فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۳، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۰، ص. ۱۴۵۵-۱۴۳۷
مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی تعداد و عرض درب‌های اتوبوس‌ها با استفاده از شبیه‌سازی جریان مسافر در شرایط شلوغی به منظور کاهش زمان توقف

امیر محمد صدرانی، کارشناسی ارشد، گروه مهندسی راه‌آهن و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان

احمد رضا جعفریان مقدم (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی راه‌آهن و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان

E-mail: ar.jafarian@trn.ui.ac.ir

محسن ابوطالبی اصفهانی، استادیار، گروه مهندسی راه‌آهن و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان

امیر مسعود رحیمی، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۵

چکیده

زمان توقف اتوبوس‌ها در خطوط حمل‌ونقل همگانی نقش بسزایی در زمانبندی صحیح و به موقع رسیدن دارد. از آنجا که این زمان متاثر از شیوه سوار و پیاده شدن مسافران دارد، بنابراین می‌تواند بخش قابل ملاحظه‌ای از کل زمان سفر را به خود اختصاص دهد. زمان توقف در ساعات اوج که تقاضای سفر در بالاترین سطح خود قرار دارد می‌تواند به صورت قابل توجهی رشد کند، چرا که در چنین شرایطی شلوغی داخل وسیله می‌تواند برخورد و اصطکاک میان مسافران را افزایش دهد و روند سوار و پیاده شدن آن‌ها را با کندی مواجه نماید. بدین منظور، مطالعه حاضر قصد دارد با بهره‌گیری از ابزارهای شبیه‌ساز، جریان مسافران هنگام سوار و پیاده شدن را شبیه‌سازی نموده و با تغییر در ویژگی‌های وسیله نقلیه از جمله تعداد و عرض درب‌ها این فرآیند را تسریع نماید. مطالعه حاضر ضمن معرفی یک ابزار قدرتمند در زمینه شبیه‌سازی جریان مسافران در شرایط شلوغی، نشان داد یکی از راه‌های موثر در کاهش زمان توقف، طراحی فیزیک اتوبوس بصورت بهینه می‌باشد. پس از بررسی سناریوهای مختلف، افزایش تعداد درب‌های اتوبوس به عنوان برترین سناریو شناسایی شد که تا حد امکان قادر است فرآیند سوار و پیاده شدن را تسریع نماید و زمان توقف را ۳۷/۶ درصد کاهش دهد. تعریض درب‌ها و تغییر در الگوی سوار و پیاده شدن مسافران نیز می‌توانند به عنوان سایر راهکارها مورد توجه طراحان و سیاست‌گذاران قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: حمل‌ونقل عمومی، شلوغی داخل وسیله، زمان توقف، طرح اتوبوس، شبیه‌سازی جریان مسافر

۱. مقدمه

امروزه با توجه به معضل آلودگی هوا در کلان شهرها، راهکارهای بسیاری جهت رفع این معضل اندیشیده می‌شود. یکی از این راهکارها، ارائه مشوق‌هایی به منظور عدم استفاده از وسایل نقلیه شخصی توسط شهروندان در طول روز می‌باشد. اما به دلایلی چون شلوغی سیستم حمل‌ونقل عمومی در ساعات اوج و در نتیجه طولانی شدن زمان توقف[1] و اتلاف زمان [Seyed Abrishami et al., 2017]، شهروندان ترجیح می‌دهند تا از خودروهای شخصی خود استفاده کنند. در نتیجه، توجه به مسائل شلوغی و همچنین زمان توقف و ارائه راه‌حل‌های مناسب به منظور مدیریت و کنترل آنها، در اثربخشی راهکارهای کاهش آلودگی هوا و ترغیب به استفاده از سیستم حمل‌ونقل همگانی حیاتی است.

شلوغی در حمل‌ونقل عمومی پدیده‌ای است که منجر به افزایش تراکم مسافران داخل وسیله نقلیه می‌شود، که نتیجه آن کاهش سطح راحتی و امنیت مسافران می‌باشد. این شلوغی تاثیر مستقیمی بر روی افزایش زمان توقف اتوبوس‌ها می‌گذارد و تداوم این روند می‌تواند موجب افت شدید در جذابیت و قابلیت اطمینان سرویس از دیدگاه استفاده‌کننده شود [Habiban & Kermanshah, 2012]. زمان توقف به زمانی اطلاق می‌گردد که در آن فرآیند سوار و پیاده شدن مسافران تکمیل می‌گردد. این زمان در ساعات اوج که تقاضای سفر در بالاترین سطح خود قرار دارد می‌تواند به صورت قابل ملاحظه‌ای رشد کند [Tirachini, 2013b]. زیرا به طور کلی هرچه تعداد افراد ایستاده داخل اتوبوس بیشتر باشد، برخورد و اصطکاک میان افراد بیشتر بوده و فرآیند سوار و پیاده شدن کندتر اتفاق می‌افتد. نتایج پژوهشی در خطوط اتوبوسرانی سیدنی نشان داد که حدود ۲۶ درصد از کل زمان سفر به زمان توقف در ایستگاه‌ها تعلق دارد [Tirachini, 2013b]، همچنین شلوغی راهروی اتوبوس، علاوه بر طولانی کردن زمان سوار شدن مسافران، زمان پیاده شدن مسافران را تا ۶۸ درصد افزایش می‌دهد [Fernandez, 2011].

بنابراین، طراحان و سیاست‌گذاران حمل‌ونقل عمومی باید در حین تهیه جدول زمان‌بندی و برنامه‌ریزی وسایل، به شلوغی و تاثیرات مخرب آن بر روی زمان توقف و جذابیت سرویس توجه کنند؛ چرا که در صورت چشم‌پوشی، نتایج و منافع بدست آمده دور از واقعیت و بعضا دست بالا خواهد بود و از طرفی استراتژی‌های کلان کاهش آلودگی را بی‌اثر خواهد کرد [El-Geneidy & Surprenant-Legault, 2010]. یکی از راهکارهای کنترلی برای بهبود قابلیت اطمینان و کارایی سیستم‌های حمل‌ونقلی در مدیریت زمان توقف، طراحی فیزیک ساخت اتوبوس است [Tirachini, 2013a] که می‌تواند این زمان را بیش از ۳۰ درصد کاهش دهد [Mahdavilayen, 2019]. با این وجود، انجام مطالعات و آزمایشات بر روی خود سیستم دشوار، زمان بر، پرهزینه و در برخی موارد غیرممکن می‌باشد. به عنوان مثال، با توجه به محدودیت‌های مالی، زمانی و سایر محدودیت‌های موجود در دنیای واقعی، تغییر در ویژگی‌های وسیله نقلیه و آزمایش کردن همه حالت‌های موجود عملا غیر ممکن است. در این میان شبیه‌سازی می‌تواند به عنوان یک ابزار مطلوب و قدرتمند، مورد توجه قرار گیرد و این امکان را فراهم آورد که بدون صرف هزینه‌های گزاف، طراحی‌ها به سمت بهینه شدن میل کنند. بنابراین، با توجه به سهم قابل توجه فیزیک اتوبوس در زمان توقف و در نهایت در زمان سفر مسافران، می‌توان با بهره‌گیری از ابزار شبیه‌سازی این زمان را بهینه کرد.

مطالعه حاضر نیز قصد دارد با بهره‌گیری از مطالعات رکسفلت و همکاران [Rexfelt et al., 2014]، راه‌حل‌هایی را برای کمینه کردن زمان توقف در خطوط اتوبوس با تقاضای بالا با استفاده از ابزار شبیه‌سازی ارائه دهد. بنابراین این پژوهش در جستجوی پاسخ علمی به سوالات ذیل است: ۱) تغییر در طراحی فیزیک اتوبوس در قالب چه سناریوهایی امکان‌پذیر است؟ ۲) تاثیر سناریوهای مختلف طراحی بر زمان توقف اتوبوس در شرایط

شلوغی چگونه است؟ ۳) سناریوی برتر و یا سناریو با بیشترین تاثیر بر کاهش زمان توقف کدام است؟

برای این منظور، با بهره‌گیری از ابزار شبیه‌ساز، جریان مسافران هنگام سوار و پیاده شدن را شبیه‌سازی کرده و با تغییر در ویژگی-های وسیله نقلیه از جمله تعداد و عرض درب‌ها، تاثیر راهکارها را بر کاهش زمان توقف ارزیابی در شرایط شلوغی می‌کند. لازم به ذکر است که در مقایسه با مطالعات رکسفلت و همکاران [Rexfelt et al., 2014]، بررسی تاثیر افزایش عرض درب‌ها از ۰/۸ به ۱ متر و همچنین تغییر الگوی سوار و پیاده‌شدن مسافران بر زمان توقف، از نوآوری‌های پژوهش حاضر محسوب می‌شود. بررسی تاثیر تغییرات عرض درب‌ها بر زمان توقف از موضوعات پیشنهادی رکسفلت و همکاران [Rexfelt et al., 2014] برای تحقیقات آتی بوده است.

۲. پیشینه تحقیق

هدف این مطالعه، شبیه‌سازی تاثیر طراحی فیزیک ساخت اتوبوس بر زمان توقف با در نظر گرفتن پدیده شلوغی است. بر این اساس، این بخش به بررسی مطالعات پیرامون تاثیر طراحی فیزیک اتوبوس بر زمان توقف و همچنین شبیه‌سازی این فرآیند توسط نرم‌افزارهای مختلف می‌پردازد. این مطالعات، ما را در تعیین سناریوهای مختلف طراحی اتوبوس و همچنین نحوه شبیه‌سازی تاثیرات این سناریوها بر زمان توقف یاری خواهد کرد.

