فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱٤، شماره ۲، زمستان ۱٤۰۱، ص. ۲۵۵۷-۲۵۳۷

مقاله علمی-پژوهشی

شبیه سازی عامل بنیان حرکت ناوگان اتوبوس های تندرو شهری(BRT)

رحمان نورمحمدی، دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

سید محمدعلی خاتمی فیروزآبادی (مسئول مکاتبات)، استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران و استاد مدعو، گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

E-mail: a.khatami@atu.ac.ir

اکبر عالم تبریز، استاد،گروه مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

رضا احتشام راثی، استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

امیر دانشور، استادیار،گروه مدیریت فناوری اطلاعات، واحد الکترونیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: ۱٤۰۱/۰٦/۲۳ پذیرش: ۱٤۰۱/۰۹/۱۹

چکیده

امروزه سیستم‌های حمل و نقل زمینی با چالش بزرگی به نام ازدحام روبه‌رو هستند. از آنجا که پدیده‌های ترافیکی و ازدحام دارای خصوصیاتی از جمله پیچیدگی و پویایی هستند، مدل‌سازی آنها با مدل‌های ریاضی معمول بسیار دشوار و بعضاً غیرممکن است. به همین منظور، می‌توان در مدل‌سازی پدیدهٔ ازدحام و تشخیص پارامترهای مؤثر در کاهش یا افزایش آن، از تکنولوژی‌های مبتنی بر عامل‌های دارای همخوانی بالا با این خصوصیات بهره گرفت. با توجه به جایگاه اتوبوس‌های تندرو شهری در جابه‌جایی مسافران، کاهش ترافیک و همچنین کاهش پارامترهای زمان انتظار مسافران و زمان سفر از اهداف این تحقیق هستند. لذا برای تحقق این اهداف از شبیه‌سازی عامل بنیان حرکت ناوگان اتوبوس‌های تندرو شهری (BRT) استفاده شده است. در این تحقیق، برنامهٔ پایهٔ NetLogo برای کدنویسی مدل و اجرای شبیه سازی آن مورد استفاده قرار گرفته است. در این بررسی سه سناریو متفاوت در نظر گرفته شد. نتایج عملکرد سیستم حمل و نقل تندرو شهری با تغییرات به عمل آمده در هر یک از پارامترهای مؤثر، در هر یک از سناریوها، قابل توجه بود. در نهایت، پس از آنالیز و تحلیل کلی و همچنین مقایسهٔ وضعیت‌های مختلف، نتایج و پیشنهاداتی برای بهبود عملکرد ناوگان اتوبوس‌های تندرو شهری ارائه شد. از جمله اینکه در خصوص دستیابی به اهداف مورد نظر (یعنی کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه‌ها و کاهش زمان سفر) وضعیت سناریوی پل نسبت به دو سناریوی چراغ هوشمند و حالت جاری مناسب‌تر است.

کلمات کلیدی: شبیه سازی، مدل سازی، نت لوگو، عامل بنیان، حمل و نقل

۱. مقدمه

یک مدل حمل‌ونقل مناسب در توصیف تقاضای سفر، جریان‌های ترافیک/مسافر مرتبط و عملکرد پویای آن‌ها برجسته است. این به عنوان یک ابزار مفید برای برنامه ریزی و مدیریت حمل و نقل از نظر کاهش تراکم ترافیک، رفع نیازهای سفر و ایجاد یک محیط حمل و نقل بهتر عمل می کند. با این حال، توصیف چنین سیستم حمل و نقل بسیار پیچیده، پویا و تصادفی با مدل‌های ریاضی تحلیلی ، چالش برانگیز است [Huang et al, 2022].

مدل‌های مبتنی بر عامل به مدل‌سازی و شبیه‌سازی حرکت مکانیکی محدود نمی‌شوند، بلکه تصمیم مستقل عامل را نیز معرفی می‌کنند. معمولاً عامل در سیستم‌ها بر اساس سناریو ظاهر نمی شود، بلکه در زمان واقعی اجرا می‌کند. از قواعد محلی عوامل شروع می شود تا رفتارهای انطباقی و نوظهور پیچیده تر که توسط تعامل عوامل همسایگی شکل می گیرد، در نتیجه پویایی سیستم در محیط را ایجاد می کند. در سیستم های حمل و نقل، مانند سیستم های مدیریت حمل و نقل و سیستم های کنترل حمل و نقل، تعداد زیادی از موجودیت های مستقل وجود دارد که به شیوه های ناهمگن و ذاتاً پیچیده رفتار می کنند. معمولاً مستلزم چارچوب ساختاری ترکیبی از زیرسیستم های توزیع شده است که نمایندگان را با برنامه ها یا استراتژی های محلی مبتنی بر دانش و قانون نشان می دهد. عملکرد کلی سیستم با همکاری و حتی یادگیری منطق عوامل، که اجزای حیاتی برای انجام یک بهبود جهانی هستند، به دست می‌آید [Chen and Cheng, 2010, Gu et al, 2020].

به طور کلی، استقلال، همکاری و واکنش‌پذیری مدل‌های مبتنی بر عامل از مزایای قابل توجهی برای مدل‌سازی رفتارها و تعاملات مختلف مانند ادراک، استدلال و تصمیم‌گیری است، بنابراین اجرای سیاست‌های متفاوت از برنامه‌ریزی ترافیکی، کنترل و دیدگاه مدیریت به عنوان مثال، در مناطق مطالعه حمل و نقل، رویکردهای مبتنی بر عامل به طور گسترده در چارچوب های مدیریت ترافیک، مدیریت ازدحام، سیاست ترافیک، کنترل ترافیک، و به ویژه کنترل علائم ترافیکی،استفاده شده است [Srinivasan, M. C. Choy, and R. L. Cheu, 2006 , Yu et al, 2021]

از مهم ترین نقاط ضعف سیستم حمل و نقل مسافر با اتوبوس های شهری، کند بودن و کارایی پایین این سیستم می باشد. عواملی همچون عدم دسترسی آسان، ازدحام بیش از حد مسافران در ایستگاه ها و اتوبوس ها، عدم اطلاع رسانی صحیح در خصوص مسیریابی، نامنظم بودن زمان حرکت اتوبوس ها، عدم ارائه برنامه زمان بندی دقیق برای توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها، طولانی بودن زمان انتظار در ایستگاه ها، طولانی بودن زمان سفر به دلیل سرعت کم اتوبوس، وضعیت نامطلوب اتوبوس ها و پاره ای دیگر از مشکلات و معضلات باعث عدم استقبال شهروندان از ناوگان حمل ونقل عمومی و خطوط فعال اتوبوسرانی در سطح شهر شده است. توسعه پرشتاب شهر نشینی در چند دهه معاصر از ابعاد مختلف اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی، سیاسی، محیطی و... زندگی بشر را تحت تأثیر قرار داده است لذا با افزایش تراکم ترافیک در شهرها و ایجاد مشکلات عدیده ناشی از تردد وسایل نقلیه نیاز برای راه حل های جدید حمل و نقل بیشتر احساس می شود [حقانی، میرابی و امام جمعه، ۱۳۹٤]. در چنین شهرهایی سیستم اتوبوس تندرو به عنوان یک راهکار مؤثر و جذاب به منظور رقابت با وسایل نقلیه شخصی مطرح می باشد تا دسترسی به نقاط مرکزی شهر، مناطق مسکونی و حومه شهر برای تمامی افراد ساکن در شهرها امکان پذیر شود لذا توسعه خطوط ویژه اتوبوس و ساماندهی ناوگان اتوبوسرانی یکی از راهکارهای اصلی کوتاه مدت، کم هزینه و مؤثر در بهبود وضعیت ترافیک کلان شهری مثل تهران است. سرمایه گذاری کم در زیرساخت ها، تجهیزات، توسعه های عملکردی و فناوری می تواند بستری را برای ایجاد سیستم های اتوبوس تندرو فراهم نماید به طوری که عملکرد سیستم اتوبوس به کیفیت مطلوب برسد [گلزارشهری، آقا باقری، دلشاد، ۱۳۹٤]. از طرفی توسعه سیستم حمل و نقل

