# بکارگیری شبیه‌سازی یکپارچه وسایل‌نقلیه و عابرین‌پیاده در ارزیابی سیاست‌گذاری‌های قطار شهری (مطالعه موردی قطعه‌ای از خط یک متروی تهران)

محمدحسین دهناد[۱،*] و علیرضا نوری[۲]

**اطلاعات مقاله**

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۷
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۳

**واژگان کلیدی:**
حمل‌ونقل،
سرفاصلهٔزمانی،
مدل‌سازی،
شبیه‌سازی،
عابرپیاده،
زمان انتظار.

**چکیده**

ارتباط مستقیم و پیوستهٔ مسافرین و وسایل‌نقلیه عمومی، بعنوان دو عضو اصلی از یک سامانهٔ حمل‌ونقل، باعث شده است که هرگونه بهبود و خللی در بهره‌برداری از سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی اثر مستقیمی بر روی زمان سفر و زمان انتظار مسافرین داشته باشد. همچنین کاهش زمان سفر و انتظار برای مسافرین از جمله عواملی است که باعث افزایش تمایل عابرین‌پیاده بر استفاده از سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی می‌شود. از طرفی با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز، که امروزه یکی از قوی‌ترین و قابل‌قبول‌ترین ابزارهای تحلیل سیستم‌ها هستند، می‌توان استراتژی‌های مختلف را شبیه‌سازی نموده و سپس مورد ارزیابی قرار داد. در این پژوهش با استفاده هم‌زمان از نرم‌افزارهای ایمسان و لجیون، اجزا شبکه مورد نظر شامل قطار شهری، ایستگاه‌ها و احجام تردد عابرین پیاده شبیه‌سازی و محدوده ایستگاه قیطریه تا شهید حقانی از خط ۱ مترو تهران مدل‌سازی شد. با ساخت مدل بر اساس زمان‌بندی‌های حال حاضر مترو و تغییر زمان‌بندی تردد قطارها مشاهده گردید که با درنظر گرفتن سرفاصله زمانی معادل ۵ دقیقه، مجموع زمان انتظار مسافرین حدود ۱۵ درصد نسبت به حالت فعلی کاهش می‌یابد. همچنین کاهش یک دقیقه‌ای سرفاصلهٔ زمانی و در نظر گرفتن آن معادل ۴ دقیقه، کاهش ۴۵ درصدی در زمان انتظار مسافرین را در پی خواهد داشت.

## ۱-مقدمه

با توجه به رشد گستردهٔ جمعیت شهرها و به تبع آن افزایش ترافیک شهری و از سوی دیگر مزایای چشم‌گیر بکارگیری سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی و انسان‌محور، کلیهٔ شهرهای پیشرفته جهان به سوی توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی گام برمی‌دارند.

با وجود مزایای قابل توجه این رویکرد، در صورتی که فارغ از دیدگاه صحیح مهندسی اقدام به ساخت و توسعه تسهیلات حمل‌ونقل عمومی شود، درعمل نتیجهٔ قابل‌قبول و بهینه به دست نخواهد آمد و زیرساخت‌های تعبیه شده، بهره‌وری مطلوب را حاصل نمی‌نمایند.

یکی از جدیدترین و در عین‌حال مفیدترین روش‌ها در مهندسی حمل‌ونقل که در سالیان اخیر توسعه شگرفی یافته، روش شبیه‌سازی نرم‌افزاری شبکهٔ حمل‌ونقل و مدل-سازی پارامترهای ترافیک است. با توجه به تحقیقاتی که در سالیان متمادی روی رفتار رانندگان در کشورهای مختلف صورت گرفته است، رفتارهای ترافیکی رانندگان را می‌توان به چند بخش کلی طبقه‌بندی نمود که شامل رفتار تعقیب

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.dehnad@qom.ac.ir
۱. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم
۲. مدیر مطالعات و برنامه‌ریزی امور فنی و عمرانی، استانداردسازی و امور بحران مرکز مطالعات شهر تهران

خودروی جلویی[1]، تغییر خط[2]، قبول گپ[3] و انتخاب مسیر[4] می‌باشد که بر اساس هر یک از این رفتارها مدل‌هایی توسعه یافته است و در نرم‌افزارهای مختلف شبیه‌ساز از این مدل‌ها استفاده می‌گردد. با وجود توسعه چشمگیر و رشد روزافزون مدل‌های شبیه‌سازی ترافیک خودروها، مدل‌های شبیه‌ساز حرکت عابرین پیاده به دلیل پیچیدگی بیشتر و نظم کمتر در تردد عابرین از توسعهٔ کمتری برخوردار بوده‌اند و در عین حال دقت ارزیابی کمتری را دارا هستند. یکی از نرم‌افزارهایی که در در سالیان اخیر توسعهٔ قابل توجهی یافته و در شرایط مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفته است، نرم‌افزار لجیون[5] است که اخیراً در ترکیب با یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌ساز ترافیک در دنیا تحولی چشم‌گیر را در شبیه‌سازی یکپارچه عبور عابرین‌پیاده و مسافرین در اندرکنش با حرکت وسایل نقلیه به وجود آورده است. در این مقاله تلاش می‌گردد تا با استفاده از شبیه‌سازی رفتار عابرین پیاده و مسافرین حاضر در تعدادی از ایستگاه‌های قطار شهری و سپس سوار شدن آنها بر قطار مترو و سفر به مقصد و سپس پیاده شدن در ایستگاه و ارزیابی این فرایند، بستری برای اثرسنجی استراتژی‌های حمل‌ونقلی در شبکه مترو فراهم گردد. سپس با تغییر سرفاصلهٔ تردد قطارهای شهری، زمان سفر مسافرین به دست آمده و اثر بکارگیری استراتژی‌های مذکور بر زمان انتظار و سفر مسافرین سنجیده شود.