۲-۱ عوامل موثر بر زمان توقف

تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با مدل‌سازی زمان توقف وسایل حمل‌ونقل عمومی صورت گرفته است که عمده آن‌ها نیز مربوط به زمان توقف اتوبوس می‌باشد. لوینسن را می‌توان به عنوان یکی از اولین افرادی معرفی کرد که به مدل‌سازی زمان توقف (D_w) پرداخته است [Levinson, 1983]. او زمان توقف را به صورت یک تابع خطی از تعداد مسافران سوار و پیاده شونده و زمان لازم برای باز و بسته شدن درب‌های اتوبوس مدل کرد. این مدل در مواقعی که درب‌های مخصوص سوار و پیاده شدن مجزا هستند شکل دیگری به خود می‌گیرد که در معادله (۱) نشان داده شده است [Sun et al., 2014]. به عبارت دیگر در این حالت زمان توقف به فرآیندی وابسته است که بیشترین زمان را به خود اختصاص می‌دهد.

$$D_w = max\{t_a.N_a, t_b.N_b\} + t_d \qquad (۱)$$

جاییکه N_a و N_b به ترتیب تعداد مسافران پیاده و سوار شده، t_a زمان لازم برای پیاده شدن یک مسافر، t_b زمان لازم برای سوار شدن یک مسافر و t_d زمان لازم برای باز و بسته شدن درب‌های اتوبوس است.

تیراچینی و هنچر پارامترهای میانگین زمان لازم برای سوار و پیاده شدن هر مسافر را بسته به ارتفاع کف اتوبوس (اختلاف ارتفاع کف اتوبوس با پلت فرم ایستگاه‌ها) و نحوه پرداخت کرایه تخمین زده‌اند [Tirachini & Hensher, 2012]. در برخی از تحقیقات همین مدل‌های ساده تنها با اضافه شدن دو پارامتر به آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حقیقت، این تحقیقات زمان توقف را وابسته به تعداد مسافرانی که از شلوغ‌ترین درب اتوبوس سوار و پیاده می‌شوند می‌دانند [Tirachini et al., 2014]. زمانی که اتوبوس دو درب یا بیشتر دارد، تعداد مسافران سوار و پیاده شونده بین درب‌ها تقسیم می‌شوند. در ساخت چنین مدل‌هایی بسیاری از فاکتورها نادیده گرفته شده‌اند. از این رو محققان به سمت مدل کردن زمان توقف با دقت بالاتر حرکت کردند. اکثر این مطالعات به دنبال یافتن رابطه میان مشخصات فیزیکی اتوبوس و زمان توقف بوده‌اند [Lu et al., 2019]. در مطالعات تیراچینی ویژگی‌های مسافران مانند سن آن‌ها در مدل-سازی زمان توقف وارد شده‌اند [Tirachini, 2013a].

تاثیر شلوغی داخل وسیله بر روی فرآیند سوار و پیاده شدن مسافران که منجر به افزایش زمان توقف می‌شود و از طرفی تاثیر طراحی اتوبوس بر این فرآیند، از موضوعات مهمی است که در پژوهش‌ها می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. محققان نشان دادند اگر راهروی اتوبوس شلوغ باشد نه تنها زمان سوار شدن مسافران

طولانی‌تر می‌شود بلکه زمان پیاده شدن مسافران هم می‌تواند تا ٦٨ درصد افزایش یابد [Fernández et al., 2010]. فرناندز در مطالعه خود نشان داد که زمان‌های سوار و پیاده شدن بسته به عرض درب اتوبوس و چگالی مسافران داخل وسیله قابل تغییر است [Fernandez, 2011].

چن و همکاران در مدل ریاضی خود که برای زمانبندی وسایل نقلیه تعبیه شده بود، فرض کردند که اتوبوس دارای دو درب می‌باشد که یکی از درب‌ها به سوار شدن و دیگری به پیاده شدن مسافران اختصاص داده شده است [Chen et al., 2015]. به عبارت دیگر، آنها الگو سوار و پیاده‌شدن مسافران را مورد توجه قرار دادند. جدول (١) جمع‌بندی بررسی مطالعات گذشته در زمینه عوامل تاثیرگذار بر زمان توقف اتوبوس‌ها را ارائه کرده است.

جدول ١. عوامل تاثیرگذار بر زمان توقف

ردیف	مطالعه		عوامل تاثیرگذار بر زمان توقف
	نویسنده	سال	
١	Levinson	١٩٨٣	تعداد مسافران سوار و پیاده شونده زمان لازم برای باز و بسته شدن درب‌های وسیله
٢	Fernández et al.	٢٠١٠	شلوغی درون وسیله
٣	Fernandez	٢٠١١	طراحی وسیله شلوغی درون وسیله
٤	Tirachini & Hensher	٢٠١٢	فیزیک وسیله پرداخت کرایه
٥	Tirachini	٢٠١٣	خصوصیات مسافر
٦	Sun et al.	٢٠١٤	فیزیک وسیله شلوغی درون وسیله
٧	Tirachini et al.	٢٠١٤	الگوی سوار و پیاده شدن
٨	Chen et al.	٢٠١٥	(به عنوان پیش‌فرض)

همانطور که در جدول (١) مشاهده می‌شود، بررسی الگوی سوار و پیاده شدن مسافران، شلوغی درون وسیله و همچنین فیزیک اتوبوس از مهمترین فاکتورهای تاثیرگذار بر زمان توقف اتوبوس هستند. مطالعه حاضر نیز قصد دارد این عامل‌ها را مورد بررسی قرار دهد. اما لازم به ذکر است که در مطالعات گذشته، الگوی سوار و پیاده‌شدن مسافران پیش از اجرای مدل، تعیین و مشخص می‌گردد و سپس مدل اجرا می‌شود. به عبارتی در این مطالعات الگوی سوار و پیاده شدن به عنوان فرضیات مدل محسوب می‌شود. در این مطالعه تاثیرات الگوی سوار و پیاده شدن بر زمان توقف مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

٢-٢ شبیه‌سازی جریان مسافر

مقوله شبیه‌سازی عابران‌پیاده به طور قابل توجهی با مفاهیم رفتارشناسی و جامعه‌شناسی پیوند خورده است. رفتار عابران‌پیاده در محیط‌های مختلف متاثر از عوامل و فاکتورهای گوناگونی است که بررسی آن‌ها مستلزم شبیه‌سازی عابران‌پیاده در محیط-های مختلف می‌باشد [Helbing & Johansson, 2013].

مدل ویلمن [Karoji et al., 2019]، شلوغی داخل وسیله را کاملا وابسته به تعداد مسافران ایستاده داخل وسیله می‌داند که از نظر منطقی هم کاملا ملموس است، زیرا تا زمانیکه مسافری به صورت ایستاده داخل وسیله نباشد اصطکاکی میان مسافران هنگام سوار و پیاده شدن ایجاد نمی‌شود لذا شلوغی داخل وسیله معنایی ندارد. بدین منظور این مدل در مطالعات و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی بسیار معتبری همچون BusMezzo برای تخمین زمان توقف اتوبوس‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [Cats et al., 2016].

همچنین مطالعات نشان داده‌اند که در مواقع بحرانی و به هنگام بروز حوادثی همچون زلزله، آتش‌سوزی و غیره، الگوهای حرکتی و رفتاری عابران‌پیاده دچار تغییر می‌شود [Lin et al., 2020; UMEZAWA et al., 2020]. هلبینگ در مطالعه خود نشان داد عابران‌پیاده تحت سطوح مختلفی از شلوغی

(تراکم)، رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل یکی از رویکردهای مطالعه رفتار عابران‌پیاده، نحوه تعامل آن‌ها با یکدیگر تحت شرایط مختلف چگالی می‌باشد [Nappi et al., 2019]. به عنوان مثال، در شرایطی که تراکم جمعیت بالا است، عابران‌پیاده از لحاظ رفتاری دچار آشفتگی شده و ممکن است حرکت‌های غیرمعقولی از آن‌ها سر بزند. ضمن اینکه در چنین شرایطی، عابران تلاش می‌کنند با سرعتی بالاتر از سرعت معمول خود حرکت کنند. عبور از گلوگاه‌ها نیز با فشارهای فیزیکی همراه می‌باشد و برخورد و تعاملات فیزیکی بین افراد افزایش می‌یابد.

به طور کلی در فرآیند شبیه‌سازی حرکتی و رفتاری عابران‌پیاده، داده‌های مورد نیاز از طریق مشاهده، دستگاه‌های شمارشگر، تحلیل‌های ویدئویی و پرسشنامه جمع‌آوری می‌شوند. بر پایه این اطلاعات، پارامترهای موثر و ارتباط موجود میان آن‌ها و جنبه‌های مختلف رفتار عابران‌پیاده شناسایی و بصورت مدل ریاضی بیان شده و شبیه‌سازی براساس آن‌ها بسط داده می‌شود.

در سال‌های اخیر، استفاده از ابزارهای شبیه‌ساز برای شبیه‌سازی رفتار و حرکت عابران پیاده مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. نرم افزارهای شبیه‌ساز عابر پیاده به دو گروه نرم افزارهای مبتنی بر مدل نیروی اجتماعی و مبتنی بر مدل عامل مبنا تقسیم بندی می‌شوند.

