نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال سیزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۴

Vol.13, No.3, Autumn 2025

۹۵ -۱۱۵

مقاله پژوهشی

توسعه یک مدل نیروی اجتماعی به منظور شبیه‌سازی تخلیه عابران پیاده داخل ساختمان

علی آریائی نژاد[۱]، زهرا بهرامیان[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

چکیده

امروزه تخلیه جمعیت عابران پیاده در محیط‌های داخلی ساختمان، چالشی کلیدی برای معماران و مهندسان ایمنی است. در این تحقیق، تخلیه عابر پیاده از یک ساختمان با استفاده از مدل نیروی اجتماعی (*SFM*) شبیه‌سازی می‌شود. برای این منظور، عواملی مانند نقشه ساختمان (موقعیت دیوارها، ستون‌ها و خروجی‌ها)، چیدمان موانع (میزها و صندلی‌ها)، توزیع مکانی و جنسیت عابران پیاده و نیز جرم کیف آن‌ها درنظر گرفته می‌شوند. بدین ترتیب، جنسیت عابران پیاده و در نتیجه قد و جرم آن‌ها و همچنین جرم کیف که بر سرعت حرکت آن‌ها تأثیر می‌گذارند، مدل‌سازی می‌شوند. علاوه بر این، فرآیند تخلیه بر اساس تصمیم‌گیری عابران پیاده برای تخصیص به نزدیک‌ترین خروجی و افزودن آگاهی و دانش تصمیم‌گیری در تخلیه است. روش تحقیق، عملکرد تخلیه را بر اساس زمان تخلیه کل، تراکم جمعیت و سرعت عابران پیاده، با استفاده از داده‌های دنیای واقعی مربوط به دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران، ارزیابی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که درنظرگرفتن تنوع جنسیتی، تصمیم‌گیری و جرم کیف، زمان تخلیه را در مقایسه با یک مدل پایه همگن، ۲۶٫۰۸٪ کاهش می‌دهد. این امر حاکی از اهمیت درنظرگرفتن جنسیت، جرم کیف و نیز تصمیم‌گیری مبتنی بر آگاهی عابران پیاده در مدل‌سازی تخلیه برای افزایش واقع‌گرایی است.

کلیدواژه‌ها : شبیه‌سازی تخلیه جمعیت عابران پیاده، مدل نیروی اجتماعی، جرم کیف، جنسیت، تصمیم‌گیری.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تلفن: ۰۲۱۶۱۱۱۴۵۲۹

Email: zbahramian@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

۱- مقدمه

امروزه با افزایش روزافزون جمعیت و محدودیت منابع زمین، استفاده بهینه از فضا امری اجتناب‌ناپذیر شده است. در نتیجه، کلان‌شهرهای سراسر جهان به سمت احداث و ایجاد ساختمان‌های بلند و سازه‌های پیچیده با ظرفیت جمعیتی بالا روی آورده‌اند. علاوه بر این، ظهور انواع جدیدی از ساختمان‌ها ناشی از دو عامل است: نخست، ورود به دوران توسعه سریع اقتصادی در دهه‌های اخیر؛ دوم، بلوغ هم‌زمان فناوری در مهندسی عمران و معماری [۱, ۲]. تنوع در طراحی و شکل ساختمان‌ها، تأثیر مستقیمی بر تخلیه ساکنان آن دارد [۳]. از این رو، یکی از چالش‌های اساسی پیش روی طراحان، ایجاد یک سیستم مؤثر برای تخلیه سریع و ایمن جمعیت از این ساختمان‌هاست.

با افزایش جمعیت و تنوع ساختمان‌ها، تخلیه جمعیت و حفظ ایمنی ساکنان پیچیده‌تر شده است. یکی از مشکلات اصلی در چنین شرایطی، تراکم بیش‌ازحد در مسیرهای خروج است. علاوه بر آن، طراحی معماری ساختمان نیز می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر کارایی و ایمنی تخلیه تأثیرگذار باشد [۴]. در این شرایط، افرادی که از مسیرهای جایگزین آگاهی ندارند، مکان دقیق خروجی‌ها را نمی‌دانند یا با علائم راهنمایی ناکافی مواجه‌اند، ممکن است مسیر اشتباهی را انتخاب کنند که این امر منجر به سردرگمی و بی‌نظمی در فرآیند تخلیه می‌شود. این در حالی است که مسائل مرتبط با جمعیت، بر اهمیت مدیریت جمعیت در افزایش ایمنی، کارایی و پایداری فضاهای عمومی شهری مشترک تأکید دارند. در چنین شرایطی، تراکم بالا، محدودبودن تعداد مسیرهای خروج و موانع فیزیکی [۵] می‌توانند به‌طور منفی بر زمان‌بندی و کارایی تخلیه تأثیر بگذارند. از این‌رو، پیش‌بینی رفتار جمعیت و به‌کارگیری روش‌های علمی برای مطالعه جریان حرکت عابران پیاده در این فضاها اهمیت روزافزونی دارد. این مسئله، به‌ویژه در ساختمان‌های آموزشی (مانند دانشگاه‌ها و مدارس) که دارای ساختاری شامل کلاس‌ها، آزمایشگاه‌ها و راهروهای باریک هستند، بسیار حائز اهمیت است. در برخی موارد، شرایط محیطی و موانع فیزیکی ممکن است مانع از تخلیه شوند. همچنین، پیچیدگی معماری ساختمان‌ها (مانند راهروهای طولانی) و عوامل انسانی و اجتماعی عابران پیاده می‌تواند تأثیر زیادی بر سرعت و اثربخشی تخلیه داشته باشد [۴].

بنابراین، چالش‌های مرتبط با تخلیه ساختمان و ضرورت تدوین راهبردهای مشخص برای مدیریت این فرآیند به‌وضوح قابل مشاهده است. یک سیستم تخلیه مؤثر نیازمند برنامه‌ریزی دقیق، ابزارهای فناورانه و آمادگی عمومی است. مهندسی یک سیستم تخلیه خوب نه تنها نیازمند تطابق مسیرهای فرار با استانداردهای ملی و بین‌المللی است، بلکه باید استفاده از فناوری‌های پیشرفته نظیر شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، تحلیل‌های پویا و سیستم‌های هدایت‌گر هوشمند را نیز در نظر بگیرد تا تخلیه مناسب و کاهش تهدیدات محقق شود. این راهبردها می‌توانند به کاهش خطرات بالقوه، افزایش سرعت تخلیه و ایمن‌سازی فرآیند کمک کنند.