## ۲- شبیه‌سازی نرم‌افزاری

همانگونه که بیان شد، شبیه‌سازی عملکرد عابرین‌پیاده، فرآیندی پیچیده و دارای خطای نسبتاً بالا است. در این راه بررسی‌های زیادی صورت پذیرفته که شماری از آنها منجر به توسعه نرم‌افزارهای شبیه‌ساز رفتار عابرین‌پیاده شده است. در این بخش ابتدا تعدادی از این نرم‌افزارها بررسی و ارزیابی شده‌اند، سپس شبیه‌سازی ترافیک خودروها مورد بحث قرار گرفته و نهایتاً ترکیب این دو دسته نرم‌افزار شبیه‌ساز، که در این تحقیق نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند، معرفی می‌شوند.

### ۲-۱- شبیه‌سازی عابرین پیاده

مطالعات متنوعی در زمینه شبیه‌سازی حرکت عابرین‌پیاده انجام شده است. شفابخش و محمدی به شبیه‌سازی حرکت عابرین پیاده با استفاده از مدل نیروی اجتماعی که برای مدل‌سازی میکروسکوپیک عابرین پیاده است، پرداختند. ایشان از طریق فیلم‌برداری و تحلیل داده‌های سرعت و چگالی پیاده‌روهای تهران و همچنین تحلیل رگرسیون خطی به همبستگی خوبی بین داده‌های میدانی و مدل‌سازی دست پیدا کردند [۱]. بسیاری از مطالعات صورت گرفته، از نرم‌افزارهای مختلفی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سود برده‌اند که در ادامه برخی از این نرم‌افزارها تشریح می‌شوند.

#### ۲-۱-۱- نرم‌افزار سیمولکس

این نرم‌افزار توسط تامپسون در انگلستان توسعه یافته است و قابلیت شبیه‌سازی تخلیهٔ اضطراری ساختمان‌های بلند را دارا می‌باشد [۲]. یکی از موارد استفاده از این نرم‌افزار شبیه‌سازی تخلیهٔ اضطراری سه ساختمان بلند در کشور استرالیا است. در این آزمایش عملیات تخلیه هم در فضای واقعی و هم در محیط نرم‌افزار صورت گرفت که مقایسه نتایج بدست آمده نشان دهنده دقت خوب و قابل قبول نرم افزار است. تغییر پارامترهای هندسی و فیزیکی نرم‌افزار، توسط نرم‌افزار جانبی ارائه شده به همراه سیمولکس[6] امکان‌پذیر است. این نرم‌افزار از الگوریتم نقشه - فاصله برای هدایت عابرین پیاده به نزدیکترین خروجی استفاده می‌کند و همچنین آمار تعداد عابرین را در هر خروجی اعلام می‌نماید. اطلاعات به صورت متنی و تصویری به کاربر ارائه می‌گردد [۳].

در مطالعه‌ای چاو و کندی به بررسی زمان انتظار در شرایط تخلیهٔ اضطراری پایانه‌های پرجمعیت حمل‌ونقل عمومی، از طریق مدل‌سازی با نرم‌افزار سیمولکس پرداختند [۴]. در مقاله‌ای دیگر در سال ۲۰۱۱، نرم‌افزار شبیه‌ساز سیمولکس برای مطالعهٔ روند تخلیهٔ اضطراری ایستگاه مترو و تعیین موقعیت‌های «گلوگاه» به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که راه‌پله‌های منتهی به سکو و سالن بلیط‌فروشی، به عنوان موقعیت گلوگاه و جایی که ازدحام جمعیت زیاد است، در هنگام تخلیه مشخص می‌شود [۵].

این نرم‌افزار برای استفاده به عنوان یک ابزار تحقیق و طراحی برای تحلیل و شبیه‌سازی تخلیهٔ جمعیت انبوه از محیط‌های ساختمانی از طریق تعریف یک طیف گسترده

[1] Car Following
[2] Lane Changing
[3] Gap Acceptance
[4] Route Choice
[5] Legion
[6] Simulex

نیز در نظر گرفته شده است [۶]. در مقاله‌ای تفاوت‌های روش‌های استفاده شده در بسته نرم‌افزاری سیمولکس از نظر متغیرهای میانگین و سرعت جریان با روش‌های سنتی ارزیابی حرکت بررسی شد [۷]. مهمترین ویژگی این مدل، شبیه‌سازی دقیق هندسی حرکت تخلیه هر فرد از فضای ساختمان است.

### ۲-۱-۲- نرم‌افزار پِدگو

این نرم‌افزار یک نرم‌افزار شبیه‌ساز است که در کنار پروژه‌ای موسوم به بای‌پس در کشور آلمان و توسط تیم‌میر کینگ و کلیپفل ارائه گردیده است. این نرم‌افزار توانایی شبیه‌سازی بیش از ۱۰ هزار نفر را به صورت هم‌زمان دارد و توسط کامپیوترهای پرقدرت برای شبیه‌سازی خروج بیش از ۱۰۰ هزار نفر از حجاج از روی پل جماعت در کشور عربستان استفاده شده است.

نرم‌افزار پِدگو[1] کاربر را قادر به شبیه‌سازی محیط پیرامونی نیز می‌سازد. در این نرم‌افزار عابرین‌پیاده با مشخصات سرعت بیشینه، توقفات، نوسانات در مسیر حرکت و کاهش سرعت‌های افراد بر اساس توزیع‌های نرمال شبیه‌سازی می‌شوند. خروجی‌های تصویری، نمایش تراکم، زمان تردد و فاصله تردد برای افراد و اطلاعات خام تردد افراد از جمله خروجی‌های این نرم‌افزار می‌باشد. در مقاله‌ای در سال ۲۰۱۴، از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی بزرگ مقیاس چند حالته برای ترافیک عابرین پیاده استفاده کردند. نویسندگان اشاره نمودند که برای برنامه‌ریزی رویدادهای بزرگ، مدیریت جمعیت از اهمیت اساسی برخوردار است. برای این منظور، شبیه‌سازی‌هایی برای شناسایی ازدحام و «نقاط دارای وضعیت هشدار» احتمالی، برای تخمین زمان لازم برای تخلیه و مدت زمان لازم برای خروج بازدیدکنندگان از جشنواره‌ای در امانتال سوئیس و سوار شدن به قطار انجام شد [۸]. در پژوهش دیگری برای بررسی تأثیر قرارگیری عابر پیاده و زمان‌های قبل از حرکت در شبیه‌سازی تخلیه از ساختمان بلند مرتبه اداری، هتل و مدرسه از نرم‌افزار پِدگو استفاده نمودند [۹].

