فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۲، ش. ۲، زمستان ۱۳۹۹، ص.۳۵۷-۳۷۶
مقاله پژوهشی

# شبیه‌سازی رفتار عابرپیاده در فرآیند تخلیه از محیط پویا با استفاده از رویکرد عامل- بنیان

سجاد حسن‌پور، دانشجوی دکتری برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

امیرعباس رصافی، (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران

Email: rasafi@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۰ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰٤

چکیده

*امروزه مطالعات رفتار انسان به عنوان یکی از ملزومات فنی در طراحی زیرساخت‌های عمرانی در نظر گرفته می‌شود. بررسی و پیش‌بینی تصمیمات افراد با استفاده از ابزار شبیه‌سازی یقیناً می‌تواند گام ارزشمندی برای طراحان و مدیران در علوم مختلف از جمله برنامه‌ریزی حمل‌ونقل باشد. حال با توجه به گره خوردن این امر با علوم انسانی، ارائه مدلی برای پیش‌بینی عملکرد انسان همواره یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهایی است که محققان و دانشمندان با آن روبه رو می‌شوند. مدل‌های عامل-بنیان (ABM) به عنوان یک تکنیک شبیه‌سازی کامپیوتری یکی از قوی‌ترین ابزارهایی است که محققان را قادر به بررسی رفتار انسان در علوم مختلف مهندسی و اجتماعی کرده است. در این مطالعه با استفاده از یک مدل سلسله مراتبی عامل‌بنیان، الگوریتمی هوشمند برای شبیه‌سازی رفتار افراد، ارتباط میان محیط و فرد و تعاملات جمعی افراد ارائه می‌شود. بر اساس آن نحوه عملکرد جابجایی انسان در فرآیند تخلیه از یک محیط دینامیک، در شرایط مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مدل ارائه شده از الگوریتم «یادگیری تقویتی» که نوعی «یادگیری ماشینی» است برای شبیه‌سازی افراد با استفاده از هوش مصنوعی استفاده شده است که با این رویکرد شبیه‌سازی رفتار انسان به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. همین امر این مدل را از دیگر مدل‌های موجود متمایز می‌کند. تمامی مدل به طور کامل در نرم‌افزار نت‌لوگو (NetLogo) کدنویسی شد. سکوی مسافران در ایستگاه متروی تهران به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد که سناریوهای مختلف طراحی خروجی‌های برای آن مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج کمی در حالت وجود دو خروجی، ظرفیت عملی محیط حدود ۱,۹ و در حالت چهار خروجی ۳,٤ نفر در ثانیه است. از خروجی‌های این مطالعه می‌توان به طور گسترده در طراحی‌های داخلی ساختمان (غیر سازه‌ای و معماری) و زیرساخت‌های عمرانی و حمل‌ونقلی استفاده کرد. همچنین بررسی زمان تخلیه افراد در شرایط اضطرار پس از حوادث (از جمله آتش‌سوزی، زلزله و حملات تروریستی) از مهمترین کاربردهای مدل ارائه شده است.*

**واژه‌های کلیدی:** مدل عامل‌بنیان-شبیه‌سازی رفتار عابر پیاده-هوش مصنوعی- شبیه‌سازی تخلیه

## ۱. مقدمه و مرور ادبیات

پیش‌بینی رفتار و عملکرد انسان در شرایط مختلف همواره یکی از مهمترین چالش‌های محققان و دانشمندان در طول تاریخ بوده است. برای دست‌یابی به پیش‌بینی درست نیاز به مشاهده، آزمایش و تجربه وجود دارد؛ حال آنکه این مشاهدات و تجربه‌ها همواره در دنیا واقعی میسر نیست. به همین دلیل شبیه‌سازی یا ارائه یک مدل از واقعیت ابزاری بسیار محبوب در تجربه و آزمایش در یک دنیای مجازی است که در این مقوله به کمک محققان آمده است. شبیه‌سازی رفتار انسان امروزه در طراحی سیستم‌های همگانی و اجتماعی بسیار مورد توجه دانشمندان، تصمیم‌گیرندگان و طراحان قرار گرفته است. اگر بتوان مدل مناسبی را برای الگوی رفتاری انسان در شرایط مختلف ارائه کرد، می‌توان از آن در بسیاری موارد از جمله ایمنی در مهندسی حمل‌ونقل استفاده نمود.

سالانه تعداد زیادی از افراد به دلیل عدم مطابقت طراحی اماکن با فرآیند تخلیه، دچار حادثه می‌شوند [Rendón Rozo et al. 2019]. حادثه ۵ فروردین سال ۱۳۸٤ پس از بازی تیمهای فوتبال ایران و ژاپن در هنگام خروج از استادیوم آزادی، که منجر به کشته شدن ۷ نفر و زخمی شدن ۳۹ نفر شد یک مثال تاریخی از عدم مدیریت مناسب جریان حرکت افراد در هنگام تخلیه است. تنها با جستجوی کوتاهی می‌توان نمونه‌های متعددی از حوادث فاجعه‌آمیز در تجمعات انسانی را یافت. ۱۰۱ زخمی و ١٦ کشته در ورود به یک استادیوم قبل از کنسرت در آنتاناناریوو ماداگاسکار در ٢٦ ژوئن ۲۰۱۹، کشته و زخمی شدن بیش از ۵۸ نفر در ایستگاه قطار در بهار شریف هند، به دلیل وحشت تجمع انسانی از زلزله در ۲۷ می ۲۰۱۸، کشته شدن حداقل ۱۰ نفر و بیش از ۵۰ زخمی در تجمع مذهبی در بنگلادش و حوادث منا در عربستان و کشته شدن بیش از ۲۰۰۰ زائر در سپتامبر سال ۲۰۱۵ تنها نمونه‌هایی از صدها حادثه در این رابطه است. بنابراین موضوع تخلیه در حالت اضطرار امروزه از مقوله‌های مهم در مطالعات لجستیک بحران است.

پرسش اصلی یافتن راه مناسب برای در نظر گرفتن تصمیمات و ترجیحات انسان بر پایه درک و فهم او از شرایط در مدلسازی‌های مربوط به شبیه‌سازی حرکت عابر است. شناسایی تعاملات میان افراد در یک سیستم و همچنین تعاملات افراد با محیط، نکته کلیدی در این مقوله مطالعاتی است. با توجه به ماهیت مولد بودن فکر افراد و در نتیجه متغیر بودن رفتار آنها در مواجهه با شرایط مختلف، پیچیدگی این بحث بسیار بالا است.

در این مقاله یک مدل سلسله مراتبی عامل–بنیان برای بررسی رفتار حرکتی افراد در شرایط اضطراری معرفی می‌شود که در آن رویکرد جدیدی با استفاده از یادگیری ماشینی برای شبیه‌سازی واقعی‌تر رفتار افراد در هنگام تخلیه به کار گرفته شده‌است. فرآیند تخلیه افراد از سکوی قطار شهری زیرزمینی متروی تهران، در سناریوهای مختلف، به عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفت.

مدل‌های شبیه‌سازی حرکت عابر پیاده از منظر هدف شبیه‌ساز، در سه سطح شبیه‌سازی کلان[1]، میانه[2] و خرد[3] دسته‌بندی می‌شود. شبیه‌سازی در سطح کلان، حرکت گروهی عابرین به صورت یک جریان کلی در نظر گرفته می‌شود. مدل شبیه‌سازی حرکت گروهی افراد با معادلات حاکم بر سیالات که توسط «هلبینگ» انجام شد، مثالی از این دسته شبیه‌سازی کلان است [Helbing, 1998]. در شبیه‌سازی میانه با در نظر گرفتن نقاط مبدا و مقصد جزئیات بیشتری را در حرکت عابر در نظر می‌گیرد که این نوع شبیه‌سازی حرکت با استفاده از مدل‌های انتخاب مسیر اغلب در مدلسازی جریان ترافیکی کاربرد دارد. به عنوان مثال رفتار عابرین پیاده در صف، در سطح شبیه‌سازی میانه و با استفاده از مدل‌های انتخاب مسیر در فضای آتوماتای سلولی بررسی شده است [Teknomo and Gerilla, 2008]. در سطح خرد با در نظر گرفتن یک المان کوچک از سیستم مورد نظر، جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مدل‌های عامل-بنیان (ABM[4]) یکی از مثال‌های بسیار محبوب در رویکرد شبیه‌سازی خرد است که از ریاضیات کاربردی در علوم اجتماعی برای توضیح و تعریف یک جز از سیستم کل استفاده می‌کند [Borrill and Tesfatsion, 2010]. مدل‌های عامل-بنیان امروزه به عنوان ابزاری قدرتمند و پرکاربرد در بسیاری از مطالعات از جمله مطالعات شبیه‌سازی رفتار افراد در هنگام تخلیه به حساب می‌آید [Ma, Chen et al. 2016، Khosraghi et al. 1394].

در مطالعه یک سیستم پیچیده، به کارگیری روش متناسب و شبیه‌سازی پویا، از جمله ملزومات برای درک و تحلیل جوانب مختلف آن سیستم است که مدل‌های عامل-بنیان یکی از بهترین ابزارها برای این منظور است [S. Roshani, 1397]. مدل‌های عامل-بنیان رفتار دینامیک یک سیستم پیچیده را از طریق بررسی و مطالعه یک جز به عنوان نماینده یا عامل سیستم استخراج می‌کند؛ به عبارت دیگر می‌توان این رویکرد را یک فرآیند پایین به بالا یا سلسله مراتبی در نظر گرفت که تأثیرات سطح کلان را از طریق مطالعه رفتار سطح خرد به دست می‌آورد [Railsback and Grimm 2011]. محیط شبیه‌سازی شامل عامل‌ها و همچنین اشیاء مختلف است که با تعریف قوانین منطقی برای روابط میان آن‌ها، همه این المان‌ها به صورت منظم در یک سیستم چند عاملی با هم در تعامل خواهند بود [Pluchino, Garofalo et al. 2014, Liun, Jiang et al. 2016].

در سال‌های اخیر پژوهشگران با ترکیب مدل‌های عامل-بنیان با دیگر ابزارهای کامپیوتری در تلاش برای دست‌یابی به رویکرد مناسبی در مدلسازی رفتار انسان هستند. به عنوان مثال برخی مطالعات با ترکیب مدل‌های عامل-بنیان با ابزارهای سازه‌ای مدلی را برای ارزیابی کاربردی طراحی سازه‌ها قبل از اجرای آن‌ها از نقطه‌نظر تعاملات رفتاری ساکنین ارائه کردند [Andrews, Yi et al. 2011, Rossini, Novembri et al. 2017].

پژوهشگران متعددی از مدل‌های عامل-بنیان در مقوله فرآیند تخلیه افراد از محیط‌های گوناگون استفاده کرده‌اند [Joo, Kim et al. 2013, Pluchino, Garofalo et al. 2014, Liun, Jiang et al. 2016, Ma, Chen et al. 2016]. در برخی مطالعات، ترکیب ABM با دیگر ابزارها از جمله «مدلسازی اطلاعات ساختمان» به کمک پژوهشگران آمده است. ترکیب ABM و BIM برای بررسی زمان تخلیه در سناریوهای مختلف پیش تعریف شده یک مثال مناسب برای این موضوع است [Cheng and Gan, 2013]. یک مطالعه از شبیه‌سازی فرآیند تخلیه کارگران ساختمانی با استفاده از مدل‌های عامل-بنیان به عنوان یک ورودی برای تصمیم‌گیری چند-معیاره جهت بهینه‌سازی زمان و هزینه فرآیند ساخت استفاده کرد [Marzouk and Daour, 2018]. البته در این مطالعه تنها از قوانین ساده و از پیش تعیین شده و بدون در نظر گرفتن جزئیات رفتاری برای تعریف تعاملات افراد استفاده شده است.