مدل نیروی اجتماعی دارای ساختاری مبتنی بر قانون دوم نیوتن می‌باشد که در آن نیرو به عنوان تابعی از جرم و شتاب شناخته می‌شود. مدل مذکور با بهره‌گیری از این مفهوم تغییرات حرکتی عابر پیاده را براساس نیروهای وارده از سوی محیط و سایر عابران پیاده مورد بررسی قرار می‌دهد [Karoji et al., 2019; Ullah et al., 2019]. از جمله نرم افزارهای مبتنی بر مدل نیروی اجتماعی می‌توان به نرم افزارهای Simwalk و Viswalk اشاره کرد. شتاب عابرپیاده و نیروهای وارد بر آن، فاکتورهای مورد مطالعه در این مدل هستند. در حقیقت حرکت عابرپیاده به سمت مقصد متاثر از چند عامل می‌باشد. عامل اول نیروی محرک است. این نیرو باعث می‌شود تا عابرپیاده از مبدا به سمت مقصد حرکت کند. در حین حرکت نیروهایی وجود دارند که موجب تغییر جهت و شتاب عابرپیاده می‌شوند. از جمله این نیروها می‌توان به نیروی دافعه و نیروی جاذبه اشاره کرد. بطور کلی می‌توان چهار جنبه مختلف را در ساختار این مدل مورد بررسی قرار داد: ۱) عابران‌پیاده سعی می‌کنند کوتاه‌ترین مسیر ممکن را برای رسیدن به مقصد خود انتخاب کنند. ۲) عابران همواره سعی می‌کنند یک فاصله معین را نسبت به یکدیگر حفظ کنند. ۳) عابران تلاش می‌کنند همواره فاصله معینی را با اشیا و موانع محیطی همچون دیوارها حفظ کنند. این اثر توسط یک تابع پتانسل اثر دافعه مدل می‌شود. ٤) اماکن و افراد دارای قابلیت جذب هستند. بدین معنا که می‌توانند عابرپیاده را به سمت خود جذب کنند. این اثر توسط تابع پتانسل اثر جاذبه مدل می‌شود. در ادامه پارامترهای مورد استفاده در مدل نیروی اجتماعی تشریح خواهند شد. معادله نیروی محرک در مدل نیروی اجتماعی بصورت زیر می‌باشد [Nappi et al., 2019]:

$$\vec{F}_d = \frac{v_i^0(t)\vec{e}_i^0(t) - \vec{v}_i(t)}{\Delta_i} \qquad (۲)$$

جایی‌که $\vec{F}_d$ نیروی محرک، $\vec{v}_i(t)$ سرعت واقعی، v_i^0 سرعت مطلوب، $\vec{e}_i^0(t)$ جهت سرعت مطلوب و Δ_i آهنگ حرکت عابرپیاده است. در واقع این پارامتر آهنگ رسیدن عابرپیاده از سرعت واقعی خود به سرعت مطلوب است و دارای بعد زمان می‌باشد. در مطالعه‌ای که توسط هلبینگ و مولنار در سال ۱۹۹۵ صورت پذیرفت، مقدار زمان شتاب‌گیری عابرپیاده برابر با ۰,۵ ثانیه تخمین زده شد [Nappi et al., 2019]. ورنر و هلبینگ در مطالعه خود در سال ۲۰۰۳ با بهره‌گیری از داده‌های تجربی به محاسبه زمان شتاب‌گیری عابرپیاده پرداختند و مقدار آن را برابر با ۰,٦۱ ثانیه برآورد نمودند [Werner & Helbing, 2003]. موسید و همکاران نیز در در سال ۲۰۰۹ با انجام تحقیقات آزمایشگاهی به تخمین توزیع سرعت عابران‌پیاده نسبت به زمان پرداختند و مقدار زمان شتاب‌گیری عابرپیاده را برابر با ۰,٥٤ ثانیه

با انحراف معیار ۰٫۰۵ ثانیه برآورد کردند [Moussaïd et al., 2010].

در روش شبیه‌سازی عامل مبنا هر عامل بصورت یک جسم با ویژگی‌ها و رفتارهای خاص خود شبیه‌سازی می‌شود. انعطاف-پذیری موجود در این مدل بسیار بالا می‌باشد بطوریکه رفتار هر عامل در مجموعه می‌تواند بصورت مستقل مدل‌سازی شود. در چنین شرایطی، امکان شبیه‌سازی مدل‌های پیچیده‌تر فراهم می-شود [Ronald et al., 2007].

در این شبیه‌سازی به رفتار تک تک افراد پرداخته خواهد شد و در نهایت تصویری از کل سیستم براساس تعاملات و تداخلات بین افراد و موانع موجود در محیط حاصل می‌شود. تفسیر نتایج در این روش به علت شباهت زیادی که بین مدل و سیستم واقعی وجود دارد دقیق‌تر و ساده‌تر می‌باشد.

از جمله پارامترهای مورد استفاده در این روش می‌توان به مشخصات عابران‌پیاده مانند سن، جنس، سرعت پیاده‌روی و غیره اشاره کرد. از جمله نرم‌افزارهایی که در حوزه شبیه‌سازی عابران-پیاده از مدل عامل مبنا بهره می‌برند می‌توان به نرم‌افزارهای STEPS و Legion اشاره کرد.

مطالعه استیل منجر به شکل‌گیری و گسترش نرم‌افزارهای مبتنی بر مدل عامل مبنا گردید [Keith Still, 2019]. در این مطالعه، رابطه میان چهار عنصر: مشاهده، حرکت، موانع و یکپارچه کردن مشاهده–حرکت–موانع بررسی شد. لذا مدل مذکور قادر بود تغییرات رفتاری و چگونگی مواجه شدن عابران‌پیاده با موانع محیطی را در سطح بالایی از دقت به تصویر بکشد. در نرم-افزارهای مبتنی بر مدل عامل مبنا، عواملی همچون توزیع سرعت و فضای موجود برای مانور بر روی انتخاب مسیر عابران تاثیرگذار است. ضمن اینکه متغیرها و محدودیت‌های موجود در مدل عامل مبنا مانع از برخورد افراد با یکدیگر و موانع موجود در مسیر می‌شوند.

یکی دیگر از کاربردهای شبیه‌سازی، تحلیل رفتار عابران‌پیاده به هنگام تقابل با وسایل نقلیه در تقاطع‌های مختلف اعم از چراغ‌دار و بدون چراغ می‌باشد. مطالعات صورت گرفته در این بخش نشان داده‌اند که نه تنها رفتار عابران‌پیاده در تسهیلات مختلف متاثر از نوع تسهیلات و محل قرارگیری آن‌ها در شهر است، بلکه عواملی همچون جنسیت، سن، سطح تحصیلات و میزان تبعیت از قانون نیز بر روی رفتار عابران‌پیاده تاثیرگذار است.

یانگ و همکاران نشان دادند در شهرهای بزرگ ٤٠ درصد از رفتارهای عابران‌پیاده خشونت آمیز است و به طور میانگین ٢٣ درصد از عابران توجهی به چراغ قرمز ندارند [Yang et al., 2006]. رن و همکاران نیز نشان دادند تنها ٦٢ درصد از عابران-پیاده در چین از قوانین موجود تبعیت می‌کنند [Ren et al., 2011]. ژو با تمرکز بر شبیه‌سازی عابران‌پیاده و بررسی قبول فرصت آن‌ها در تقاطعات دو طرفه، مدل‌های رفتاری عابران‌پیاده در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز خردنگر CORSIM و VISIM شبیه‌سازی شد [Zhao, 2012]. نتایج بدست آمده نشان دادند که در تقاطع‌های دو طرفه کنترل شده، افرادی که قصد عبور عرضی از معبر اصلی تقاطع را دارند از لحاظ حق تقدم عبور و جهت حرکت در شرایط مشابهی با وسایل نقلیه موجود در معبر فرعی تقاطع قرار دارند.

سازمان مطالعات حمل‌ونقل نیوزلند به بررسی تاخیرات متقابل عابران‌پیاده و وسایل نقلیه پرداخت. رویکرد اصلی در این مطالعه کالیبره کردن نرم‌افزارهای شبیه‌سازی Paramics و Aimsun به منظور محاسبه تاخیرات ناشی از تقابل وسایل نقلیه و عابران در تقاطع‌های بود. در این راستا داده‌های مورد نیاز از شش تقاطع مورد مطالعه جمع‌آوری و در نهایت سرعت عابران‌پیاده به عنوان متغیر اصلی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت [Gao et al., 2012].

تیان در سال ٢٠٠٦ [Tian & Xu, 2006] از یک رویکرد تحلیل تصادفی برای محاسبه احتمال تداخل بین عابران و وسایل نقلیه و در نهایت تاخیر ناشی از آن استفاده کرد. نتایج حاصل شده از این مطالعه برای کالیبره کردن نرم‌افزار SimTraffic مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعه‌ای که توسط لی و ژانگ

انجام شد، تاثیر سیستم‌های هوشمند کنترل ترافیک بر روی تاخیرات ناشی از تداخل عابران‌پیاده با وسایل نقلیه مورد بررسی قرار گرفت [Li & Zhang, 2011]. در مطالعه مذکور، میانگین سرعت عابران‌پیاده، حجم تردد وسایل نقلیه، عرض و تعداد خطوط حرکتی و فاصله نصب سیستم‌های هوشمند کنترل ترافیک تا محل تقاطع به عنوان پارامترهای تاثیرگذار شناخته شدند. نتایج حاصل شده از این مطالعه برای کالیبره کردن نرم‌افزار VISSIM مورد استفاده قرار گرفت.

کاربرد شبیه‌سازی در تحلیل جریان مسافران به هنگام سوار و پیاده شدن موضوعی است که به تازگی مورد توجه محققان قرار است و جنبه‌های ناشناس آن هنوز بصورت گسترده مورد مطالعه قرار نگرفته است. لذا موضوع حاضر از پتانسیل‌های بسیار بالای تحقیقاتی برخوردار است.

لی، لام و وانگ به بررسی رفتار مسافران در ایستگاه راه‌آهن هنگ‌کنگ در طول ساعت اوج با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی PEDROUTE پرداختند [Lee et al., 2001]. آن‌ها نشان دادند که نوع طراحی و مشخصات فیزیکی ایستگاه‌ها می‌تواند بر راحتی و سرعت مسافران هنگام سوار و پیاده شدن تاثیر بگذارد و لذا ارتقا و طراحی بهینه این تسهیلات می‌تواند موجب افزایش سطح رضایت مسافران گردد. ژانگ، هان و لی در مطالعه خود از مدل اتوماتای سلولی[۲] برای شبیه‌سازی مسافران هنگام سوار و پیاده شدن در ایستگاه متروی پکن استفاده کردند [Zhang et al., 2008]. در مدل آن‌ها، مشخصات فردی و رفتارهای گروهی مسافران بطور همزمان مدل شده بود و برای نزدیک‌تر نمودن مدل به شرایط واقعی، فاکتورهای مختلفی مانند شکل و ارتفاع سکوهای موجود در ایستگاه‌ها، عرض درب‌های مترو در نظر گرفته شده بود. نتایج بدست آمده نشان دادند که مدل مذکور قادر است حرکت‌های گروهی مسافران را به هنگام سوار و پیاده شدن به خوبی پیش‌بینی کند.

اتوماتای سلولی یک سیستم دینامیکی است که در آن زمان و مکان دو پارامتر گسسته می‌باشند. در واقع، مدل اتوماتای سلولی شبکه‌ای از سلول‌ها می‌باشد که هرکدام از آن‌ها می‌توانند یک وضعیت از k وضعیت ممکن را به خود بگیرند که این وضعیت‌ها از ویژگی مذکور برخوردار هستند که در گام‌های زمانی مختلف و بر طبق مجموعه‌ای از قوانین محلی تغییر پیدا کنند. وضعیت هر سلول نیز با توجه به وضعیت سلول‌های واقع در همسایگی آن در یک مرحله قبل‌تر معین می‌شود [Itoh & Chua, 2019].