### ۲-۱-۳- نرم‌افزار گریدفلو

این نرم‌افزار توسط دیوید پورسر در انگلستان توسعه داده شده است. این نرم‌افزار در انواع مختلفی از ساختمان‌ها اعتبارسنجی شده و تنها در مورد خروج اضطراری عابرین پیاده از ساختمان‌ها کاربرد دارد [۱۰, ۱۱].

یک نرم‌افزار پیاده‌سازی طرح هندسی به منظور ایجاد هندسه موانع و مسیرها، در نرم‌افزار قرار داده شده است. قابلیت وارد نمودن اطلاعات طراحی از نرم‌افزار اتوکد را نیز نرم‌افزاری جانبی که به همین منظور طراحی شده است تحت نام *جوزفین* انجام می دهد. امکان وارد نمودن تاخیر قبل از حرکت و همچنین سرعت حرکت و توزیع آن در نرم‌افزار تعبیه گردیده است و علاوه بر آن شبیه‌سازی تاثیرات دود، آتش و گازهای سمی در فضای تنفس عابرین امکان‌پذیر است. نرم‌افزار همچنین از یک روش سلولی برای شبیه‌سازی خردنگر جابه‌جایی‌ها استفاده می‌کند. وارد نمودن خروجی‌های نرم‌افزار به طور مستقیم در اکسل، تعداد افراد در هر مقطع در هر بازه زمانی، زمان خروج و نمایش گرافیکی شبیه‌سازی از جمله خروجی‌های نرم‌افزار می‌باشد [۱۰, ۱۱].

رانچی در سال ۲۰۱۳ از نرم‌افزار گریدفلو[2] و سیمولکس به همراه ۴ مدل پیش بینی تخلیه دیگر برای تحلیل ایمنی آتش در تونل استفاده نمود [۱۲].

### ۲-۱-۴- نرم‌افزار اسری

نرم‌افزار اسری[3] توسط ولکر اشنایدر از موسسه زیکرهیست-تکنیک[4] به بازار عرضه شده است و توانایی شبیه‌سازی تعداد زیاد عابرین را در حرکت‌های پیچیده دارا است. این نرم‌افزار همچنین توانایی شبیه‌سازی شرایط تخلیه بناها در شرایط اضطراری را نیز دارد. عابرین مورد شبیه‌سازی توسط پارامترهای زیادی همچون اندازه، سرعت، تناسب اندام، میزان شناخت از ساختمان و همچنین مقصد تردد هر یک از افراد از یکدیگر متمایز می‌شوند [۱۳]. مطالعه دیگری در آلمان در زمینه ایمنی حوادث در مقیاس بزرگ به بررسی مدل‌سازی میکروسکوپی جریان انبوه سناریوهای ورود و خروج پرداخت [۱۴].

### ۲-۱-۵- نرم‌افزار لجیون

نرم‌افزار لجیون توسط شرکت لجیون اینترنشنال[5] توسعه داده شده است. این نرم‌افزار حاصل سال‌ها تحقیق و بررسی بر روی جابجایی جمعیت و رفتار جمعی عابرین می‌باشد. این نرم‌افزار توانایی شبیه‌سازی هزاران عابر پیاده را روی

[1] PedGo
[2] GridFlow
[3] ASERI
[4] Sicherheits-Technik
[5] Legion International

یک کامپیوتر شخصی دارد و در کلیهٔ شرایط اضطراری و نرمال قابلیت کاربرد دارد. نرم‌افزار تسهیلات قابل توجهی را برای وارد کردن و اختصاص شرایط محلی فراهم می‌نماید. امکان تعریف ورودی‌ها، خروجی‌ها و مسیرهای جابجایی در این نرم‌افزار فراهم است اما به صورت پیش‌فرض هر یک از عابرین پیاده بر اساس اهداف خود تصمیم‌گیری می‌کنند. آن‌ها همچنین از محدوده اطراف خود درک داشته و این ادراک را در رفتار خود لحاظ می‌نمایند.

تعداد زیادی از مشخصات عابرین در قالب الگوهای پیش‌فرض در نرم‌افزار قرارداده‌شده‌اند که در برگیرندهٔ نوع عابرین‌پیاده شامل توریست، مشتریان مغازه‌ها و... و مشخصات مربوط به هر یک از انواع عابرین، نوع وسایل مورد حمل توسط عابرین است. داده‌های خروجی شامل میزان تراکم محلی، مناطق شلوغ و پرتراکم، زمان لازم برای رسیدن افراد به مقصد، ویدئو و عکس است که نرم‌افزار قادر به ارائه مستقیم این خروجی‌ها می‌باشد.

در مقاله‌ای در سال ۲۰۱۶ ، تأثیر زاویه و شعاع منحنی‌های راهرو مترو، بر ویژگی‌های جریان عابر پیاده تجزیه و تحلیل گردید. مشخص شد ظرفیت پیاده‌روی عابرین پیاده در شعاع‌های بیش از ۱۰ متر در سطح بهتری قرار می‌گیرد [۱۵]. در پژوهشی دیگر، یک مدل شبیه‌سازی از یک ساختمان پایانه چند شیوه‌ای ساخته شد و با نرم‌افزار لجیون کالیبره و مدل شد. از نتایج شبیه‌سازی برای نشان دادن چگونگی انجام ارزیابی پویا از طراحی امکانات ترمینال چندحالته استفاده شد [۱۶].