در شبیه‌سازی فرآیند تخلیه اغلب مطالعات محیط‌های مختلف با سطوح پیچیدگی گوناگون را در نظر میگیرند. این در حالی است که برخی از مطالعات با دینامیک فرض کردن محیط پا را فراتر می‌گذارند. به عنوان مثال [M. Farahani et al. 1397] امکان تصمیم‌گیری دربارهٔ مکان‌های امن را همزمان با وقوع بحران برای تصمیم‌گیرندگان مورد مطالعه قرار می‌دهد. پویا بودن محیط در این مطالعه، با فرض وجود عدم قطعیت مربوط به ظرفیت مسیرها در شبکه میسر شده است. مدلسازی احتمالی آسیب با استفاده از روش غیرخطی المان محدود و ترکیب آن با مدل‌های عامل-بنیان برای بررسی رفتار افراد در محیط دینامیک و آسیب‌دیده از جمله این مطالعات است [Liu, Jacques et al. 2015].

یکی از اصلی‌ترین بخش‌های شبیه‌سازی رفتار عابرین پیاده، فرآیند تصمیم‌گیری افراد است که امروزه برخی مطالعات به صورت ویژه بر روی این بخش تمرکز می‌کنند [Gwynne and Hunt 2018, Marzouk and Mohamed, 2019]. امروزه با پیشرفت چشمگیر تکنولوژی در تمامی رشته‌ها،

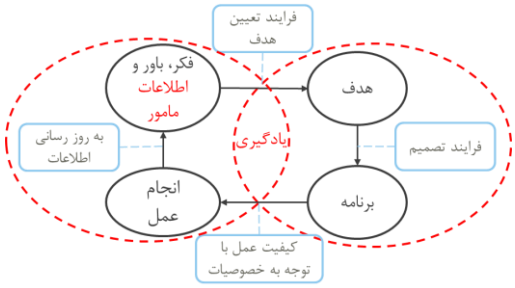
روش‌های جدید و ابزارهای کامپیوتر به کمک پژوهشگران حتی در علوم اجتماعی آمده است. هوش مصنوعی یکی از ابزارهای قدرتمند در این حیطه است که کاربردهای وسیعی در علوم مختلف از جمله رباتیک [Kanth, 2017]، تجزیه و تحلیل داده [Lenjani et al. 2019] و شبیه‌سازی تخلیه [Wang et al. 2019] دارد.

با مرور ادبیات در مقوله شبیه‌سازی فرآیند تخلیه با استفاده از مدل‌های ABM، سه چالش اصلی را می‌توان به عنوان دغدغه‌های اصلی محققان بر شمرد: در نظر گرفتن چارچوب فیزیکی مناسب در مدلسازی محیط، در نظر گرفتن جنبه‌های روحی و روانی در رفتار افراد هنگام تخلیه و در نظر گرفتن تعاملات دینامیک افراد با یکدیگر و همچنین با محیط. با به کار گرفتن یادگیری ماشینی در رویکرد معرفی شده در این مطالعه، هر سه این چالش‌ها به خوبی مورد توجه قرار گرفته است که این مطالعه را از مطالعات موجود در ادبیات متمایز می‌کند.

## ۲. روش‌شناسی

در این بخش جزئیات الگوریتم حرکت افراد برای خروج از یک محیط توضیح داده خواهد شد. مدل DBI[۵] (باور–خواسته–تصمیم) یکی از رویکردهای شناخته شده در تعریف توالی رفتار فرد است (شکل ۱) بر اساس آن فرد در ابتدا از طریق مشاهدات و تجزیه و تحلیل آنها بر اساس اعتقادات خود، مجموعه‌ای از اهداف را برای خود انتخاب می‌کند. در گام بعدی پس از تعیین هدف برنامه‌ریزی برای دست‌یابی به آن هدف لازم است و در پایان با انتخاب از میان برنامه‌ها عمل خاصی برای رسیدن به هدف خاص انجام می‌شود. همه این توالی همان چیزی است که به طور اتوماتیک در مغز انسان نیز صورت می‌گیرد.

اگرچه چارچوب مدل BDI بر اساس روانشناسی همگانی است که به راحتی قابل تفسیر است، هنوز بسیاری از جزئیات جنبه‌های رفتاری و تفکر انسان در آن مغفول است [Norling, 2004]. در نظر بگیرید فرد با یک محیط بزرگ و دینامیک روبرو خواهد بود که ممکن است با همه جزئیات آن آشنا نباشد. همچنین ممکن است فرآیند تخلیه بعد از وقوع یک حادثه باشد که فرد فرآیند تصمیم‌گیری خود را با شتاب انجام می‌دهد. ضمن اینکه خود حادثه (مثلاً زلزله) ممکن است موجب تغییر در فضای فیزیکی محیط شود که این یعنی مسئله دینامیک بودن محیط از حالت معمولی پیچیده‌تر خواهد بود. بنابراین در این بخش ابتدا رویکرد شبیه سازی محیط بررسی می‌شود. سپس به جزئیات فرآیند تصمیم‌گیری افراد و تعاملات اجتماعی در هنگام حرکت در محیط پرداخته خواهد شد و بعد از آن شبیه‌سازی کل رویکرد با استفاده از نرم‌افزار تخصصی مدل‌های عامل–بنیان توضیح داده خواهد شد.




**شکل ۱. ساختار BDI ترکیبی در مطالعه**

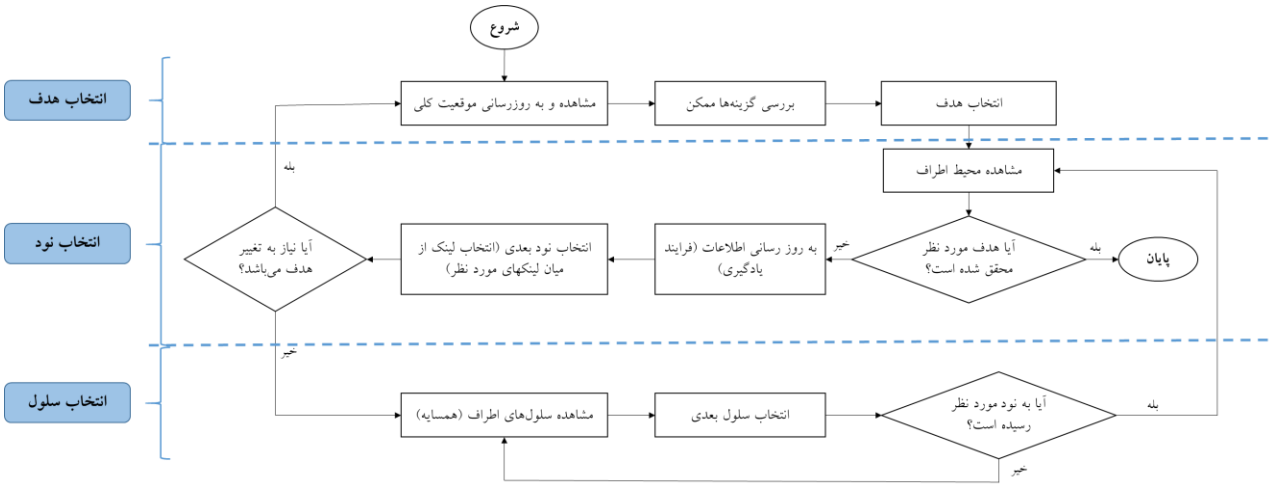
وجود ساختار سلسله مراتبی در رفتار انسان یک کشف بزرگ در ادبیات شبیه‌سازی هوشمند رفتار انسان و علوم رفتاری به حساب می‌آید [Botvinick, 2008]. بر این اساس برای دست‌یابی به رویکرد واقعی‌تر برای شبیه‌سازی فردی هوشیار که می‌تواند با حرکت منطقی در یک محیط دینامیک تجربه کسب کند و یاد بگیرد، در این مطالعه، از یک رویکرد سلسله مراتبی بر پایه هوش مصنوعی در چارچوب BDI استفاده شده است.

### ۲–۱ شبیه‌سازی محیط

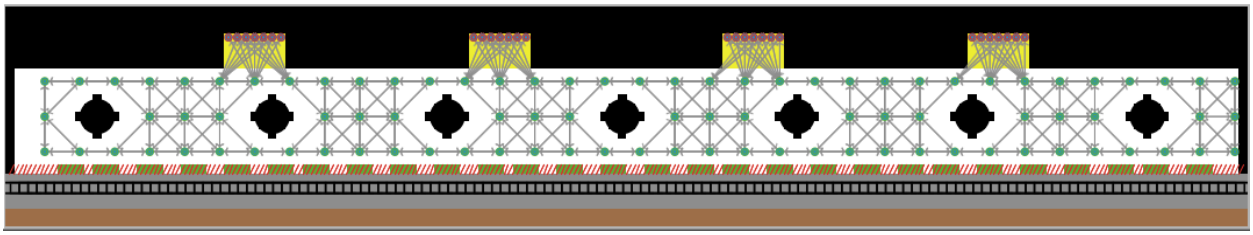
محیط می‌تواند فضای داخلی یک ساختمان یا ایستگاه حمل‌ونقل همگانی باشد. در بسیاری از مطالعات عامل–بنیان، محیط، به صورت سلولی در نظر گرفته می‌شود، و اندازه سلول‌ها به اندازه سطحی است که هر فرد اشغال می‌کند. بنابراین در هر

لحظه فرد با استفاده از قوانین تعریف شده، سلول بعدی خود را انتخاب می‌کند. اما در واقعیت، تصمیم‌گیری فرد برای هر گام مسئله‌ای است که با توجه به خصوصیات مشخص او و محیطش قابل تعریف است. مسئله چالش‌برانگیز انتخاب جهت کلی حرکت فرد در محیط است. بر این اساس برای دست‌یابی به یک ساختار سلسله مراتبی منطقی، این مطالعه از ترکیب رویکرد سلولی و گراف استفاده می‌کند. بنابراین فرد در یک فرآیند سلسله مراتبی بالا به پایین ابتدا گره هدف خود را انتخاب می‌کند، سپس در سطح پایین‌تر گره حرکت خود را در جهت گره هدف انتخاب می‌کند و در پایان برای رسیدن به گره حرکت سلول بعدی خود را انتخاب می‌کند. شکل ۲ ساختار کلی رویکرد سلسله‌مراتبی به کار رفته در مطالعه را به صورت فلوچارت ارائه می‌دهد.

در این مطالعه محیط علاوه بر سولها، شامل گره‌ها و یالها نیز هست E(N,L) هر گره یا نود (Ni) نماینده یک منطقه یا یک بخش از محیط است و هر یال یا لینک (Li) نشانگر مسیر ارتباطی بین دو گره است. شکل ۳ موقعیت گره‌ها و لینک‌ها در محیط شبیه‌سازی نرم‌افزار نت‌لوگو برای مطالعه موردی را نمایش می‌دهد. افراد برای حرکت در محیط به طور طبیعی از میان گره‌ها جهت کلی مسیر خود را انتخاب می‌کنند و سپس با رویکرد سلولی در جهت انتخاب شده حرکت می‌کنند. به عنوان مثال برای فضای داخلی یک ساختمان یک گره می‌تواند نشانگر فضای یک اتاق، سالن انتظار، ابتدا یا انتهای راهرو یا خروجی باشد. در این حالت فرد با توجه به هدف و شرایط موجود بین رفتن به مناطق مختلف محیط مثلاً رفتن به یک اتاق یا حرکت به سمت انتهای راهرو انتخاب می‌کند که در واقعیت هم همین اتفاق می‌افتد. در یک سکوی مترو به صورت ساده‌تر گره‌ها می‌توانند نشانگر فضای نزدیک لبه‌ی سکو، فضای میانی سکو و خروجی‌ها باشند.