رادلوف و همکاران فرآیند سوار و پیاده شدن مسافران در قطار را با مدل نیروی اجتماعی شبیه‌سازی کردند و نشان دادند زمانی‌که یک ابزار شبیه‌سازی بر روی داده‌های واقعی کالیبره شود می‌تواند یک روش مقرون به صرفه برای پیش‌بینی این‌که چگونه طراحی یک وسیله نقلیه می‌تواند روی زمان توقف آن تأثیر بگذارد، باشد [Rudloff et al., 2011].

جی و همکاران از طریق یک مفهوم چند عاملی به توسعه یک مدل شبیه‌سازی مبتنی بر نیروی اجتماعی پرداختند که قادر است ویژگی‌های حرکتی مسافران در فرآیند سوار و پیاده شدن و در نتیجه زمان توقف اتوبوس را محاسبه کند. آن‌ها سناریوهای مختلفی را مورد آزمایش قرار دارند و نشان دادند که بزرگ کردن ناحیه پلت فرم (محل سوار و پیاده شدن) و نصب کردن میله‌های راهنما به وضوح می‌تواند نوسانات زمان توقف را کاهش دهد [Ji et al., 2018].

تعداد و جنس پارامترهای دخیل در مدل‌های حرکتی و رفتاری مسافران به قدری زیاد و گسترده هستند که عملیات جمع‌آوری داده و تلاش برای کالیبره کردن آن‌ها به روندی پرهزینه تبدیل می‌شود. ضمن آنکه باید توجه داشت کالیبره کردن چنین مدل‌هایی با داده‌های ناکافی می‌تواند منجر به نتایج نادرست شود [Andelfinger et al., 2018]. رکسفلت و همکاران [Rexfelt et al., 2014] نشان دادند که سوار و پیاده شدن مسافران تحت تأثیر ویژگی‌های وسیله نقلیه مانند تعداد درب، ارتفاع کف اتوبوس، نوع اتوبوس (مفصل دار یا بدون مفصل)، سایز اتوبوس، تعداد صندلی‌های داخل اتوبوس و غیره قرار دارد.

سپس تلاش کردند ضمن معرفی یک نرم‌افزار جامع برای شبیه-سازی جریان مسافران، زمان توقف را از طریق طراحی بهینه مشخصات فیزیکی اتوبوس به حداقل برسانند.

جدول (۲) مطالعات مورد بررسی پیرامون شبیه‌سازی جریان مسافر را جمع‌بندی می‌کند.

جدول ۲. عوامل تاثیرگذار بر جریان مسافر

ردیف	مطالعه		عوامل تاثیرگذار بر جریان مسافر
	نویسنده	سال	
۱	Lee et al.	۲۰۰۱	مشخصات ایستگاه
۲	Yang et al.	۲۰۰۶	رفتار مسافر
۳	Tian & Xu	۲۰۰۶	رفتار مسافر رفتار راننده
٤	Ronald et al.	۲۰۰۷	ویژگی‌های مسافر رفتار مسافر
٥	Zhang et al.	۲۰۰۸	رفتار مسافر مشخصات مسافر مشخصات ایستگاه طراحی وسیله
٦	Rudloff et al.	۲۰۱۱	طراحی وسیله
۷	Ren et al.	۲۰۱۱	رفتار مسافر
۸	Li & Zhang	۲۰۱۱	رفتار مسافر رفتار راننده تراکم ترافیک وسایل سیستم‌های هوشمند
۹	Zhao	۲۰۱۲	رفتار مسافر (حق تقدم)
۱۰	Gao et al.	۲۰۱۲	رفتار مسافر (سرعت)
۱۱	Rexfelt et al.	۲۰۱٤	طراحی وسیله شلوغی درون وسیله
۱۲	Cats et al.	۲۰۱٦	شلوغی درون اتوبوس
۱۳	Ji et al.	۲۰۱۸	طراحی وسیله راهنمای مسافران
۱٤	Nappi et al.	۲۰۱۹	تعامل مسافران با یکدیگر
۱٥	Karoji et al.	۲۰۱۹	تعامل مسافران با یکدیگر
۱٦	Ullah et al.	۲۰۱۹	تعامل مسافران با محیط
۱۷	Keith Still	۲۰۱۹	رفتار مسافر موانع موجود
۱۸	Lin et al.	۲۰۲۰	حوادث غیر مترقبه
۱۹	UMEZAWA et al.	۲۰۲۰	

لازم به ذکر است که مطالعه حاضر نیز با الهام از مطالعات رکسفلت و همکاران [Rexfelt et al., 2014]، فیزیک و طراحی اتوبوس را در جهت میل کردن به فیزیک بهینه، که منجر به کاهش زمان توقف اتوبوس می‌شود، دست‌خوش تغییر قرار می‌دهد. در واقع این تغییرات را تحت عنوان سناریوهای مختلف در یک نرم‌افزار شبیه‌ساز مدل می‌کند و با تست سناریوها به یک قضاوت کارشناسی می‌رسد. اما به عنوان نوآوری‌هایی که در مطالعه رکسفلت و همکاران مورد بحث و بررسی قرار نگرفته است، مطالعه حاضر قصد دارد با مدلسازی عامل رفتار و نوع مسافر، الگوهای بهینه سوار و پیاده شدن و همچنین تغییرات عرض درب‌ها و تاثیر آن بر روی زمان توقف را نیز مورد مطالعه قرار دهد و سناریوی برتر در این زمینه را معرفی نماید.

۳. معرفی شبیه‌ساز جریان مسافر و سناریوهای مختلف طراحی فیزیک اتوبوس

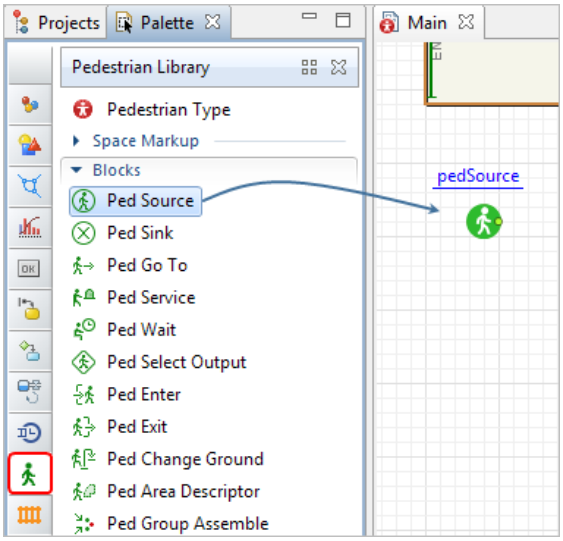
یکی از راه‌های بهبود زمان توقف، تغییر در ویژگی‌های وسیله نقلیه می‌باشد. در این بخش ضمن معرفی یک ابزار قدرتمند برای شبیه‌سازی جریان مسافران هنگام سوار و پیاده شدن و کالیبراسیون آن، سناریوهای مختلفی برای به حداقل رساندن زمان توقف اتوبوس مورد آزمایش و ارزیابی قرار می‌گیرند.

۳-۱ نرم‌افزار شبیه‌ساز جریان مسافران

در پژوهش حاضر، فرآیند شبیه‌سازی در نرم‌افزار Anylogic پیاده‌سازی گردیده است. Anylogic یک نرم‌افزار شبیه‌سازی قدرتمند و همه منظوره با ویژگی‌هایی از قبیل پلت‌فرم چند منظوره، امکان انجام کار بصورت گروهی، انیمیشن سه‌بعدی و پشتیبانی از همه رویکردهای شبیه‌سازی است. Anylogic یکی از معدود نرم‌افزارهایی است که از همه رویکردهای رایج شبیه-سازی از قبیل مدل‌های عامل بنیان، مدل‌های سیستم پویا و مدل رخدادهای گسسته بصورت همزمان پشتیبانی می‌کند [Rexfelt et al., 2014]. در واقع کاربران قادر هستند در یک محیط نرم‌افزاری بطور همزمان مدل خود را با استفاده از روش‌های فوق توسعه دهند. این شبیه‌ساز شی‌گرا بوده و امکان استفاده از زبان جاوا را برای انعطاف بیشتر دارا است [Lyubchenko et al., 2020].

تعداد زیادی از اشیای موردنیاز برای شبیه‌سازی دنیای واقعی در کتابخانه‌های نرم‌افزار موجود هستند و در چند گروه طبقه‌بندی شده‌اند [Denis & Aksyonov, 2019]:

- کتابخانه کسب و کار: برای ساختن مدل‌های گسسته پیشامد از سامانه‌های تولیدی، زنجیره عرضه، لجستیکی، درمانی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- کتابخانه ریلی: با استفاده از این کتابخانه می‌توان تمامی فرآیندهای موجود در سامانه‌های ریلی را شبیه‌سازی نمود. مدل شبیه‌سازی سامانه‌های ریلی را می‌توان با شبیه-سازی گسسته پیشامد یا عامل بنیان ترکیب نمود.
- کتابخانه عابران‌پیاده: یکی از منحصر به فردترین قابلیت‌های نرم‌افزار Anylogic پشتیبانی از کتابخانه عابران‌پیاده است که به منظور شبیه‌سازی جریان عابران‌پیاده مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱). کتابخانه مذکور این امکان را ایجاد می‌کند که جریان افراد را در ایستگاه‌های مترو و اتوبوس، مراکز خرید و غیره شبیه‌سازی نمود. مدل ساخته شده امکان جمع‌آوری اطلاعات و میزان تجمع افراد در مناطق مختلف را دارا است. با استفاده از این کتابخانه می‌توان نقاط گلوگاهی، طول صف‌ها و مشکلات احتمالی مانند جایگاه نامناسب راهروها و ... را شناسایی کرد.