علاوه بر این، وجود تفاوت‌های جنسیتی و فیزیکی بین عابران پیاده منجر به تفاوت در زمان تخلیه آن‌ها می‌شود. آقایان و بانوان دارای ویژگی‌های جسمانی متفاوتی نظیر قد و جرم هستند که در هنگام فرآیند تخلیه، منجر به زمان تخلیه گوناگون می‌شوند. از طرف دیگر، جرم کیف نیز نقش مهمی را در مدل‌کردن حرکت عابران پیاده ایفا می‌کند [۶]؛ زیرا سرعت شخص را کاهش می‌دهد که در صورت سنگین‌بودن، به‌عنوان عامل تنظیم‌کننده نیز اثرگذار است. همچنین، عابران پیاده ممکن است به دلیل ناآگاهی از مکان دقیق خروجی‌ها یا نبود علائم راهنما، ناخواسته مسیر اشتباهی را انتخاب کرده و موجب بی‌نظمی شوند. بنابراین لازم است عواملی شامل جنسیت عابران پیاده، جرم کیف و تصمیم‌گیری آن‌ها با توجه به آگاهی از مکان نزدیک‌ترین خروجی در فرآیند تخلیه مدنظر قرار

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

گیرند.

برای بررسی و درک فرآیند تخلیه جمعیت به‌طور کلی دو رویکرد وجود دارد: آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی. روش‌های تجربی معمولاً از داده‌هایی استفاده می‌کنند که از تمرین‌های تخلیه واقعی، سناریوهای میدانی و مشاهده رفتار افراد در محل به‌دست آمده‌اند. با وجود این، انجام یک تمرین واقعی که تمام شرایط را شامل شود، پیچیده، دشوار یا غیرممکن است. همچنین باید توجه داشت که این تمرین‌ها معمولاً در شرایط کنترل‌شده انجام می‌شوند و ممکن است واکنش‌های واقعی افراد را منعکس نکنند. داده‌های جمع‌آوری‌شده ممکن است به‌خاطر آگاهی شرکت‌کنندگان از برگزاری تمرین و محدودیت‌های فضایی یا اجرایی، قابلیت تعمیم به شرایط واقعی را نداشته باشند. به دلیل این محدودیت‌ها، شبیه‌سازی به ابزاری بسیار مفید برای مطالعه تخلیه جمعیت تبدیل شده است. شبیه‌سازی این امکان را فراهم می‌کند که تأثیر پارامترها و سناریوهای مختلف بدون نیاز به آزمایش‌های واقعی، پرهزینه و زمان‌بر تحلیل شوند [۷]. علاوه بر این، مدل‌های شبیه‌سازی پیشرفته می‌توانند رفتار انسان را به‌صورت واقع‌گرایانه‌تری شبیه‌سازی کنند و اثرات جنسیت و تصمیم‌گیری مبتنی بر آگاهی از مسیرهای خروج را در طول تخلیه مدنظر قرار دهند. بدین ترتیب، شبیه‌سازی پیشرفته عاملی ضروری برای بهبود طراحی ساختمان، تدوین راهبردهای تخلیه و افزایش ایمنی در مکان‌های عمومی به شمار می‌رود.

از سوی دیگر، مدل‌های شبیه‌سازی حرکت عابران پیاده به‌طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند: ماکروسکوپی، مزوسکوپی و میکروسکوپی [۸]. مدل ماکروسکوپی تعامل بین عابران پیاده را درنظر نمی‌گیرد و جریان آن‌ها را مانند گاز یا سیال درنظر می‌گیرد. مدل مزوسکوپی در میانه مدل‌های ماکرو و میکرو قرار دارد و تعاملات فردی را لحاظ نمی‌کند. این واژه دو تعبیر دارد: نخست، به‌عنوان یک چارچوب مکانی برای هدایت حرکت عابران پیاده؛ دوم، به‌عنوان مدلی با دقت پایین‌تر که بیشتر مورد توجه پژوهشگران علوم اطلاعاتی قرار دارد. مدل میکروسکوپی، عابران پیاده را به‌عنوان موجوداتی عقلانی درنظر گرفته و تعاملات بین فردی را لحاظ می‌کند. این مدل نه تنها برای توصیف دقیق رفتار جمعی پیچیده گروه‌های عابران پیاده مناسب است، بلکه می‌تواند تعاملات فردی را نیز به‌صورت کمّی نمایش دهد [۹, ۱۰].

مدل نیروی اجتماعی (*SFM*)[1] یکی از پرکاربردترین مدل‌های میکروسکوپی می‌باشد که بر اساس قانون دوم نیوتن پیشنهاد شد [۹]. این مدل قادر است طیف وسیعی از سناریوهای مرتبط با حرکت واقع‌گرایانه عابران پیاده را بازنمایی کند. از همین‌رو، اغلب به‌عنوان مدل پایه انتخاب شده و برای شبیه‌سازی انواع تخلیه‌ها تطبیق داده می‌شود. با وجود این، عمده بهبودهای اعمال‌شده در این مدل، بر افزودن نیروهای جدید مطابق با کاربردهای خاص متمرکز بوده‌اند و توجه کمتری به ادراک محیطی در هنگام تخلیه شده است.