عمومی از جمله مواردی است که در توسعه پایدار شهرها نقش کلیدی بازی می کند و در واقع گسترش حمل و نقل عمومی به عنوان یکی از مهم ترین راهبردها در دستیابی به پایداری تلقی می گردد؛ چرا که حمل و نقل عمومی علاوه بر افزایش ظرفیت عملکردی معابر شهری، به لحاظ بهره وری بهینه از امکانات موجود نیز، از جایگاه ویژه ای برخوردار است و از دیدگاه مهندسین ترافیک در اولویت درجه یک راهکارهای بهبود وضعیت تردد و توسعه شهری محسوب می گردد [فغانی، بزرگمهرنیا و بابایی و ۱۳۹٤] . کلید حل مشکل ترافیک در یک کلان شهر بستگی به سیستم حمل و نقل مدرن یا یک سیستم مبتنی بر اتوبوس یا قطارهای شهری است. در دهه های اخیر سیستم مبتنی بر اتوبوس به عنوان سیستم حمل و نقل سریع(BRT) مستقر شده است که در نرخی بالاتر از سیستم های مبتنی بر راه آهن گسترش پیدا کرده اند. باتوجه به هزینه ساخت کم خطوط (BRT) نسبت به سایر مدهای حمل و نقلی، این خطوط غالباً بیشتر از سایر مدها دست خوش تغییر و اصلاح می شوند. حتی گاهی اوقات برخی از این اصلاحات با مطالعات امکان سنجی اولیه در تناقض است و صرفاً در یک جنبهٔ خاص باعث بهبود وضعیت می شوند. به طور مثال در خط یک BRT تهران ایستگاه هایی ایجاد شده اند که فاصلهٔ آن ها از یکدیگر کمتر از ٤۲۰ متر هستند که این موضوع عملاً تأثیر مستقیمی بر روی اتلاف وقت، مصرف انرژی، ازدحام و... خواهد گذاشت. همچنین سرعت متوسط اتوبوس های این خط کمتر از ۳۵ کیلومتر بر ساعت است که این برای اتوبوس های تندرو سرعت کمی محسوب می گردد و می توان با راهکارهای علمی این نقیصه ها را جبران نموده و به اصلاح بهینه وضع موجود پرداخت. از مشکلات و معضلات اساسی در سیستم‌های حمل و نقل، می توان به عدم دسترسی آسان ، عدم مطلوبیت زمان سفر، طولانی بودن زمان انتظار و نیز عدم توجیه پذیری اقتصادی اشاره نمود، بنابراین دستیابی به این شاخص‌های مطلوب بدون در نظر گرفتن مطالعات امکان سنجی، مطالعات حین بهره برداری و اصلاحات پس از آغاز به کار سیستم بسیار مشکل است. با توجه به افزایش جمعیت و گستردگی شهر تهران، بهبود و ارتقاء وضعیت حمل‌و نقل شهری و کاهش ازدحام ترافیک همواره به‌عنوان یکی از اهداف اصلی مدیریت شهری مطرح بوده است. با نگاهی به آمار و ارقام ارائه شده از سوی سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران و مقایسه آن با تجربه موفق سایر کشورها به این موضوع پی می بریم که سیستم حمل ونقل مسافر با اتوبوس های شهری در برخی از شاخص ها دچار عدم مطلوبیت هستند که با صرف هزینه های کمی می توان شاخص ها را به سطح قابل قبولی ارتقاء داد. با توجه به اینکه شهر تهران با ۸ میلیون جمعیت ساکن و ۱۵ میلیون جمعیت روزانه مهم ترین کلان شهر ایران به شمار می رود و توسعه زیرساخت های حمل ونقل عمومی از نیازهای اساسی کلان شهرها می باشد و نیز با توجه به افزایش جمعیت و گستردگی شهر تهران، بهبود و ارتقاء وضعیت حمل ونقل شهری و کاهش ازدحام ترافیک همواره به عنوان یکی از اهداف اصلی مدیریت شهری مطرح بوده است. و اینکه یکی از مهم ترین نقاط ضعف سیستم حمل ونقل مسافر با اتوبوس های شهری، کندی تحرک و پائین بودن بهره وری این سیستم می باشد که البته یکی از دغدغه عای اصلی در کلان شهرها خصوصاً شهر تهران است و با تمام تلاش هایی که در این زمینه انجام شده اما متأسفانه همچنان این معضل به قوت خود باقی است . لذا با توجه به موارد مذکور هدف تحقیق حاضر، شبیه سازی عامل بنیان حرکت ناوگان اتوبوس های تندرو شهری(BRT) در وضعیت های مختلف و تأثیر آن بر کاهش مدت زمان سفر و زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها می باشد.

مدل سازی مبتنی بر عامل یکی از رویکردهای قدرتمند در شبیه سازی می باشد که با ایجاد یک جمعیت مصنوعی از عامل های خودمختار و اجازه دادن به آن ها تعامل و ارتباط با سایر عوامل و محیط عمل می کند. این رویکرد برای درک، جستجو،

شناخت یک سیستم و بهتر کردن سیستم فعلی و بررسی شرایط مختلف در سیستم از جمله شرایط غیرمنتظره و غیر قابل پیش بینی است؛ همچنین مدل سازی عامل بنیان دارای محیطی گسسته است، در این محیط زمان و مکان به صورت گسسسته تعریف می شود و شبیه سازی در گام زمانی اجرا می شود [ابوالفتحی، طلوعی و حمیدی زاده، ۱۳۹۹].

۲. پیشینه تحقیق

کاظمی و حسینعلی(۱٤۰۱)، در مقاله ای تحت عنوان "مسیریابی چندساختی مبتنی بر عامل در سیستم حمل و نقل عمومی" به تحقیق پرداختند. نتایج نشان داد که اولویت هر یک از گزینه‌های سفر برابر ۰/٤، ۰/۲۷، ۰/۱۹ و ۰/۱٤ به ترتیب مربوط به تاکسی اینترنتی، آژانس، اتوبوس و تاکسی می‌باشد. بررسی ها آشکار ساخت که تصمیم های افراد تا حدودی با خروجی مدل عامل–مبنا که در واقع بیانگر انتخاب های بهینه است، متفاوت می باشد.

غفاری و اکبرزاده (۱٤۰۰)، در مقاله ای تحت عنوان " بررسی تأثیر اولویت‌دهی فعال غیرمشروط به حمل‌ونقل همگانی در زمان‌بندی چراغ راهنمایی با شبیه سازی" به تحقیق پرداختند. نتایج نشان داد که تأخیر مسافران سامانه تندرو حدود ٦٥ درصد و مسافران اتوبوس عادی حدود ۷ درصد کاهش یافته است. همچنین زمان سفر اتوبوس تندرو در این تقاطع ۳۷ درصد و این مقدار برای اتوبوس عادی ۱۱ درصد کاهش می یابد.

فائزی و همکاران (۱۳۹۸)، در مقاله ای به بررسی معیارهای تاثیرگذار در تعیین مسیر اتوبوس تندرو و تعیین مسیر بهینه بر اساس روش تصمیم‌گیری چند معیاره پرداختند. طبق نتایج بدست آمده ده معیار تاثیرگذار در انتخاب مسیر بی‌آرتی شناسایی شد که مهمترین معیار تعداد مسافر جذب شده به حمل‌ونقل عمومی در وضعیت کنونی می‌باشند. گزینه پیشنهادی مسیر شماره یک اتوبوس تندرو شهری از پایانه حصارک در خیابان شهید بهشتی تا پایانه شهید سلطانی و گزینه پیشنهادی مسیر شماره دو از پایانه شهید سلطانی تا میدان ملارد انتخاب شدند. بر اساس معیارهای تاثیرگذار بهترین مسیر، مسیر پیشنهادی یک از پایانه شه دسلطانی تا میدان حصارک در نظر گرفته شد.

نجفی زنگه و همکاران (۱۳۹۵)، در مقاله ای به بررسی بهبود بهره‌وری نیروی انسانی تعمیرگاه با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم مطالعه موردی سامانه اتوبوسرانی تندرو تهران (BRT) پرداختند. در این تحقیق از تکنیک شبیه‌سازی برای سیستم تعمیرگاهی استفاده شده است. پس از تعیین توزیع هر یک از انواع خرابی به شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار ARENA پرداخته شد. برای پیش بینی تعداد خرابی‌ها از شبکه‌ی عصبی مصنوعی چند لایه استفاده گردید. نهایتاً به مدل‌سازی ریاضی برای محاسبه تعداد اپراتورهای تعمیرگاهی با استفاده از نرم‌افزار GAMS پرداخته شد. در واقع تخصیص بهینه نیروی انسانی منجر به افزایش کارایی و جلب رضایت استفاده‌کنندگان به عنوان هدف اصلی سیستم خواهد شد.

فلفلانی و صفاریان (۱۳۹۳)، تحقیقی تحت عنوان تجزیه و تحلیل و بهینه سازی پارامترهای موثر بر سیستم اتوبوس های BRT به وسیله ی تکنیک شبیه سازی گسسته–پیشامد ارائه دادند. یک سیستم BRT را که با استفاده از نمونه گیری تصادفی از ٦ ایستگاه متوالی از خط ۳ مشهد بدست آمده و توزیع های آماری توسط نرم افزار SPSS مستخرج شده اند به وسیله ی تکنیک شبیه سازی گسسته پیشامد با استفاده از نرم افزار ARENA شبیه سازی کردند و با بررسی پارامترهایی نظیر زمان انتظار و نرخ ورود و خروج در ایستگاه های مختلف، راهبردی جهت بهینه سازی تعداد ایستگاه های خطوط BRT و کاهش زمان انتظار مسافران ارائه دادند.

وانگ و همکاران (۲۰۱٦)، به مدلسازی زمان بندی و زمان توقف خدمات برای اتوبوس های شهری در چین پرداختند. نتایج تحلیلی نشان داده است که توقف اتوبوس در مکان های متفاوت (نزدیک، کنار و اواسط بلوک) و دوره های زمانی[1](اوج

و غیر پیک) اندکی متفاوت است. ایستگاه های نزدیک در کنار هم تأثیر قابل توجهی بر روی زمان حرکت اتوبوس و زمان اتلاف وقت دارند. در این پژوهش پیشنهاد می گردد که سازمان حمل و نقل و ترافیک، چراغ های راهنمایی در تقاطع ها را با مدت زمان طولانی تر برای خودروهای شخصی نصب کنند تا توقف اتوبوس ها در بین دو ایستگاه های نزدیک به هم کم تر و زمان سرویس دهی به مسافران نیز بهبود می یابد [Wang et al, 2016].

پاتیاس و گورگیو (۲۰۱۷)، تحقیقی با عنوان" مدلسازی و پیاده سازی BRT براساس ترافیک جداگانه با اولویت بندی همانگ شده و موقعیت مکانی اتوماتیک " انجام دادند. نتایج نشان داد که مسافر و مقامات حمل و نقل شهری می توانند از مزایای محل خودرو خودکار[۲](AVL) و سیستم های اولویت بندی وسایل نقلیه از طریق راهرو سریع ترانسپورتی اتوبوس می باشد. در این تحقیق برای افزایش رضایت سیستم BRT، افزایش و عریض کردن تعداد کوریدورهای سیستم های جدا شده را مطابق با استانداردهای اعمال شده پیشنهاد داده اند [Patias & Georgiev, 2017].

نسماکنو و همکاران (۲۰۱۹)، تحقیقی تحت عنوان هماهنگ سازی چراغ های ترافیکی برای اتوبوس های سریع حمل و نقل با استفاده از الگوریتم تکاملی موازی[۳] را ارائه دادند. این تحقیق الگوریتم تکاملی موازی برای بهینه سازی حمل و نقل عمومی در زمینه BRT با در نظرگیری چراغ های راهنمایی ارائه دادند. تحقیق یک الگوریتم موازی را برای پیکربندی و هماهنگ سازی چراغ های راهنمایی و رانندگی با متوسط سرعت BRT را با شرایط NP-Hard ارائه می دهند. نتایج نشان می دهد که کاربرد این الگوریتم موازی با حذف چند ایستگاه غیرضروری کیفیت خدمات را تا ۱۵/۳٪ و سرعت متوسط را تا ۲٤/۸٪ افزایش داد [Nesmachnow et al, 2018].