شکل ۱. کتابخانه شبیه‌سازی عابر پیاده در نرم افزار AnyLogic (www.anylogic.com)

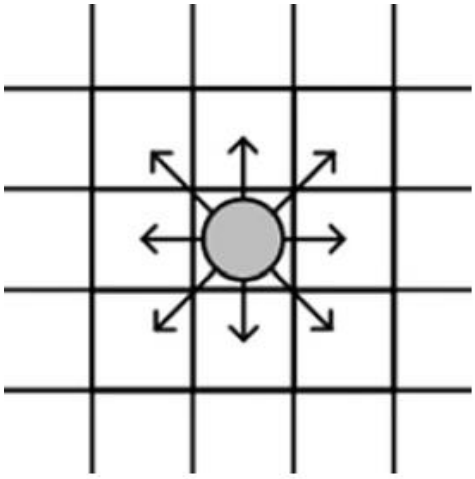
۳-۲ کالیبراسیون نرم‌افزار شبیه‌ساز

لازم به ذکر است تمام پارامترها و شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش از مقادیر کالیبره شده در مطالعه رکسفلت و همکاران [Rexfelt et al., 2014] گرفته شده‌اند و فرآیند شبیه‌سازی نیز در نرم‌افزار Anylogic پیاده‌سازی گردید. در این زیربخش، پارامترها و تنظیمات مدل به عنوان یک مدل عامل مبنا، تشریح می‌گردد:

- **مدلسازی رفتار و جریان مسافران در فرآیند سوار و پیاده‌شدن و تعیین موقعیت ایستادن و نشستن مسافر در اتوبوس:** در مطالعه حاضر به منظور تعیین مدل رفتار مسافران از مطالعه جامع آندرسون و همکاران [Andersson et al., 2010] استفاده شده است. آنها مسافران را در هشت گروه مختلف با عنوان *persona*، گروه‌بندی می‌کنند. در این مطالعه، با بررسی وضعیت جسمی و روانی هر گروه، مدل متناظر با گروه معرفی شده

است. این مدل بیانگر اهداف مختلف مسافر در سوار شدن و سرعت‌های مختلف راه رفتن و همچنین درب انتخابی برای ورودی، نوع و محل نشستن، مکان ایستادن مسافر و حتی انتخاب فرد کناری است. به عبارتی مدل هر گروه از یک فرآیند تصمیم‌گیری پشتیبانی می‌کند و این تصمیمات با توجه به میزان شلوغی درون وسیله تغییر می‌کند [Rexfelt et al., 2014]. چهار حالت خالی بودن کامل اتوبوس، پر بودن، نیمه پر بودن و حدود ۷۵ درصد پر بودن اتوبوس در مدل هر گروه مورد توجه قرار می‌گیرد و متناسب با وضعیت اشغال اتوبوس، مدل برای هر فرد گروه تصمیمات مختلفی را اتخاذ می‌کند. در پژوهش حاضر نیز، در حین فرآیند شبیه‌سازی، با توجه به وضعیت اشغال اتوبوس، یکی از چهار حالت فوق به مدل ارائه می‌شود و همچنین تعداد مسافر از هر گروه بصورت کاملا تصادفی تعیین می‌شود.

- **پارامتر زمان شتاب‌گیری عابرپیاده:** این پارامتر بیانگر بازه زمانی است که در آن عابرپیاده از سرعت حقیقی به سرعت مطلوب نیل پیدا می‌کند. در مطالعه حاضر مطابق مطالعات موسید و همکاران [Moussaïd et al., 2010]، مقدار زمان شتاب‌گیری عابرپیاده ۰,۵٤ ثانیه با انحراف معیار ۰,۰۵ ثانیه مد نظر قرار گرفت.
- پارامتر سایز شبکه: این پارامتر سایز سلول‌های شبکه‌بندی محدوده مورد نظر را مشخص می‌کند. در واقع به وسیله این پارامتر می‌توان محدوده اثرگذاری عابران‌پیاده بر روی یکدیگر را تعیین کرد. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، هر عابرپیاده در یک سوال قرار دارد و از عابرانی که در هشت سلول مجاور او قرار دارند تاثیر می‌پذیرد. ابعاد سلول‌ها نشان‌دهنده محدوده اثرگذاری افراد بر روی یکدیگر می‌باشد.



شکل ۲. شبکه سلولی اثرگذاری عابران‌پیاده روی یکدیگر

- **تعداد عابران‌پیاده اثرگذار:** این پارامتر نشان‌دهنده تعداد عابران‌پیاده اثرگذار بر هر عابرپیاده می‌باشد. مطابق با توضیحات ابتدای این زیربخش در مدل‌سازی رفتار و جریان مسافران، در شبیه‌سازی این مقدار برابر هشت در نظر گرفته شده است.
- **پارامتر اثرات غیرایزوتروپیک:** اثرات نیروهای عابران‌پیاده پشتی با اثرات نیروی وارده از طرف عابران‌پیاده جلوئی بسته به زاویه قرارگیری آن‌ها متفاوت می‌باشد. هرچه مقدار این پارامتر کمتر از یک باشد، اثرات عابران‌پیاده جلوئی بیشتر از عابران‌پیاده پشتی خواهد بود اما در حالتی که این پارامتر برابر با یک است این اثرات متقابل برابر خواهد بود.
- **پارامتر فاصله از موانع:** این پارامتر نشان‌دهنده فاصله عابران‌پیاده از اشیا و موانع محیطی می‌باشد. عابران بسته به نوع رفتار، فاصله معینی را از موانع (مانند دیوارها) حفظ می‌کنند. این مقدار مطابق سایر مطالعات، برابر با ۰,۵ متر در نظر گرفته شده است.
- **پارامتر آرایش صف‌بندی:** این پارامتر میزان تبعیت افراد از آرایش صف را نشان می‌دهد. در این مطالعه، عدد

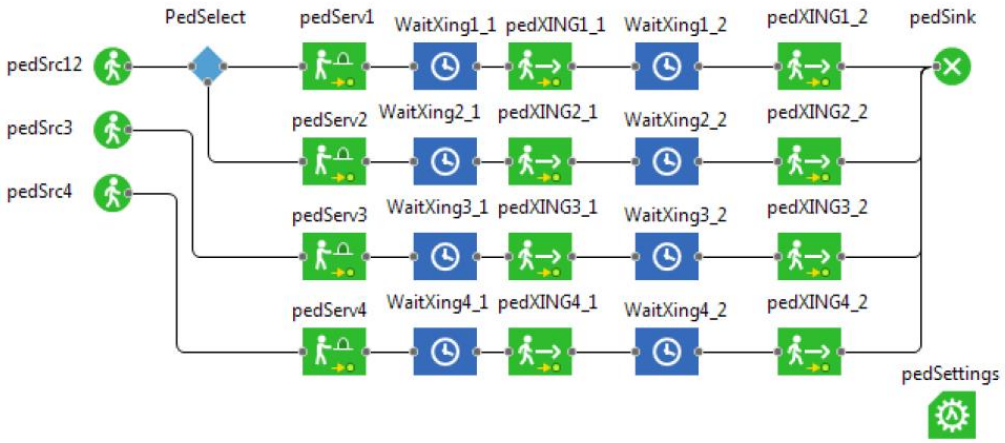
۰٫۵ که بیانگر تبعیت متوسط از آرایش صف است، مد نظر قرار گرفت.

- **پارامتر ارجحیت سمت:** این پارامتر ارجحیت سمت حرکت عابران‌پیاده را نشان می‌دهد. اگر مقدار آن برابر با ۱- باشد، ارجحیت حرکتی از سمت راست و اگر برابر با ۱ باشد ارجحیت حرکتی از سمت چپ خواهد بود. ضمن اینکه مقدار صفر نشان‌دهنده حرکت‌های کنترل نشده می‌باشد. در این مطالعه به هر یک از عابران تاثیرگذار، میزان ارجحیت بطور تصادفی اختصاص می‌یابد.
- **میزان ظرفیت اشغال شده اتوبوس:** به منظور مطالعه زمان توقف در شرایط شلوغی، فرض می‌شود که حداقل ۵۰ درصد از کل ظرفیت اتوبوس پر شده است. برای مثال زمانیکه ۵۰ درصد از ظرفیت یک اتوبوس ۶۰ نفری که دارای ۲۵ صندلی است اشغال شده باشد، ۲۵ نفر از مسافران بصورت نشسته و ۵ نفر نیز بصورت ایستاده در داخل اتوبوس قرار دارند. زیرا شرایط شلوغی در حالتی معنا دارد که صندلی‌ها پر بوده و مسافرانی در اتوبوس ایستاده هستند.

ضمن اینکه برای تحلیل و ارزیابی تاثیر شلوغی داخل وسیله بر روی زمان توقف، آزمایش‌های عددی در سطوح مختلفی از ظرفیت یعنی زمانیکه ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد از ظرفیت داخل اتوبوس اشغال می‌باشد نیز انجام خواهند شد.

- **نرخ سوار و پیاده شدن مسافر:** در این مطالعه فرض می‌شود ۲۰ درصد از مسافران داخل وسیله قصد پیاده شدن در ایستگاه مورد نظر را دارند و تعداد مسافران منتظر در ایستگاه که قصد سوار شدن به اتوبوس را دارند برابر با یک سوم تعداد مسافران داخل وسیله می‌باشد.

لازم به ذکر است در مورد نحوه جمع‌آوری کرایه فرض می‌شود دستگاه کرایه‌خوان خارج از اتوبوس قرار دارد و مسافران پیش از وارد شدن به ایستگاه برای سوار شدن کرایه خود را پرداخت کرده‌اند. از این رو، مسافران هنگام وارد شدن به اتوبوس نیازی به کارت زدن، که میانگین زمان لازم برای سوار شدن افراد را افزایش می‌دهد، نخواهند داشت. شکل (۳) شبیه‌سازی جریان مسافر در نرم‌افزار Anylogic را نشان می‌دهد.