در مطالعه‌ای موردی، آرکل با استفاده از نرم‌افزار لجیون به آنالیز دقیق و همه‌جانبه شبکه‌ای شامل قطار سبک شهری و ترافیک عمومی در یک محیط مشترک و همچنین تردد عرضی عابرین پیاده از تقاطعات چراغ‌دار با طراحی دقیق پرداخته است [۱۷].

**۶-۱-۲- نرم‌افزار سیم‌والک**

این نرم‌افزار توسط شرکت سوانا سیمولیشن[1] در سوئیس تهیه گردیده است که در هر دو حالت شبیه‌سازی عبور و مرور عادی عابرین پیاده و تخلیه سریع افراد از محل حادثه کاربرد دارد، با این وجود شبیه‌سازی شرایط عادی شامل محدودیت‌هایی است. در این نرم‌افزار می توان نقطه شروع، مسیر و نقطه پایان را برای شبیه‌سازی جمعیت با تعداد و تراکم بالا به‌کار برد [۱۸]. داس و همکاران نیز در هند با استفاده از نرم افزار شبیه‌ساز ویس‌واک جریان تردد عابرین پیاده را در مقیاس بزرگ مدل‌سازی نمودند [۱۹]. کاراموتا و همکاران تحقیقات گسترده‌ای روی تکنیک‌های تشخیص، مدل های ریاضی و نرم افزار شبیه سازی در دینامیک عابر پیاده را بررسی نمودند و در مطالعه شان شبیه سازهای چون لجیون، سیم‌واک و ویس‌واک را ارزیابی نمودند [۲۰]. به‌منظور مقایسه هرچه بهتر نرم‌افزارهای شبیه‌ساز تردد عابرین پیاده جدول ۱ تهیه شده است [۲۱].

جدول ۱- مقایسه امتیاز نرم‌افزارهای شبیه‌ساز تردد عابرین پیاده

| | نام نرم‌افزار | توانایی شبیه سازی تجمعات با تراکم بالا | ابزارهای شبیه-سازی طرح هندسی | مدل شبیه‌سازی | ابزارهای گزارش-گیری و محاسبه خروجی‌ها | مجموع از ۱۰۰ امتیاز |
|---|---|---|---|---|---|---|
| توانایی شبیه‌سازی تخلیه اضطراری عابرین | اسری | ۳/۴۵ | ۱۴ | ۱۶/۵ | ۶/۲ | ۴۰/۱ |
| | پدگو | ۱۱/۵ | ۷/۸ | ۹/۳ | ۶/۸ | ۳۵/۴ |
| | سیمولکس | ۲/۹ | ۱۴/۴ | ۱۰/۶ | ۴/۹ | ۳۲/۸ |
| | گریدفلو | ۲/۳ | ۶/۷ | ۸/۲۵ | ۶ | ۲۳/۲ |
| تخلیه اضطراری عابرین + عبور عادی عابرین | لجیون | ۳/۴ | ۱۴/۱۲ | ۱۹ | ۱۳/۶ | ۵۰/۳ |
| | استپس | ۶/۶ | ۱۲/۴ | ۱۵ | ۱۳/۱ | ۴۷/۱ |
| | سیم‌والک | ۴/۳ | ۱۰/۹ | ۱۴/۱ | ۱۱/۴ | ۴۰/۷ |

**۲-۲- شبیه‌سازی ترافیک خودروها**

نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ترافیک خودروها عموماً به سه دسته کلی میکروسکوپیک، مزوسکوپیک و ماکروسکوپیک تقسیم‌بندی می‌شوند. نرم‌افزارهای میکروسکوپیک بیشترین سطح جزئیات را در شبیه‌سازی به خود اختصاص می‌دهند و در عین حال در صورت کالیبراسیون دقیق

[1] Savannah Simulation

بیشترین سطح دقت را ارائه می‌نمایند. در این گروه از نرم-افزارها، نرم‌افزارهای ویسیم[1]، پارامیکس[2] و ایمسان[3] از بیشترین تعداد کاربر در سطح دنیا برخوردار هستند که نرم افزار ایمسان با توجه به شبیه‌سازی خطوط حمل‌ونقل عمومی شهری و همچنین دسترسی آسان، به عنوان نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق انتخاب گردید.

در مطالعه‌ای با استفاده از نرم‌افزار ایمسان، تصادفات با زمان پاک‌سازی‌های مختلف و برای خطوط متفاوت به‌عنوان سناریوها شبیه‌سازی و مقایسه گردید و زمان تاخیر در هر یک از حالات اندازه‌گیری شد [۲۲]. علاوه بر این در مقاله‌ای دیگر، عملکرد خطوط سامانه اتوبوس‌های تندرو در دو سناریو مختلف با نرم‌افزار ایمسان شبیه‌سازی و مدل‌سازی شد [۲۳].

در تحقیقی دیگر شفابخش و شاه‌حسینی از تکنیک شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار خردنگر کورسیم[4]، برای بررسی جریان ترافیک عبوری بزرگراه گرمسار- سمنان پژوهشی انجام دادند. ایشان نتیجه گرفتند که کورسیم یک نرم‌افزار توانمند برای شبیه‌سازی جریان ترافیک راه‌ها است که قادر است اغلب مشخصات هندسی بزرگراه را شبیه-سازی کند [۲۴].

برخی مطالعات نیز متمرکز بر قطارهای شهری و مسافرین آن انجام شده‌اند. به‌عنوان نمونه، سلماس‌نیا و همکاران، بهینه‌سازی چند هدفه متوسط زمان سفر در خط ۴ مترو تهران را ارزیابی نمودند. ایشان رویکرد مدل‌سازی و حل بر اساس شبیه‌سازی گسسته – پیشامد و متدولوژی سطح پاسخ را ارائه نمودند و نشان دادند که از دیدگاه مسافران کاهش در هر دو مقدار زمان سفر و همچنین نرخ پر بودن واگن از مطلوبیت برخوردار است. همچنین احتمال عزیمت مسافران از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر از طریق توزیع ورود مشتریان را ارزیابی نمودند [۲۵].