**شکل ۲. فلوچارت کلی از رویکرد سلسله مراتبی حرکت عامل‌ها در فرآیند تخلیه از محیط ارائه شده در مطالعه**



**شکل ۳. شبیه‌سازی محیط در نرم‌افزار نت‌لوگو با ترکیب رویکرد سلولی با شبکه**

اندازه سلولهای محیط بر اساس فضای اشغالی توسط یک فرد (عامل) در نظر گرفته شده است که این مقدار با توجه به ادبیات مرتبط با علوم انسانی، با در نظر گرفتن حریم فیزیکی افراد و همچنین برای ساده‌سازی محاسبات به طور میانگین مربع 40 cm در 40 cm در نظر گرفته شده است [Pheasant et. al. 2006].

**۲-۲. شبیه سازی فرد**

نلسون و مورر بر این عقیده‌اند که انسان از نظر روانی به طور خودکار از برخورد فیزیکی با افراد دیگر اجتناب می‌کند (مگر در حالت ازدحام و اجبار) [Nelson and Mowrer2002]. بنابراین افراد دارای یک فضای حریم شخصی هستند که از آن به عنوان مخروط حریم فرد در ادبیات نام برده می‌شود [Hurley et al. 2016 and Fruin, 1971].

متغیر بعدی بسیار مهم در مورد افراد در شبیه‌سازی تخلیه سرعت حرکت افراد است. در این مطالعه هر فرد سرعت خاص خود را دارد. به این معنی که همانند آنچه که در واقعیت وجود دارد، یک سرعت یکسان برای همه افراد در نظر گرفته نشده است بلکه افراد سرعت‌های متفاوت دارند که می‌توان به طور کلی فرض کرد که سرعت افراد مختلف از توزیع نرمال پیروی می‌کند [Huang and Ma 2010]. به عبارت دیگر سرعت‌های مختلف با توزیع نرمال میان افراد پخش شده است. حال سرعت افراد در حالت‌های مختلف (حالت نرمال یا حالت شتاب برای تخلیه) متفاوت است. میانگین توزیع نرمال برای سرعت افراد در حالت نرمال 1.2 m/s و در حالت شتابزدگی 2 m/s در نظر گرفته شده است و همچنین بیشینه سرعت افراد 2.5 m/s در نظر گرفته شده است [Zebala, et al. 2009, Zębala et al. 2012]. حال این مقدار میانگین سرعت برای توزیع سرعت میان مردان و زنان کمی متفاوت است [Huang and Ma 2010]. شبیه‌سازی سرعت در حرکت افراد با توجه به مقیاس شبیه‌سازی فیزیکی محیط است. به این صورت که سرعت 1.2 m/s به این معنی است که فرد در یک ثانیه سه سلول از محیط را طی می‌کند (3*0.4=1.2)

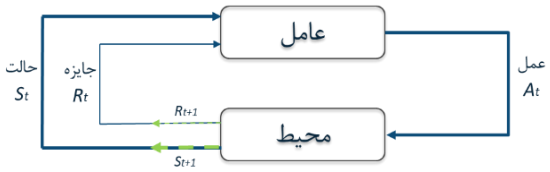
**۲-۳ فرآیند یادگیری**

افراد در هنگام تخلیه مسیرهایی با بیشترین میزان مطلبوبیت را انتخاب می‌کنند. میزان مطلوبیت مسیرها برای افراد مختلف یا با توجه به اطلاعات قبلی آنها محاسبه می‌شود یا با تجربه کردن آن مسیرها به هر کدام امتیاز دهی می‌شود. بنابراین افرادی که اطلاعات قبلی از مسیرها ندارند با امتحان کردن آنها میزان مطلوبیت مسیرها را در رسیدن به هدف می‌سنجند که باید این اطلاعات جدید را به یاد آورند. در این بخش جزئیات به روز کردن Qvalueها (میزان مطلوبیت برای یال‌های استفاده شده با استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی) بررسی می‌شود که نوعی یادگیری ماشینی است. یادگیری تقویتی ماشینی در میان انواع دیگر الگوریتم‌های یادگیری شبیه‌ترین فرآیند به رفتار انسان و دیگر موجودات زنده است [Sutton and Barto, 2017].

پایه اصلی این الگوریتم بر مبنای بیشینه کردن مطلوبیت کلی برای فرد است. چارچوب کلی این مدل به این صورت است که هر فرد در هر گام با انجام یک عمل، علاوه بر تغییر حالت محیط، یک جایزه از محیط دریافت می‌کند. این جایزه می‌تواند مثبت-به معنای اینکه آن عمل او را به هدف کلی نزدیک کرده است- یا منفی-به معنای اینکه عملی نامناسب برای رسیدن به هدف بوده است- از محیط دریافت می‌کند. جایزه مثبت یا منفی در برخی مطالعات با عناوین پاداش و جریمه نیز آورده شده‌اند.

در هر گام زمانی t عامل با یک شرایط خاصی از محیط روبه‌رو است ($S_t \in S$) و بر اساس آن عملی را انتخاب می‌کند و انجام می‌دهد ($A_t$) پس از انجام عمل، عامل یک پاداش عددی از محیط دریافت می‌کند ($R_{t+1} \in R$) و همچنین خود را در وضعیت جدید ($S_{t+1} \in S$) می‌یابد. بنابراین مسیر یا توالی فرآیند یادگیری را می‌توان به صورت زیر نمایش داد (شکل ٤):

$S_0, A_0, R_1, S_1, A_1, R_2, S_2, A_2, R_3, \ldots$




**شکل ٤. تعامل عامل-محیط در فرآیند هوشمند تصمیم‌گیری**

[مرجع: Sutton and Barto 2017]

در فرآیند یادگیری در این مطالعه از رابطه‌ای برگرفته از معادله بلمن برای به روز کردن مقدارهای $Qvalue$ یال‌ها استفاده شده است:

$$Qvalue_i^t = (1-\alpha)Qvalue_i^{t-1} + \alpha\left(reward_j + \gamma Qmax_j\right) \quad (۱)$$

$$Qmax_j = \max\{j\text{ یال‌های موجود از گره انتخابی }Qvalue\text{ها}\}$$

که $Qvalue_i^t$ ارزش یال i در زمان یا وضعیت t از گره انتخاب شده j است. $reward_j$ همان جایزه گره انتخابی j است که مقداری ثابت برای گره‌های مختلف با توجه به موقعیت آنها است. در این مطالعه ما دو نوع گره در نظر گرفته‌ایم. گره معمولی و گره خروجی. جایزه گره‌های معمولی مقداری منفی و جایزه گره‌های خروجی مثبت در نظر گرفته می‌شود تا همگرایی فرآیند یادگیری تامین شود. $\alpha$ و $\gamma$ هم پارامترهای مدل یادگیری هستند که به ترتیب نرخ یادگیری و فاکتور تنزیل نامیده می‌شوند که هر دو مقداری بین ۰ و ۱ هستند. $\alpha$ نشان‌دهنده ارزش یادگیری اطلاعات جدید نسبت به یادآوری اطلاعات گذشته است. به راحتی از معادله می‌توان دریافت که اگر $\alpha$ صفر در نظر گرفته شود مقادیر $Qvalue$ به روز نخواهند شد و همواره برابر همان مقداری قبلی باقی خواهند ماند و حال اگر این مقدار ۱ در نظر گرفته شود بدون هیچ تأثیری از مقدار قبلی (عدم یادآوری)، با توجه به جایزه گره جدید و موقعیت‌های آینده این گره، مقدار $Qvalue$ به روز می‌شود.

فاکتور تنزیل $\gamma$ نیز ارزش موقعیت‌ها یا یال‌های پیش‌رو را به مقدار $Qvalue$ یال انتخاب شده اضافه می‌کند.

### ۲-٤ فرآیند تصمیم‌گیری فرد

به طور کلی شبیه‌سازی فرآیند حرکت افراد در هنگام تخلیه در این مطالعه در قالب سه الگوریتم تعریف شده است. الگوریتم شماره یک مربوط به کلیات حرکت افراد بر اساس مدل BDI است. ابتدا افراد اطلاعات محیطی خود را به روز می‌کنند و بر اساس آن هدف کلی خود را انتخاب می‌کنند. پس از آن بر اساس اطلاعات به روز شده مسیر حرکت خود را برای رسیدن به هدف انتخاب می‌کنند (الگوریتم شماره ۲) و در پایان به صورت منطقی در جهت انتخاب شده حرکت می‌کنند (الگوریتم شماره ۳)

#### ۲-٤-۱ الگوریتم شماره ۱

**معیار توقف:** اگر مامور به گره هدف رسیده است (میتواند گره خروج از محیط باشد) الگوریتم متوقف شود.

گام ۱: به روز رسانی اطلاعات محیطی با استفاده از مشاهده اطراف در وضعیت جدید St (بر اساس قابلیت‌های فیزیکی از جمله قدرت دید فیزیکی) – به روز رسانی $S_t := (N_t)$

گام ۲: تجزیه و تحلیل اطلاعات ورودی در وضعیت جدید و درک محیط جدید (به روز کردن Qvalueهای یالهای استفاده شده (یادگیری) و درک Qvalueهای پیش‌رو) $B_i := (B_{t-1}, O_t)$

گام ۳: به روز رسانی هدف کلی بر اساس اطلاعات جدید – $G_t := (B_t)$

گام ٤: انتخاب یال بر اساس هدف کلی و اطلاعات به روزشده – $P_t := P(B_t, G_t)$ (الگوریتم شماره ۲)

گام ۵: انجام عمل $(A_{pt})$ حرکت در جهت یال انتخاب شده (الگوریتم شماره ۳)

گام ٦: اگر به وضعیت جدید (گره جدید) رسید، آنگاه $t := t+1$

گام ۷: بازگشت به گام ۱

(تکرار الگوریتم تا رسیدن به هدف)

**۲-٤-۲ الگوریتم شماره ۲**

در ادبیات مدل‌های عامل-بنیان، مقصود از نظریه‌ی تصمیم، تکنیک‌های ریاضی است که عامل، بر اساس آنها عملی را با توجه به عدم آگاهی کامل از خروجی آن عمل برای انجام انتخاب می‌کند (انتخاب یک یال) حال این فرآیند انتخاب عمل در یک محیط پیچیده عامل ذاتا دارای عدم قطعیت است. بنابراین برای هر وضعیت محیط پیرامون در لحظه خاص ($S_t$)، عامل برای گزینه‌های مختلف در دسترس به طور خودکار یک امتیازی را در نظر می‌گیرد و با توجه به نرمالایز کردن این امنیاز کمی، احتمال انجام هر یک از عمل‌ها را محاسبه می‌کند ($P(A_i$) اگر A را به عنوان مجموعه تمام عمل‌ها در لحظه خاص برای عامل در نظر بگیریم:

$$P: A \in [0,1]$$

و در لحظه t داریم:

$$P(A^t_1) + P(A^t_2) + P(A^t_3) + \ldots + P(A^t_i) = 1 \qquad (۲)$$

ورودی: هدف، مجموعه یال‌های در دسترس، Qvalueهای به روز شده برای هر یال

خروجی: انتخاب احتمالی یال ($P_i$) در جهت بیشینه کردن مطلوبیت (توجه داشته باشیم با توجه به اینکه هر یال اتصال بین دو گره است، بنابراین انتخاب یال در هر مرحله در واقع انتخاب گره بعدی «next-node» نیز هست)

فرض: احتمال انتخاب گزینه بالای ٤٠ درصد حتما انتخاب می‌شود [Gluckman, 2016].