شکل ۳. روند شبیه‌سازی جریان مسافران در نرم‌افزار AnyLogic

۳-۳ سناریوهای مختلف طراحی فیزیک اتوبوس

پژوهش حاضر به منظور بررسی تاثیر طراحی فیزیک اتوبوس بر زمان توقف، با الهام از رکسفلت و همکاران [Rexfelt et al., 2014]، مطالعات بررسی شده در زیربخش ۲-۱ و همچنین نظرخواهی از متخصصان حوزه حمل‌ونقل عمومی، سه سناریوی ذیل را برای طراحی فیزیک اتوبوس مورد مطالعه قرار داده است تا بتواند ضمن بهینه کردن زمان توقف در شرایط شلوغی، سناریوی برتر را معرفی نماید. سناریوی برتر، سناریویی است که

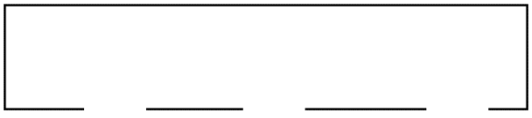
زمان توقف را بهینه می‌کند و امکان اجرای آن از دیدگاه متخصصان نیز وجود دارد.

- سناریوی اول (تغییر در تعداد درب‌های اتوبوس)

در این سناریو تعداد درب‌های اتوبوس و تاثیر آن بر روی فرآیند سوار و پیاده شدن مسافران سنجیده خواهد شد. در سناریوی پایه (شکل ٤) فرض می‌شود که اتوبوس استاندارد ۱۲ متری و دارای ۲ درب به عرض ۰/۸ متر می‌باشد. ظرفیت کل اتوبوس مورد نظر (حداکثر مسافران نشسته و ایستاده‌ای که در اتوبوس جا می‌شوند) برابر با ٦۰ مسافر می‌باشد و تعداد صندلی‌های موجود در آن برابر با ۲۵ فرض خواهد شد. به عبارت دیگر ظرفیت نشسته و ایستاده در اتوبوس به ترتیب برابر با ۲۵ و ۳۵ خواهند بود. در مورد فرآیند سوار و پیاده شدن، فرض می‌شود که فرآیندها بصورت متوالی انجام می‌شوند بدین صورت که ابتدا مسافرانی که قصد پیاده شدن در ایستگاه را دارند از اتوبوس پیاده شده و پس از اتمام فرآیند پیاده شدن، فرآیند سوار شدن مسافران منتظر در ایستگاه آغاز می‌گردد.

شکل ٤. تعداد درب‌های اتوبوس در حالت پایه

همانطور که در شکل (۵) مشخص است، در سناریوی اول فرض می‌شود که تعداد درب‌های اتوبوس از ۲ درب به ۳ درب تغییر یافته است و تاثیر آن بر روی زمان توقف اتوبوس سنجیده خواهد شد.



شکل ۵. تعداد درب‌های اتوبوس در سناریوی اول

- سناریوی دوم (تغییر در عرض درب‌های اتوبوس)

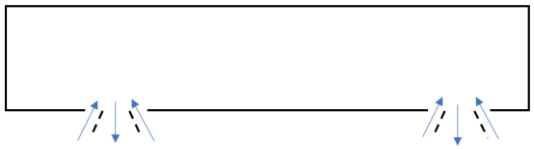
همانطور که در شکل (٦) مشاهده می‌شود، در این سناریو عرض درب‌های اتوبوس از ۰/۸ متر به ۱ متر افزایش پیدا می‌کند و تاثیر آن بر روی فرآیند سوار و پیاده شدن مسافران سنجیده خواهد شد.

شکل ٦. عرض درب‌های اتوبوس در سناریوی دوم

- سناریوی سوم (تغییر در الگوی سوار و پیاده شدن)

همانطور که توضیح داده شد، در حالت پایه فرض می‌شود فرآیندهای سوار و پیاده شدن بصورت متوالی انجا می‌شوند. بدین معنا که پس از تمام شدن فرآیند پیاده شدن، فرآیند سوار شدن مسافران منتظر آغاز می‌گردد. در این سناریو الگوی مذکور دست‌خوش تغییر می‌شود.

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، دو چهارم از وسط درب به فرآیند پیاده شدن و هرکدام از یک چهارم‌های کناری به فرآیند سوار شدن اختصاص می‌یابند. در واقع در این سناریو، فرآیند سوار و پیاده شدن بصورت همزمان اتفاق می‌افتند. تاکنون مطالعه مشخصی تاثیر این الگو بر کاهش زمان توقف را نسنجیده است. البته واکنش افراد و میزان پایبندی آن‌ها به این الگوها نیز نیازمند مطالعات دیگری است.



شکل ۷. سوار و پیاده شدن در فضاهای مشخص شده

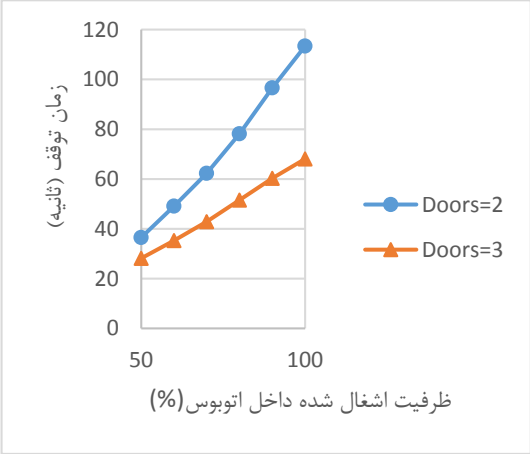
٤. شبیه‌سازی جریان مسافر و فیزیک اتوبوس و تاثیر آن بر زمان توقف

در این بخش، نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی جریان مسافران در نرم‌افزار Anylogic مورد تحلیل و ارزیابی قرار خواهد گرفت. با توجه به شکل (۸)، هرچه سطح اشغالی داخل وسیله یا همان درجه شلوغی داخل وسیله بیشتر باشد، منافع ناشی از اضافه کردن درب افزایش خواهد یافت. به عنوان مثال، زمانی که

۵۰ درصد از ظرفیت داخل اتوبوس اشغال شده است، با افزایش تعداد درب‌ها از ۲ به ۳، میانگین زمان توقف از ۳۶/۵ به ۲۸/۲ ثانیه تقلیل یافته است که نمایانگر به کاهش ۲۲/۷ درصدی در زمان توقف می‌باشد. این در حالی است که اگر ۹۰ درصد از ظرفیت داخل وسیله اشغال شده باشد و تعداد درب‌های اتوبوس از ۲ به ۳ افزایش یافت، شاهد یک کاهش ۳۷/۶ درصدی در زمان توقف خواهیم بود. در واقع می‌توان نتیجه گرفت، سناریوی افزایش درب بصورت ویژه می‌تواند برای سطوح شلوغی بالا مانند کریدورهای اتوبوسی که در ساعات اوج خود شاهد تقاضای بالای مسافر هستند مثمر ثمر واقع شود.

بنابراین همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، با افزایش درب‌های اتوبوس از ۲ به ۳ در سناریوی اول، میانگین زمان توقف در تمامی سطوح ظرفیت کاهش می‌یابد. علت اصلی کاهش زمان توقف آن است که با افزایش تعداد درب‌های اتوبوس جمعیت سوار و پیاده شوندگان بین درب‌های بیشتری توزیع می‌شوند و در نتیجه فرآیند سوار و پیاده شدن تسریع می‌یابد.

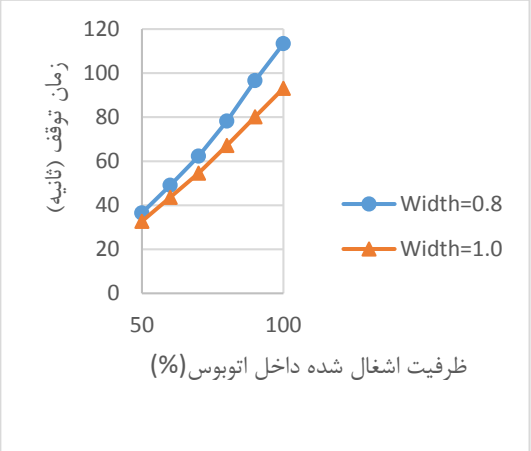
این موضوع در مدل‌هایی که توسط تیراچینی و همکاران [Tirachini et al., 2014] و رکسفلت و همکاران [Rexfelt et al., 2014] برای محاسبه زمان توقف ساخت شده است نیز به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. تیراچینی و همکاران نشان دادند که افزایش درب‌های اتوبوس، زمان توقف در هر توقف را بطور متوسط ۲۰ کاهش خواهد داد. اما رکسفلت و همکاران، تاثیر افزایش درب بر کاهش زمان توقف در هر توقف اتوبوس را ۱۷ درصد برآورد نمودند. همچنین آنها نشان دادند که با افزایش درب‌های اتوبوس به ٤ درب، زمان توقف ۲۰ درصد کاهش خواهد یافت. علاوه بر این، همانطور که انتظار می‌رفت زمان توقف با افزایش مسافران داخل وسیله (سطح اشغال داخل وسیله) رشد پیدا می‌کند. در واقع نشان می‌دهد شلوغی داخل وسیله می‌تواند به عنوان یک فاکتور اصطکاکی تاثیر مهمی بر روند سوار و پیاده شدن مسافران داشته باشد.



شکل ۸. روند تغییر زمان توقف همزمان با افزایش تعداد درب‌های اتوبوس (سناریوی اول)

در سناریو دوم عرض درب‌های اتوبوس از ۰/۸ متر به ۱ متر افزایش پیدا کرد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۹)، تعریض درب‌ها نیز می‌تواند به فرآیند سوار و پیاده شدن مسافران سرعت بخشد و اما تاثیرگذاری آن به اندازه سناریوی اول یعنی افزودن یک درب به اتوبوس نمی‌باشد. به عنوان مثال، در سطح اشغال ۹۰ درصد، تعریض درب‌های اتوبوس، باعث کاهش ۱٦/۹ درصدی در زمان توقف خواهد شد. همانند سناریوی اول، هرچه درجه شلوغی داخل وسیله بالاتر می‌رود، تعریض درب‌ها با سود بیشتری همراه خواهد بود.

واضح است که در فرآیند سوار و پیاده شدن مسافران به ویژه در سطوح شلوغی بالا، درب اتوبوس همانند یک تنگنا عمل می‌کند که برخورد و تداخل مسافران در آن زمان توقف و سطح نارضایتی مسافران را افزایش خواهد داد، لذا تنظیم کردن عرض درب‌ها بصورت بهینه می‌تواند تاثیرات مثبتی در بر داشته باشد. ضمن اینکه به نظر می‌رسد اجرای این سناریو برای طراحان و تولیدکنندگان اتوبوس عملی‌تر و ساده‌تر از اضافه کردن یک درب بصورت جداگانه می‌باشد.



