۹	۱۸.۵٪	۸۴	۲۸۸	۱۹	۵۲۴۶	۱۳

جدول ۲. مقدار شاخص‌های زیست‌محیطی در برابر تغییرات سرفاصله اتوبوس تندرو خیابان بهشتی

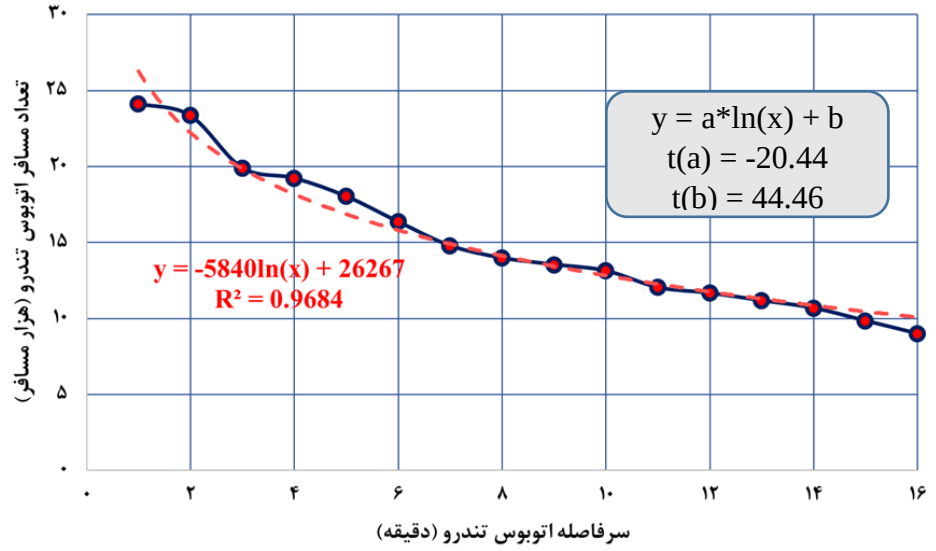
سرفاصله (دقیقه)	میزان آلاینده CO (تن)	میزان آلاینده HC (تن)	میزان آلاینده SO۲ (تن)	میزان آلاینده NOX (تن)	میزان آلاینده PM۱۰ (تن)	جمع کل آلاینده‌ها (تن)
۱۶	۳۰۱/۶	۲۶/۷	۱/۲۴	۳/۴	۱/۹	۳۵۰/۸۴
۱۵	۳۰۱/۴	۲۶/۷	۱/۲۴	۳/۴	۱/۹	۳۴۹/۶۴
۱۴	۳۰۱/۱	۲۶/۷	۱/۲۴	۳/۴	۱/۹	۳۴۸/۳۴
۱۳	۳۰۱/۱	۲۶/۷	۱/۲۴	۳/۴	۱/۹	۳۴۷/۳۴
۱۲	۳۰۱/۰	۲۶/۷	۱/۲۴	۳/۴	۱/۹	۳۴۶/۲۴
۱۱	۳۰۰/۸	۲۶/۶	۱/۲۴	۳/۴	۱/۹	۳۴۴/۹۴
۱۰	۳۰۰/۶	۲۶/۶	۱/۲۴	۳/۴	۱/۹	۳۴۳/۷۴
۹	۳۰۰/۲	۲۶/۶	۱/۲۴	۳/۴	۱/۹	۳۴۲/۳۴
۸	۳۰۰/۳	۲۶/۶	۱/۲۳	۳/۴	۱/۹	۳۴۱/۴۳
۷	۳۰۰/۲	۲۶/۶	۱/۲۴	۳/۴	۱/۹	۳۴۰/۳۴
۶	۲۹۹/۵	۲۶/۵	۱/۲۳	۳/۴	۱/۹	۳۳۸/۵۳
۵	۲۹۹/۶	۲۶/۵	۱/۲۳	۳/۴	۱/۹	۳۳۷/۶۳
۴	۲۹۹/۵	۲۶/۵	۱/۲۳	۳/۴	۱/۹	۳۳۶/۵۳
۳	۲۹۹/۰	۲۶/۵	۱/۲۳	۳/۴	۱/۹	۳۳۵/۰۳
۲	۲۹۸/۵	۲۶/۴	۱/۲۳	۳/۴	۱/۹	۳۳۳/۴۳
۱	۲۹۸/۴	۲۶/۴	۱/۲۳	۳/۴	۱/۹	۳۳۲/۳۳