### ۲-۳- شبیه‌سازی یکپارچه خودروها و عابرین

یکی از مهمترین نقاط ضعف نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ترافیک خودروها، ضعف در شبیه‌سازی رفتار عابرین پیاده است که با بکارگیری همزمان نرم‌افزارهای شبیه‌ساز عابرین‌پیاده و خودروها می‌توان بر این ضعف عمده فائق آمد. با توجه به ارائه نسخه‌های جدید نرم‌افزار شبیه‌ساز ایمسان به گونه‌ای که قابلیت کار با محیط نرم‌افزار لجیون را نیز داشته باشد از نسخه ۶/۱ این نرم‌افزار جهت شبیه‌سازی مدل راه‌آهن شهری و ساخت ایستگاه‌ها استفاده شد و سپس ترافیک عابرین‌پیاده در این محیط بارگذاری گردید.

گرمه‌ای و کاشی در مقاله‌ای، کالیبراسیون مدل جریان وسایل‌نقلیه و عابرین‌پیاده در میدان با نرم‌افزار ایمسان را بررسی کردند. در مطالعه ایشان، پارامترهای میانگین سرعت عابر پیاده، زمان واکنش و زمان تاخیر در حالات مختلف بررسی و مقایسه شده‌اند [۲۶].

در پژوهشی دیگر، نیلز و همکاران با توسعه سناریوهایی و استفاده همزمان از نرم‌افزارهای ایمسان و لجیون، یک طرح جدید کنترل تقاطع یکپارچه برای وسایل نقلیه خودکار و عابران پیاده، مبتنی بر شبیه سازی ارزیابی و ارائه نمودند [۲۷].

## ۳- مدل‌سازی

### ۳-۱- منطقه مورد بررسی

به دلیل محدودیت‌های موجود جهت جمع آوری اطلاعات مسیر عبور ریل‌های مترو و اطلاعات تردد قطارها و ترافیک مسافرین، قطعه مورد بررسی به حدفاصل ایستگاه قیطریه تا ایستگاه شهید حقانی محدود گردید و در این تحقیق شبیه‌سازی ایستگاه‌های شهید حقانی، میرداماد، دکتر شریعتی، قلهک، شهید صدر و قیطریه بر اساس اطلاعات موجود صورت پذیرفت. نقشه خط در نرم‌افزار وارد گردید و خطوط مترو با حداکثر سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در مدل وارد گردید. همچنین جهت حرکت مورد بررسی از سوی ایستگاه قیطریه به سوی ایستگاه شهید حقانی انتخاب شد.

### ۳-۲- ورود اطلاعات برای مدل‌سازی

با توجه به مشخصات فنی ارائه شده در وبسایت شرکت بهره‌برداری متروی تهران مشخصات قطارهای خط مورد مطالعه به شرح ارائه شده در جدول ۲ می‌باشد که به همین صورت در مدل وارد گردید. همچنین سرفاصله عبور قطارها بر اساس اطلاعات مندرج در وبسایت شرکت متروی تهران در حال حاضر از ساعت ۵:۳۰ الی ۵:۵۰ به میزان ۲۰ دقیقه، از ساعت ۵:۵۰ الی ۶:۰۵ به میزان ۱۵ دقیقه، از ساعت ۶:۰۵

[1] VISSIM
[2] Paramics
[3] Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and non-urban (AIMSUN)
[4] CORSIM

الی ۶:۲۵ به میزان ۱۰ دقیقه، از ۶:۲۵ الی ۶:۵۵ به میزان ۵ دقیقه، در ساعت اوج صبحگاهی در بازه میان ۶:۵۵ الی ۹:۰۵ به میزان ۴,۵ دقیقه می‌باشد. سپس تا شروع بازه اوج عصرگاهی سرفاصله عبور به میزان ۵ دقیقه افزایش می‌یابد. با شروع ساعت اوج عصرگاهی در بازه میان ۱۷:۰۵ الی ۲۰ این زمان مجدداً به ۴,۵ دقیقه کاهش می‌یابد و پس از آن تا ساعت ۲۲:۳۰ ( اتمام کار خط ۱ متروی تهران) سرفاصله تردد قطارها افزایش خواهد داشت.

با توجه به ابزارهای موجود در نرم‌افزار لجیون، عابرین پیاده از نوع آسیایی و با بارهای دستی کوچک تعریف گردید. همچنین با توجه به شبیه‌سازی صرفا جهت شمال به جنوب خط از سوی ایستگاه قیطریه به ایستگاه شهید حقانی، ماتریس تردد مسافرین به صورت مثلثی و به میزان نمایش داده شده در جدول ۳ تعریف گردیده و در نرم‌افزار وارد شد. با توجه به اینکه شرکت بهره‌برداری از قطارهای شهری تهران به منظور کاهش زمان تردد مسافرین در بین ایستگاه‌ها تلاش در افزایش تعداد قطارها و کاهش سرفاصله تردد قطارها دارد، لذا علاوه بر ساخت مدل بر اساس زمان‌بندی‌های حال حاضر مترو، استراتژی تغییر زمان‌بندی تردد قطارها به سرفاصله‌های ۵ دقیقه، ۴ دقیقه، ۳ دقیقه، ۲ دقیقه و ۱ دقیقه مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و پارامترهای مجموع زمان انتظار مسافرین، زمان پیاده‌روی متوسط مسافر بر روی سکو و همچنین زمان سفر متوسط مسافر از لحظه ورود به سکو تا لحظه خروج از سکوی ایستگاه مقصد به دست آمد و مبنای قضاوت قرار گرفت.