جی کیوتسالیتیس و همکاران (۲۰۱۹)، در مقاله ای تحت عنوان طراحی مدل کم هزینه سازی برای تخصیص ناوگان اتوبوس با تولید تاکتیکی از گزینه های کوتاه و چرخشی پرداختند. نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت نشان می دهد پتانسیل زمان انتظار مسافر و هزینه های عملیاتی با اضافه کردن تنها چند گزینه کوتاه و چرخشی، کاهش قابل توجهی می یابد [Gkiotsalitisa et al, 2019].

سوریانی و همکاران (۲۰۲۰)، از تکنیک تصمیم گیری چندمعیاره برای مدلسازی و شبیه سازی بهبود کارایی سیستم های حمل و نقل استفاده کردند.در این مقاله برای مدل سازی و تحلیل کارایی حمل و نقل از یک شبیه سازی داینامیک استفاده شده است. نتایج نشان داد که اجرای سناریوها سبب بهروه وری بالاتر سیستم حمل و نقل از ٥٦٪ در سال ۲۰۱۹ به ٦٦٪در سال ۲۰۲۰ گردید [Suryani et al, 2020].

کامارودین و همکاران (۲۰۲۰)، در تحقیقی به ارزیابی عملکرد سرویس مترو دبی با استفاده از مدل SCOR و شبیه سازی ARENA پرداختند. زمان واقعی صرف شده توسط مسافران در خدمات دهی سرویس مترو و شبیه سازی زمان خدمات مسافر در ایستگاه های منتخب را اندازه گیری کرده و سناریوهای مختلف را به عنوان تحلیل به کار بردند. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که میانگین زمان صرف شده در سیستم از جمله شارژ کارت به کارت، پرداخت خودکار با استفاده از سیستم های شناسایی فرکانس رادیویی RFID، ادغام سیستم با استفاده از اینترنت اشیاء IOT و blockchain و سیستم اختصاصی خط را به عنوان پارامترها در تحلیل سناریو به کار بردند [Kamarudeen, et al, 2020].

ژو، وانگ و لیو (۲۰۱۷)، در پژوهشی با توجه به اهمیت خطوط اتوبوس تندرو در کاهش ترافیک و افزایش رضایت مسافران در استفاده از حمل ونقل عمومی روشی را برای کاهش تأخیر اتوبوس تندرو در چهارراه ها با ارائه یک مدل

کنترل چراغ فعال برای این دسته خودروها بر اساس سیستم یکپارچه اطلاعات ارائه دادند. در این پژوهش از شبیه سازی و برنامه نویسی استفاده شد و مدل مربوطه با مقادیر واقعی مقایسه شد و نتایج پاسخ های رضایت بخشی را نشان داد [Zhou, Wan & Liu, 2017].

پویا و همکاران (۲۰۲۱)، در مقاله ای به طراحی مدل بهینه سازی و سیستم پشتیبانی تصمیم برای تعیین ظرفیت تعدادی از انواع حمل و نقل عمومی خطوط اتوبوسرانی شهری پرداختند. نتایج پاسخ‌های به‌دست‌آمده از مدل نشان داد که با تعداد خودروهای کمتر از تعداد اتوبوس‌های واقعی در روزهای مورد بررسی، تمامی محدودیت‌های سیستم به‌ویژه تقاضا فراهم می‌شود [Pooya et al, 2021].

هانگ و همکاران (۲۰۲۲)، در تحقیقی به مروری بر مدل های مبتنی بر عامل برای شبیه سازی و تحلیل حمل و نقل پرداختند. برنامه‌های کاربردی مدل‌های مبتنی بر عامل در سیستم‌های حمل‌ونقل در سه مدل مقیاس زمانی و به دنبال آن یک بحث اضافی در مورد رویکردهای مدل‌سازی ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی گسترده باورها، خواسته‌ها، یادگیری و سازگاری افراد و مشکلات بهینه‌سازی با استفاده از مدل‌های مبتنی بر عامل بررسی می‌شود. علاوه بر این، ما به برخی محدودیت‌ها از نظر روش کالیبراسیون و اعتبارسنجی، مدل‌سازی رفتار عامل‌ها و کارایی محاسبات اشاره می‌کنیم. در پایان، توصیه هایی ارائه شده و جهت گیری های بالقوه و روشنگری مانند کلان داده[4] و دوقلوی دیجیتال[5] برای تحقیقات آینده پیشنهاد می شود [Huang et al, 2022].

جدول ۱. خلاصه مطالعات انجام شده و تفاوت پژوهش جاری با هر یک از پژوهش ها

نویسنده	روش مطالعه	تفاوت پژوهش جاری با هر یک از پژوهش ها
کاظمی و همکاران (۱۴۰۱)	مسیریابی چندساختی مبتنی بر عامل در سیستم حمل و نقل عمومی	شبیه سازی عامل بنیان مسیر **BRT**
غفاری و همکاران (۱۴۰۰)	بررسی تأثیر اولویت‌دهی فعال غیرمشروط به حمل‌ونقل همگانی در زمان‌بندی چراغ راهنمایی با شبیه سازی	استفاده از شبیه سازی عامل بنیان با استفاده از نرم افزار نت لوگو و کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها
فائزی و همکاران (۱۳۹۸)	بررسی معیارهای تأثیرگذار در تعیین مسیر اتوبوس تندرو (نمونه موردی شهر کرج)	در نظر گرفتن سناریو های مختلف اعم از ایجاد تقاطع غیر هم سطح یا پل در تقاطعات و همچنین چراغ های هوشمند
نجفی زنگه و همکاران (۱۳۹۵)	بهبود بهره‌وری نیروی انسانی تعمیرگاه با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم مطالعه موردی سامانه BRT	کاهش همزمان مدت زمان سفر و زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها در پژوهش
فلفلانی و صفاریان (۱۳۹۳)	تجزیه و تحلیل و بهینه سازی پارامترهای موثر بر سیستم اتوبوس های **BRT** به وسیله ی تکنیک شبیه سازی گسسته-پیشامد	در نظر گرفتن سناریوهای متفاوت و در نظر گرفتن بیکاری اتوبوس ها در مسیر رفت و برگشت با استفاده از شبیه سازی .
وانگ و همکاران (۲۰۱۶)	مدلسازی زمان بندی و زمان توقف خدمات برای اتوبوس های شهری در چین	استفاده از شبیه سازی عامل بنیان و دستیابی به اهداف متفاوت
پاتیاس و گورگیو (۲۰۱۷)	مدلسازی و پیاده سازی **BRT** براساس ترافیک جداگانه با اولویت بندی همانگ شده و موقعیت مکانی	استفاده از شبیه سازی عامل بنیان و نرم افزار برنامه پایه **NetLogo** در پژوهش

نویسنده	روش مطالعه	تفاوت پژوهش جاری با هر یک از پژوهش ها
	اتوماتیک	
نسماکنو و همکاران (۲۰۱۸)	هماهنگ سازی چراغ های ترافیکی برای اتوبوس های سریع حمل و نقل با استفاده از الگوریتم تکاملی موازی	در نظر گرفتن سناریو های مختلف اعم از ایجاد تقاطع غیر هم سطح یا پل در تقاطعات با استفاده از شبیه سازی
جی کیوتسالیتیس و همکاران (۲۰۱۹)	طراحی مدل کم هزینه سازی برای تخصیص ناوگان اتوبوس با تولید تاکتیکی از گزینه های کوتاه و چرخشی	استفاده از نرم افزار **Net logo** و کد نویسی در محیط مورد نظر و بهبود وضعیت حمل و نقل **BRT** از حیث زمان سفر با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف
سوریانی و همکاران (۲۰۲۰)	تصمیم گیری چندمعیاره برای مدلسازی و شبیه سازی بهبود کارایی سیستم های حمل و نقل	در نظر گرفتن سناریوهای مختلف و دستیابی به اهداف کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها و کاهش زمان سفر
کامارودین و همکاران (۲۰۲۰)	ارزیابی عملکرد سرویس مترو دبی با استفاده از مدل **SCOR** و شبیه سازی **ARENA**	شبیه سازی عامل بنیان خطوط **BRT**
لی ژو و همکاران (۲۰۱۷)	مدل کنترل چراغ فعال برای اتوبوس تندرو بر اساس سیستم یکپارچه اطلاعات	استفاده از روش عامل بنیان و در نظر گرفتن سناریوهای مختلف
پویا و همکاران (۲۰۲۱)	طراحی مدل بهینه سازی و سیستم پشتیبانی تصمیم برای تعیین ظرفیت تعدادی از انواع حمل و نقل عمومی خطوط اتوبوسرانی شهری	در نظر گرفتن تغییر ظرفیت و تعداد اتوبوس ها لذا تفاوت در دستیابی به اهداف مورد نظر در پژوهش جاری مشهود می باشد.
هانگ و همکاران (۲۰۲۲)	مروری بر رویکرد مدل‌سازی و شبیه‌سازی مبتنی بر عامل و پیشرفت‌های اخیر آن در زمینه‌های حمل‌ونقل	اجرای روش شبیه سازی عامل بنیان در مسیر خط یک **BRT** شهر تهران با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف و دستیابی به اهداف مورد نظر از جمله کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها و همچنین کاهش زمان سفر

با وجود اینکه در اکثر مطالعات قابلیت اطمینان به عنوان یکی از اساسی ترین شاخص ها در کارایی و اثر بخشی حمل و نقل عمومی ذکر شده، لیکن در اکثر مطالعات انجام شده از دیدگاه زمان سفر به میزان تأخیر در تقاطع ها توجه شده و از جنبه ایجاد پراکندگی در زمان بندی اتوبوس ها و کاهش قابلیت اطمینان به این موضوع توجه کافی نشده است. در اکثر مطالعات به زمان بندی، سرعت حرکت اتوبوس ها و همچنین زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها به عنوان یک پارامتر، و زمان بندی چراغ راهنمایی به عنوان یک متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است، که این باعث کاهش انعطاف پذیری سیستم می شود.

ضمناً در اکثر مطالعات انجام شده تقاطع ها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته اند، به این معنی که در زمان تصمیم گیری جهت اولویت دهی به اتوبوس ها در یک تقاطع، به زمان رسیدن آن اتوبوس به تقاطع های بعدی و وضعیت چراغ راهنمایی در آن تقاطع ها توجهی نمی شود، از طرف دیگر به زمان رسیدن اتوبوس های بعدی به تقاطع مورد نظر و وضعیت چراغ راهنمایی در صورت دادن یا ندادن اولویت به اتوبوس حاضر در تقاطع توجه نمی شود. از این رو می توان نتیجه گرفت که مطالعات انجام شده فاقد یک دید گاه کل نگر به کل مسیر سامانه اتوبوس های تندرو می باشد و همواره تقاطع ها به صورت جداگانه مورد بحث قرار گرفته اند.