در شکل ۳ تغییرات تعداد کل مسافران حمل و نقل همگانی (اتوبوس، اتوبوس تندرو و مترو) شهر کرج در سال افق طرح، در برابر تغییرات سرفاصله آورده شده است. بر اساس این نتایج می‌توان گفت این تغییرات از یک تابع لوگاریتمی که معادله آن در شکل نشان داده شده است با معیار نکویی برازش ۰/۹۶۴۵ پیروی می‌نماید. بر اساس نتایج مشخص می‌گردد به ازای هر یک درصد افزایش سرفاصله، تعداد کل مسافران حمل و نقل همگانی حدود ۳۸ مسافر کاهش می‌یابد. همچنین مطابق با آماره t محاسبه شده می‌توان گفت با توجه به آنکه مقدار آن‌ها (هم برای ضریب لگاریتم طبیعی سرفاصله و هم برای عدد ثابت مدل)

از مقدار بحرانی t با درجه آزادی ۱٤ در سطح معناداری یک درصد یعنی ۲/٦۲ بیشتر است، پس هر دو پارامتر مدل در سطح یک درصد معنادار هستند. در شکل ٤ تغییرات تعداد کل مسافران خط اتوبوس تندرو خیابان بهشتی شهر کرج در برابر تغییرات سرفاصله به تصویر کشیده شده است که نتایج بیانگر آن است که همانند تعداد کل مسافران حمل و نقل همگانی، از یک تابع لوگاریتمی با معیار نکویی برازش ۰/۹٦۸٤ پیروی می‌نماید. بر اساس مدل برازش شده می‌توان گفت به ازای هر یک درصد افزایش سرفاصله، تعداد مسافران اتوبوس تندرو بهشتی حدود ۵۸ مسافر کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به مقدار آماره t می‌توان گفت هر دو پارامتر مدل در سطح معناداری یک درصد معنادار هستند.



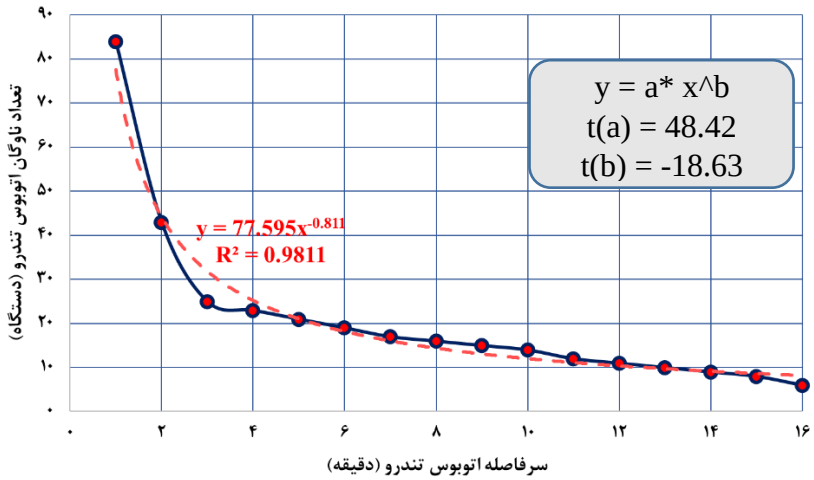
شکل ۳. تغییرات تعداد کل مسافران حمل و نقل همگانی شهر کرج در برابر تغییرات سرفاصله



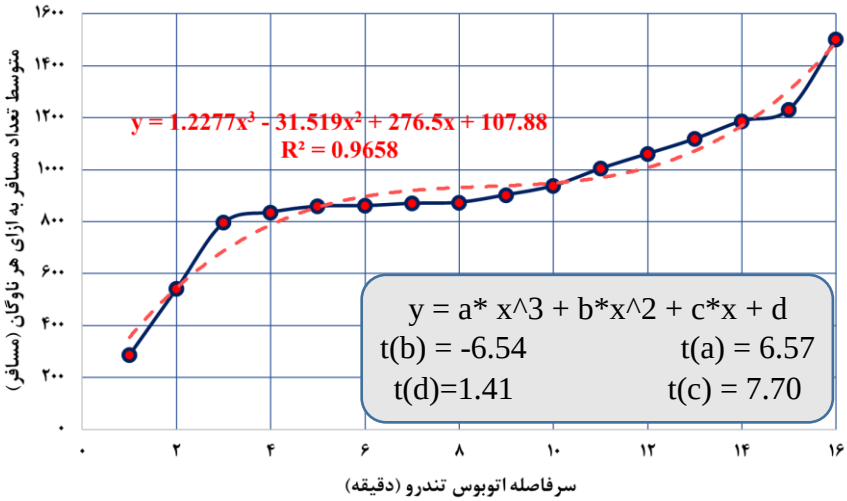
شکل ٤. تغییرات تعداد کل مسافران خط اتوبوس تندرو خیابان بهشتی شهر کرج در برابر تغییرات سرفاصله