تاکنون در تحقیقات متعددی به شبیه‌سازی تخلیه جمعیت با استفاده از مدل‌های میکروسکوپیک از جمله مدل نیروی اجتماعی پرداخته شده است. به عنوان مثال، ژو[2] و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که عرض خروجی، تعداد خروجی‌ها و طرح کلاس بر کارایی تخلیه تأثیر داشته و با افزایش تعداد افراد، تخلیه دشوارتر شد. همچنین خروجی دوتایی، افزایش تعداد مسیرها و بهینه‌سازی چیدمان میز و صندلی، کارایی تخلیه را بهبود بخشید [۱۱]. لیان[3] و همکاران (۲۰۲۳) نیز ۲۷ سناریو طراحی بهینه فضای تردد با تغییر عرض راهرو، شکل راهرو و عرض پله را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد حساسیت پارامترهای طراحی فضای تردد نسبت به زمان تخلیه ۳۱٫۸۵٪ و تأثیر عرض راهرو بر زمان تخلیه ۴۹٫۰۶ برابر

[1] *Social Force Model*
[2] *Zhou*
[3] *Lian*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

عرض پلکان بود [۸]. دلسیا[1] و همکاران (۲۰۱۹) به افزایش آگاهی در موقعیت‌های تخلیه اضطراری کلاس درس با استفاده از مدل‌سازی عامل‌مبنا پرداختند. آن‌ها یک مطالعه آزمایشی دو مرحله‌ای روی تخلیه کلاس درس انجام دادند. دانش کسب‌شده منجر به افزایش آگاهی دانش‌آموزان و کاهش ۲۲٫۹۹ درصدی زمان تخلیه شد [۱۲]. هوانگ[2] و همکاران (۲۰۲۳) نیز تخلیه اضطراری یک خوابگاه دانشجویی را با استفاده از مدل‌سازی عامل‌مبنا و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان[3] (*BIM*) به ترتیب برای شبیه‌سازی رفتار افراد و محیط فیزیکی بر اساس زمان تأخیر شبیه‌سازی کردند. سه سناریو برای زمان اطلاع‌رسانی، زمان واکنش و زمان آماده‌سازی که به همه آن‌ها زمان تأخیر تخلیه می‌گویند، درنظر گرفته شد: ۳۰-۰، ۶۰-۳۱ و ۹۰-۶۱ ثانیه که برای هر سناریو ۳ بار شبیه‌سازی انجام و میانگین زمان تخلیه ایمن محاسبه شد. نتایج نشان داد که زمان تأخیر باید در ۹۰ ثانیه محدود شود تا تخلیه ایمن انجام شود [۱۳].

علاوه بر این، در تعدادی از مطالعات پیشین در حوزه شبیه‌سازی فرایند تخلیه با استفاده از *SFM*، تاثیر وجود موانع نیز در نظر گرفته شد. به عنوان مثال، زانگ[4] و همکاران (۲۰۲۱) دو مدل شبیه‌سازی از یک ساختمان آموزشی ۱۹ طبقه را ساختند؛ یکی با موانع (میزها) در کلاس‌ها و دیگری بدون موانع. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که زمان تخلیه با موانع ۲۳٫۶٪ سریع‌تر از بدون موانع بود که اشاره به کمک موانع به تنظیم تراکم و جریان جمعیت داشت. تحلیل‌ها نشان داد موانع به صورت فیزیکی جمعیت را جداسازی و مسیرها را محدود کردند تا از هجوم بی‌نظم به خروجی‌ها جلوگیری شود [۱۴]. وانگ[5] و همکاران (۲۰۲۰) نیز تأثیر تعامل انسان با موانع در تخلیه کلاس‌های درس را بررسی کردند و دو نوع رفتار عبور از روی موانع و هل‌دادن موانع را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که رفتار عبور از روی موانع زمان تخلیه را کاهش داد، در حالی که هل‌دادن موانع اثر منفی داشته و باعث مسدودشدن مسیرها شد [۱۵].

از سوی دیگر، تعدادی از مطالعات پیشین، تاثیر حمل کیف یا چمدان را در شبیه‌سازی فرایند تخلیه با استفاده از *SFM*، در نظر گرفتند. به عنوان مثال، شوبل[6] و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر حمل کوله‌پشتی بر ایمنی عابران پیاده دانشجویان دانشگاه را مطالعه کردند. یافته‌ها نشان داد داشتن کوله‌پشتی باعث کاهش سرعت راه‌رفتن و زمان ایمنی شد. این موضوع همچنین خطرات برخورد و قرارگیری در موقعیت‌های خطرناک را افزایش داد. این مطالعه نشان داد که تأثیر کوله‌پشتی مستقل از عوامل جنسیت، سن، شاخص توده بدنی[7] (*BMI*)، عادات حمل کوله‌پشتی و میزان پیاده‌روی است [۱۶]. شانگ[8] و همکاران (۲۰۲۵) نیز اثر حمل چمدان بر استراتژی انتخاب مسیر خروج و دینامیک حرکت جمعیت در هنگام تخلیه اضطراری را مورد بررسی قرار دادند. یافته‌ها از این قرار بودند که افزایش درصد افراد دارای چمدان باعث کاهش چشمگیر سرعت و نرخ تخلیه، به‌ویژه در تراکم‌های بالا شد. اگر افراد در فاصله دورتری (زودتر) تصمیم به خروج بگیرند، زمان کلی تخلیه کاهش می‌یابد. همچنین تغییر مکرر مسیر خروج در طول مسیر به فرآیند تخلیه آسیب زد و باعث ازدحام در نقطه تصمیم‌گیری شد [۱۷].

این در حالی است که بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات گذشته تمرکز خود را بر روی مدل‌های تخلیه افراد به صورت کلی و بدون توجه

[1] *Delcea*
[2] *Huang*
[3] *Building Information Modeling*
[4] *Zang*
[5] *Wang*
[6] *Schwebel*
[7] *Body Mass Index*
[8] *Shang*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

دقیق به ویژگی‌های فردی قرار دادند. مدل‌های سنتی نیز عمدتاً به‌صورت ماکروسکوپی یا مبتنی بر رفتارهای ساده فردی پیاده شدند که در شبیه‌سازی‌های دقیق، توانایی کمتری در بازنمایی تصمیم‌گیری‌های واقعی افراد دارند. در مطالعات اخیر، تلاش‌هایی برای نزدیک‌تر کردن شبیه‌سازی به واقعیت انجام شد. با وجود این، بیشتر این مدل‌ها هنوز از لحاظ درنظرگرفتن تنوع ویژگی‌های جسمانی افراد، مدل‌سازی کیف و توجه به تصمیم‌گیری مبتنی بر آگاهی در کنار یکدیگر در طول فرآیند تخلیه محدود هستند. در این تحقیق، با افزودن ویژگی‌های فیزیکی واقعی (مانند جنسیت، قد و جرم) و کیف روی دوش یا در دست، تلاش شده است این شکاف علمی به شکل بهتری پوشش داده شود.