لازم به ذکر است در اکثر مطالعات پیشین، شبیه سازی در یک جهت مسیر دو طرفه اعمال شده شده است، لیکن در مدل حاضر مدلسازی در دو جهت مسیر (رفت و برگشت) به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفت.

اضافه می نماید روش شبیه‌سازی عامل بنیان مدلی است که شامل یک یا چند عامل است که این عوامل در یک محیط قرار دارند. عوامل می‌توانند با هم در ارتباط باشند و بر هم تأثیر بگذارند. در واقع، یک مدل عامل محور دارای ساختاری پویا و پایین به بالا (جزء به کل) است. بدین معنی که از فعالیت اجزای آن که عامل‌ها هستند، نتیجه‌ای جامع و منسجم حاصل می‌شود. این مدل‌ها به طور معمول با سیستم‌ها و مسائل پیچیده مواجه بوده و دارای قابلیت‌های ابداعانه و خلاقانه هستند. این روش بهترین شیوه برای مدل‌سازی در نقاطی است که با عواملی هوشمند مثل انسان مواجه هستند [Bonabeau, 2002].

۳. روش شناسی تحقیق

این تحقیق از نظر دسته بندی تحقیقات بر حسب هدف، یک تحقیق کاربردی توسعه ای و به لحاظ نظری توصیفی می باشد. نحوه گردآوری داده ها، بصورت کتابخانه ای و مصاحبه ای عمیق با خبرگان و کارکنان و ابزار گردآوری و ثبت داده ها، پایگاه های داده اطلاعاتی معتبر است. همچنین بخشی از این پژوهش از نظر بعد زمانی گذشته نگر اما در نهایت آینده نگر می باشد. سرآغاز پژوهش پیش رو مطالعات کتابخانه ای، گردآوری اطلاعات ، مصاحبه عمیق با خبرگان و کارکنان و استفاده از اطلاعات جامعه موردنظر و ویژگی های خاص آن می باشد. پس از گردآوری اطلاعات لازم، روش مدنظر طراحی شده و بعد از آن صحت روش های ارایه شده به صورت مستدل بررسی و قضایای مربوطه اثبات شده است.

به عبارت دیگر روش تحقیق بسیاری از سیستم های واقعی چنان پیچیده اند که حل ریاضی مدل هایشان در عمل ناممکن است. در اینگونه موارد به منظور تقلید رفتار سیستم، با گذشت زمان، می توان از شبیه سازی رایانه ای استفاده کرد. با استفاده از شبیه سازی، داده هایی فراهم می آید که می توان به نوعی سیستم واقعی را مشاهده کرد. از داده های به وجود آمده از شبیه سازی برای شناسایی معیارهای سنجش عملکرد سیستم استفاده می شود. در این مقاله از برنامه پایه NetLogo برای کدنویسی مدل و اجرای شبیه سازی مدل استفاده شده است.

بنابراین طبق فرایند انجام پژوهش، پس از بررسی مبانی نظری پژوهش، عامل های نقش آفرین در سیستم حمل و نقل اتوبوس های تندرو شهری (خط یک BRT) شناسایی شدند. سپس داده های استاندارد تهیه و پارامترهای مهم انتخاب شدند. پس از آن، جهت انجام شبیه سازی، نرم افزار نت لوگو انتخاب گردید و سپس مراحل کدنویسی جهت معرفی عامل ها و تعاملات میان آنها اجرا شد. در مرحله پایانی پس از اعتبارسنجی مدل و تأیید اعتبار آن اجرای مدل بر مبنای داده های استاندارد صورت پذیرفت و نتایج حاصل از آن تبیین گردید.

۳-۱ سناریوهای تحقیق

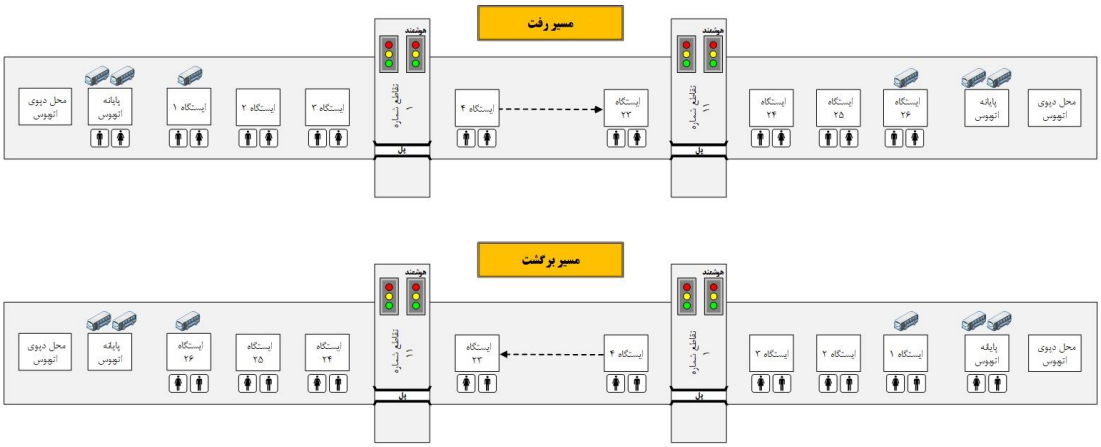
۱- سناریو اول: سیستم عادی BRT ؛ با توجه به اطلاعات و ورودی اولیه داده شده برای سناریو اول پس از آنالیز، خروجی ها و تصاویر دو بعدی و سه بعدی حاصل گردیده است. در کل در این مسیر سه لاین اختصاص داده شده ، که یک لاین جداگانه به اتوبوس و دو لاین به ماشین ها اختصاص یافته است.

۲- سناریو دوم: سیستم BRT با بکارگیری چراغ راهنمای هوشمند در تقاطعات ؛ در کل در این مسیر سه لاین اختصاص داده شده، که یک لاین جداگانه به اتوبوس با چراغ راهنمای هوشمند و دو لاین به ماشین ها اختصاص یافته است. با توجه به اطلاعات و ورودی اولیه داده شده برای سناریو دوم پس از آنالیز، خروجی ها و تصاویر دو بعدی و سه بعدی حاصل گردیده است.

۳- سناریو سوم: سیستم BRT با ایجاد سازه غیر هم سطح یا پل در تقاطعات ؛ در کل در این مسیر سه لاین اختصاص داده شده است، که یک لاین جداگانه به اتوبوس بصورت سازه غیر همسطح (پل) و دو لاین به ماشین ها اختصاص داده شده است. با توجه به اطلاعات و ورودی اولیه داده شده برای سناریو سوم پس از آنالیز، خروجی ها و تصاویر دو بعدی و سه بعدی حاصل گردیده است.

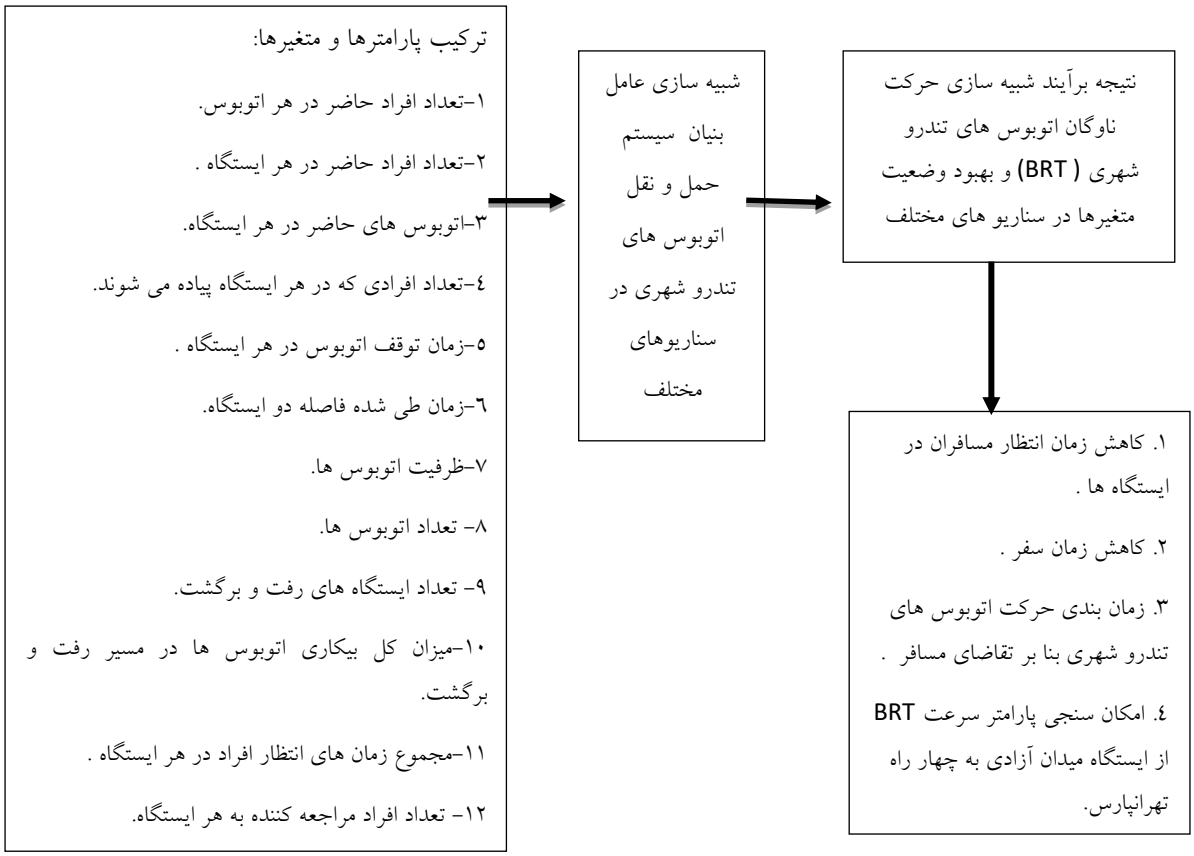
ضمناً مسیر(خط یک BRT) در هر سه سناریو دارای ۲۶ ایستگاه رفت و ۲۶ ایستگاه برگشت می باشد. فاصله زمانی اعزام اتوبوس ها از پایانه از ۷۰ ثانیه تا ۲۲۵ ثانیه می باشد. سرعت اتوبوس ها در این خط به طور میانگین ۵۰ کیلومتر بر ساعت (حداقل ٤٠ و حداکثر ٦٠ کیلومتر بر ساعت) و زمان طی نمودن مسیر رفت یا برگشت به طور میانگین ۵۰ دقیقه و همچنین زمان توقف در ایستگاه به تناسب حجم مسافر از ۳۰ تا ٤٥ ثانیه بوده و همچنین طول مسیر از ۱۱ چراغ راهنمایی و تعدادی تقاطع بدون چراغ راهنمایی تشکیل شده است.