شکل ۹. روند تغییر زمان توقف همزمان با تعریض دربهای اتوبوس (سناریوی دوم)

در سناریوی سوم، تعداد و عرض دربها در حالت پایه باقی می‌ماند و فقط الگوی سوار و پیاده شدن مسافران دست‌خوش تغییر می‌شود. مطابق شکل (۱۰)، این الگو می‌تواند زمان توقف را نسبت به حالتی که در آن فرآیند سوار شدن بعد از اتمام فرآیند پیاده شدن آغاز می‌گردد کاهش دهد.

در واقع، اجرای سناریوی سوم علاوه بر اینکه اجازه می‌دهد فرآیند سوار و پیاده شدن بصورت همزمان رخ دهد، قادر است ورود و خروج مسافران را منظم‌تر و تنش و برخورد میان آن‌ها را کاهش دهد. تاثیرگذاری این سناریو تقریبا همانند سناریوی دوم می‌باشد ولی به اندازه اضافه کردن یک درب نمی‌تواند مفید واقع شود. باید توجه داشت که در دنیای واقعی، میزان پایبندی مسافران به الگوی مذکور و ورود و خروج آن‌ها در فضاهای مشخص شده خارج از کنترل متصدی است.

لازم به ذکر است که بررسی سناریوهای دوم و سوم، به عنوان نوآوری مقاله حاضر محسوب می‌شود. بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که تاکنون تحقیق مشابهی در این زمینه انجام نشده است. بنابراین امکان مقایسه نتایج این سناریو با مطالعات قبلی وجود ندارد. همانطور که قبلا نیز اشاره شد، در مطالعات گذشته، الگوی پیاده و سوار شدن مسافران، قبل از مدلسازی مشخص شده است. به عبارتی، مشخص بودن نحوه پیاده و سوار شدن مسافران از درب‌های مختلف اتوبوس به عنوان یکی از فرضیات مدل ذکر شده است. به عنوان مثال در مطالعات سان و همکاران، الگوی سوار و پیاده شدن مسافران به اینگونه فرض شده است که مسافران از درب جلوی اتوبوس، سوار شده و از درب عقب وسیله پیاده خواهند شد. پس از این فرض به مدلسازی تاثیر ارتفاع کف اتوبوس و شلوغی درون وسیله بر زمان توقف پرداخته‌اند [Sun et al., 2014].

با اینحال مقاله حاضر تاثیر و اهمیت افزایش عرض دربهای اتوبوس و الگوی پیاده و سوار شدن مسافران بر زمان توقف را به خوبی نشان داده است. به نحوی که نتایج این مقاله می‌تواند مورد استفاده سازندگان، طراحان و مدیران شهری قرار گیرد.

شکل ۱۰. روند تغییر زمان توقف همزمان با تغییر در الگوی سوار و پیاده شدن (سناریوی سوم)

۵. جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

زمان توقف یکی از عناصر تشکیل‌دهنده زمان سفر می‌باشد و به زمانی اطلاق می‌گردد که در آن فرآیند سوار و پیاده شدن مسافران تکمیل می‌گردد. این عنصر به ویژه در شرایط شلوغی داخل وسیله، می‌تواند بخش قابل ملاحظه‌ای از زمان سفر مسافران را تشکیل دهد که نشان‌دهنده اهمیت آن در عملکرد سرویس‌ها می‌باشد. مطالعه حاضر راه‌کارهایی را برای به حداقل رساندن این زمان پیشنهاد نمود. بدین منظور، در ابتدا به مرور و معرفی مطالعاتی پرداخت که در آن‌ها زمان توقف با در نظر گرفتن پدیده

شلوغی مدل شده بود. در مرحله دوم، با بهره‌گیری از ابزارهای موجود به شبیه‌سازی جریان مسافران هنگام سوار و پیاده شدن در شرایط شلوغی پرداخت تا بتواند با تغییر در ویژگی‌های فیزیکی وسیله نقلیه، زمان توقف اتوبوس را بهبود بخشد. مهمترین نتایج و دستاوردهای پژوهش به شرح ذیل است:

- یکی از راه‌های موثر در کاهش زمان توقف، طراحی بهینه فیزیک اتوبوس می‌باشد. طراحان و کارخانه‌های تولید کننده اتوبوس می‌توانند با بهره‌گیری از ابزارهای شبیه‌ساز، جریان مسافران هنگام سوار و پیاده شدن را شبیه‌سازی نموده و از این طریق طراحی‌های خود را به سمت بهینه شدن سوق دهند. مطالعه حاضر ضمن معرفی یک ابزار شبیه‌سازی قدرتمند در این زمینه، سناریوهای افزایش تعداد و تعریض درب‌ها و تغییر در الگوی جریان مسافران را جهت بررسی تاثیر آنها بر زمان توقف معرفی نمود.
- نتایج تحقیق نشان داد که افزایش درب‌های اتوبوس از ۲ به ۳، در سطوح شلوغی بالا قادر است زمان توقف اتوبوس را تا ۳۷/٦ درصد کاهش دهد. این نتایج با مطالعات مشابه گذشته نیز کاملا منطبق است. تعریض درب‌ها نیز به عنوان یکی دیگر از سناریوهای مفید در این زمینه شناسایی شد، بطوریکه در یک اتوبوس شامل دو درب، تعریض درب‌ها از ۰/۸ به ۱ متر می‌تواند زمان توقف را در سطوح بالای شلوغی به میزان ۱٦/۹ درصد کاهش دهد. تغییر در الگوی سوار و پیاده شدن مسافران نیز به اندازه تعریض درب‌ها مفید واقع شد. بررسی تاثیر افزایش عرض درب و همچنین اصلاح الگوی سوار و پیاده شدن مسافران بر زمان توقف، از نوآوری‌های مقاله حاضر محسوب می‌شود.
- این پژوهش، سناریوی افزایش تعداد درب‌های اتوبوس را به عنوان سناریوی برتر معرفی نمود. در واقع، الگوهایی که در آن‌ها اصطکاک و برخورد میان مسافران کمتر است، می‌توانند نقش مهمی در کاهش زمان توقف ایفا کنند. البته میزان پایبندی مسافران به الگوهای تعیین شده نیز مهم بوده و نیازمند مطالعات رفتاری بیشتر است.

در زمینه شبیه‌سازی جریان مسافران به منظور کاهش زمان توقف، پژوهشگران می‌توانند بصورت همزمان فیزیک اتوبوس و الگوهای سوار و پیاده شدن را دست‌خوش تغییر قرار دهند. در واقع، سناریوهای موجود در این مطالعه را می‌توانند بصورت ترکیبی مورد آزمایش قرار دهند. همچنین مقوله شبیه‌سازی مسافران به هنگام سوار و پیاده شدن به طور قابل ملاحظه‌ای با مفاهیم رفتارشناسی و جامعه‌شناسی پیوند خورده است و تعداد پارامترهای رفتاری و حرکتی موجود در این نوع شبیه‌سازی قابل توجه است. لذا کالیبره کردن نرم‌افزارهای شبیه‌ساز جریان مسافر متناسب با رفتار مسافران در شهرهای مختلف ایران و همچنین بررسی تطابق گروه‌بندی افراد مبتنی بر مطالعات آندرسون و همکاران [Andersson et al., 2010]، با الگوی رفتاری اتوبوس‌سواران در ایران می‌تواند به عنوان یک پروژه بزرگ مورد مطالعه محققان قرار گیرد.

همچنین می‌توان بررسی اثرات سناریوهای مختلف دیگری همچون لزوم پرداخت کرایه توسط مسافران با استفاده از کارت‌های اعتباری، افزوده شدن درب به سمت چپ اتوبوس، وجود پله و یا حذف آن در ورود و خروج از اتوبوس، حذف کارت خوان در شروع یا خروج از اتوبوس، افزایش طول اتوبوس به ۱۵ و ۱۸ متر و همچنین بررسی تاثیر استفاده از فناوری‌های جدید در پرداخت کرایه بدون نیاز به تماس فیزیکی و الگوهای مختلف سوار و پیاده‌شدن مسافران بر زمان توقف را به عنوان موضوعات بسیار جذاب برای تحقیقاتی آتی معرفی نمود. علاوه بر این، مدلسازی زمان توقف برای مسافران ایرانی و ارزیابی دقت آن می‌تواند زمینه پژوهش‌های بسیار مناسبی را فراهم آورد.

٦. پی‌نوشت‌ها

1. Dwell time
2. Cellular Automata Models

۷. منابع

– حبیبیان، م. و کرمانشاه، م. (۱۳۹۱) بررسی اثر متغیرهای حمل‌ونقلی بر تغییر استفاده از سواری شخصی در سفرهای روزانه، *فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل*، دوره سوم، شماره سوم، ص. ۱۹۸–۱۸۱.

– سید ابریشمی، س.ا.، خانزاد، ا. زرین مهر، ا.ع. و ممدوحی، ا.ر. (۱۳۹۶) ارائه یک روش ابتکاری برای طراحی خطوط شبکه حمل‌ونقل همگانی با استفاده از الگوریتم تولید مسیر. *فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل*، دوره هشتم، شماره چهارم، ص. ٦٤٣–٦٥٤.

- Andelfinger, P., Chen, Y., Su, B., Cai, W., Zehe, D., Eckhoff, D., & Knoll, A. (2018).

- Incremental calibration of seat selection preferences in agent-based simulations of public transport scenarios. Paper presented at the 2018 Winter Simulation Conference (WSC).

- Andersson, T., Wikström, L., & Karlsson, M. (2010). Empirical Studies of Passenger Behaviour and the Creation of Personas. Appendix to D2. 1.2. On Board Passenger Flow Simulation Tool. Report to the EBSF project. Retrieved from

- Cats, O., West ,J., & Eliasson, J. (2016). "A dynamic stochastic model for evaluating congestion and crowding effects in transit systems". Transportation Research Part B: Methodological. Vol. 89. No. pp. 43-57 .