تغییرات تعداد ناوگان مورد نیاز در مقابل تغییرات سرفاصله در شکل ۵ نمایش داده شده است. بر اساس این نتایج مشخص می‌گردد این تغییرات از یک تابع نمایی با معیار نکویی برازش ۰/۹۸۱۱ پیروی می‌نماید. بر اساس این نتایج مشخص می‌گردد

با کاهش سرفاصله از ۱۶ دقیقه تا ٤ دقیقه، تعداد ناوگان مورد نیاز از ٦ دستگاه به ۲۳ دستگاه می‌رسد. می‌توان گفت با یک چهارم شدن سرفاصله، تقریبا تعداد ناوگان مورد نیاز چهار برابر خواهد شد این نسبت برای کاهش سرفاصله از ٤ دقیقه به یک دقیقه هم تقریبا پا برجا است؛ زیرا تعداد ناوگان از ۲۳ دستگاه به ۸٤ دستگاه می‌رسد. بر اساس آماره t مدل می‌توان گفت هر دو پارامتر مدل در سطح معناداری یک درصد معنادار هستند. تغییرات متوسط مسافران هر ناوگان در برابر تغییرات سرفاصله نیز در شکل ٦ آورده شده است بر اساس این نتایج مشخص می‌گردد این تغییرات از یک تابع چند جمله‌ای درجه سوم با معیار نکویی برازش ۰/۹٦۵۸ پیروی می‌نماید. بر اساس آماره t می‌توان گفت تمامی پارامترهای مدل به جز عدد ثابت آن در سطح معناداری یک درصد معنادار هستند. بی‌معنی شدن عدد ثابت در این مدل حاکی از آن است که متغیرهای مستقل لحاظ شده می‌توانند به خوبی تغییرات متغیر وابسته (یعنی متوسط تعداد مسافران هر ناوگان) را به خوبی پیش‌بینی نمایند.



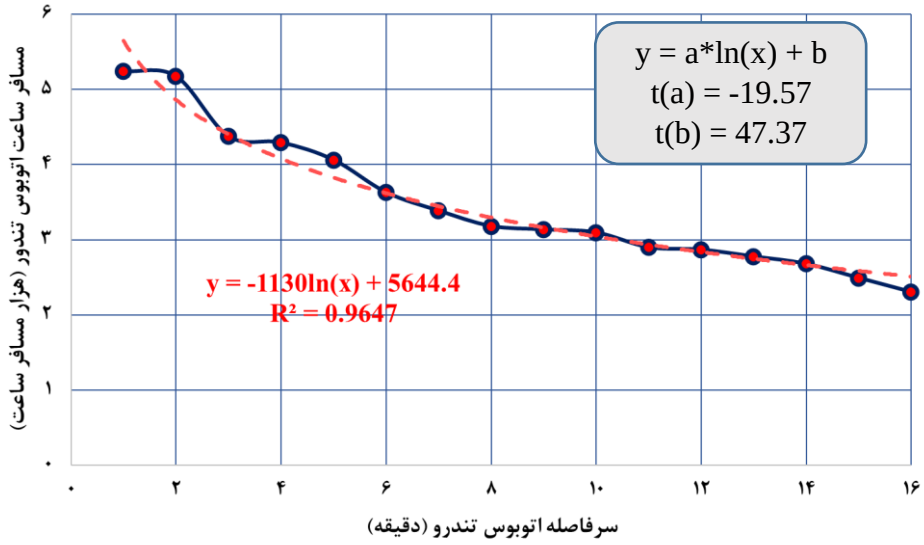
شکل ۵. تغییرات تعداد ناوگان مورد نیاز در برابر تغییرات سرفاصله