تعداد اتوبوس های دو کابین فعال در خط یک برابر با ١٦٦ دستگاه می باشد. تعداد صندلی های کل اتوبوس برای آقایان ۲۹ صندلی و برای بانوان ۱۳ صندلی بوده و ظرفیت مسافران ایستاده برای آقایان ۵۰ و برای بانوان ۲۵ نفر می باشد. ضمن اینکه موقعیت تمامی ایستگاه ها از حیث جمعیت مسافری به صورت یکسان در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. نمای کلی مسیر رفت و برگشت خط یک BRT

پارامترها و متغیرهای وضعیت سیستم: برابر با نمودار ۱ (الگوریتم فرآیند تحقیق) تعداد ۱۲ متغیر و پارامتر موجود می باشد، که حالات و چگونگی سیستم را در یک مقطع زمانی توصیف می کنند:



نمودار ۱. الگوریتم فرآیند تحقیق

٤. اعتبارسنجی مدل

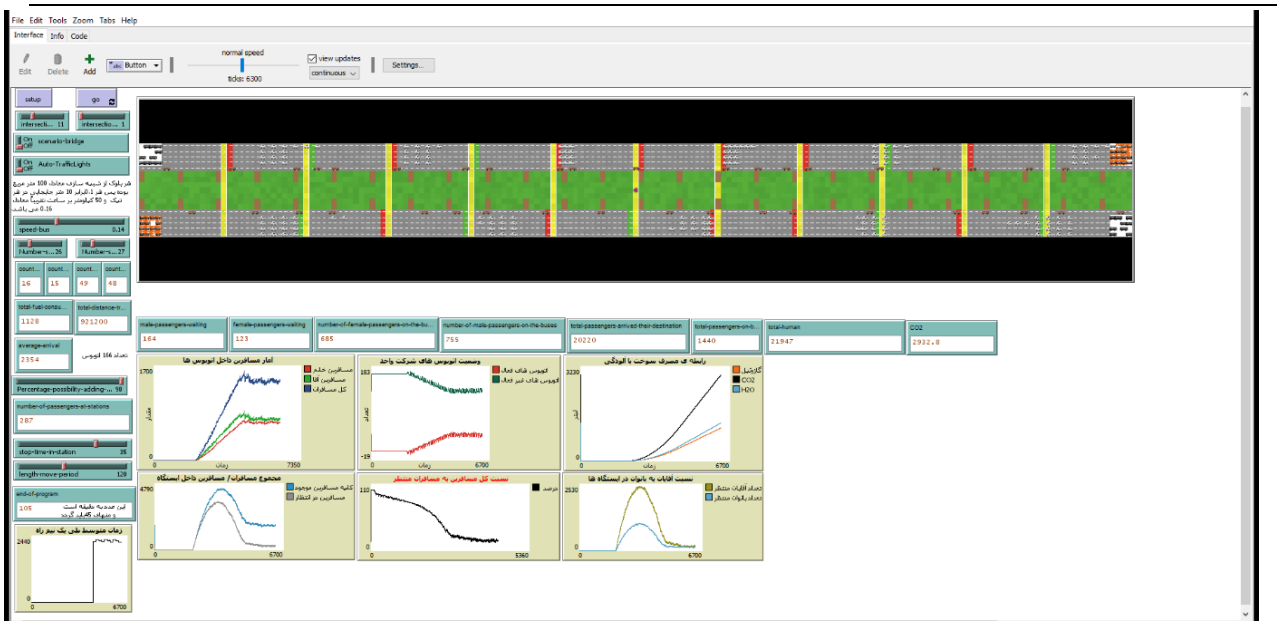
برای دستیابی به قابلیت اطمینان بالا در مدل شبیه سازی و نتایج آن، معمولاً رفتار مدل در شبیه سازی خروجی ها با شرایط تجربی مقایسه می شود. روش های مختلفی از جمله آزمایش شرایط حدی، روایی داده های تاریخی، تحلیل حساسیت، روایی ظاهری و... برای اعتبارسنجی شبیه سازی ارائه شده اند [Sargent, 20007]. که در این تحقیق از روش تحلیل حساسیت استفاده شده است. این روش شامل ایجاد تغییر و دستکاری مقادیر ورودی مدل برای مشخص شدن اثر آنها بر رفتار مدل یا خروجی های برنامه شبیه سازی است. بدین منظور، با تغییر برخی متغیرهای تأثیرگذار ورودی، مانند سرعت اتوبوس ها، زمان توقف اتوبوس در ایستگاه ها، زمان اعزام اتوبوس از پایانه، خروجی های مدل ثبت و بررسی شد که با مباحث تئوریک و نظر خبرگان حوزه حمل و نقل همخوانی داشت.

٥. نتایج شبیه‌سازی

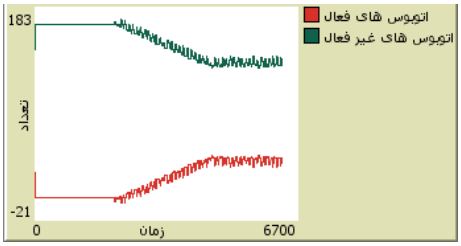
در جدول شماره ۲ نتایج میزان شاخص های مختلف بررسی شد و میزان اثرگذاری آنها بر روی اتوبوس ها و مسافران ارزیابی گردیده است. در جداول شماره های ۲ تا ۷ مطالعه سناریو های مختلف با پارامترهای موثر ذکر شده در یک ساعت (٦۰ دقیقه) در زمان پیک مسافری مدنظر می باشد. در جدول شماره ۲ در وضعیت فعلی سامانه تندور خط یک شرکت واحد اتوبوسرانی، زمان اعزام ۱۲۰ ثانیه، زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها ۳۵ ثانیه و سرعت اتوبوس ها ٤٥ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. بررسی تحت پارامترهای فعلی در خط یک

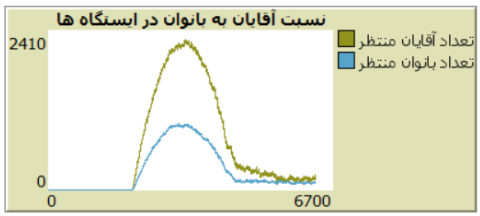
شرح هدف	پارامتر های موثر	بازه ی متغیر	سناریو وضعیت موجود (سناریو اول)	سناریو چراغ هوشمند (سناریو دوم)	سناریو سازه غیر همسطح یا پل (سناریو سوم)
- کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها - کاهش زمان سفر - زمانبندی حرکت	- زمان اعزام	۷۰-۲۲۵	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
	- زمان توقف در ایستگاه	۳۰-۴۵	۳۵	۳۵	۳۵
	- سرعت اتوبوس	۴۰-۶۰	۴۵	۴۵	۴۵
نتیجه:	نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران حاضر در ایستگاه ها		۲۸۷	۱۸۷	۱۶۲
	نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران به مقصد رسیده		۲۰۲۲۰	۲۰۶۱۷	۲۰۶۲۴
	نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها		۱۴۴۰	۱۱۸۲	۱۱۶۷



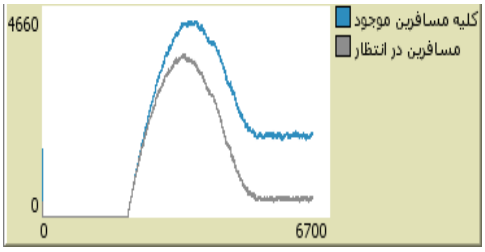
شکل ۲. نمای کلی از خروجی نرم افزار در سناریو وضعیت موجود(تحت پارامترهای فعلی)



شکل ۳. نمودار وضعیت اتوبوس های فعال و غیرفعال در ساعت اول بهره برداری



شکل ٤. نمودار نسبت تعداد آقایان به بانوان در حال انتظار در ایستگاه ها در ساعت اول بهره برداری



شکل ۵. نمودار نسبت تعداد کل مسافران موجود به مسافران در حال انتظار در ساعت اول بهره برداری

با استفاده از مبنای پارامترهایی که در حال حاضر در خط یک اتوبوس های تندرو مدنظر و ملاک عمل می باشد یعنی زمان اعزام که هر ۱۲۰ ثانیه یک اتوبوس اعزام می شود و زمان توقف در ایستگاه که این پارامتر در حال حاضر ۳۵ ثانیه می باشد و سرعت اتوبوس ها که در حالت عادی ٤٥ کیلومتر بر ساعت می باشد، لذا با توجه به اهداف مورد نظر به ارزیابی سناریوهای مختلف پرداخته ایم. به عنوان نمونه تعداد مسافران در ایستگاه های اتوبوس در سناریوی پل به کمترین میزان خود رسیده است که در واقع نشان از کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها می باشد که یک اتفاق خوشایند برای مسافران به شمار می آید و همچنین در سناریوی چراغ هوشمند نیز نسبت به سناریو وضعیت موجود تغییر محسوسی در فاکتور مورد نظر مشاهده می گردد . فاکتور تعداد کل مسافران به مقصد رسیده نیز در سناریو پل و چراغ هوشمند نسبت به سناریو وضعیت موجود افزایش یافته که در این صورت شاهد کاهش زمان سفر مسافران می باشیم و در این صورت رضایت مسافران را به همراه خواهد داشت و نیز فاکتور تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها در دو سناریو پل و چراغ هوشمند نسبت به سناریو وضعیت موجود کاهش یافته است که این فاکتور نیز به نوعی نشانگر کاهش زمان سفر مسافران می باشد.