گام ۱: تشکیل تابع مطلوبیت برای همه یالهای پیش رو با توجه به Qvalue، هدف، شخصیت فرد، ریسک و ازدحام:

گام ۲: محاسبه احتمال انتخاب گزینه‌ها:

گام ۳: اگر بیشینه احتمال یالی بیشتر از ٤٠ درصد باشد: معرفی یال به عنوان $P_i$

در غیر اینصورت انتخاب احتمالی خواهد بود.

**۲-٤-۲ الگوریتم شماره ۳**

تقریبا مشابه الگوریتم شماره ۱ است با این تفاوت که فرآیند انتخاب به جای گره‌های اصلی محیط بین سلولهای همسایه صورت می‌گیرد. ضمن اینکه رویکرد در این قسمت معین است و احتمالی نیست. به این معنی که بر اساس قوانین معین و از پیش تعیین شده، تصمیم‌گیری برای انتخاب سلول بعدی از میان سلول‌های همسایه انجام می‌شود.

**معیار توقف:** اگر مامور به گره انتخاب شده جدید رسیده است الگوریتم متوقف شده و الگوریتم شماره ۱ ادامه خواهد یافت.

گام ۱: بررسی و دریافت اطلاعات دینامیک محیطی از سلولهای اطراف (همسایه) با استفاده از مشاهده اطراف- Ct t=(1,2,…,8)

گام ۲: انتخاب بهترین سلول همسایه بر اساس متغیرهای از پیش تعیین شده (قوانین حرکت عاملها) و گره انتخابی (جهت کلی حرکت)

گام ۳: حرکت به سمت سلول انتخابی بر اساس سرعت فرد

گام ٤: به روز رسانی متغیرهای دینامیک سلولها از جمله وضعیت اشغال بودن سلولها یا میزان خطر موجود در آنها

گام ٥: t:=t + 1

گام ٦: اگر هنوز به گره انتخاب شده «next-node» نرسیده‌ایم به گام ۱ می‌رویم در غیر اینصورت به گام ٦ الگوریتم ۱ می‌رویم.

**۲-٤-۳ فرضیات و قوانین حرکت عاملها**

۱- همه افراد توانایی دیدن و رفتن سلول‌های اطراف (فضاهای محیطی اطراف) را دارند (افراد معلول و نابینا در این شبیه‌سازی آورده نشده است)

۲- در هنگام تخلیه سکوی مترو، هیچ فردی وارد سکو نمی‌شود.

۳- افراد پس از انتخاب گره بعدی (جت کلی حرکت با استفاده از الگوریتم شماره ۲) تا قبل از رسیدن به آن و در میانه راه جهت دیگری را انتخاب نمی‌کنند.

٤- سرعت افراد قبلا به صورت توزیع احتمالی (توزیع نرمال) به آنها تخصیص داده شده است و به نوعی یک خصوصیت غیرقابل تغییر برای هر فرد در طول شبیه‌سازی است.

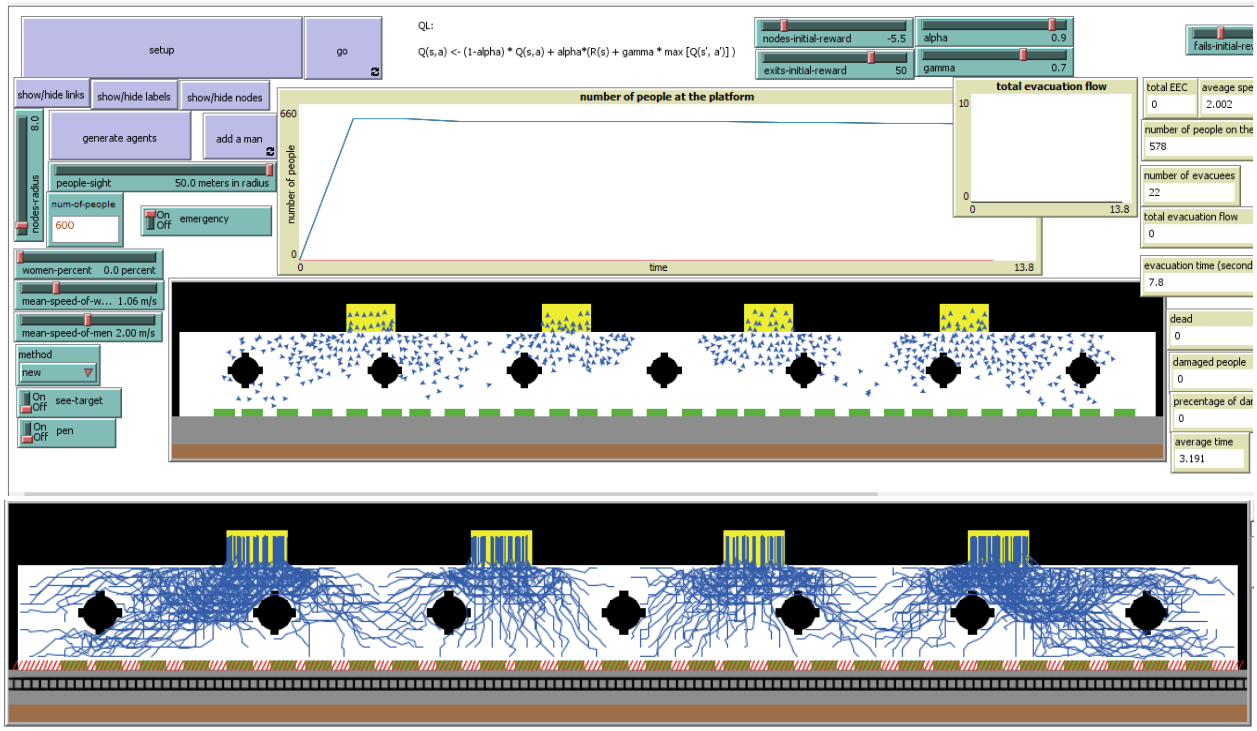
٥- در این مطالعه شبیه‌سازی منظور از قابل دسترس بودن سلولها تنها اشغال نبودن آنها توسط عامل دیگر است و فعلا متغیرهای دیگر از جمله میزان خطر موجود بی‌تأثیر است. البته این موارد می‌تواند در مطالعات آینده در نظر گرفته شوند.

٦- اگر هیچ سلول بهتر و قابل دسترسی در جهت کلی انتخاب شده وجود نداشته باشد (همه سلولهای قابل دسترس اطراف قبلا اشغال شده باشد) آن عامل به اندازه یک گام زمانی نرم‌افزار در موقعیت خود باقی می‌ماند و پس از به روز شدن شرایط سلولها در گام بعدی در صورت امکان به حرکت خود ادامه می‌دهد.

## ۳. مطالعه موردی: ایستگاه متروی تهران

با توجه به این که هدف مطالعه ارائه یک رویکرد شبیه‌سازی رفتار عابر پیاده است، فضا و فرضیات می‌توانند به صورت انتزاعی در نظر گرفته شوند، اما برای نزدیک شدن خروجی‌ها با واقعیت و همچنین ارائه یک مثال ساده از کاربرد مدل پیشنهادی، سکوی متروی شهر تهران برای مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. البته اندازه‌ها و ابعاد ایستگاه‌های مختلف در متروی تهران با هم متفاوت است که دراین مطالعه اندازه‌های تیپ کلی این ایستگاه‌ها با توجه به اندازه‌گیری میدانی از ایستگاه مترو تهران در نظر گرفته شده است. طول سکو انتظار مسافران ۱٤٥ متر و عرض آن ٥ متر در نظر گرفته شده است (مطابق برداشت میدانی از ایستگاه شاهد تهران) ابعاد خروجی‌ها به طور متوسط ٤,٥ متر است. همچنین ضخامت خروجی‌ها ۰,۸ متر معادل دو برابر اندازه حریم افراد فرض شده است. در این مطالعه تعداد خروجی‌ها به عنوان یک متغیر برای بررسی کیفیت تخلیه از ایستگاه در حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده است.

تمام رویکرد شبیه‌سازی در این مطالعه در نرم‌افزار نت‌لوگو کدنویسی شده است. این نرم‌افزار یک ابزار شبیه‌سازی قدرتمند در زمینه مدل‌های عامل-بنیان است. مولفه‌های اصلی در این نرم‌افزار Patch (سلول)، Turtle(عامل) و Link (یال) هستند. قسمت (الف) شکل ٥ نمای کلی از شبیه‌سازی محیط مطالعه موردی در این نرم‌افزار است که در آن متغیرهای قابل تنظیم نیز مشخص است. در پنجره شبیه‌سازی ناحیه سفید رنگ سکوی انتظار مترو، نواحی زرد رنگ خروجی‌ها و نواحی سیاه دیوارها، ستون‌ها و به طور کلی موانع عبوری هستند.




**شکل۵ (الف) محیط ساخته شده و رابط کاربری پرداخت شده در نرم‌افزار نت‌لوگو برای مدل پیشنهادی، (ب) الگوی تخلیه افراد از نواحی مختلف محیط شبیه‌سازی شده**

به منظور درست‌آزمایی مدل شبیه‌سازی ارائه شده در مطالعه، شاخص‌های اصلی در این خصوص بر اساس ادبیات موجود، مورد بررسی قرار گرفت [Ronchi, Kuligowski et al. Lubaś, Mycek et al. 2014 and 2013]. بر این اساس آزمایشات کیفی پایه از جمله حرکت و جهت‌یابی منطقی عاملان، قابلیت حفظ سرعت تعریف شده و اجتناب از برخورد با موانع و دیوارها، تعامل اجتماعی و انتخاب بهترین جهت در راستای خروج از محیط به صورت دقیق مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۵ قسمت ب الگوی کلی حرکت افراد برای تخلیه از سکوی مترو را پس از اجرای شبیه‌سازی برای حالت چهار خروجی نشان می‌دهد که در آن افراد قبل از تخلیه در نقاط مختلف سکو پخش شده‌اند.

برای اجرای شبیه‌سازی در یک محیط دینامیک، فرض شده است یک حادثه مخرب (مثلاً یک زلزله) در حال وقوع است که به صورت تصادفی در هر لحظه باعث خرابی المان‌ها یا بخش‌هایی از محیط خواهد شد. این اثرات ممکن است باعث شود بخشی از محیط غیر قابل تردد شود. البته در این مطالعه از آنجا که تمرکز بر روی فرآیند تخلیه و نحوه حرکت عاملان در محیط دینامیک است، آسیب‌های جسمی عاملان و تلفات ناشی از حادثه در نظر گرفته نشده است که می‌تواند در مطاللعات بعدی مورد توجه باشد.