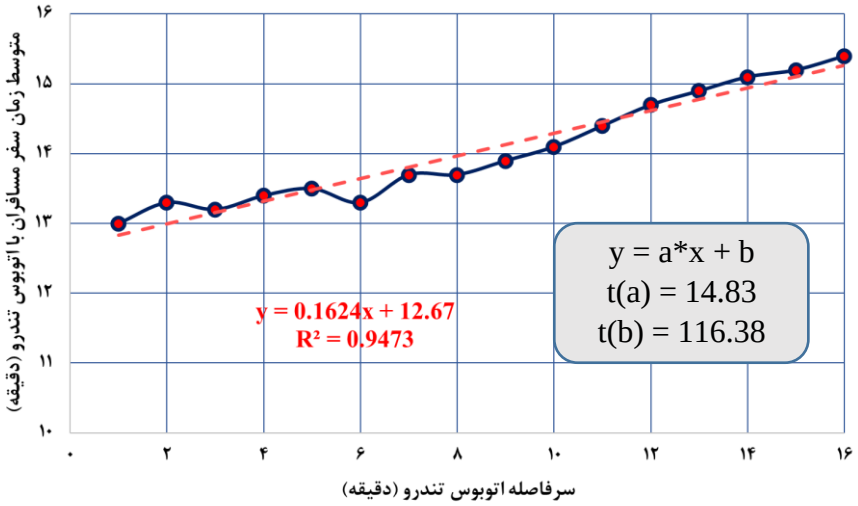
شکل ٦. تغییرات متوسط مسافران هر ناوگان در برابر تغییرات سرفاصله

در شکل ۷ تغییرات مسافر ساعت اتوبوس تندرو در برابر تغییرات سرفاصله به تصویر کشیده شده است. بر اساس این نتایج می‌توان گفت همانند تعداد کل مسافران خط اتوبوس تندرو و تعداد کل مسافران حمل و نقل همگانی، از یک تابع لوگاریتمی با معیار نکویی برازش ۰/۹٦٤۷ پیروی می‌نماید. همچنین نتایج حاکی از آن است که با افزایش یک درصد سرفاصله، مسافر ساعت خط، به میزان ۱۱/۳ مسافر ساعت کاهش می‌یابد. همچنین نتایج آزمون t حاکی از آن است که هر دو پارامتر مدل در سطح معناداری یک درصد از لحاظ آماری معنادار هستند. تغییرات متوسط زمان سفر مسافران اتوبوس تندرو در برابر تغییرات سرفاصله در شکل ۸ آورده شده که نتایج آن بیان می‌کند این تغییرات از یک تابع چند جمله‌ای درجه یک با معیار نکویی برازش ۰/۹٤۷۳ پیروی می‌نماید. همچنین نتایج بیان‌نگر آن است که به ازای افزایش هر یک دقیقه سرفاصله، متوسط زمان سفر مسافران ۰/۱٦۲٤ دقیقه (حدود ۱۰ ثانیه) افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آزمون t حاکی از آن است که هر دو پارامتر مدل در سطح معناداری یک درصد از لحاظ آماری معنادار هستند.

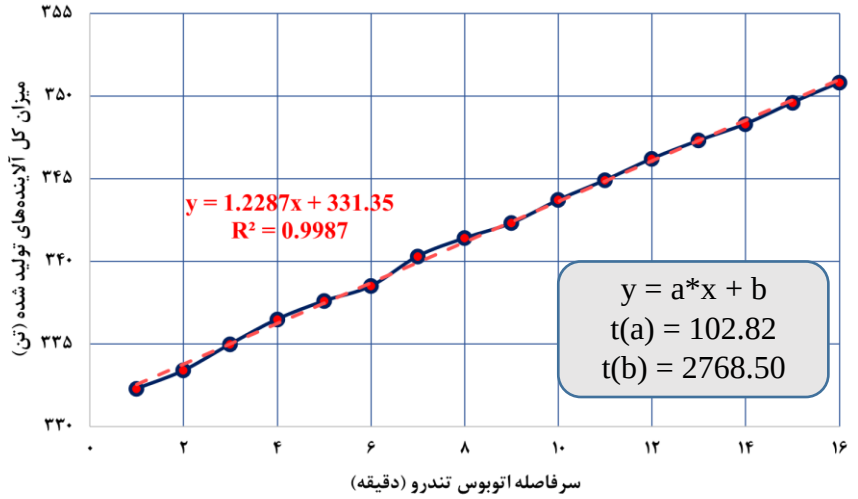
در شکل ۹ مجموع کل آلاینده‌های زیست‌محیطی در برابر تغییرات سرفاصله آورده شده که نشان‌دهنده آن است که این تغییرات از یک تابع چند جمله‌ای درجه یک با معیار نکویی برازش ۰/۹۹۸۷ پیروی می‌نماید. همچنین می‌توان گفت با افزایش هر یک دقیقه سرفاصله، آلاینده‌های زیست‌محیطی در یک ساعت اوج صبح ۱۲۲۸/۷ کیلوگرم افزایش می‌یابد.نتایج آزمون t نیز بیانگر معنادار بودن هر دو پارامتر در سطح یک درصد است. شکل ۱۰ تغییرات کل مصرف سوخت (بنزین و گازوئیل) شهر کرج به تصویر کشیده که نتایج آن حاکی از آن است این تغییرات از یک تابع درجه سوم با معیار نکویی برازش ۰/۹۵۳٤ پیروی می‌نماید. آماره t بیانگر آن است که تمامی پارامرهای مدل در سطح ۵ درصد از لحاظ آماری معنادار هستند. کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌های تولید شده، به دلیل کاهش سهم خودروهای شخصی و کاهش حجم ترافیک معابر است. با توجه به شکل نمودار مشخص می‌گردد تا سرفاصله ۱۲ دقیقه مجموع مصرف سوخت در کل شهر چندان کاهش نمی‌یابد. این امر می‌تواند ناشی از آن باشد که اتوبوس تندرو خیابان بهشتی در سرفاصله‌های بیشتر از ۱۲ دقیقه نمی‌تواند مسافر قابل توجهی را از سایر شیوه‌ها جذب نماید و افزایش مصرف سوخت به دلیل افزایش تعداد ناوگان اتوبوس تندرو با کاهش مصرف سوخت ناشی از کاهش سایر شیوه‌ها تقریبا برابری می‌نماید.