در جدول شماره (۳) اقدام به افزایش در پارامتر سرعت اتوبوس از ٤٥ به ٦٠ کیلومتر بر ساعت گردیده است تا تغییرات به عمل آمده در سناریوهای مختلف بررسی گردد.

جدول ۳. تغییر پارامتر (افزایش سرعت اتوبوس)

شرح هدف	پارامتر های موثر	بازه ی متغیر	سناریو وضعیت موجود (سناریو اول)	سناریو چراغ هوشمند (سناریو دوم)	سناریو سازه غیر همسطح یا پل (سناریو سوم)
– کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها – کاهش زمان سفر – زمانبندی حرکت	–زمان اعزام	۷۰–۲۲۵	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
	– زمان توقف در ایستگاه	۳۰–٤٥	۳۵	۳۵	۳۵
	– سرعت اتوبوس	٤٠–٦٠	٦٠	٦٠	٦٠
نتیجه:	نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران حاضر در ایستگاه ها		۲٤٤	۱۸۵	۱٥٤
	نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران به مقصد رسیده		۲۰٤۲٤	۲۰۷٥٤	۲۰۸۷۷
	نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها		۱۲٥٤	۹۹۲	۹٦۱

در جدول شماره ۳ همانطور که مشخص است با افزایش سرعت اتوبوس نسبت به جدول شماره ۲ (حالت اولیه) ، در مجموع فاکتورهای تعداد مسافران در ایستگاه ها و تعداد کل مسافران داخل اتوبوس ها کاهش می یابد. ضمناً با افزایش سرعت اتوبوس در جدول شماره ۳ در بررسی سناریوهای مختلف، شاهد کاهش چشمگیری در فاکتور تعداد مسافران در ایستگاه ها در سناریو پل و چراغ هوشمند نسبت به سناریو وضعیت موجود بوده ایم که قاعدتاً به هدف کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها دست پیدا کرده ایم ولی فاکتور تعداد کل مسافران به مقصد رسیده تغییر چشمگیری ندارد.

در تغییر بعدی اقدام به کاهش در پارامتر سرعت اتوبوس از حالت اولیه ٤٥ به ٤٠ کیلومتر بر ساعت گردیده است تا تغییرات بعمل آمده در سناریوهای مختلف بررسی گردد. با کاهش سرعت اتوبوس شاهد این موضوع بوده ایم که تعداد مسافران در ایستگاه ها نسبت به حالت فعلی که سرعت اتوبوس ٤٥ کیلومتر بر ساعت می باشد، تا حدودی افزایش یافته است یعنی مسافران میبایست زمان بیشتری در انتظار سوار شدن به اتوبوس صرف نمایند. در این حالت فاکتور تعداد کل مسافران به مقصد رسیده نیز نسبت به جدول شماره ۲ یعنی حالت فعلی اتوبوس ها در خط یک سامانه تندرو کاهش داشته و تعداد کل مسافران موجود در اتوبوس نیز افزایش داشته است که نهایتاً منتج به افزایش زمان سفر مسافران بوده که عدم رضایت مشتری را به همراه دارد.

ضمناً با کاهش سرعت اتوبوس در بررسی سناریوهای مختلف، سناریو پل از حیث فاکتورهای زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها، تعداد کل مسافران به مقصد رسیده ، تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها، شرایط بهتری نسبت به دو سناریو دیگر داشته است. البته سناریو چراغ هوشمند نیز نسبت به سناریو حالت جاری درخصوص فاکتورها و دستیابی به اهداف مورد نظر شرایط به مراتب بهتری داشته یعنی زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها و همچنین زمان سفر کاهش یافته است.

در ادامه اقدام به تغییر در پارامتر زمان توقف در ایستگاه از ۳۵ ثانیه به ۳۰ ثانیه نموده ایم تا تغییرات بعمل آمده در سناریوهای مختلف بررسی گردد.

در صورت کاهش زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه، نسبت به حالت اولیه که زمان توقف در ایستگاه ۳۵ ثانیه بود، مسافران بیشتری در ایستگاه ها در انتظار سوار شدن به اتوبوس می باشند یعنی زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها افزایش می یابد که در قیاس با حالت اولیه اوضاع بدتر شده است. البته از طرفی فاکتور تعداد کل مسافران به مقصد رسیده نسبت به حالت اولیه افزایش یافته و همچنین تعداد کل مسافران داخل اتوبوس نیز کاهش یافته است که در نتیجه منتج به کاهش زمان سفر مسافران می گردد که مطمئناً رضایت مشتریان را نیز به همراه دارد.

ضمناً با کاهش زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها در بررسی سناریوهای مختلف، سناریو پل از حیث فاکتورهای زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها، تعداد کل مسافران به مقصد رسیده وتعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها شرایط بهتری نسبت به دو سناریو دیگر دارد. البته سناریو چراغ هوشمند نیز نسبت به سناریو وضعیت موجود درخصوص فاکتورها و دستیابی به اهداف مورد نظر شرایط به مراتب بهتری داشته است یعنی زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها و زمان سفر برای مسافران کاهش یافته است.

در تغییر بعدی اقدام به افزایش پارامتر زمان توقف در ایستگاه از ۳۵ ثانیه به ٤٥ ثانیه گردیده است تا تغییرات بعمل آمده در سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد.

در صورت افزایش زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها از ۳۵ ثانیه به ٤٥ ثانیه در مقایسه با حالت اولیه یعنی جدول شماره ۲ شاهد کاهش تعداد مسافران در ایستگاه ها می باشیم یعنی به هدف کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها دست پیدا نموده ایم. ولی از سوی دیگر شاهد کاهش تعداد کل مسافران به مقصد رسیده و همینطور شاهد افزایش تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها می باشیم که نشانگر بدتر شدن اوضاع یعنی افزایش زمان سفر هستیم.

ضمناً با افزایش زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها در بررسی سناریوهای مختلف، سناریو پل و سناریو چراغ هوشمند از حیث فاکتورهای زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها، تعداد کل مسافران به مقصد رسیده و تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها شرایط بهتری نسبت به سناریوی وضعیت موجود داشته اند. به عبارت دیگر دو سناریو مورد بحث نسبت به سناریو وضعیت موجود در دستیابی به اهداف مورد نظر یعنی

زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها و زمان سفر کاهش قابل ملاحظه ای داشته اند.

در ادامه اقدام به کاهش پارامتر زمان اعزام اتوبوس از ۱۲۰ ثانیه به ۷۰ ثانیه شده است تا تغییرات بعمل آمده در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گیرد. در صورتیکه زمان اعزام اتوبوس از پایانه (مبدأ)کاهش یابد یعنی در فاصله های زمانی کمتری اتوبوس ها اعزام شود، فاکتور تعداد مسافران در ایستگاه ها نسبت به حالت اولیه (جدول شماره ۲) بسیار کاهش یافته است یعنی زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها بسیار کم می باشد و مسافران در اسرع وقت سوار اتوبوس ها می شوند که در واقع هدف کاهش زمان انتظار مسافران قابل دستیابی می باشد و از این لحاظ رضایت مسافران را در پی داشته است. ولی از حیث تعداد کل مسافران به مقصد رسیده و تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس اوضاع نسبت به حالت اولیه بدتر شده است و اگرچه مسافران زودتر سوار اتوبوس ها شده اند لیکن به دلیل اعزام زیاد اتوبوس ها منجر به ایجاد ترافیک در لاین اتوبوس ها شده است که می تواند ناشی از عدم گنجایش خط ویژه اتوبوس ها باشد و در همین راستا هدف کاهش زمان سفر در این حالت محقق نمی گردد.

ضمناً با کاهش زمان اعزام اتوبوس ها در بررسی سناریوهای مختلف، سناریو پل از حیث فاکتورهای زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها، تعداد کل مسافران به مقصد رسیده و تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها شرایط بهتری نسبت به دو سناریو دیگر دارد. البته سناریو چراغ هوشمند نیز نسبت به سناریو وضعیت موجود درخصوص ۳ فاکتور مذکور و اهداف کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها و کاهش زمان سفر شرایط به مراتب بهتری داشته است.

پیرو تغییرات قبلی اقدام به افزایش پارامتر زمان اعزام اتوبوس از ۱۲۰ ثانیه به ۲۲۵ ثانیه می گردد تا تغییرات بعمل آمده در سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. در این حالت زمان اعزام اتوبوس ها از پایانه (مبدأ)افزایش می یابد یعنی در فاصله های زمانی بیشتری اتوبوس ها اعزام می شوند، لذا فاکتور تعداد مسافران در ایستگاه ها نسبت به حالت اولیه (جدول شماره ۲) بسیار افزایش یافته است و بیش از دو برابر شده است یعنی زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها بسیار زیاد بوده و مسافران با تأخیر زیاد سوار اتوبوس ها می شوند که در واقع هدف کاهش زمان انتظار مسافران به هیچ عنوان قابل دستیابی نمی باشد و از این حیث عدم رضایت مسافران را به همراه دارد. در این حالت از حیث تعداد کل مسافران به مقصد رسیده وضعیت تقریباً برابر با حالت اولیه (جدول شماره ۲) می باشد ولی فاکتور تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس در این حالت نسبت به حالت اولیه کمتر شده است که دلیل آن این است که با توجه به اعزام اتوبوس ها با فاصله زمانی بیشتر از پایانه مبدأ، لذا مسافران بیشتری در ایستگاه ها در انتظار سوار شدن می باشند.

ضمناً با افزایش زمان اعزام اتوبوس ها در بررسی سناریوهای مختلف، سناریو پل از حیث فاکتورهای زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها، تعداد کل مسافران به مقصد رسیده و تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها تقریباً برابر با سناریو چراغ هوشمند می باشد. البته دو سناریو پل و چراغ هوشمند نیز نسبت به سناریو وضعیت موجود درخصوص فاکتورهای مذکور و اهداف کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها و کاهش زمان سفر شرایط تقریباً بهتری داشته اند.

در جداول شماره ٤ تا ٦ وضعیت کاهش و یا افزایش پارامترها در سناریوهای مختلف (سناریو وضعیت موجود/ سناریو چراغ هوشمند/ سناریو پل) در کنار یکدیگر آورده شده است تا بتوان تحلیل بهتری در هر یک از سناریوها داشت.