در این مطالعه از دو شاخص برای سنجش کیفیت حرکت افراد در محیط یا فرآیند تخلیه استفاده شده است. شاخص اول زمان تخلیه است که یک از شاخص‌های بسیار شناخته شده در ادبیات این مقوله است. این شاخص به خوبی می‌تواند نشانگر کیفیت فرآیند تخلیه در وضعیت‌های مختلف محیطی باشد. در این مطالعه زمان کلی که برای تخلیه همه افراد از سکوی مترو به بیرون از آن لازم است به عنوان زمان تخلیه تعریف شده است. با استفاده از این شاخص کمی می‌توان سناریوهای

مختلف طراحی را برای یک محیط از نظر فرآیند تخلیه بررسی و مقایسه نمود.

دومین شاخص جریان تخلیه (یا نرخ خروج از ایستگاه) است. این شاخص در صورتی که جریان اشباع را نشان دهد، می‌تواند بیانگر ظرفیت عملی خروجی‌های ایستگاه در هنگام اضطرار باشد. ظرفیت تخلیه اضطراری (EEC) است که عبارتست از جریان بیشینه عبوری یا خارج شده از خروجی در یک بازه زمانی مشخص که در این مطالعه با توجه به جریان تخلیه به طور منطقی ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. با فرض ثابت بودن چگالی افراد در هنگام تخلیه، ظرفیت یک خروجی به مشخصات فیزیکی آن بستگی دارد. بر این اساس ظرفیت خروجی را می‌توان از معادله ۳ به دست آورد:

$$C_{ex}=vk(l_{ex}) \qquad (۳)$$

که در آن $C_{ex}$ ظرفیت خروجی (p/s)، v سرعت تخلیه افراد در خروجی (m/s)، k چگالی افراد در دهانه خروجی در زمان تخلیه ($p/m^2$) و $l_{ex}$ طول مفید (m) خروجی است.

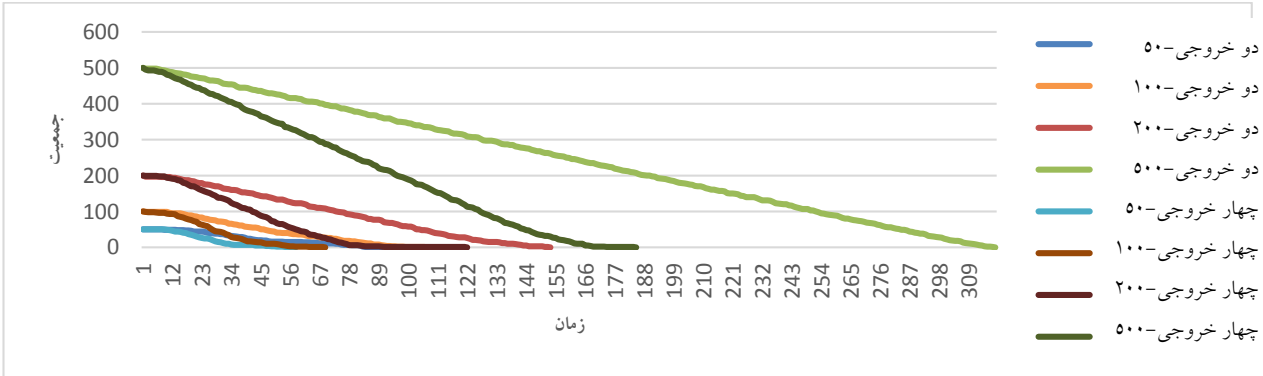
## ٤. نتایج شبیه‌سازی

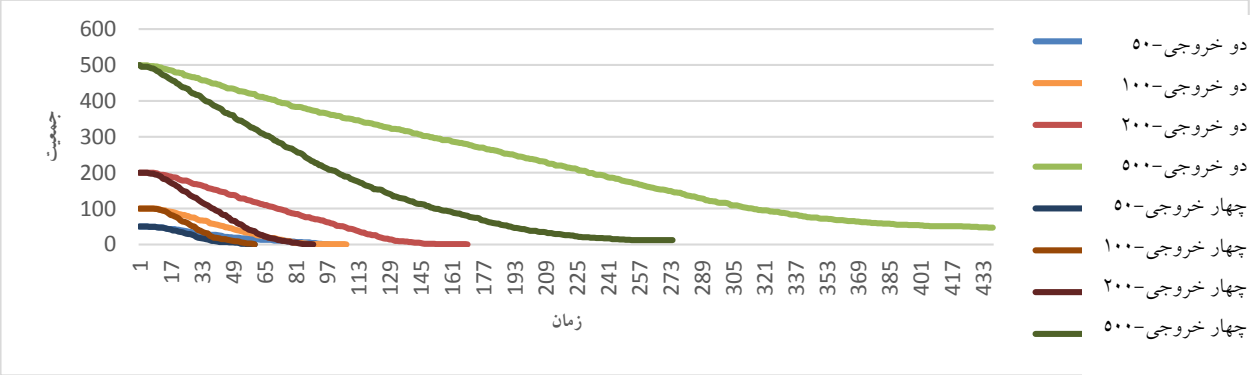
برای انجام شبیه‌سازی ابتدا سناریوهای مختلف برای بررسی تأثیرات خصوصیات فیزیکی خروجی‌ها تعریف شد. تعداد خروجی‌ها، اندازه جمعیت و وضعیت حادثه مخرب (وجود یا عدم وجود) به عنوان متغیر مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۱ مقدار متغیرها را در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.

**جدول ۱. مشخصات سناریوهای مورد آزمایش**

| شماره سناریو | جمعیت | تعداد خروجی | وضعیت حادثه مخرب |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۵۰ | ۲ | ۰ |
| ۲ | | | ۱ |
| ۳ | | ٤ | ۰ |
| ٤ | | | ۱ |
| ٥ | ۱۰۰ | ۲ | ۰ |
| ٦ | | | ۱ |
| ۷ | | ٤ | ۰ |
| ۸ | | | ۱ |
| ۹ | ۲۰۰ | ۲ | ۰ |
| ۱۰ | | | ۱ |
| ۱۱ | | ٤ | ۰ |
| ۱۲ | | | ۱ |
| ۱۳ | ٤۰۰ | ۲ | ۰ |
| ۱٤ | | | ۱ |
| ۱٥ | | ٤ | ۰ |
| ۱٦ | | | ۱ |

در این جدول وجود یا عدم وجود حادثه مخرب به ترتیب با ۱ یا ۰ نشان داده شده است. همچنین چهار گروه برای تعداد جمعیت مورد آزمایش قرار گرفت که عبارتند از ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰ نفر. تعداد درهای خروجی برای تخلیه افراد از ایستگاه مترو در دو حالت ۲ در و ٤ در مورد آزمایش قرار گرفت. مدل شبیه‌سازی برای هر سناریو به تعداد ٤ تکرار اجرا و نتایج ثبت شد که در مجموع معادل ٦٤ تکرار شبیه‌سازی انجام شد. شکل ٦ تعداد افرادی که در سکوی ایستگاه مترو هستند را برای سناریوهای مختلف و در گامهای زمانی مختلف در دو حالت وجود حادثه مخرب و عدم وجود آن نمایش می‌دهد. شیب این خطوط نشانگر سرعت تخلیه افراد از محل است.






**شکل ٦. تعداد افراد حاضر در سکوی مترو در هر لحظه-الف: عدم وجود حادثه مخرب، ب: وجود حادثه مخرب**

متوسط جریان تخلیه (AEF[٦])، بیشینه جریان تخلیه (MEF[٧]) و زمان کلی تخلیه (TET[٨]) به عنوان سه شاخص کیفیت تخلیه در شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲ آمار توصیفی کلی شامل متوسط و انحراف معیار این سه متغیر وابسته در مدل شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد. با توجه به وجود سه متغیر مستقل در مدل شبیه‌سازی، برای بررسی تأثیرهای مختلف این متغیرها بر روی شاخص‌ها (متغیرهای وابسته) از تحلیل واریانس چند متغیره (MANOVA)[٩] استفاده شد. بنابراین سه تحلیل واریانس به صورت جداگانه صورت گرفت که در ادامه نتایج آنها بررسی خواهند شد. فرضیه‌های تهی یا صفر (H0) برای هر یک از تحلیلهای واریانس به صورت زیر است (برای بیشینه جریان تخلیه (MEF) به عنوان نمونه نوشته شده است):

H0: اندازه جمعیت هیچ تأثیری بر روی بیشینه جریان تخلیه از مکان مورد نظر ندارد

H0: تعداد خروجی هیچ تأثیری بر روی بیشینه جریان تخلیه از مکان مورد نظر ندارد

H0: وجود یا عدم وجود حادثه مخرب هیچ تأثیری بر بیشینه جریان تخلیه از مکان مورد نظر ندارد

H0: اندرکنش اندازه جمعیت و تعداد خروجی هیچ تأثیری بر روی بیشینه جریان تخلیه از مکان مورد نظر ندارد

H0: اندرکنش اندازه جمعیت و وجود حادثه مخرب هیچ تأثیری بر بیشینه جریان تخلیه از مکان مورد نظر ندارد

H0: اندرکنش تعداد خروجی و وجود حادثه مخرب هیچ تأثیری بر روی بیشینه جریان تخلیه از مکان مورد نظر ندارد