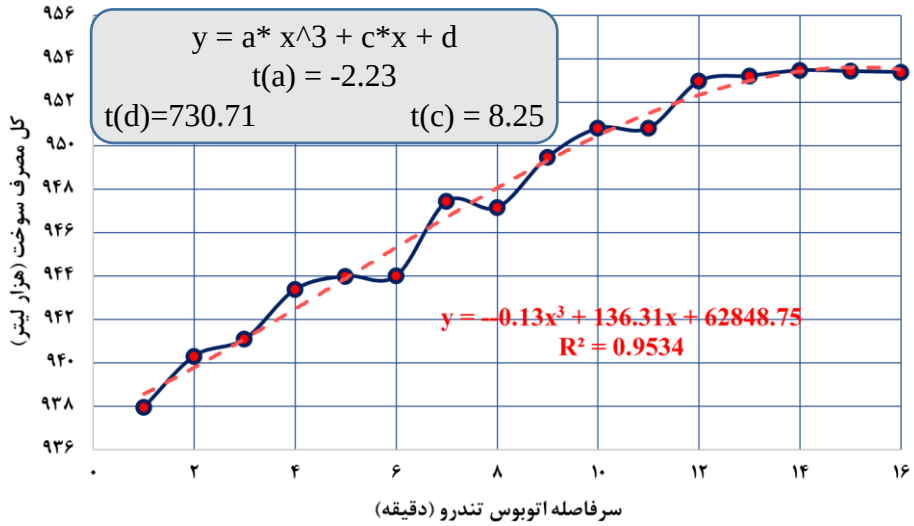
شکل ۷. تغییرات مسافر ساعت اتوبوس تندرو در برابر تغییرات سرفاصله



شکل ۸. تغییرات متوسط زمان سفر مسافران اتوبوس تندرو در برابر تغییرات سرفاصله

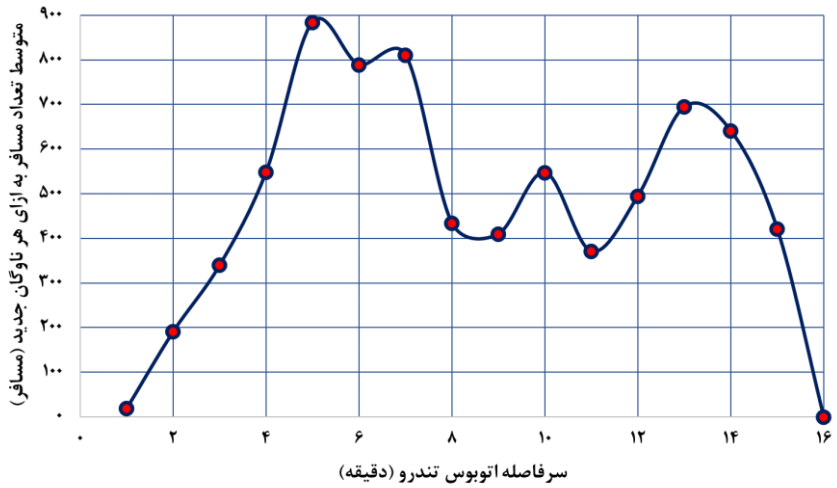


شکل ۹. تغییرات میزان کل آلاینده‌های زیست‌محیطی تولید شده در برابر تغییرات سرفاصله