جدول ٤. تغییر پارامترها در سناریو وضعیت موجود

سناریو وضعیت موجود	افزایش زمان اعزام	کاهش زمان اعزام	افزایش زمان توقف در ایستگاه	کاهش زمان توقف در ایستگاه	کاهش سرعت اتوبوس	افزایش سرعت اتوبوس	حالت فعلی
نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران حاضر در ایستگاه ها	٦٦١	١٨٩	٢٣٩	٣٤٩	٢٧٤	٢٤٤	٢٨٧
نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران به مقصد رسیده	٢٠٤٩٩	١٩١٢٧	٢٠١٠١	٢٠٢٩٠	٢٠١٦١	٢٠٤٢٤	٢٠٢٢٠
نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها	٧٩٢	٢٦٧٥	١٦٢٦	١٣٤٥	١٥٤٥	١٢٥٤	١٤٤٠
نتیجه مقایسه	✓			✓		✓	

همانطور که در جدول وضع موجود (شماره ٤) مشهود می باشد در پارامتر سرعت اتوبوس ها، در صورت افزایش سرعت اتوبوس ها سه فاکتور تعداد مسافران حاضر در ایستگاه ها، تعداد کل مسافران به مقصد رسیده و تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها در مقایسه با حالت فعلی شرایط بهتری نسبت به کاهش سرعت اتوبوس ها دارند و منتج به دستیابی به دو هدف کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها و کاهش زمان سفر می گردد. به همین ترتیب با افزایش و کاهش در پارامترهای زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها و زمان اعزام اتوبوس ها نیز می توان فاکتورها و اهداف مورد نظر را نسبت به حالت فعلی مورد بررسی قرار داد که در جدول شماره ٤ قابل مشاهده است.

جدول ٥. تغییر پارامترها در سناریو چراغ هوشمند

سناریو چراغ هوشمند	افزایش زمان اعزام	کاهش زمان اعزام	افزایش زمان توقف در ایستگاه	کاهش زمان توقف در ایستگاه	کاهش سرعت اتوبوس	افزایش سرعت اتوبوس	حالت فعلی
نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران حاضر در ایستگاه ها	٤٩٣	٦٠	١٦٣	٢١٨	٢١٧	١٨٥	١٨٧
نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران به مقصد رسیده	٢٠٨٠٠	٢٠٠١٩	٢٠٥٢٧	٢٠٦٧٣	٢٠٤٧٤	٢٠٧٥٤	٢٠٦١٧
نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها	٦٩٢	١٨٧١	١٢٩٦	١١٠٩	١٢٦٣	٩٩٢	١١٨٢
نتیجه مقایسه	✓			✓		✓	

در جداول شماره ٥ و ٦ تحلیل های مورد نظر را می توان در دو سناریو دیگر یعنی سناریو چراغ هوشمند و سناریو پل انجام و به فراخور اهداف دنبال شده در تحقیق بهترین وضعیت را انتخاب نمود.

جدول ٦. تغییر پارامترها در سناریو پل

سناریو پل	افزایش زمان اعزام	کاهش زمان اعزام	افزایش زمان توقف در ایستگاه	کاهش زمان توقف در ایستگاه	کاهش سرعت اتوبوس	افزایش سرعت اتوبوس	حالت فعلی
نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران حاضر در ایستگاه ها	٥١٨	٣٩	١٦١	١٨٦	١٥٥	١٥٤	١٦٢
نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران به مقصد رسیده	٢٠٧٨٠	٢٠٠٦١	٢٠٤٧٩	٢٠٦٨٥	٢٠٥٨٦	٢٠٨٧٧	٢٠٦٢٤
نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها	٦٨٦	١٨٥٠	١٢٩٨	١٠٩٩	١٢٢١	٩٦١	١١٦٧
نتیجه مقایسه	✓			✓		✓	

با توجه به نتایج جداول مقایسه ای ٤و ٥ و ٦، در جدول شماره ٧ به طور همزمان اقدام به افزایش پارامتر زمان اعزام اتوبوس ها، کاهش پارامتر زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها و همچنین افزایش پارامتر سرعت اتوبوس ها گردیده تا تغییرات بعمل آمده در سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد.

جدول ٧. بهبود عملکرد با تغییر پارامترها

شرح هدف	پارامتر های موثر	بازه ی متغیر	سناریو وضعیت موجود (سناریو اول)	سناریو چراغ هوشمند (سناریو دوم)	سناریو سازه غیر همسطح یا پل (سناریو سوم)
- کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها - کاهش زمان سفر - زمانبندی حرکت	- زمان اعزام	٧٠-٢٢٥	١٧٥	١٧٥	١٧٥
	-زمان توقف در ایستگاه	٣٠-٤٥	٣٠	٣٠	٣٠
	-سرعت اتوبوس	٤٠-٦٠	٥٠	٥٠	٥٠
نتیجه	نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران حاضر در ایستگاه ها		٣٤٨	٣٣٦	٣٠٧
	نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران به مقصد رسیده		٢٠٦٣٨	٢٠٩٠٨	٢٠٩٦٢
	نسبت به فاکتور تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها		٩٥٣	٧٥٣	٧٠١

در این صورت این حالت در مقایسه با حالت اولیه (جدول ٢) از حیث فاکتور تعداد مسافران در ایستگاه ها افزایش یافته است یعنی هدف کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها محقق نشده است اما از سویی دیگر وضعیت سایر فاکتورها شامل تعداد مسافران به مقصد رسیده و تعداد مسافران داخل اتوبوس ها به مراتب بهتر شده است یعنی به عبارت دیگر هدف کاهش زمان سفر برای مسافران محقق شده است. بنابراین در صورتیکه اولویت با هدف کاهش زمان سفر باشد ، بهتر است برابر جدول مذکور پارامترهای مذکور تغییر یابد. ضمناً در این حالت

با توجه به افزایش زمان اعزام اتوبوس ها، از استهلاک اتوبوس ها نیز کاسته می شود.

ضمناً با تغییرات انجام شده یعنی به طور همزمان با افزایش پارامتر زمان اعزام اتوبوس ها، کاهش پارامتر زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها و همچنین افزایش پارامتر سرعت اتوبوس ها در بررسی سناریوهای مختلف، سناریو پل و سناریو چراغ هوشمند از حیث فاکتورهای زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها، تعداد کل مسافران به مقصد رسیده و تعداد کل مسافران در داخل اتوبوس ها شرایط بهتری نسبت به سناریوی وضعیت موجود داشته اند. به عبارت دیگر دو سناریو مورد بحث نسبت به سناریو وضعیت موجود در دستیابی به اهداف مورد نظر یعنی زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها و زمان سفر برای مسافران دارای کاهش قابل ملاحظه ای می باشند.

٦. نتیجه‌گیری

هدف تحقیق حاضر شبیه سازی عامل بنیان حرکت ناوگان اتوبوس های تندرو شهری (BRT) می باشد. نتایج نشان می دهد که وضعیت سناریوی پل نسبت به دو سناریو چراغ هوشمند و حالت جاری درخصوص دستیابی به اهداف مورد نظر یعنی(کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها،کاهش زمان سفر مسافران) مناسب تر می باشد و همچنین وضعیت سناریو چراغ هوشمند نیز نسبت به سناریو وضعیت موجود درخصوص اهداف مورد نظر بهتر عمل می نماید. لذا بر اساس خروجی شبیه سازی و ارزیابی سناریوهای مختلف پیشنهاد می گردد برای تقاطعات که لاجرم دارای چراغ های راهنمایی می باشد و موجب اتلاف وقت مسافران می باشد با توجه به اصلاح الگوی مصرف در صورت امکان در تقاطعات همانند چهار راه کالج در مسیر خط یک اتوبوس های تندرو یا از پل های روگذر استفاده گردد تا اتوبوس ها به راحتی در تقاطعات از روی این پل ها عبور نمایند و یا از چراغ های هوشمند استفاده گردد تا به محض رسیدن اتوبوس به تقاطع، چراغ راهنمایی با یک تأخیر زمانی کوتاه تبدیل به سبز و اتوبوس از تقاطع عبور نماید. همچنین با توجه به تغییر افزایش پارامتر سرعت، نتایج بیانگر آن است، در مجموع فاکتورهای تعداد مسافران در ایستگاه ها و تعداد کل مسافران داخل اتوبوس ها کاهش می یابد . ضمناً با افزایش سرعت اتوبوس در جدول شماره ۳ در بررسی سناریوهای مختلف، شاهد کاهش چشمگیری در فاکتور تعداد مسافران در ایستگاه ها در سناریو های پل و چراغ هوشمند نسبت به سناریو وضعیت موجود می باشیم که قاعدتاً هدف کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها قابل دستیابی می باشد و فاکتور تعداد کل مسافران به مقصد رسیده نیز افزایش یافته است. ضمناً در جدول شماره ۷ به طور همزمان اقدام به افزایش پارامتر زمان اعزام اتوبوس ها، کاهش پارامتر زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها و همچنین افزایش پارامتر سرعت اتوبوس ها می گردد که در این صورت این حالت در مقایسه با حالت اولیه (جدول ۲) از حیث فاکتور تعداد مسافران در ایستگاه ها افزایش یافته است یعنی هدف کاهش زمان انتظار مسافران در ایستگاه ها محقق نشده است اما از سوی دیگر وضعیت سایر فاکتورها شامل تعداد مسافران به مقصد رسیده و تعداد مسافران داخل اتوبوس ها بهتر شده است یعنی به عبارت دیگر هدف کاهش زمان سفر برای مسافران محقق شده است. بنابراین در صورتیکه اولویت با هدف کاهش زمان سفر باشد ، بهتر است برابر جدول مذکور پارامترهای مذکور تغییر یابد. ضمناً در این حالت با توجه به افزایش زمان اعزام اتوبوس ها، از استهلاک اتوبوس ها نیز کاسته می شود و به نوعی اقتصادی تر می باشد. لازم به ذکر است با بررسی اثر تغییر ظرفیت و تعداد اتوبوس ها در مدل می توان به الگویی برای چگونگی میزان سرمایه گذاری و هزینه کرد اقتصادی تر در تهیه و تدارک ناوگان سامانه اتوبوسرانی دست یافت بطوریکه کمک شایانی به تصمیم گیران و مسئولین امر در خصوص تعیین اندازه بهینه ناوگان اتوبوسرانی می نماید. در انتها پیشنهاد می گردد با تغییرات جزئی در پارامترهای سرعت اتوبوس ها، زمان توقف اتوبوس ها در ایستگاه ها و همچنین

تغییرات در زمان اعزام اتوبوس ها از پایانه یا به عبارت دیگر تغییرات در سرفاصله زمانی حرکت اتوبوس ها نسبت به بهبود عملکرد سیستم اتوبوس های تندرو شهری اقدام گردد. ضمن اینکه پیشنهاد می شود که شرایط و فضاهایی مناسب جهت سبقت گیری اتوبوس ها انجام گیرد و در صورت امکان در تقاطع ها نسبت به ایجاد سازه های غیر هم سطح یا پل اقدام شود و یا ایجاد سامانه چراغ‌های راهنمایی هوشمند در دستور کار قرار بگیرد و همچنین نصب نیمکت، جان پناه، چراغ روشنایی، تلفن عمومی و ... در ایستگاه‌ها جهت رفاه بیشتر مسافران تعبیه شود و نیز دسترسی به ایستگاه‌ها در راستای ایمنی بیشتر از طریق پل های هوایی عابر پیاده و یا زیرگذرها انجام گیرد.