بنابراین، در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی تخلیه جمعیت در شرایط عادی (غیراضطراری) در محیط‌های داخلی ساختمان، یک روش مبتنی بر *SFM* پیشنهاد می‌شود. این روش چیدمان ساختمان، مکان موانع، موقعیت و جنسیت عابران پیاده (و در نتیجه قد و جرم آن‌ها)، کیف و تصمیم‌گیری مبتنی بر آگاهی از خروجی نزدیک‌تر را در شبیه‌سازی حرکت آن‌ها لحاظ می‌کند. نوآوری اصلی این مطالعه، درنظرگرفتن تنوع جنسیتی میان عابران پیاده و در نتیجه تنوع قد و جرم آن‌ها، تصمیم‌گیری و همچنین تنوع جرم کیف آن‌ها می‌باشد. تنوع جنسیت عابران و جرم کیف باعث اختلاف در سرعت مطلوب حرکت عابران پیاده شده و این پارامترها تأثیر مستقیم و قابل توجهی در مدل دارند. علاوه بر این، تصمیم‌گیری عابران پیاده با توجه به آگاهی آن‌ها از خروجی نزدیک‌تر لحاظ می‌شود

در ادامه، در بخش دوم روش پیشنهادی تشریح می‌گردد. در بخش سوم نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی ارائه می‌شوند. در نهایت، بخش پایانی به بحث و نتیجه‌گیری می‌پردازد.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی تخلیه عابران پیاده از یک ساختمان (آموزشی) در شرایط عادی از مدل نیروی اجتماعی استفاده می‌شود. برای دستیابی به این هدف، مجموعه‌ای جامع از داده‌ها باید درنظر گرفته شود؛ از جمله: نقشه معماری ساختمان، چیدمان موانع (میزها و صندلی‌ها در کلاس‌ها)، توزیع مکانی عابران پیاده (دانشجویان)، ویژگی‌های فیزیکی عابران پیاده مانند جنسیت (و در نتیجه، قد و وزن آن‌ها) و جرم کیف. علاوه بر این، تصمیم‌گیری عابران پیاده با توجه به سطح آگاهی آن‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته و تخلیه هر کلاس یا مکان از طریق نزدیک‌ترین خروجی در دسترس انجام می‌شود. مراحل روش تحقیق در شکل(۱) نمایش داده شده و در ادامه جزئیات آن تشریح می‌گردد.

۲-۱- جمع‌آوری داده

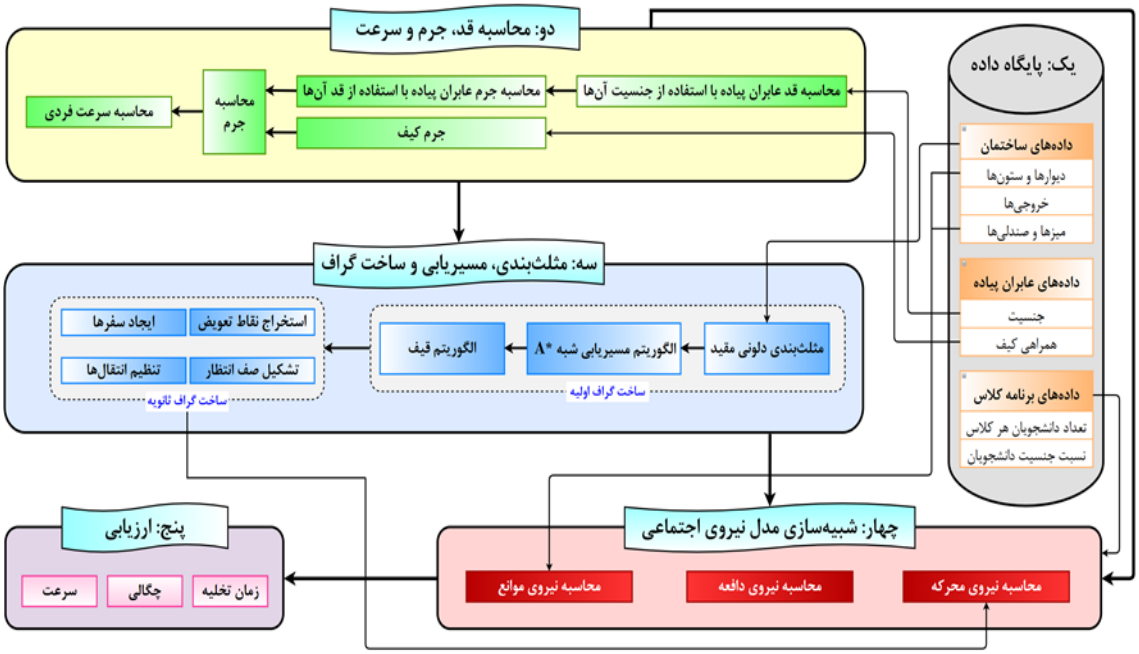
در این مطالعه، داده‌های مربوط به ساختمان، موانع، عابران پیاده و برنامه کلاس مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر یک به‌طور جداگانه در ادامه توضیح داده می‌شوند.

۲-۱-۱- داده‌های ساختمان

یکی از اجزای اصلی در پیکربندی شبیه‌سازی دینامیک عابران پیاده، تعریف ناحیه قابل حرکت است؛ یعنی ناحیه یا محدوده‌ای که عابران مجاز به حرکت در آن هستند. در نتیجه، تمامی نقاط داخل این ناحیه برای عابران قابل دسترسی بوده و نقاط خارج از آن در محیط شبیه‌سازی لحاظ نمی‌شوند. هیچ عابری از این مرزها نمی‌تواند فراتر رود. مفهوم ناحیه قابل حرکت با استفاده از یک چندضلعی ساده (شکلی بدون تقاطع داخلی با سطح غیرصفر) است که با توجه به داده‌های ساختمان شامل دیوارها و ستون‌ها، خروجی‌ها و موانع تعریف می‌شود.