شکل ۱۰. تغییرات مجموع مصرف سوخت در برابر تغییرات سرفاصله

تغییرات شاخص پیشنهادی تعیین سرفاصله بهینه در مقابل تغییرات زمان سفر در شکل ۱۱ آورده شده است. به طور کلی می‌توان گفت تا یک سرفاصله‌ای با کاهش سرفاصله مسافر و افزایش مسافران خط، مقدار شاخص پیشنهادی (متوسط تعداد مسافر به ازای هر ناوگان جدید) افزایش می‌یابد. به بیان دیگر می‌توان گفت تا یک سرفاصله‌ای خرید ناوگان جدید می‌تواند به‌صرفه باشد. برای تفسیر شکل ۱۱ به عنوان مثال می‌توان گفت برای کاهش سرفاصله از ۷ دقیقه به ٦ دقیقه به ازای هر ناوگان جدیدی که توسط گردانندگان سیستم خریداری می‌شود، به طور متوسط ۷۸۹ مسافر جدید جذب سیستم اتوبوس تندرو خواهند شد درحالی که برای کاهش سرفاصله از ٦ دقیقه به ۵ دقیقه به ازای هر ناوگان جدید خریداری شده، به طور متوسط ۸۸۵ مسافر جدید جذب سیستم اتوبوس تندرو می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت سرفاصله مناسب برای این خط مطابق با شاخص پیشنهادی، برابر با ۵ دقیقه است.



شکل ۱۱. متوسط تعداد مسافر به ازای هر ناوگان جدید خریداری شده برای کاهش سرفاصله (شاخص پیشنهادی)

۵. نتیجه‌گیری

حمل و نقل همگانی به عنوان یکی از مهم‌ترین و حیاتی‌ترین زیرساخت‌ها در بسیاری از شهرها علی‌الخصوص کلان‌شهرها شناخته می‌شود. همواره یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های مهندسان و برنامه‌ریزان شهری افزایش سطح خدمات و در نتیجه افزایش مطلوبیت حمل و نقل همگانی بوده است. شیوه اتوبوسرانی تندرو یکی از مهم‌ترین شیوه‌های حمل و نقل همگانی با ظرفیت نسبتا زیاد محسوب می‌گردد. یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین ویژگی‌های این شیوه سرفاصله زمانی اتوبوس‌ها است. هر چه سرفاصله کمتر باشد از دید کاربران سیستم شرایط مطلوب‌تر است اما از دید گردانندگان آن، منجر به افزایش هزینه‌های خرید ناوگان و تعمیر و نگهداری آن‌ها می‌شود. از این‌رو در پژوهش جاری به تحلیل حساسیت شاخص‌های ارزیابی حمل و نقلی در صورت تغییرات سرفاصله پرداخته شد. شایان ذکر است در مطالعات پیشین سرفاصله بهینه یا تعداد ناوگان مورد نیاز، خروجی نهایی مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی استفاده شده بوده است اما در این پژوهش سرفاصله به عنوان یک ورودی به مدل داده شده است و تغییرات شاخص‌های ارزیابی حمل و نقلی در صورت تغییر سرفاصله با فرض ثابت بودن تمامی ورودی‌های دیگر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. برای نیل به این هدف از مدل‌های رگرسیون خطی (نسبت به پارامترها) که با روش کمینه مربعات خطا پرداخت می‌شوند، استفاده شده است. همچنین شاخص جدیدی برای تعیین سرفاصله بهینه پیشنهاد گردید که در تعریف این شاخص سعی بر آن بود تا در عین سادگی و همچنین کاربردی و عملی بودن آن، تعادلی بین منافع کاربران و گردانندگان سیستم ایجاد گردد. برای انجام این مطالعه

از اطلاعات طرح جامع مصوب شهر کرج با افق سال ۱٤۱۰ که اطلاعات پایه‌ای آن شامل ماتریس تقاضای سفر و مشخصات اقتصادی اجتماعی نواحی ترافیکی آن در سال پایه ۱۳۹۵ برداشت شده بود، استفاده گردید. اهم نتایج تحلیل حساسیت شاخص‌های ارزیابی حمل و نقل مطابق با سناریوهای اجرا شده در مدل کلان‌نگر شهر کرج در یک ساعت اوج صبح سال افق طرح ۱٤۱۰ در ادامه آورده شده است.