- Chen, J., Liu, Z., Zhu, S., & Wang, W. (2015). "Design of limited-stop bus service with capacity constraint and stochastic travel time". Transportation research part E: logistics and transportation review. Vol. 83. No. pp. 1-15 .

- Denis, M., & Aksyonov, K. (2019). "THE DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODELING OF TRAFFIC PRIORITIZATION IN MULTISERVICE ENTERPRISE NETWORKS IN THE ANYLOGIC SYSTEM". No .

- El-Geneidy, A.M., & Surprenant-Legault, J. (2010). "Limited-stop bus service: an evaluation of an implementation strategy". Public Transport. Vol. 2. No. 4. pp .۳۰٦-۲۹۱ .

- Fernandez, R. (2011). Experimental study of bus boarding & alighting times. Paper presented at the European Transport Conference.

- Fernández, R., Zegers, P., Weber, G., & Tyler, N. (2010). "Influence of platform height, door width, and fare collection on bus dwell time: laboratory evidence for Santiago de Chile". Transportation research record. Vol. 2143. No. 1. pp. 59-66 .

- Gao, L., Liu, M., & Feng, J. (2012). "Delay modeling of Ped-Veh system based on pedestrian crossing at signalized intersection". Procedia-social and behavioral sciences. Vol. 43. No. pp. 530-539 .

- Habiban, M., & Kermanshah, M. (2012). "Investigating the Contribution of Transportation Demand Management Policies to Car Commuters' Mode Changel". Journal of Transportation Engineering. Vol. 3. No. 3. pp. 181-198 .

- Helbing, D., & Johansson, A. (2013). "Pedestrian, crowd, and evacuation dynamics". arXiv preprint arXiv:1309.1609. No .

- Itoh, M., & Chua, L. (2019). Memristor cellular automata and memristor discrete-time cellular neural networks. In Handbook of Memristor Networks (pp. 1289-1361): Springer.

- Ji, Y., Gao, L., Chen, D., Ma, X., & Zhang, R. (2018). "How does a static measure influence passengers' boarding behaviors and bus dwell time? Simulated evidence from Nanjing bus

- Mahdavilayen, M. (2019). The Effects of New Bus Designs on Bus Dwell Time and Bus Schedule Adherence when used by Passengers with Mobility Limitations: An Integrated Approach with Human Subject Experiments and Microscopic Traffic Simulation. State University of New York at Buffalo ,

- Moussaïd, M., Perozo, N., Garnier, S., Helbing, D., & Theraulaz, G. (2010). "The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics". PloS one. Vol. 5. No. 4 .

- Nappi, M.M.L., Moser, I.R., & Souza, J.C. (2019). Collective Phenomena in Pedestrian Crowds and Computational Simulation. Paper presented at the Operations Management for Social Good: 2018 POMS International Conference in Rio.

- Ren, G., Zhou, Z., Wang, W., Zhang, Y., & Wang, W. (2011). "Crossing behaviors of pedestrians at signalized intersections: observational study and survey in China". Transportation research record. Vol. 2264. No. 1. pp. 65-73 .

- Rexfelt, O., Schelenz, T., Karlsson, M., & Suescun, A. (2014). "Evaluating the effects of bus design on passenger flow: Is agent-based simulation a feasible approach?". Transportation Research Part C: Emerging Technologies. Vol. 38. No. pp. 16-27 .

- Ronald, N., Sterling, L., & Kirley, M. (2007). "An agent-based approach to modelling pedestrian behaviour". International Journal of Simulation. Vol .۸ .No. 1. pp. 25-38 .

- Rudloff, C., Bauer, D., Matyus, T., & Seer, S. (2011). Mind the gap: Boarding and alighting processes using the social force paradigm calibrated on experimental data. Paper presented at the 2011 14th International IEEE stations". Transportation Research Part A: Policy and Practice. Vol. 110. No. pp. 13-25 .

- Karoji, G., Hotta, K., Hotta, A., & Ikeda, Y. (2019). Pedestrian dynamic behaviour modeling. Paper presented at the 24th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia: Intelligent and Informed, CAADRIA 2019.

- Keith Still, G. (2019). "Crowd Science and Crowd Counting". Impact. Vol. 2019. No. 1. pp. 19-23 .

- Lee, J.Y., Lam, W.H., & Wong, S. (2001). Pedestrian simulation model for Hong Kong underground stations. Paper presented at the ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No. 01TH8585).

- Levinson, H.S. (1983). Analyzing transit travel time performance.

- Li, S., & Zhang, Y. (2011). Pedestrian delay and HAWK pedestrian treatment. Retrieved from

- Lin, L., Zhang, D., Luo, P., & Zuo, W. (2020). Pedestrian Detection with RPN and Boosted Forest. In Human Centric Visual Analysis with Deep Learning (pp. 47-54): Springer.

- Lu, S., Ma, H., Xin, L., & Zuo, W. (2019). "Lightweight design of bus frames from multi-material topology optimization to cross-sectional size optimization". Engineering Optimization. Vol. 51. No. 6. pp. 961-977 .

- Lyubchenko, A., Kopytov, E., Bogdanov, A., & Maystrenko, V .(۲۰۲۰) .Discrete-event Simulation of Operation and Maintenance of Telecommunication Equipment Using AnyLogic-based Multi-state Models. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.

motion segmentation". Neural Computing and Applications. Vol. 31. No. 11. pp. 7317-7333 .

- UMEZAWA, M., Asanuma, H., Gunji, Y., & Ito, O .(۲۰۲۰) .Pedestrian protecting device for vehicle and vehicle including same. In: Google Patents.

- Werner, T., & Helbing, D. (2003). The social force pedestrian model applied to real life scenarios. Paper presented at the Pedestrian and Evacuation Dynamics .۲۰۰۳ Proceedings of the 2nd International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics.

- Yang, J., Deng, W., Wang, J., Li, Q., & Wang, Z. (2006). "Modeling pedestrians' road crossing behavior in traffic system micro-simulation in China". Transportation Research Part A: Policy and Practice. Vol. 40. No. 3. pp. 280-290 .

- Zhang, Q., Han, B., & Li, D. (2008). "Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations". Transportation Research Part C: Emerging Technologies. Vol. 16. No. 5. pp. 635-649 .

- Zhao, Y. (2012). Exploration of pedestrian gap acceptance at twsc intersections using simulation. Paper presented at the Proceedings of the ITE Western District Annual Meeting Technical Paper Compendium, Santa Babara.

Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).

- Seyed Abrishami, S.E., Khanzad, I., Zarin Mehr, A.A., & Mamdouhi, A.R. (2017). "A Heuristic Method for Public Transportation Network Design using Route Generation Algorithm". Journal of Transportation Engineering. Vol. 8. No. 4. pp. 643-654 .

- Sun, L., Tirachini, A., Axhausen, K.W., Erath, A., & Lee, D.-H. (2014). "Models of bus boarding and alighting dynamics". Transportation Research Part A: Policy and Practice. Vol. 69. No. pp. 447-460 .

- Tian, Z., & Xu ,F. (2006). Modeling the effects of pedestrians on intersection capacity and delay with actuated signal control. Paper presented at the Proc., 5th International Symposium on Highway Capacity.

- Tirachini, A. (2013a). "Bus dwell time: the effect of different fare collection systems, bus floor level and age of passengers". Transportmetrica A: Transport Science. Vol. 9. No. 1. pp. 28-49 .

- Tirachini, A. (2013b). "Estimation of travel time and the benefits of upgrading the fare payment technology in urban bus services". Transportation Research Part C: Emerging Technologies. Vol. 30. No. pp. 239-256 .

- Tirachini, A., & Hensher, D.A. (2012). "Multimodal transport pricing: first best, second best and extensions to non-motorized transport". Transport Reviews. Vol .۳۲ .No. 2. pp. 181-202 .

- Tirachini, A., Hensher, D.A., & Rose, J.M. (2014). "Multimodal pricing and optimal design of urban public transport: The interplay between traffic congestion and bus crowding". Transportation Research Part B: Methodological. Vol. 61. No. pp. 33-54 .

- Ullah, H., Ullah, M., & Uzair, M. (2019). "A hybrid social influence model for pedestrian

محمد صدرانی هم اکنون یک عضو پژوهشی و دانشجوی دکترا در دانشگاه فنی مونیخ (TUM) است. وی مدارک کارشناسی خود را در مهندسی عمران در سال ۱۳۹٤ و کارشناسی ارشد در مهندسی حمل‌ونقل از دانشگاه اصفهان در سال ۱۳۹۸ دریافت کرد. تحقیقات او عمدتا بر سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، الگوهای تحرک انسان و استفاده از روش‌های بهینه‌سازی (به ویژه الگوریتم‌های فرا ابتکاری) و تکنیک‌های یادگیری ماشین در علوم حمل‌ونقل متمرکز است.

احمد رضا جعفریان مقدم عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل در دانشگاه اصفهان می‌باشد. مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی حمل‌ونقل ریلی به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸٦ از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت نموده است. وی در سال ۱۳۹٤ در دوره دکتری رشته مهندسی صنایع (مدیریت سیستم و بهره‌وری) در دانشگاه علم و صنعت ایران فارغ التحصیل شده است. زمینه‌های مورد علاقه وی داده کاوی، مدلسازی شبکه‌های حمل‌ونقل، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، مدیریت و کنترل پروژه، مدیریت استراتژیک و تصمیم‌گیری در شرایط قطعیت و عدم قطعیت می‌باشد.

محسن ابوطالبی اصفهانی، درجه کارشناسی در رشته عمران- عمران را در سال ۱۳۷٤ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران- راه و ترابری در سال ۱۳۷٦ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۸٦ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران- راه و ترابری از دانشگاه دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی ترافیک و حمل ونقل، طرح هندسی و روسازی راه بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه اصفهان است.

امیرمسعود رحیمی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷٦ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی و برنامه‌ریزی حمل و نقل در سال ۱۳۷۸ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۷ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی و برنامه‌ریزی حمل و نقل از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدلسازی حمل و نقل، شبیه‌سازی جریان ترافیک، ایمنی ترافیک و حل مسأله مسیریابی وسیله نقلیه است.