**جدول ۲. آمار توصیفی کلی در سناریوهای مختلف شبیه‌سازی**

| جمعیت | خروجی | حادثه مخرب | متوسط جریان تخلیه (AEF) | | بیشینه جریان تخلیه(MEF) | | زمان کلی تخلیه (TET) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | میانگین | S. D. | میانگین | S. D. | میانگین | S. D. |
| ۵۰ | ۲ | ۰ | ۰,٤٧ | ۰,۰٤ | ۱,۰۷٥ | ۰,۲۰٦ | ٥٨,۰٥ | ٤,٧٦ |
| | | ۱ | ۰,٤٧ | ۰,۰۳ | ۱,۰٥۰ | ۰,۱۲۹ | ٥٨,٥۰ | ۳,٤٨ |
| | ٤ | ۰ | ۰,٧٦ | ۰,۰٦ | ۱,۸۲٥ | ۰,۱۷۱ | ۳٥,۸٥ | ۲,۷۹ |
| | | ۱ | ۰,٧٤ | ۰,۰٦ | ۱,۹۰۰ | ۰,۲٤٥ | ۳۷,۰٥ | ۳,۰۷ |
| ۱۰۰ | ۲ | ۰ | ۰,۸٦ | ۰,۰۷ | ۱,٥٥۰ | ۰,۰٥۸ | ٦۳,۱٥ | ٤,٦۰ |
| | | ۱ | ۰,۸۳ | ۰,۰۸ | ۱,٦۷٥ | ۰,۰۹٦ | ٦٥,۷۰ | ٦,۰۷ |
| | ٤ | ۰ | ۱,۲٦ | ۰,۱٤ | ۲,۹٥۰ | ۰,۱۷۳ | ٤۳,۲۰ | ٤,۹۷ |
| | | ۱ | ۱,۱۹ | ۰,۲۸ | ۲,۸٥۰ | ۰,۱۲۹ | ٤۷,۷۰ | ۱۱,٤۳ |
| ۲۰۰ | ۲ | ۰ | ۱,۲۳ | ۰,۰٦ | ۱,۸٥۰ | ۰,۰٥۸ | ۸۷,۹۰ | ۳,۸۱ |
| | | ۱ | ۱,۱٤ | ۰,۱٤ | ۱,۷۷٥ | ۰,۰٥ | ٤٥۲,۷۰ | ۲۳٤,۸۸ |
| | ٤ | ۰ | ۱,٦۲ | ۰,۱۲ | ۳,۳۷٥ | ۰,۰۹٦ | ٦٦,۷٥ | ٤,۹۳ |
| | | ۱ | ۱,۷٦ | ۰,۳۹ | ۳,۳۷٥ | ۰,۱٥۰ | ۸٥,۸۰ | ٥۹,۷۱ |
| ٥۰۰ | ۲ | ۰ | ۱,۳۸ | ۰,۰۳ | ۱,۹۲٥ | ۰,۰٥ | ۱۹٥,۳۰ | ۳,٥۸ |
| | | ۱ | ۰,۸۲ | ۰,۱۰ | ۱,۸۷٥ | ۰,۰۹٦ | ٥۹٥,٥۰ | ۷,۲۱ |
| | ٤ | ۰ | ۲,۲۷ | ۰,۱۳ | ۳,٤۷٥ | ۰,۰٥۰ | ۱۱۸,۲۰ | ٦,۸۱ |
| | | ۱ | ۱,۹٤ | ۰,۲۲ | ۳,٤۰۰ | ۰,۱٦۳ | ٥۷٦,۹۰ | ٥۹,٥۹ |
| کل | ۲ | ۰ | ۰,۹۸ | ۰,۳٦ | ۱,٦۰۰ | ۰,۳٦۰ | ۱۰۱,۱۰ | ٥۷,٤۹ |
| | | ۱ | ۰,۸۱ | ۰,۲٦ | ۱,٥۹٤ | ۰,۳٤۳ | ۲۹۳,۱۰ | ۲٦٥,۸۹ |
| | ٤ | ۰ | ۰,۹۰ | ۰,۳۲ | ۱,٥۹۷ | ۰,۳٤٦ | ۱۹۷,۱۰ | ۲۱۲,۸۹ |
| | | ۱ | ۱,٤۸ | ۰,٥۸ | ۲,۹۰٦ | ۰,٦۸٦ | ٦٦,۰۰ | ۳۳,٥۹ |
| | | | ۱,٤۱ | ۰,٥٤ | ۲,۸۸۱ | ۰,٦٤۷ | ۱۸٦,۸٦ | ۲۳٦,٤۱ |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | کل | ۱,٤٤ | ۰,۵۵ | ۲,۸۹٤ | ۰,٦٥٦ | ۱۲٦,٤۳ | ۱۷۷,۰۹ |
| | ۰ | ۱,۲۳ | ۰,۵٤ | ۲,۲۵۳ | ۰,۸۵۵ | ۸۳,۵۵ | ٤۹,٦۳ |
| ط | ۱ | ۱,۱۱ | ۰,۵۲ | ۲,۲۳۸ | ۰,۸۲۹ | ۲۳۹,۹۸ | ۲۵۳,۳۱ |
| | کل | ۱,۱۷ | ۰,۵۳ | ۲,۲۵٤ | ۰,۸۳۵ | ۱٦۱,۷۷ | ۱۹۷,٤۹ |

قبل از انجام تحلیل واریانس، آزمون همگنی واریانس‌ها انجام شد که بر اساس تست لون[۱۰] مشخص شد برای بیشینه جریان تخلیه می‌توان فرض همگنی واریانس‌ها را در نظر گرفت ولی در دو متغیر وابسته دیگر (زمان کل تخلیه و متوسط جریان تخلیه) این فرض تقریبا رد می‌شود. این امر می‌تواند انجام تحلیل واریانس را زیر سوال ببرد. حال آنکه با بررسی بیشتر مشخص شد در مواردی که حادثه مخرب وجود دارد در برخی از سناریوها حتی ممکن است تخلیه به طور کامل صورت نگیرد که این امر باعث ایجاد ناهمگونی در فرآیند تخلیه می‌شود. اما این ناهمگونی تنها به بخش بسیار کوتاهی از فرآیند تخلیه مرتبط است و درصد بیشتر افراد به صورت همگون تخلیه می‌شوند. به عبارت دیگر فرض نرمال بودن داده‌ها در واقع برای همه داده‌ها صادق است فقط بخش اندکی از این داده‌ها (انتهای نمودار تخلیه در حالت وجود حادثه مخرب) این فرض را نقض می‌کند. بنابراین به طور کلی استفاده مؤثر از تحلیل واریانس برای این موضوع و همچنین درست و مفید بودن آن رد نمی‌شود.

### ٤-۱ زمان تخلیه کل (TET)

زمان تخلیه کل، به زمانی اطلاق می‌شود که در آن کل افراد از محل مورد نظر تخلیه شوند. جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس را برای این متغیر وابسته بین متغیرهای مستقل نمایش می‌هد. واضح است اندازه جمعیت، تعداد خروجی‌ها و وجود حادثه مخرب هر کدام به تنهایی در میزان زمان تخلیه کل مؤثر هستند. در مورد تأثیر اندرکنش‌ها نیز اختلافات بین گروه‌ها برای همه به جز اندرکنش تعداد خروجی و وجود حادثه مخرب معنادار است.

با توجه به معنادار بودن اختلاف میانگین برای اندازه‌های مختلف جمعیت مقایسه مقادیر درون گروهی نیز برای مقادیر زمان تخلیه صورت گرفت. نتایج جدول ٤ نشان می‌دهد اختلاف زمان تخلیه کل بین همه گروه‌های جمعیت به جز جمعیت ۵۰ و ۱۰۰ معنادار است. جالب اینکه مقدار p-value بالای بین جمعیتهای ۵۰ و ۱۰۰ (۰,۹۸٦) نشان می‌دهد که زمان تخلیه در این دو گروه جمعیتی اختلاف زیادی با هم ندارند. این امر نشان می‌دهد در حالتی که جمعیت ۵۰ یا ۱۰۰ نفر بوده فرآیند تخلیه بدون ازدحام و تشکیل صف در خروجی‌ها صورت گرفته است.

**جدول۳. تحلیل واریانس تأثیرات متغیرهای مستقل بر روی زمان تخلیه کل**

| منشا تغییرات | مجموع مربعات کل | درجه آزادی | میانگین مربعات | آماره F | معناداری |
|---|---|---|---|---|---|
| جمعیت | ۱۰۹۷۷۷۷,۵۸۲ | ۳ | ۳٦۵۹۲۵,۸٦۱ | ۹۳,۳۷۳ | ۰,۰۰۰ |
| تعداد خروجی | ۷۹۹۰۵,۱۵٦ | ۱ | ۷۹۹۰۵,۱۵٦ | ۲۰,۳۸۹ | ۰,۰۰۰ |
| وجود حادثه مخرب | ۳۹۱۵۳۱,۷۷٦ | ۱ | ۳۹۱۵۳۱,۷۷٦ | ۹۹,۹۰۷ | ۰,۰۰۰ |
| جمعیت * تعداد خروجی | ۸۳۱۸۱,٦٦۲ | ۳ | ۲۷۷۲۷,۲۲۱ | ۷,۰۷۵ | ۰,۰۰۰ |
| جمعیت * حادثه مخرب | ٤۹۳۵۷۰,٦۸۲ | ۳ | ۱٦٤۵۲۳,۵٦۱ | ٤۱,۹۸۱ | ۰,۰۰۰ |
| تعداد خروجی * حادثه مخرب | ۲۰۲٤۲,۱۷٦ | ۱ | ۲۰۲٤۲,۱۷٦ | ۵,۱٦۵ | ۰,۰۲۸ |
| جمعیت * خروجی * حادثه مخرب | ۱۰۲۷۲۷,۵۰۲ | ۳ | ۳٤۲٤۲,۵۰۱ | ۸,۷۳۸ | ۰,۰۰۰ |
| a. R Squared = ۰,۹۲۳ | | | | | |

**جدول٤.. مقایسه‌های چندگانه درون گروهی جمعیت بر اساس زمان تخلیه کل**

| | جمعیت (I) | جمعیت (J) | تفاوت میانگین (I-J) | خطای استاندارد | معناداری | 95% Confidence Interval | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | حد پایین | حد بالا |
| Tukey HSD | ۵۰ | ۱۰۰ | -۷,۵۷۵ | ۲۲,۱۳۳۰ | ۰,۹۸۶ | -٦٦,٤٧٩ | ۵۱,۳۲۹ |
| | | ۲۰۰ | -۱۲۵,۹۲۵* | ۲۲,۱۳۳۰ | ۰,۰۰۰ | -۱۸٤,۸۲۹ | -٦۷,۰۲۱ |
| | | ۵۰۰ | -۳۲٤,۱۱۳* | ۲۲,۱۳۳۰ | ۰,۰۰۰ | -۳۸۳,۰۱۷ | -۲٦۵,۲۰۸ |
| | ۱۰۰ | ۵۰ | ۷,۵۷۵ | ۲۲,۱۳۳۰ | ۰,۹۸٦ | -۵۱,۳۲۹ | ٦٦,٤۷۹ |
| | | ۲۰۰ | -۱۱۸,۳۵۰* | ۲۲,۱۳۳۰ | ۰,۰۰۰ | -۱۷۷,۲۵٤ | -۵۹,٤٤٦ |
| | | ۵۰۰ | -۳۱٦,۵۳۸* | ۲۲,۱۳۳۰ | ۰,۰۰۰ | -۳۷۵,٤٤۲ | -۲۵۷,٦۳۳ |
| | ۲۰۰ | ۵۰ | ۱۲۵,۹۲۵* | ۲۲,۱۳۳۰ | ۰,۰۰۰ | ٦۷,۰۲۱ | ۱۸٤,۸۲۹ |
| | | ۱۰۰ | ۱۱۸,۳۵۰* | ۲۲,۱۳۳۰ | ۰,۰۰۰ | ۵۹,٤٤٦ | ۱۷۷,۲۵٤ |
| | | ۵۰۰ | -۱۹۸,۱۸۸* | ۲۲,۱۳۳۰ | ۰,۰۰۰ | -۲۵۷,۰۹۲ | -۱۳۹,۲۸۳ |
| | ۵۰۰ | ۵۰ | ۳۲٤,۱۱۳* | ۲۲,۱۳۳۰ | ۰,۰۰۰ | ۲٦۵,۲۰۸ | ۳۸۳,۰۱۷ |
| | | ۱۰۰ | ۳۱٦,۵۳۸* | ۲۲,۱۳۳۰ | ۰,۰۰۰ | ۲۵۷,٦۳۳ | ۳۷۵,٤٤۲ |
| | | ۲۰۰ | ۱۹۸,۱۸۸* | ۲۲,۱۳۳۰ | ۰,۰۰۰ | ۱۳۹,۲۸۳ | ۲۵۷,۰۹۲ |

*با دقت ۰,۰۵ معنادار

در این حالت موقعیت فیزیکی در محیط و سرعت حرکت افراد تعیین کننده زمان تخلیه کل است. پس در این دو گروه جمعیتی می‌توان گفت افراد با کمترین سرعت حرکت و در دورترین نقطه نسبت به موقعیت خروجی‌ها، تعیین کننده زمان تخلیه کل بوده‌اند. در حالی که در گروه‌های جمعیتی دیگر به دلیل تشکیل ازدحام در خروجی‌ها فرآیند تخلیه به موارد دیگری از جمله ظرفیت خروجی‌ها وابسته بوده است.