## ۴- نتایج خروجی

به دلیل ماهیت احتمالاتی مدل‌های شبیه‌سازی مورد استفاده، عملیات محاسبات مدل برای هر یک از سناریوها به تعداد سه بار تکرار اجرا گردیده و در پایگاه داده‌های مدل ثبت شد. در مجموع ۱۸ بار مدل مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و میانگین نتایج حاصله محاسبه گردید. همچنین هر یک از مدل‌ها توسط کاربر در دو حالت دو بعدی و سه بعدی مورد بازبینی قرار گرفت. نتایج حاصل از خروجی‌های دو بعدی و سه بعدی شبیه‌سازی، به تجزیه و تحلیل و درک عملکرد سیستم مورد مطالعه کمک نموده و می‌تواند راهی قدرتمند برای جلب مقبولیت گسترده برای استراتژی‌های پیچیده باشد.

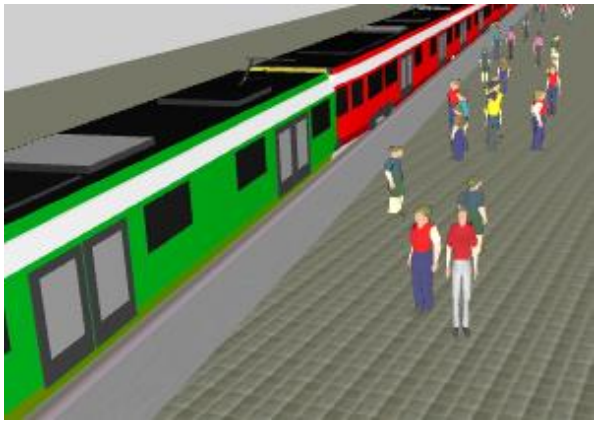
شکل (۱) مدل عابرین پیاده در حال ورود و خروج به متروی متوقف شده را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی پس از محاسبه میانگین در جدول شماره ۴ نمایش داده شده است. در حالت عادی و در هنگامی که سرفاصله‌های بیش از ۵ دقیقه در سیستم وجود دارد مجموع زمان انتظار مسافرین بیشترین مقدار خود را دارد و مقدار آن به حدود ۴۰۰۰۰۰ ثانیه می‌رسد. با کاهش سرفاصله عبور قطارها به ۵ دقیقه در تمامی اوقات روز، این مقدار به حدود ۳۴۰۰۰۰ ثانیه می‌رسد که کاهشی در حدود ۶۰۰۰۰ ثانیه را از خود نشان می‌دهد. این کاهش زمان انتظار با رسیدن سرفاصله به ۴ دقیقه در حدود ۱۸۰۰۰۰ ثانیه و با رسیدن سرفاصله به ۳ دقیقه رقمی در حدود ۲۸۰۰۰۰ ثانیه را به خود اختصاص خواهد داد.

جدول ۲- مشخصات قطارهای عبوری از خط ۱ متروی تهران

| شرح | آرایش قطار | جرم قطار بدون مسافر (تن) | میانگین شتاب منفی ($m/s^2$) | | | بیشینه سرعت(Km/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | رانش | ترمز سروی | ترمز اضطرار | |
| خط ۱ قطار DC | Mc-M-Ms-Ms-M-M-Mc | ۲۵۷ | ۰/۹ | -۱ | -۱/۲ | ۸۰ |

جدول ۳- ماتریس تردد ایستگاههای مورد بررسی

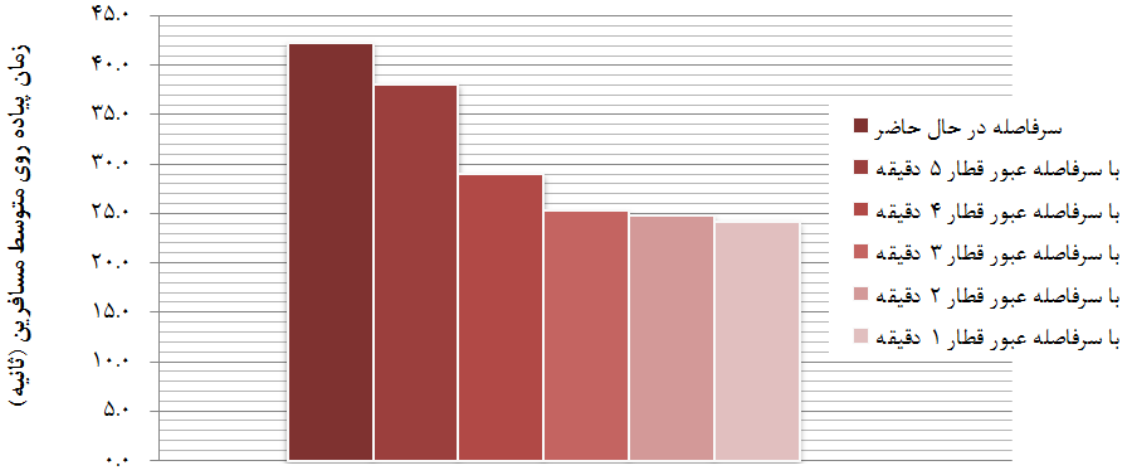
| | حقانی | میرداماد | شریعتی | قلهک | صدر | قیطریه |
|---|---|---|---|---|---|---|
| حقانی | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| میر داماد | ۱۳۵۴ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| شریعتی | ۱۰۰۰ | ۸۸۶ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| قلهک | ۱۶۲۹ | ۱۴۴۳ | ۱۰۱۴ | ۰ | ۰ | ۰ |
| صدر | ۶۶۴ | ۵۸۸ | ۴۱۳ | ۷۳۸ | ۰ | ۰ |
| قیطریه | ۱۹۹۷ | ۱۷۷۰ | ۱۲۴۳ | ۲۲۱۹ | ۷۸۸ | ۰ |