نتایج مدل‌های رگرسیون خطی پرداخت شده حاکی از آن است که تغییرات تعداد کل مسافر حمل و نقل همگانی، تعداد کل مسافران اتوبوس تندرو و مسافر ساعت اتوبوس تندرو از یک تابع لوگاریتمی به ترتیب با ضریب نکویی برازش‌های ۰/۹٦٤٥، ۰/۹٦۸٤ و ۰/۹٦٤۷ پیروی می‌نماید. بر اساس این نتایج می‌توان گفت به ازای هر به ازای هر یک درصد افزایش سرفاصله، تعداد کل مسافران حمل و نقل همگانی حدود ۳۸ مسافر کاهش می‌یابد. در حالی که به ازای هر یک درصد افزایش سرفاصله، تعداد مسافران اتوبوس تندرو بهشتی حدود ۵۸ مسافر کاهش می‌یابد.

تغییرات متوسط زمان سفر مسافران اتوبوس تندرو در برابر تغییرات سرفاصله از یک تابع چند جمله‌ای درجه یک با ضریب نکویی برازش ۰/۹٤۷۳ پیروی می‌نماید. همچنین می‌توان نتیجه گرفت به ازای افزایش هر یک دقیقه سرفاصله، متوسط زمان سفر مسافران حدود ۱۰ ثانیه افزایش می‌یابد.

به طور کلی بر اساس شاخص‌های بررسی شده می‌توان نتیجه گرفت، در صورت کاهش سرفاصله تمامی شاخص‌های ارزیابی حمل و نقلی بهبود می‌یابند. اما در اینجا یک سوال مهم و اساسی می‌تواند مطرح می‌شود که بهبود این شاخص‌ها در ازای چه هزینه‌ای است؟ از این در پژوهش جاری سعی بر آن بود تا یک شاخص ساده و کاربردی جهت برقراری تعادل بین بهبود شاخص‌ها و هزینه‌های سیستم اتوبوس تندرو پیشنهاد گردد..

در رابطه پیشنهادی فرض بر آن است که گردانندگان سیستم وقتی ناوگان جدید خریداری می‌نمایند که به نسبت مسافر بیشتری جذب سیستم گردد. به عنوان مثال با توجه به نتایج پژوهش به ازای هر ناوگان جدید که برای کاهش سرفاصله از ٦ دقیقه به ۵ دقیقه خریداری می‌شود، تعداد ۸۸۵ مسافر جدید در یک ساعت اوج صبح جذب خط اتوبوس تندرو می‌شود، در حالی که به ازای هر ناوگان جدیدی که برای کاهش سرفاصله از ۵ دقیقه به ٤ دقیقه خریداری می‌شود ۵٤۹ مسافر جدید جذب این خط می شوند. به بیان دیگر می‌توان گفت با کاهش سرفاصله از ۵ دقیقه به ٤ دقیقه هزینه‌های گردانندگان سیستم بیشتر شده اما تعداد مسافران جدید جذب شده به ازای هر ناوگان (تقریبا معادل هر واحد هزینه) کاهش یافته است.

نهایتا در بین تمامی سرفاصله‌های بررسی شده سرفاصله ۵ دقیقه با توجه به شاخص معرفی شده بهترین عملکرد را داشته است. و می‌تواند به عنوان سرفاصله بهینه برای بهره‌برداری خط مطالعه شده به گردانندگان سیستم پیشنهاد گردد.

٦. پیشنهادها

با توجه به محدودیت اطلاعات در دسترس این محققان، امکان بررسی و تحلیل حساسیت شاخص‌های ارزیابی حمل و نقلی در ساعات دیگر روز میسر نبود. لذا پیشنهاد می‌گردد این تحلیل حساسیت برای ساعات مختلف روز بررسی و نتایج آن با پژوهش جاری مقایسه گردد. همچنین پیشنهاد می‌گردد اثر ترکیب چند خط اتوبوس تندرو بر تعیین سرفاصله بهینه با تحلیل حساسیت شاخص‌های حمل و نقلی در پژوهش‌های آتی مورد بررسی قرار گیرد.

۷. قدردانی و تشکر

نویسندگان این مقاله لازم می‌دانند از معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری کرج و همچنین شرکت مهندسان مشاور اندیشکار بابت در اختیار قرار گرفتن اطلاعات و نتایج مدل کلان‌نگر شهر کرج قدردانی نمایند.

۸. پی‌نوشت‌ها

1. Generalised Costs

2. Automatic Vehicle Location (AVL)
3. Ordinary Least Square (OLS)
4. Standard Erro

۹. مراجع

– افندی‌زاده زرگری, ش., بیگدلی‌راد, ح., شاکر, ح.، (۱۳۹۸). استفاده از روش بهینه‌سازی و فراابتکاری به‌منظور کاهش سرفاصله زمانی اتوبوس (نمونه موردی: خطوط اتوبوس‌رانی قزوین). فصلنامه مهندسی حمل و نقل, ۱۰(٤), ۸۳۳-۸٤۹.