### ٤-۲ متوسط جریان یا نرخ تخلیه (AEF)

متوسط جریان تخلیه عبارتست از تعداد افرادی که در سناریوهای مختلف در هر ثانیه به صورت موفقیت آمیز از سکوی مترو خارج شده‌اند. در این مطالعه برای محاسبه متوسط جریان تخلیه، ابتدا تعداد افراد خارج شده از محیط در ۱۰ ثانیه محاسبه شده و سپس این تعداد تقسیم بر ۱۰ شده است.

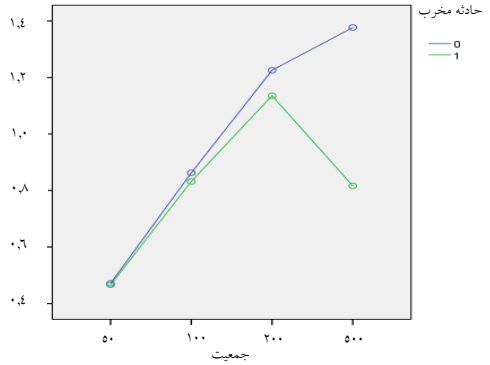
در تحلیل بین‌گروهی اختلاف میانگین‌ها براساس گروه‌های جمعیت، تعداد خروجی و حادثه مخرب هر کدام به تنهایی معنادار بوده، البته مقدار p-value برای حادثه مخرب کمی بیشتر از متغیرهای دیگر است. اندرکنش حادثه مخرب با تعداد خروجی و همچنین اندرکنش هر سه متغیر مستقل با هم تأثیر معناداری در متوسط نرخ تخلیه ندارند (جدول ۵)

شکل ۷ متوسط جریان تخلیه را در حالت دو خروجی برای گروه جمعیت‌های مختلف در دوحالت وجود و عدم وجود حادثه مخرب نمایش می‌دهد. شیب خطوط در نمودار با افزایش جمعیت کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد در جمعیت‌های بالا با افزایش ازدحام سرعت تخلیه تحت‌الشعاع قرار می‌گیرد. حال این تأثیر در حالت وجود حادثه مخرب با توجه به اینکه برخی از مسیرها از بین می‌رود و دامنه حرکت افراد محدود می‌شود، بسیار شدیدتر است. در نمودار نیز در حالت وجود حادثه مخرب از جمعیت ۲۰۰ نفر به ۵۰۰ نفر متوسط نرخ تخلیه کاهش یافته است.

**جدول ۵. تحلیل واریانس تأثیرات متغیرهای مستقل بر روی متوسط جریان**

| منشا تغییرات | مجموع مربعات کل | درجه آزادی | میانگین مربعات | آماره F | معناداری |
|---|---|---|---|---|---|
| جمعیت | ۹,٤۳۰ | ۳ | ۳,۱٤۳ | ۱۳۲,۱۵۵ | ۰,۰۰۰ |
| تعداد خروجی | ٤,۷۲۸ | ۱ | ٤,۷۲۸ | ۱۹۸,۷۹۷ | ۰,۰۰۰ |
| وجود حادثه مخرب | ۰,۲۳٦ | ۱ | ۰,۲۳٦ | ۹,۹٤۲ | ۰,۰۰۳ |
| جمعیت * تعداد خروجی | ۱,۲٦۰ | ۳ | ۰,٤۲۰ | ۱۷,٦٦٤ | ۰,۰۰۰ |
| جمعیت * حادثه مخرب | ۰,۵۷۳ | ۳ | ۰,۱۹۱ | ۸,۰۲۹ | ۰,۰۰۰ |
| تعداد خروجی * حادثه مخرب | ۰,٤۰ | ۱ | ۰,۱۰ | ۱,٦۸۱ | ۰,۲۰۱ |
| جمعیت * خروجی * حادثه مخرب | ۰,٦۳ | ۳ | ۰,۰۲۱ | ۰,۸۷۹ | ۰,٤۵۹ |

a. R Squared = ۰,۰۹۳۵




**شکل ۷: مقایسه تغییرات متوسط جریان تخلیه در دو حالت وجود یا عدم وجود حادثه مخرب**

## ٤-۳ بیشینه نرخ تخلیه (MEF)

بیشینه نرخ تخلیه به عنوان یک شاخص مهم در این مطالعه در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. حال این سوال مطرح می‌شود که چرا بیشینه نرخ تخلیه در حالت‌های مختلف دارای اهمیت است. به طور کلی شاخص بیشینه جریان (از یک معبر یا خروجی) می‌تواند نشانگر ظرفیت (آن معبر یا خروجی) باشد. در این مطالعه نیز بیشینه نرخ تخلیه از خروجی‌های سکوی ایستگاه مترو در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت تا ظرفیت عملی ایستگاه در فرآیند تخلیه تخمین زده شود. در محاسبه این شاخص نیز همانند شاخص متوسط نرخ تخلیه از تخلیه افراد در بازه‌های زمانی ۱۰ ثانیه استفاده شد (تعداد افراد خارج شده در ۱۰ ثانیه، تقسیم بر ۱۰)

جدول ٦ تأثیرات بین گروهی متغیرهای مستقل را بر بیشینه نرخ تخلیه نمایش می‌دهد. بر این اساس هم میزان جمعیت و هم تعداد خروجی‌ها تأثیر معناداری در این شاخص دارند اما وجود یا عدم وجود حادثه مخرب باعث اختلاف معناداری در متوسط این شاخص نشده است. تأثیر اندرکنش این متغیر مستقل با دیگر متغیرها نیز معنادار نیست. این نتیجه قابل انتظار است زیرا اگر قرار باشد بیشینه نرخ تخلیه، نماینده ظرفیت عملی خروجی سکوی مترو باشد، به طور منطقی وجود یا عدم وجود حادثه مخرب نباید تأثیر معناداری بر ظرفیت سکوی ایستگاه داشته باشد.

همچنین جمعیت‌های مختلف نیز نباید در ظرفیت ایستگاه تأثیر چندانی داشته باشند حال آنکه بررسی تحلیل بین گروهی، اختلاف معناداری را در متوسط بیشینه جریان تخلیه در گروه‌های مختلف این متغیر نشان می‌دهد. البته باید عنوان کرد جمعیت می‌تواند در چگالی افراد در دهانه خروجی تأثیرگذار است که این متغیر با توجه به معادله ۳ در ظرفیت خروجی‌ها مؤثر است. اما باید در نظر گرفت این تأثیر غیر مستقیم با توجه به به وجود آمدن ازدحام و تشکیل صف در جمعیت‌های بالا و متعاقبا یکسان بودن تراکم افراد در دهانه خروجی، نباید تأثیر معناداری در ظرفیت خروجی‌ها داشته باشد. بر این اساس در مقایسه‌های دو به دوی درون گروهی (جدول ۷) به طور واضح مشخص می‌شود بیشینه نرخ تخلیه در تخلیه ۲۰۰ نفر و ۵۰۰ نفر اختلاف چندانی با هم ندارند. در تفسیر این نتایج می‌توان گفت که در جمعیت‌های زیر ۲۰۰ نفر در واقع میزان جمعیت به ظرفیت محیط مورد مطالعه نرسیده است. بنابراین با رشد

جمعیت نرخ بیشتری از تخلیه حاصل می‌شود. با توجه به جدول ۲ در حالت دو خروجی می‌توان بیان کرد ظرفیت عملی تخلیه سکوی مترو حدود ۱,۹ نفر در هر ثانیه است. این عدد برای حالت ٤ در خروجی به ۳,٤ می‌رسد.

**جدول ٦. تحلیل واریانس تأثیرات متغیرهای مستقل بر روی بیشینه نرخ تخلیه**

| منشا تغییرات | مجموع مربعات کل | درجه آزادی | میانگین مربعات | آماره F | معناداری |
|---|---|---|---|---|---|
| جمعیت | ١٤,٦١٨ | ٣ | ٤,٨٧٣ | ٢٧٢,٧٥٥ | ٠,٠٠٠ |
| تعداد خروجی | ٢٦,٩١٠ | ١ | ٢٦,٩١٠ | ١٥٠٦,٣٤١ | ٠,٠٠٠ |
| وجود حادثه مخرب | ٠,٠٠٤ | ١ | ٠,٠٠٤ | ٠,٢١٩ | ٠,٦٤٢ |
| جمعیت * تعداد خروجی | ١,٥٠٢ | ٣ | ٠,٥٠١ | ٢٨,٠٢٠ | ٠,٠٠٠ |
| جمعیت * حادثه مخرب | ٠,٢٠ | ٣ | ٠,٠٠٧ | ٠,٣٨٢ | ٠,٧٦٦ |
| تعداد خروجی * حادثه مخرب | ٠,٠٠١ | ١ | ٠,٠٠١ | ٠,٠٧٩ | ٠,٧٨٠ |
| جمعیت * خروجی * حادثه مخرب | ٠,٠٦٥ | ٣ | ٠,٠٢٢ | ١,٢٢٢ | ٠,٣١٢ |
| a. R Squared = ٠,٩٨١ | | | | | |

**جدول ۷. مقایسه‌های چندگانه درون گروهی جمعیت بر اساس بیشینه جریان تخلیه**

| | جمعیت (I) | جمعیت (J) | تفاوت میانگین (I-J) | خطای استاندارد | معناداری | 95% Confidence Interval | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | حد پایین | حد بالا |
| Tukey HSD | ۵۰ | ۱۰۰ | -۰,۷۹٤* | ۰,۰٤۷۳ | ۰,۰۰۰ | -۰,۹۲۰ | -۰,٦٦۸ |
| | | ۲۰۰ | -۱,۱۳۱* | ۰,۰٤۷۳ | ۰,۰۰۰ | -۱,۲۵۷ | -۱,۰۰۵ |
| | | ۵۰۰ | -۱,۲۰٦* | ۰,۰٤۷۳ | ۰,۰۰۰ | -۱,۳۳۲ | -۱,۰۸۰ |
| | ۱۰۰ | ۵۰ | ۰,۷۹٤* | ۰,۰٤۷۳ | ۰,۰۰۰ | ۰,٦٦۸ | ۰,۹۲۰ |
| | | ۲۰۰ | -۰,۳۳۸* | ۰,۰٤۷۳ | ۰,۰۰۰ | -۰,٤٦۳ | -۰,۲۱۲ |
| | | ۵۰۰ | -۰,٤۱۳* | ۰,۰٤۷۳ | ۰,۰۰۰ | -۵۳۸.- | -۰,۲۸۷ |
| | ۲۰۰ | ۵۰ | ۱,۱۳۱* | ۰,۰٤۷۳ | ۰,۰۰۰ | ۱,۰۰۵ | ۱,۲۵۷ |
| | | ۱۰۰ | ۰,۳۳۸* | ۰,۰٤۷۳ | ۰,۰۰۰ | ۰,۲۱۲ | ۰,٤٦۳ |
| | | ۵۰۰ | -۰,۷۵ | ۰,۰٤۷۳ | ۰,۳۹۵ | -۰,۲۰۱ | ۰,۰۵۱ |
| | ۵۰۰ | ۵۰ | ۱,۲۰٦* | ۰,۰٤۷۳ | ۰,۰۰۰ | ۱,۰۸۰ | ۱,۳۳۲ |
| | | ۱۰۰ | ۰,٤۱۳* | ۰,۰٤۷۳ | ۰,۰۰۰ | ۰,۲۸۷ | ۰,۵۳۸ |
| | | ۲۰۰ | ۰,۰۷۵ | ۰,۰٤۷۳ | ۰,۳۹۵ | -۰,۵۱ | ۰,۲۰۱ |
| *با دقت ۰,۰۵ معنادار | | | | | | | |

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای مطالعات آینده

در این مطالعه یک رویکرد جدید عامل-بنیان برای شبیه‌سازی فرآیند تخلیه افراد در حالت‌های مختلف ارائه شده که در آن افراد به صورت منطقی در نقاط مختلف محیط حرکت کرده و با محیط و همدیگر در تعامل هستند. هر فرد به صورت مستقل توانایی انتخاب و تصمیم برای جزئیات حرکتی خود را دارند. سکوی متروی تهران به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است و نتایج نشان می‌دهد مدل به صورت موفق توانایی شبیه‌سازی تخلیه افراد از سکوی مترو در حالات مختلف را دارد.