خروجی‌ها، نقاط اختصاصی تخلیه را در شبیه‌سازی مدل می‌کنند. ناحیه خروج، محدوده‌ای را مشخص می‌کند که عابران پس از ورود به آن از شبیه‌سازی حذف می‌شوند. به بیان دیگر، عابران به سمت مرکز چندضلعی خروج حرکت می‌کنند و به محض ورود به ناحیه مشخص‌شده، از شبیه‌سازی خارج می‌شوند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]



شکل۱: مراحل روش تحقیق

موانعی مانند ستون‌ها، میزها و صندلی‌ها در ناحیه قابل حرکت قرار دارند. عابران از ورود به این نواحی ممنوعه خودداری کرده و از آن‌ها عبور نمی‌کنند. این نواحی به‌صورت سوراخ‌هایی در داخل چندضلعی اصلی گنجانده می‌شوند. هنگام اضافه‌کردن موانع، باید دقت شود که ناحیه قابل حرکت به دو یا چند بخش جدا از هم تقسیم نشود.

۲-۱-۲- داده‌های عابران پیاده

در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی واقعی‌تر، افراد بر اساس جنسیت‌شان دسته‌بندی می‌شوند. این جنسیت در مرحله بعدی به کار می‌رود. همچنین همراه عابران پیاده کیف در نظر گرفته می‌شود که جرم آن در شبیه‌سازی تأثیرگذار است.

۲-۱-۳- داده‌های برنامه کلاس

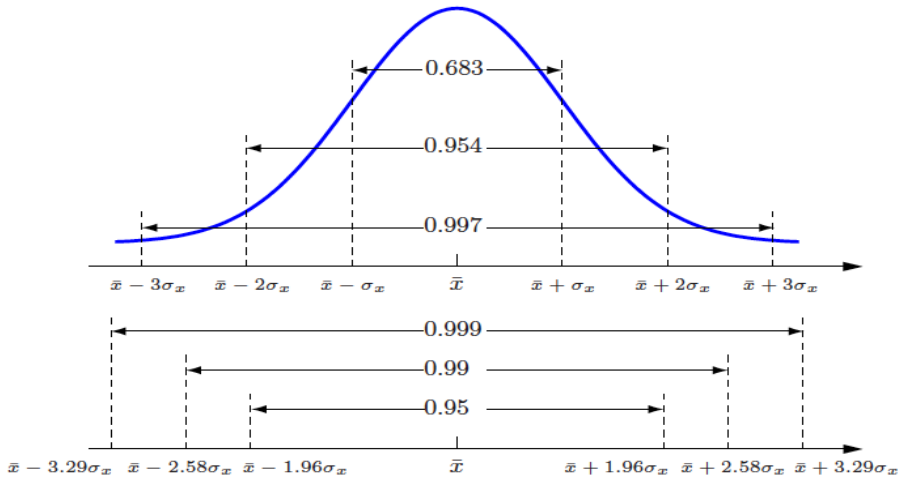
با توجه به برنامه کلاس‌ها، تعداد عابران هر کلاس و نسبت جنسیت آن‌ها تعیین می‌شود.

۲-۲- محاسبه قد، جرم و سرعت

از آنجایی که قد و جرم (x) به طور عمومی از توزیع نرمال پیروی می‌کنند، بر اساس آمار و احتمال، اگر مقدار انحراف معیار (σ_x) آن‌ها را دو برابر کرده و از میانگین ($\bar{x}$) آن‌ها کم و به آن اضافه شود ($\bar{x} \pm 2\sigma_x$)، ۹۵/۴ ٪ افراد جامعه را دربرمی‌گیرد؛ یعنی با داشتن انحراف معیار می‌توان حد پایین و بالای بازه قد و جرم را با دقت گفته‌شده، به دست آورد. شکل (۲)، گویای این موضوع است.

به همین منظور، ابتدا با توجه به جنسیت عابران پیاده، این بازه برای قد آن‌ها در پایگاه داده استخراج شده و سپس بازه جرم از بازه قد تعیین می‌شود. از طرفی، در صورت داشتن کیف، جرم کیف واردشده از پایگاه داده در کنار این جرم قرار می‌گیرد تا جرم نهایی هر عابر پیاده مشخص شود. سپس، سرعت فردی بر اساس جرم نهایی محاسبه می‌شود؛ بطوریکه جرم بیشتر دارای سرعت فردی کمتری است. در انتها این مقادیر، همراه با توزیع مکانی افراد، به‌صورت تصادفی به عابران پیاده اختصاص داده می‌شوند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]



شکل ۱: احتمالات مهم توزیع نرمال قد یا جرم عابران پیاده (x)

۲-۳- مثلث‌بندی، مسیریابی و ساخت گراف

این بخش، شامل دو گراف اولیه (گراف مسیریابی شبه A^*) و گراف ثانویه (گراف نیروی محرکه) می‌باشد که در ادامه به تشریح جزئیات هر یک پرداخته می‌شود.

۲-۳-۱- مثلث‌بندی، ساخت گراف اولیه و مسیریابی

در این مرحله، ابتدا چندضلعی حاصل از نقشه ساختمان و موانع با استفاده از الگوریتم مثلث‌بندی دلونی مقید[1] (CDT)، مثلث‌بندی می‌شود. در هندسه محاسباتی، مثلث‌بندی دلونی مقید تعمیمی از مثلث‌بندی دلونی است که برخی از بخش‌های لازم را به‌عنوان یال‌ها در مثلث‌بندی وارد می‌کند [۱۸, ۱۹]؛ برخلاف مثلث‌بندی دلونی [۲۰] که صرفاً براساس موقعیت مجموعه‌ای از رئوس داده شده است و توجهی به نحوه اتصال آن‌ها با یال‌ها ندارد. ورودی مسئله مثلث‌بندی دلونی مقید، یک چندضلعی مسطح خطی مستقیم است که شامل مجموعه‌ای از نقاط و بخش‌های خطی بدون تداخل در صفحه می‌باشد. مثلث‌بندی دلونی مقید این ورودی، مثلث‌بندی محدب آن است که همه بخش‌های ورودی را به‌عنوان یال‌ها شامل می‌شود و تنها از رئوس ورودی استفاده می‌کند. برای هر یال اضافی‌ای که برای تکمیل مثلث‌بندی به ورودی اضافه می‌شود، باید دایره‌ای وجود داشته باشد که دو سر یال روی محیط آن قرار داشته باشند و هر رأس داخل این دایره توسط حداقل یکی از بخش‌های ورودی طوری مسدود شده باشد که از دید یکی از سرهای یال قابل مشاهده نباشد. این