شکل ۱- نمای سه بعدی مسافرین در حال سوار شدن و پیاده شدن از قطار

جدول ۴- نتایج خروجی مدل

| | سرفاصله در حال حاضر | با سرفاصله عبور قطار ۵ دقیقه | با سرفاصله عبور قطار ۴ دقیقه | با سرفاصله عبور قطار ۳ دقیقه | با سرفاصله عبور قطار ۲ دقیقه | با سرفاصله عبور قطار ۱ دقیقه |
|---|---|---|---|---|---|---|
| مجموع زمان انتظار مسافرین (ثانیه) | ۳۹۶۹۴۰ | ۳۴۰۱۷۰ | ۲۲۰۹۵۰ | ۱۲۵۰۱۰ | ۶۹۸۹۰ | ۶۳۶۹۰ |
| زمان سفر متوسط مسافر(ثانیه) | ۴۸۸/۴ | ۴۵۷ | ۳۱۸/۲ | ۲۵۷/۲ | ۲۲۵ | ۲۲۳ |
| زمان پیاده روی متوسط مسافر بر روی سکو(ثانیه) | ۴۲/۲ | ۳۸/۱ | ۲۹ | ۲۵/۲ | ۲۴/۸ | ۴۲/۲ |




شکل ۲- نمودار زمان پیاده‌روی متوسط مسافرین برای هر یک از سناریوهای مورد بررسی

با کاهش یک دقیقه‌ای سرفاصله عبور قطار و رساندن آن به ۲ دقیقه مجموع زمان انتظار مسافرین بر روی سکوها در حدود ۵۰۰۰۰ ثانیه کاهش می‌یابد. اما با این وجود تغییر سرفاصله به ۱ دقیقه تاثیر چندان چشم‌گیری را بر زمان انتظار مسافرین بر روی سکوها نخواهد داشت. علت این موضوع آن است که زمان پیاده‌روی متوسط مسافرین بر روی سکو ثابت باقی می‌ماند که در مدل جزئی از زمان انتظار به حساب می‌آید و عملاً همان‌گونه که در جدول شماره ۴ مشاهده می‌شود، تغییر در سرفاصله میان قطارها و رسیدن این زمان از ۲ دقیقه به ۱ دقیقه تاثیر چندانی بر این زمان نخواهد داشت.

با توجه به اینکه مسافرین در مدل نقاط مشخصی را برای سوار شدن به قطار انتخاب می‌کنند، با افزایش سرفاصله عبور قطارها و شلوغ‌تر شدن ایستگاه، زمان بیشتری را برای

رسیدن به محل‌های مورد نظر خود انتخاب می‌نمایند که این موضوع منجر به افزایش زمان پیاده روی مسافر بر روی سکو می‌شود. در شکل شماره (۲) نمودار زمان‌پیاده روی متوسط مسافرین برای هر یک از سناریوهای مورد بررسی به تصویر کشیده شده است.

## ۵-نتیجه گیری

در این پژوهش تلاش گردید برخی از نرم‌افزارهای رایجی که در شبیه‌سازی تردد عابرین پیاده استفاده می‌شوند، بررسی و مقایسه گردد و اندرکنش تردد وسایل نقلیه و عابرین پیاده مورد توجه قرار گیرد. استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز لجیون روی بستر نرم‌افزار ایمسان، در این تحقیق نتایج مطلوبی ارائه داد؛ به منظور افزایش دقت مدل و کاهش تفاوت‌های اقلیمی و اجتماعی پهنه مورد مطالعه با کشورهای ارائه‌کننده نرم‌افزارها، کالیبراسیون نرم‌افزار اقدامی مهم بوده که تلاش گردید با ورود اطلاعات و جزئیات مربوط به وسیله نقلیه (قطار شهری) و عابر پیاده و تدقیق الگوریتم‌های پیش‌فرض نرم‌افزار تا حدی مشابهت قابل قبولی با شرایط واقعی متصور گردد.

بر اساس مطالعه و ارزیابی صورت گرفته نتایج زیر حاصل گردید:

- با بکارگیری همزمان نرم‌افزارهای شبیه‌ساز عابرین پیاده و خودروها می‌توان بر ضعف شبیه‌سازهای ترافیک وسایل نقلیه که قادر به شبیه‌سازی مناسب رفتار عابر پیاده نیستند، غلبه نمود.
- با کاهش سرفاصله زمانی عبور قطار، مجموع زمان انتظار مسافرین کمتر شده و بیشترین کاهش در سرفاصله معادل ۲ دقیقه بدست آمد که حدود ۴۵ درصد نسبت به سرفاصله معادل ۳ دقیقه زمان انتظار مسافرین کمتر می‌شود. نتیجه نسبی به‌دست آمده در راستای نتایج بررسی مدل‌های ارتباط بین سرفاصله زمانی و زمان انتظار مسافرین در تحقیقات پیشین، همچون [۲۸] و [۲۹] بوده است.
- با کاهش سرفاصله زمانی نرخ کاهش زمان انتظار مسافرین بیشتر از نرخ کاهش زمان متوسط سفر مسافرین محاسبه گردید.
- بیشترین کاهش زمان پیاده روی متوسط مسافرین با کاهش سرفاصله زمانی از ۵ دقیقه به ۴ دقیقه حاصل شد.

## مراجع

[۱] غلامعلی شفابخش و مهدی محمدی، "شبیه سازی حرکت عابرین پیاده با استفاده از مدل نیروی اجتماعی"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۱، شماره ۳۴، ۱۳۹۲، صفحه ۴۹-۶۲.

[2] P. Thompson, H. Lindstrom, P. Ohlsson, and S. Thompson, "Simulex: analysis and changes for IMO compliance", Proceedings of 2nd international conference: pedestrian and evacuation dynamics, 2003.

[3] P. Å. Olsson, and A. Regan Michael, "A comparison between actual and predicted evacuation times", Safety science, Vol. 38, No. 2, 2001, pp. 139-145.

[4] W. K. Chow, and M. N. Candy, "Waiting time in emergency evacuation of crowded public transport terminals", Safety Science, Vol. 46, No. 5, 2008, pp. 844-857.