همچنین پیشنهاد می گردد معیارهایی که در این پژوهش شناسایی شده را با استفاده از تکنیک های تصمیم گیری وزن دهی و رتبه بندی نمود. ضمناً از سایر سناریوها شامل ایجاد زیرگذر در تقاطع ها و... در تحقیقات آتی استفاده نمود. و همینطور می توان هر یک از سناریوها را از حیث تحلیل اقتصادی (هزینه – فایده) نیز مورد بررسی قرار داد.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. evolutionary algorithm (EA)
2. peak and non-peak
3. Automated Vehicle Location (AVL)
4. Big Data
5. Digital Twin

۸. مراجع

- حقانی، محمود و میرابی و حیدرضا، امام جمعه، سیدمیثم (۱۳۹٤) "رابطه بین کیفیت زندگی کاری و عملکرد سازمانی کارکنان مراکز فرمان شرکت بهره برداری راه آهن شهری تهران و حومه (مترو)" پانزدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک، تهران.

- گلزارشهری، احمد و آقاباقری، مصطفی و دلشاد، محمدحسین (۱۳۹٤) "بهبود عملکرد شبکه خطوط اتوبوسرانی در محدوده شهر یزد با هدف ارتقای کیفیت خدماتدهی و کاهش هزینه ها" پانزدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک، تهران،

- فغانی، علی و بزرگمهرنیا، رضا و بابایی، شروین (۱۳۹٤) "تحلیل اثر تعداد فضای توقف در ایستگاه بر ظرفیت خط ویژه اتوبوس مطالعه موردی: سامانه دو اتوبوس های تندرو شهر تهران" پانزدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک، تهران.

- فلفلانی، محمدرضا و صفاریان، محسن (۱۳۹۵) "تحلیل علل عدم دقت کافی رانندگان به عابران در حال گذر از تقاطع ها (مطالعه موردی : مشهد)" چهارمین همایش ملی کاربرد فناوری های نوین در علوم مهندسی، تربت حیدریه.

- ابوالفتحی، احسان و طلوعی اشلقی، عباس و حمیدی زاده، محمدرضا (۱۳۹۹) "بهبود انتشار نوآوری از طریق تحلیل عملیاتی مدلسازی عامل بنیان" چشم انداز مدیریت صنعتی، سال دهم، شماره، ۳۷، ص ص ۱۱۷-۱٤۲.

- کاظمی، مبشر و حسینعلی، فرهاد. (۱٤۰۱) "مسیریابی چندساختی مبتنی بر عامل در سیستم حمل و نقل عمومی" فصلنامه مهندسی حمل و نقل، شماره ۳، ص ۱۷۸۳-۱۷۹٦.

- فائزی، سید فرزین و کی منش، محمودرضا و ساسانی، مصطفی (۱۳۹۸) "بررسی معیارهای تأثیرگذار در تعیین مسیر اتوبوس تندرو (نمونه موردی شهر کرج)" فصلنامه علمی جاده، ش ۱۰۰، ص ۳۳-٤٤.

- غفاری، علیرضا و اکبرزاده، میثم (۱۴۰۰) "بررسی تأثیر اولویت‌دهی فعال غیرمشروط به حمل‌ونقل همگانی در زمان‌بندی چراغ راهنمایی با شبیه سازی" نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، شماره ۱، ص ۲۰۱-۲۱۲.

- نجفی زنگنه، سعید و همکاران (۱۳۹۵) "بهبود بهره‌وری نیروی انسانی تعمیرگاه با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم مطالعه موردی سامانه اتوبوسرانی تندرو تهران (BRT)" نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، ش ۱۰، ص ۱۱۸-۱۳۰.

- Bonabeau E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. Proceedings of the National Academy of Sciences, 99(suppl 3): 7280-7287.

- B. Chen and H. H. Cheng (2010) “A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 11, no. 2, pp. 485–497.

- D. Srinivasan, M. C. Choy, and R. L. Cheu (2006) “Neural networks for real-time traffic signal control,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 7, no. 3, pp. 261–272.

- H. Yu, P. Liu, Y. Fan, and G. Zhang (2021) “Developing a decentralized signal control strategy considering link storage capacity,” Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 124, Article ID 102971.

- Huang, Jiangyan, Cui, Youkai, Zhang, Lele, Tong, Weiping, Shi, Yunyang, and Liu, Zhiyuan (20022) “An Overview of Agent-Based Models for Transport Simulation and Analysis” Journal of Advanced Transportation, Vol.2022, pp. 1-17.

- Ioannis Patias , and Vasil Georgiev (2017) “Modeling and Implementation of Bus Rapid Transit corridor based on isolated or coordinated Traffic Prioritization and Automatic Location” Emerging Research and Solutions in ICT, Vol.1, No. 1, pp. 17-24.

- K. Gkiotsalitisa, Z. WubO and Cats (2019) “Transportation Research Part C” Emerging Technologies Vol 98, p, 14-36.

- Kamarudeen N, Sundarakani B, Manikas L "(2020) “An Assessment of the Dubai Metro Service’s Performance Using SCOR Model and ARENA Simulation” FIIB Business Review, Vol.9, No. 3, pp. 1-13.

- Nesmachnow, Sergio, Renzo Massobrio, Efraín Arreche, Christine Mumford b, Ana Carolina Olivera, Pablo Javier Vidal, Andrei Tchernykh (2019) “Traffic lights synchronization for Bus Rapid Transit using a parallel evolutionary algorithm” International Journal of Transportation Science and Technology, Vol 8, Issue 1, Pp. 53-67

- Pooya, A., Pakdaman, M., Fadaei, S., Chaichi Motlagh, M., Sadraei, S. (2021) “Design of optimization model and Decision Support System to determine the capacity of a number of types of public transportation of urban bus lines” Journal of Transportation Research, Vol 18(3), pp. 185-206.

- Sargent, R. G. (2007). Verification and validation of simulation models. Simulation conference, Washington, DC, USA.

- Suryani E, Hendrawan RA, Adipraja PFE, Indraswari R, Ahyudanari E, Jauhari A, Prambayanto P (2020) “Modeling and Simulation to Improve the Efficiency of Transportation Systems” A Tool for Decision Support, Preprint from Research Square, Europe PMC,1-33.

- Wang, Chao, Zhirui Ye, Yuan Wang, Yueru Xu, and Wei Wang (2016) “Modeling Bus Dwell Time and Time Lost Serving Stop in China” Journal of Public Transportation, Vol. 19, No. 3, pp. 55-77.

- Y. Gu, X. Fu, Z. Liu, X. Xu, and A. Chen (2020) “Performance of transportation network under perturbations: reliability, vulnerability, and resilience” Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 133, Article ID 101809.

- Zhou, L., Wang, Y., & Liu, Y. (2017) “Active signal priority control method for bus rapid transit based on Vehicle Infrastructure Integration” International Journal of Transportation Science and Technology, Vol.6, No. 2, pp. 99-109.

رحمان نورمحمدی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع گرایش تولید صنعتی را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب أخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۹۳ موفق به کسب درجه کارشناسی ارشد در رشته مدیریت صنعتی گرایش تحقیق در عملیات از دانشگاه آزاد اسلامی واحد فیروزکوه گردید. همچنین دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی گرایش تحقیق در عملیات در واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی می باشد. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، شبیه سازی و بهینه‌سازی است.

محمد علی خاتمی فیروزآبادی، درجه کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در رشته مهندسی صنایع را اخذ نموده اند. علاقه پژوهشی ایشان در حوزه های تصمیم گیری، مدیریت زنجیره تأمین، قابلیت اطمینان سیستم ها، مدل های کلان داده و ارزیابی عملکرد سازمان ها می باشد. ایشان در حال حاضر عضو هیئت علمی دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه علامه طباطبایی می باشند.

اکبر عالم تبریز، درجه دکتری تخصصی مدیریت صنعتی را در سـال ۱۳٦۸ از کشور ترکیه اخذ نمود. زمینه های پژوهشـی مورد علاقه ایشان تحقیق در عملیات، مدیریت تولید و آمار بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه استاد در دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه شهید بهشتی می باشد.

رضا احتشام راثی، درجه کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در رشته مدیریت صنعتی گرایش تولید و عملیات را اخذ نموده اند. زمینه های پژوهشـی مورد علاقه ایشان مدیریت زنجیره تأمین، مدلسازی و بهینه سازی بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه استادیار در دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین می باشد.

امیر دانشور، درجه دکتری در رشته مدیریت صنعتی گرایش تحقیق در عملیات را اخذ نموده اند. زمینه های پژوهشـی مورد علاقه ایشان تحقیق در عملیات، تصمیم گیری چند معیاره، مدلسازی و شبیه سازی بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه استادیار در دانشکده مدیریت دانشگاه آزاد اسلامی واحد الکترونیکی می باشد.