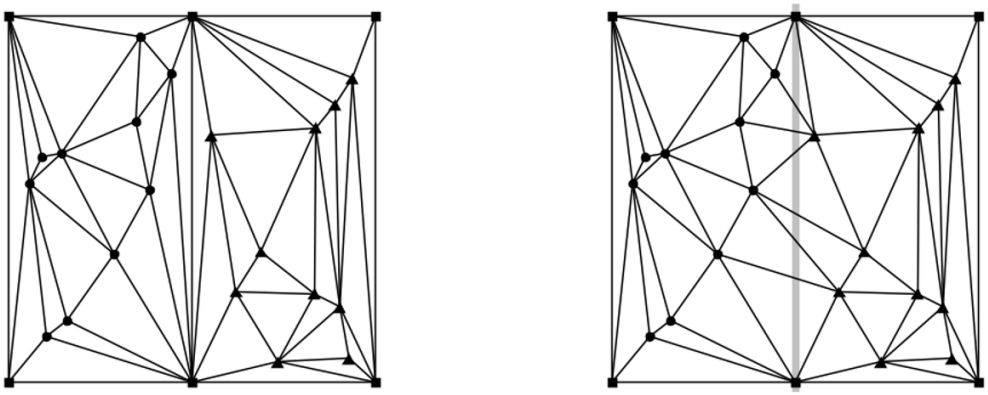
تعریف، خاصیت اصلی مثلث‌بندی دلونی دوبعدی را تعمیم می‌دهد که در آن، برای هر یال دایره‌ای وجود دارد که فقط دو سر آن را در بر دارد و هیچ رأس دیگری داخل آن نیست. یک مثلث‌بندی که این خواص را داشته باشد همیشه وجود دارد [۱۸]. مثلث‌بندی دلونی مقید به ما این امکان را می‌دهد که مجموعه‌ای از یال‌ها به شبکه مثلثی اضافه شود که معیار دلونی را نادیده گرفته و نحوه اتصال رأس‌ها را در شبکه محدود کند.

در شکل (۳)، محدودیت به صورت یک یال عمودی در مرکز مثلث‌بندی نشان داده می‌شود و داده‌های نشان‌داده‌شده در دو ناحیه جداگانه قرار دارند. مثلث‌بندی دلونی معمولی رأس‌های جداگانه را آزادانه به هم وصل می‌کند، اما مثلث‌بندی دلونی مقید اطلاعات بیشتری را به سیستم اضافه می‌کند؛ مانند

[1] *Constrained Delaunay Triangulation*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

یال‌هایی که مرز ناحیه‌های داده را تعریف می‌کنند. در واقع، مثلث‌بندی دلونی مقید همه رئوس (نقاط) و خطوط مرزی (قیود) را نگه می‌دارد، مثلث‌هایی با کیفیت هندسی بالا (زاویه‌های باریک کمتر) تولید می‌کند و اجازه وجود حفره و موانع مانند دیوارها، ستون‌ها، میزها و صندلی‌ها را می‌دهد.



شکل ۲: مثلث‌بندی دلونی معمولی (سمت راست) و مثلث‌بندی دلونی مقید (سمت چپ) [۱۸]

سپس گراف اولیه ساخته می‌شود که رأس‌های آن متناظر با مثلث‌های حاصل از اعمال مثلث‌بندی و یال‌های آن اتصال بین دو مثلث مجاور با وزن فاصله اقلیدسی بین مراکز دو مثلث مربوطه می‌باشد. در ادامه، به هر عابر پیاده یک مقصد هدف خاص اختصاص داده می‌شود که باید به سمت آن حرکت کند. گام بعدی و مهم، تعیین مسیر مناسب برای رسیدن به این اهداف است. این امر شامل محاسبه مسیرهای بهینه از موقعیت فعلی عابر پیاده تا مقصد تعیین‌شده در محیط شبیه‌سازی است. برای تعیین مسیر، از روش مثلث‌بندی هندسی مذکور استفاده شده و فاصله بین دو نقطه از طریق مثلث‌بندی محاسبه می‌شود. در این فرآیند فاصله بین مرکز دو مثلث مجاور محاسبه می‌شود و اگر مسیرهای متعددی به مقصد منتهی شوند، کوتاه‌ترین مسیر انتخاب می‌گردد. بر اساس موقعیت عابران پیاده و فواصل اقلیدسی آن‌ها تا خروجی‌های موجود، هر فرد به نزدیک‌ترین خروجی اختصاص داده می‌شود تا شبیه‌سازی انجام شود.

در این تحقیق، از الگوریتم شبه A^* برای مسیریابی استفاده می‌شود، الگوریتم A^* انعطاف‌پذیر بوده و می‌توان از آن در طیف وسیعی از زمینه‌ها استفاده کرد [۲۱]. راز موفقیت این الگوریتم در این است که اطلاعاتی که الگوریتم دیکسترا[1] استفاده می‌کند (ترجیح‌دادن رأس‌هایی که به نقطه شروع نزدیک هستند) را با اطلاعاتی که جستجوی حریصانه بهترین-اول[2] استفاده می‌کند (ترجیح‌دادن رأس‌هایی که به هدف نزدیک‌ترند)، ترکیب می‌کند [۲۱].