[5] L. I. Yi-Fan, C. H. E. N. Jun-min, J. I. Jie, Z. H. A. N. G. Ying, and S. U. N. Jin-hua, "Analysis of crowded degree of emergency evacuation at “Bottleneck” position in subway station based on stairway level of service", Procedia Engineering, Vol. 11, 2011, pp. 242-251.

[6] P. A. Thompson, and E. W. Marchant, "A computer model for the evacuation of large building populations", Fire safety journal, Vol. 24, No. 2, 1995, pp. 131-148.

[7] P. A. Thompson and E. W. Marchant, "Testing and application of the computer model ‘SIMULEX’", Fire Safety Journal, Vol. 24, No. 2, 1995, pp. 149-166.

[8] H. Klüpfel, "Large scale multi-modal simulation of pedestrian traffic", Transportation Research Procedia, Vol. 2, 2014, pp. 446-451.

[9] C. Rogsch, R. Galster, T. Luthardt, and D. Mohr, "The effect of pedestrian placement and pre-movement times on evacuation simulation", Transportation Research Procedia, Vol. 2, 2014, pp. 291-299.

[10] G. Chu, J. Sun, Q. Wang, and S. Chen, "Simulation study on the effect of pre-evacuation time and exit width on evacuation", Chinese Science Bulletin, Vol. 51, No. 11, 2006, pp. 1381-1388.

[11] M. A. R. K. Bensilum, and D. A. Purser, "Grid flow: An object-oriented building evacuation model combining pre-movement and movement behaviors for performance-based design", Fire Safety Science, Vol. 7, 2003, pp. 941-952.

[12] E. Ronchi, "Testing the predictive capabilities of evacuation models for tunnel fire safety analysis", Safety science, Vol. 59, 2013, pp. 141-153.

[13] V. Schneider, "Simulating evacuation processes with ASERI", Pedestrian and evacuation dynamics 2001.

[14] R. Könnecke, and V. Schneider, "BaSiGo: safety of large scale events–crowd flow modeling of ingress and egress scenarios", Transportation Research Procedia, Vol. 2, 2014, pp. 501-506.

[15] L. S. Sun, L. Cui, J. Rong, P. F. Zhao, and W. Luo, "Subway Corridor Curve Effects on Pedestrian Characteristics Based on the Legion Studio-Enabled Simulation", CICTP 2016, pp. 965-975.

[16] G. Zhang, Y. Chen, and D. Wu, "Pedestrian Simulation Research of Multi-Mode Transfer Terminals", ICTIS 2011: Multimodal Approach to Sustained Transportation System Development: Information, Technology, And Implementation, 2011. pp. 837-844.

[17] C. Arkell, "Legion for AIMSUN: modelling the interactions between pedestrians, light rail and general traffic", Australian Institute of Traffic Planning and Management (AITPM) National Conference, 2017, Melbourne, Victoria, Australia, 2017.

[18] NFPA, "130: Standard for Fixed Guide way Transit and Passenger Rail Systems", National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2007.

[19] P. Das, , M.Parida, and V. K. Katiyar, "Macroscopic pedestrian flow modelling using simulation technique", International Journal for Traffic and Transport Engineering, Vol. 8, No. 2, 2018.

[20] C. Caramuta, G. Collodel, C. Giacomini, C. Gruden, G. Longo, and P. Piccolotto, "Survey of detection techniques, mathematical models and simulation software in pedestrian dynamics". Transportation research procedia, Vol. 25, 2017, pp. 551-567.

[21] S. Sarmady, F. Haron, M. M. Salahudin, and A. Z. H. Talib, "Evaluation of existing software for simulating of crowd at Masjid Al-Haram", Journal Pengurusan Jabatan Wakaf Zakat and Haji, Vol. 1, No. 1, 2007, pp. 83-95.

[۲۲] اشکان کیهانی، "شبیه‌سازی سناریومحور عملکرد خطوط سامانه اتوبوس‌های تندرو"، فصلنامه علمی مدیریت ترافیک، شماره ۵۵، ۱۳۹۸. صفحه ۱۱۹-۱۵۰.

[۲۳] نیلوفر مطلائی، احمد گلی، مهدی ابطحی و امیر ایزدی، "تأثیر محل وقوع حادثه بر زمان تأخیر"، فصـــلنامه علمی مدیریت ترافیک، شماره ۴۰، ۱۳۹۵، صفحه ۱۰۷-۱۲۲.

[۲۴] غلامعلی شفابخش و امیر شاه حسینی، "آنالیز حساسیت جریان ترافیک بزرگراه‌های برون شهری نسبت به عوامل هندسی مسیر"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۵، شماره ۱۹، ۱۳۸۸، صفحه ۲۳-۳۵.

[۲۵] علی سلماس نیا، سید امیر حامد حسین زاده و بهنام عبدزاده، "بهینه سازی چند هدفه متو سط زمان سفر در خطوط مترو با در نظر گرفتن توام اثرات مکانی و پراکندگی"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۲، ۱۳۹۷، صفحه ۳۳۱-۳۴۵.

[26] S. Garmei, and E. Kashi, "Calibration of Aimsun roundabout model: Pedestrian and vehicles flow", Cogent Engineering, Vol. 6, No. 1, 2019, 1686796.

[27] T. Niels, N. Mitrovic, N. Dobrota, K. Bogenberger, A. Stevanovic, and R.Bertini, "Simulation-based evaluation of a new integrated intersection control scheme for connected automated vehicles and pedestrians". Transportation research record, Vol. 2674, No. 11, 2020, 779-793.

[28] W. Li, X. Yan, X. Li, and J. Yang, "Estimate Passengers' Walking and Waiting Time in Metro Station Using Smart Card Data (SCD) ", IEEE Access, Vol. 8, 2020, pp. 11074-11083.

[29] M. Ansari Esfeh, S. C.Wirasinghe, S. Saidi and L.Kattan, "Waiting time and headway modelling for urban transit systems–a critical review and proposed approach", Transport Reviews, Vol. 41, No. 2, 2021, pp. 141-163.