– حسنی نسب، س. ش.، صفارزاده، م.، ممدوحی، ا. ر.، (۱۳۹۰). روشی برای مسیریابی بهینه در حمل و نقل همگانی یکپارچه شبکه اتوبوس و اتوبوس تندرو. فصلنامه مهندسی حمل و نقل, ۲(٤), ۳۰۳-۳۱٦.

– سلیمی، ک.، ریاحی سامانی، ع.، (۱۳۹۷)، اندازه‌گیری قابلیت اطمینان اتوبوس‌های با سرفاصله کوتاه با کمک داده‌های AVL (مطالعه موردی: اتوبوسرانی اصفهان)، ششمین کنگره بین المللی توسعه و ترویج علوم و فنون بنیادین در جامعه، تهران، ایران.

– مشاوران اندیشکار، (۱۳۹۵ – ۱۳۹۷)، مجموعه گزارش‌های طرح جامع حمل و نقل شهری و حومه شهر کرج، کارفرما شهرداری کرج.

– متین قهفرخی، ف.، جهانگرد رفسنجانی، ا.، کاظم‌زاده، ن.، (۱٤۰۰)، ارزیابی و پیش‌بینی پایداری سرفاصله‌ی اتوبوس‌های شهری با هدف برنامه‌ریزی شهری بر اساس داده های مسیر GPS، کنفرانس ملی آخرین دستاوردهای مهندسی داده و دانش و محاسبات نرم، شهرکرد، ایران.

– Chen, W., Liu, X., Chen, D., & Pan, X. (2019). Setting headways on a bus route under uncertain conditions. Sustainability, 11(10), 2823.

– Chen, X., Hellinga, B., Chang, C., & Fu, L. (2015). Optimization of headways with stop-skipping control: a case study of bus rapid transit system. Journal of advanced transportation, 49(3), 385-401.

– Hawkins, J., Wirasinghe, S. C., & Hunt, J. D. (2021). Bus headway optimization with consumer surplus as a measure of societal benefit. International Journal of Urban Sciences, 25(1), 86-103.

– Liang, S., He, Z., & Sha, Z. (2011). Bus rapid transit scheduling optimal model based on genetic algorithm. In ICCTP 2011: Towards Sustainable Transportation Systems (pp. 1296-1305).

– Liang, S., Ma, M., & He, S. (2019). Multiobjective optimal formulations for bus fleet size of public transit under headway-based holding control. Journal of Advanced Transportation, 2019.

– Macfarlane, G. S., Sheffield, M. H., Bennett, L. S., & Schultz, G. G. (2021). The Effect of Transit Signal Priority on Bus Rapid Transit Headway Adherence. Findings, 24499.

– Ortuzar, J. D., Willumsen, L. G., (2011) Modeling Transport 4th Edition, Wiley.

– Schmaranzer, D., Braune, R., & Doerner, K. F. (2018, December). Simulation-based headway optimization for a subway network: a performance comparison of population-based algorithms. In 2018 Winter Simulation Conference (WSC) (pp. 1957-1968). IEEE.

– Seman, L. O., Koehler, L. A., Camponogara, E., & Zimmermann, L. (2021). Generalized Auto-Sequencing Bus Headway Control Formulation. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.

– Seman, L. O., Koehler, L. A., Camponogara, E., Zimmermann, L., & Kraus, W. (2019). Headway control in bus transit corridors served by multiple lines.

محمودرضا کی‌منش، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۶۳ از دانشگاه سیستان و بلوچستان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران–راه و ترابری در سال ۱۳۷۰ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. دارای درجه دکتری در رشته مهندسی عمران–راه و ترابری از دانشگاه انستیتو تکنولوژی اینسا فرانسه (دانشگاه دولتی) که زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی روسازی، تعمیر و نگهداری روسازی و ایمنی راه بوده و هم اکنون عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه پیام نور است.

امیرمحمد پرویني، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری را در سال ۱۳۹۳ را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان اخذ نمود. در سال ۱۳۹۷ موفق به پذیرش در درجه دکتری در رشته عمران–راه و ترابری از دانشگاه پیام نور تهران شمال گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طرح هندسی راه(طراحی و تحلیل میدان های مدرن)، مدلسازی، بهینه سازی و برنامه ریزی حمل و نقل همگانی است.