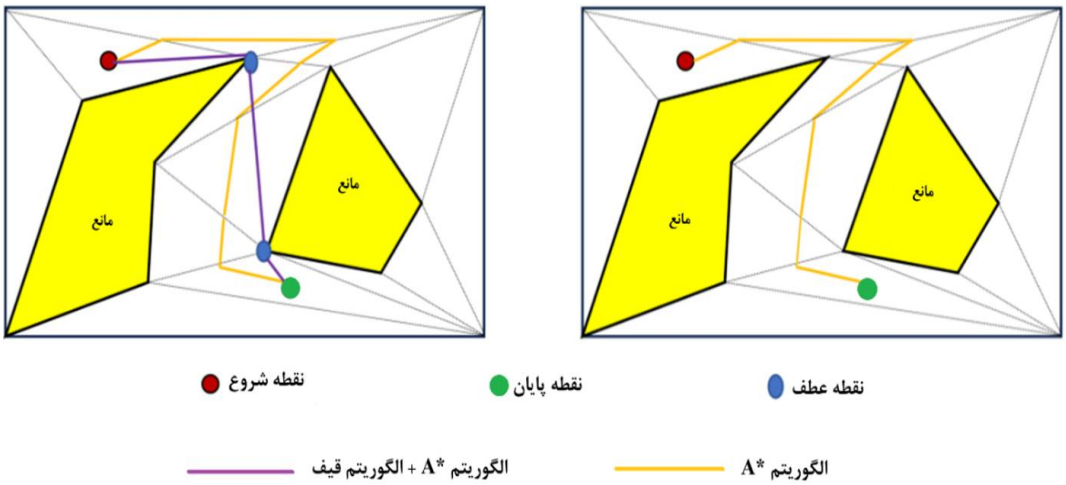
در هر مرحله از حلقه اصلی، رأسی را که دارای کمترین مقدار $f(n) = g(n) + h(n)$ است، بررسی می‌کند [۲۱]. برای تخمین هزینه باقی‌مانده تا مقصد (h)، هزینه بین گره‌ها (مثلث‌ها) با استفاده از فاصله اقلیدسی بین نقطه مقصد و نزدیک‌ترین نقطه روی لبه بین مثلث جاری و همسایه‌اش محاسبه می‌شود. چون مسیریابی روی مثلث‌ها انجام می‌شود، فاصله تا نزدیک‌ترین نقطه روی لبه منطقی‌ترین تخمین برای یک عابر نقطه‌ای است. برای هزینه طی‌شده از مبدأ تا وضعیت (مثلث) فعلی (g)، از سه تخمین فاصله اقلیدسی نقطه فعلی تا لبه مشترک (طول فیزیکی یال بین دو نقطه)، اختلاف مقدار h بین مثلث فعلی و بعدی (برای تخمین هزینه

[1] *Dijkstra*
[2] *Greedy best-first search*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

انتقال بین مثلث‌ها) و فاصله بین مراکز دو مثلث (برای تخمین هزینه ورود به مثلث جدید) استفاده می‌شود که از بین آن‌ها مقدار حداکثر انتخاب می‌شود. مقدار حداکثر برای تضمین پایداری مسیر و جلوگیری از کم‌برآوردکردن هزینه، می‌باشد. در نتیجه، از یک الگوریتم شبه A^* استفاده می‌شود. زیرا مسیر واقعی طی‌شده در اینجا تخمینی از سه تابع (تخمین از هزینه بین مثلث‌ها) است نه یک تابع دقیق (مجموع وزن یال‌های طی‌شده)؛ بنابراین مسیر نهایی ممکن است کمی دورتر از بهینه باشد. شبه A^* حتی بعد از رسیدن به مقصد، ممکن است ادامه دهد، در حالیکه در A^* وقتی مقصد دیده شد، جستجو پایان می‌یابد.

در ادامه، الگوریتم قیف (*Funnel*) نیز استفاده می‌شود که نسخه‌ای ساده شده از مسیری را به دست می‌آورد که توسط الگوریتم شبه A^* پیدا شده است. این الگوریتم با شناسایی و حذف پیچ‌وخم‌های غیرضروری، مسیر را هموارتر می‌کند [۲۲]. این الگوریتم، یک قیف (یعنی کریدور مسیر بین یک رأس و لبه‌های مسیر) را حفظ می‌کند، آن را به‌مرور اصلاح کرده و این فرآیند را تکرار می‌کند تا مسیر کوتاه‌تر و هموارتری بیابد [۲۲]. الگوریتم قیف کاربردهای زیادی دارد و اغلب همراه با الگوریتم‌های مسیریابی که مجموعه‌ای از نقاط میانی (گره‌ها) را روی یک مش ناوبری (*Navmesh*) یا ساختار مشابه تولید می‌کنند، استفاده می‌شود. این نقاط میانی مجموعه‌ای از «پورتال‌ها» را تشکیل می‌دهند؛ پورتال‌ها لبه‌هایی هستند که بین هر جفت مثلث مجاور در مش ناوبری قرار دارند و ورودی الگوریتم هستند. قیفی که الگوریتم سعی در حفظ آن دارد، با یک رأس (نقطه شروع مسیر) در یک سر و دو نقطه کناری (لبه‌های چپ و راست کریدور مسیر) تعریف می‌شود. در ابتدا، قیف بسیار عریض است و مسیر تقریباً به‌صورت کامل طی می‌شود. سپس الگوریتم به‌صورت تکراری، قیف را با بازمحاسبه رأس، لبه چپ و لبه راست، بر اساس پورتال‌های مسیر باریک‌تر می‌کند. در شکل(۴) [۲۳] که این مفهوم را به صورت بصری بیان می‌کند، نقطه عطف نقطه‌ای است که یک مانع دور زده می‌شود.



شکل ۳: اثربخشی برنامه‌ریزی مسیر توسط الگوریتم A^* (سمت راست) و ترکیب الگوریتم A^* و الگوریتم قیف (سمت چپ)

۲-۳-۲- ساخت گراف ثانویه و برنامه‌ریزی مسیر

در روش تحقیق به منظور شبیه‌سازی تخلیه جمعیت، مسیریابی به فرآیند تعیین نحوه حرکت عابران پیاده در یک محیط فیزیکی مانند ساختمان اشاره دارد. این فرآیند شامل دو بخش اساسی برنامه‌ریزی مسیر و یافتن مسیر است. در برنامه‌ریزی مسیر، تصمیم‌گیری

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

عابران برای انتخاب مسیر شبیه‌سازی می‌شود و بر اساس آن، اهداف آن‌ها مشخص می‌گردد. این تصمیم‌گیری‌ها ممکن است شرطی بوده و بسته به موقعیت یا وضعیت، متفاوت باشند.

برای مدل‌سازی سناریوهای پیچیده، می‌توان مسیرهایی شامل مراحل مختلف تعریف کرد که به آن‌ها سفرها[1] گفته می‌شوند. یک سفر شامل گره‌های اهداف میانی به نام *Stages* و اتصالات جهت‌دار بین آن‌ها به نام *Transition*ها است که تعیین می‌کنند پس از رسیدن به یک هدف میانی، هدف بعدی کدام است. عابران پس از رسیدن به یک هدف میانی، ممکن است منتظر بمانند تا اجازه حرکت به مرحله بعد صادر شود.