تحلیل آماری خروجی شبیه‌سازی مطالعه موردی نشان داد، تعداد جمعیت افراد در صورتی که باعث ازدحام در دهانه خروجی‌ها شود قطعا در زمان تخلیه کل تأثیرگذار است. در جمعیت کمتر از ۱۰۰ نفر زمان تخلیه افراد به سرعت افراد یا توانایی فیزیکی آنها در تخلیه سریع تعیین کننده زمان تخلیه کل است. نرخ یا جریان تخلیه می‌تواند شاخصی برای ارزیابی قابلیت فیزیکی محیط در فرآیند تخلیه باشد. حل تحلیل جریان تخلیه در مدل شبیه‌سازی شده این مطالعه نشان داد اگر حادثه مخربی هنگام تخلیه وجود داشته باشد متوسط نرخ تخلیه برای جمعیت ۲۰۰ نفر بیشتر از ۵۰۰ نفر است در حالی که در صورت عدم وجود حادثه مخرب نرخ تخلیه جمعیت ۵۰۰ نفر بیشتر خواهد بود. بیشینه نرخ تخلیه نماینده ظرفیت محیط در تخلیه افراد است. در حالت وجود دو خروجی ظرفیت محیط حدود ۱,۹ و در حالت چهار خروجی ۳,٤ نفر در ثانیه است.

در مطالعات آینده می‌توان از پتانسیل مدل ارائه شده در ترکیب با ابزارهای مختلف سازه‌ای از جمله مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BDI) استفاده نمود و ابزار واحدی را برای شبیه‌سازی ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها ارائه کرد که می‌تواند به صورت گسترده در طراحی‌ها مورد استفاده قرار گیرد. همچنین در این مطالعه به صورت مختصر یک حادثه مخرب شبیه‌سازی شد که این مورد می‌تواند به صورت دقیقتر با به کارگیری مدل‌های مرتبط نظیر مدل‌های پاسخ دینامیک سازه (SRM) رویکرد دقیقتری ارائه نمود. همچنین قابلیت مدل ارائه شده برای در نظر گرفتن جزئیات مسائل روحی و روانی و خصوصیات افراد مختلف از جمله تفاوت میان رفتار زن و مرد، می‌توان در مطالعات آینده مورد توجه قرار گیرد.

## ٦. پی‌نوشت‌ها

1) Macro-simulation
2) Mesoscopic level
3) Micro-simulation
4) Agent-Based Modelling
5) Belief–Desire–Intention
6) Average evacuation flow
7) Maximum evacuation flow
8) Total evacuation time
9) Multivariate analysis of variance
10) Levene’s test

## ۷. مراجع

-روشنی، س. (۱۳۹۷) "کاربرد مدل سازی عامل-بنیان در تحلیل سیستم های پیچیدهٔ اجتماعی: روش شناسی تحلیل سیستم های نوآوری"، فصلنامه علمی-ترویجی سیاست‌نامه علم و فناوری، دوره ۸، شماره ۲، ص ۵۹-۷۰.

-سلخی خسرقی، گ.، غفاری، ع.، چناقلو، م. ر.، شهبازی، ی. (۱۳۹٤) "کاربرد مدل های عامل-بنیان در شبیه سازی رفتار مسیریابی افراد در محیط های ناآشنا"، دومین کنگره بین المللی افق های جدید در معماری و شهرسازی با رویکرد توسعه و فناوری

-مزرعه فراهانی، م.، چهارسوقی، س. ک.، نخعی کمال آبادی، ع. و تیموری،الف. (۱۳۹۷) "الگوریتم شاخه و کران برای مسئله برون‌بری- مکان‌یابیِ (ایستا و پویای استوار) در لجستیکِ

اضطراری"، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل، دوره ۱۰ شماره ۱، ص ۳۱-۵۲.

-Andrews, C. J., Yi, D., Krogmann, U., Senick, J. A. and Wener, R. E. (2011) "Designing Buildings for Real Occupants: An Agent-Based Approach", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, Vol. 41, No. 6, pp. 1077-1091.

-Borrill, P. L. and Tesfatsion, L. (2010) "Agent-based modeling: the right mathematics for the social sciences?", Staff General Research Papers Archive, Iowa State University, Department of Economics Working Paper No. 10023.

-Botvinick, M. M. (2008) "Hierarchical models of behavior and prefrontal function", Trends in Cognitive Sciences, Vol. 12, No. 5, pp. 201-208.

-Cheng, H. and Yang, X. (2012) "Emergency evacuation capacity of subway stations", Procedia - Social and Behavioral Sciences Vol.43, pp.339-348.

-Cheng, J. C. P. and Gan, V. J. L. (2013) "Integrating Agent-Based Human Behavior Simulation with Building Information Modeling for Building Design" International Journal of Engineering and Technology Vol. 5, No. 4, pp. 473-477.

-Fruin, J. J. (1971) "Pedestrian planning and design", New York, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners.

-Gluckman, P. (2016) "Making decisions in the face of uncertainty: Understanding risk", A paper by Office of the Prime Minister's Chief Science Advisor, Available at http://www.pmcsa.org.nz/

-Gwynne, S. M. V. and Hunt, A. L. E. (2018) "Why Model Evacuee Decision-Making?", Safety science Vol. 110, pp. 457-466.

-Helbing, D. (1998) "A Fluid Dynamic Model for the Movement of Pedestrians", Complex Systems, Vol. 6, pp. 391-415.

-Huang, C. and Ma, W. (2010) "A Statistical Analysis of Pedestrian Speed on Signalized Intersection Crosswalk", Tenth International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP) 2010.

-Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall Jr., J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M., Torero, J. L., Watts Jr., J. M., Wieczorek, C. J. (2016) "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", Springer, New York.

-Joo, J., Kim, N., Wysk, R. A., Rothrock, L., Son, Y.-J., Oh, Y.-g. and Lee, S. (2013) "Agent-based simulation of affordance-based human behaviors in emergency evacuation" Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 32, pp. 99-115.

-Kanth, B. (2017) "Agent-Based Modeling Based Artificial Intelligence Robot for Fire Extinguishing." International Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 07, pp.38-42.

-Lenjani, A., Bilionis, I., Dyke, S. J., Yeum, C. M. and amp; Monteiro, R. (2019) "Accelerating Residential Building Post-Event Data Collection and Analysis Using Artificial Intelligence", arXiv preprint.

-Liu Z., Jacques, C. C., Szyniszewski, S., Guest, J. K., Schafer, B. W., Igusa, T. and Mitrani-Reiser J. (2015) "Agent-Based Simulation of Building Evacuation after an Earthquake: Coupling Human Behavior with Structural Response", Natural Hazards Review, Vol.17, No. 1.

-Liu, R., Jiang, D. and Shi, L. (2016) "Agent-based simulation of alternative classroom evacuation scenarios", Frontiers of Architectural Research, Vol. 5, No. 1, pp. 111-125.

Journal of Artificial Societies and Social Simulation Vol. 17, No. 1.

-Railsback, S. F. and Grimm, V. (2011) "Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction", ISBN: 9780691136745, Princeton University Press.

-Rendón Rozo, K., Arellana, J., Santander-Mercado A. and Jubiz-Diaz, M. (2019) "Modelling building emergency evacuation plans considering the dynamic behaviour of pedestrians using agent-based simulation", Safety Science, Vol. 113, pp. 276-284.

-Ronchi E., Kuligowski, E. D., Reneke, P. A., Peacock, R. D. and Nilsson, D. (2013) "The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models", NIST Technical Note 1822, National Institute of Standards and Technology.

-Rossini, F., Novembri, G. and Fioravanti, A. (2017) "BIM and Agent-Based Model Integration for Construction Management Optimization." 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction.

-Sutton, R. S. and Barto, A. G. (2017) "Reinforcement Learning: An Introduction", The MIT Press.

-Teknomo, K. and Gerilla, G. P. (2008) "Mesoscopic Multi-Agent Pedestrian Simulation", in Inweldi, P. O. (Ed.), Transportation Research Trends, pp. 323-336, New York, Nova Science Publishers.

-Wang, K., Shi, X., Goh, A. P. X., and Qian, S. (2019) "A machine learning based study on pedestrian movement dynamics under emergency evacuation", Fire Safety Journal Vol. 106, pp.163-176.

-Zębala, J & Ciepka, Piotr & Reza, Adam (2012) "Pedestrian acceleration and speeds." Problems of Forensic Sciences, Vol. 91, pp. 227-234.

-Lubaś R., Mycek, M., Porzycki, J. and Wąs, J. (2014) "Verification and Validation of Evacuation Models – Methodology Expansion Proposition." Transportation Research Procedia, Vol. 2, pp. 715-723.

-Ma, L., Chen, B., Qiu, S., Li, Z. and Qiu, X. (2016) "Agent-based modeling of emergency evacuation in a railway station square under sarin terrorist attack", International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, Vol. 8, No. 2.

-Marzouk, M. and Daour, I. A. (2018) "Planning labor evacuation for construction sites using BIM and agent-based simulation", Safety science Vol. 109, pp. 174-185.

-Marzouk, M. and Mohamed, B. (2019) "Integrated agent-based simulation and multi-criteria decision making approach for buildings evacuation evaluation", Safety Science, Vol. 112, pp. 57-65.

-Nelson, H. E. and Mowrer, F. E. (2002) "Emergency movement". In SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed.; di

- Nenno, P.J., (Ed.); Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association: Quincy, MA, USA; pp. 367–380

-Norling, E. (2004) "Folk Psychology for Human Modelling: Extending the BDI Paradigm", Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems - Volume 1. New York, New York, IEEE Computer Society, pp. 202-209.

-Pheasant, S. and Haslegrave, C. M. (2005) "Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work", CRC Press.

-Pluchino, A., Garofalo, C., Inturri, G., Rapisarda A. and Ignaccolo M. (2014) "Agent-Based Simulation of Pedestrian Behaviour in Closed Spaces: A Museum Case Study",

سجاد حسن‌پور، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه علم و صنعت و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران–برنامه‌ریزی حمل‌ونقل را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۹٤ در مقطع دکتری در رشته عمران –برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) قزوین پذیرفته شد. در مقطع دکتری همچنین به طور موفق از دوره ٦ماهه فرصت مطالعاتی در دانشگاه آکلند کشور نیوزلند بهره‌مند شد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان شبیه‌سازی رفتار عابر پیاده و ایمنی در حمل‌ونقل است.

امیرعباس رصافی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۰ از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران–برنامه‌ریزی حمل‌ونقل را در سال ۱۳۷٦ از دانشگاه صنعتی شریف اخذ نمود. در سال ۱۳۸۳ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران–برنامه‌ریزی حمل‌ونقل از دانشگاه صنعتی شریف شد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان توسعه پایدار، مدل‌سازی تقاضا، و شبیه‌سازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) است.