در برخی موارد، لازم است چند زیر سفر تعریف شود که عابران بتوانند بسته به شرایط محیط، بین آن‌ها جابه‌جا شوند. این تغییر مسیر در نقاطی موسوم به نقاط تعویض انجام می‌شود که از داده‌های هندسی محیط قابل استخراج هستند. توجه به این نکته ضروری است که تمامی مراحل باید در ناحیه قابل حرکت قرار داشته باشند.

در این تحقیق، علاوه بر هدایت حرکت عابران با نقاط مسیر، امکان تعریف صف‌های انتظار نیز فراهم می‌شود. در این صف‌ها، عابران در موقعیت‌هایی از پیش تعیین‌شده به ترتیب قرار می‌گیرند. هر عابر پس از خالی‌شدن موقعیت جلویی، به سمت آن حرکت می‌کند. برای خروج از صف، لازم است سیگنالی به عابران ارسال شود که تعداد مجاز برای خروج را مشخص کند. در صورت پر بودن ظرفیت صف، عابران اضافی در آخرین موقعیت منتظر خواهند ماند.

در نهایت، پس از تعریف گره‌ها، باید آن‌ها را در قالب یک سفر ترکیب و با *Transition*ها به یکدیگر متصل کرد. این انتقال‌ها تعیین می‌کنند که عابر پس از اتمام هر مرحله، به کدام هدف بعدی حرکت کند. لازم است اطمینان حاصل شود که خروجی‌ها فقط در پایان مسیر تعریف شوند؛ چراکه در غیر این صورت، عابران به اشتباه از شبیه‌سازی حذف خواهند شد.

۲-۴- شبیه‌سازی با استفاده از مدل نیروی اجتماعی

در فرایند شبیه‌سازی حرکت عابران پیاده، مدل‌های میکروسکوپی بسته به پارامترهایی مانند زمان، فضا، رویکرد مدل‌سازی و دقت، با هم تفاوت‌هایی دارند. مدل نیروی اجتماعی [۹] و مدل خودکاره سلولی[2] (*CA*) [۱۰] از پرکاربردترین مدل‌های میکروسکوپی هستند. با توسعه فناوری کامپیوتر، مدل‌سازی عامل‌مبنا[3] (*ABM*) [۲۴] و مدل‌های مبتنی بر سرعت [۲۵] نیز به تدریج توسط پژوهشگران ترجیح داده شده است.

در این تحقیق، از مدل نیروی اجتماعی به منظور شبیه‌سازی حرکت عابران پیاده استفاده می‌شود. مدل نیروی اجتماعی [۲۶]، یک مدل مبتنی بر نیرو است که حرکت عابران پیاده را بر اساس ترکیب نیروهای اجتماعی مختلف تأثیرگذار بر فرد تعریف می‌کند. این مدل نیروهایی که بر یک فرد تأثیر می‌گذارند شامل نیروی محرک، نیروی دافعه و نیروی مانع را مشخص می‌کند. نیروی محرک نشان‌دهنده تمایل فرد به حرکت در یک جهت خاص، مستقل از سایر افراد و موانع است. نیروی دافعه ناشی از تعامل بین افراد است و باعث می‌شود آن‌ها برای جلوگیری از برخورد، از یکدیگر فاصله بگیرند. نیروی مانع نیز به روشی مشابه با نیروی دافعه عمل می‌کند تا از برخورد با موانع موجود در محیط جلوگیری کند. در این تحقیق، موقعیت اولیه عابران پیاده به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، این نیروها تشریح می‌گردند.

نیروی محرک عابر پیاده i، نیرویی را تعریف می‌کند که عابر پیاده i را به سمت مقصد مورد نظرش هدایت می‌کند که با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود[۲۶]:

[1] *Journeys*

[2] *Cellular Automata Model*

[3] *Agent-Based Modeling*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

رابطه(۱) $$\overrightarrow{F_i^{drv}} = \frac{v_i^0 \overrightarrow{e_i^0} - \overrightarrow{v_i}}{\tau}$$

در رابطه (۱)، v_i^0 سرعت مطلوب، $\overrightarrow{e_i^0}$ جهت مطلوب، $\overrightarrow{v_i}$ سرعت فعلی و τ زمان واکنش عابر iام است.

علاوه بر این، عابران پیاده با کاهش فاصله‌شان، نیروی دافعه‌ای را که به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد، بر یکدیگر اعمال می‌کنند. نیروی دافعه بین عابران پیاده از عابر پیاده مبدأ به سمت عابر پیاده‌ای که نیرو بر آن اعمال می‌شود، وارد می‌شود. زمانی که فاصله‌ی بین دو عابر پیاده بیشتر از مجموع شعاع‌های آن‌ها باشد، هیچ نیروی دیگری اعمال نخواهد شد. اما اگر فاصله بین دو عابر پیاده کمتر از مجموع شعاع‌های آن‌ها باشد، برخورد رخ می‌دهد و یک نیروی اصطکاکی نیز به وجود می‌آید. به عبارت دیگر، هنگام برخورد، نه تنها نیروهای رانشی شدیدتر می‌شوند، بلکه یک نیروی اصطکاکی نیز ایجاد می‌شود. این نیروی اصطکاکی عمود بر نیروی دافعه عمل می‌کند و جهت آن در راستای تفاوت سرعت بین دو عابر پیاده است. نیروی دافعه بین دو عابر پیاده i و j با استفاده از رابطه (۲) تعریف می‌شود [۲۶]. در رابطه (۲)، j یک عابر پیاده دیگر، $r_{ij} = r_i +$ r_j مجموع شعاع‌های عابران پیاده i و j، d_{ij} فاصله بین عابران پیاده i و j، و A_i، B_i، k و κ ثابت‌های مدل می‌باشند. g نیز فاصله بین عابران هنگام تماس را نشان می‌دهد و در صورتی که تماس وجود نداشته باشد، مقدار آن صفر است ($g(x) = x\ if\ x > 0\ else\ 0$).

بردار $\overrightarrow{n_{ij}} = (n_{ij}^1 . n_{ij}^2) = (\overrightarrow{pos_i} - \overrightarrow{pos_j})/d_{ij}$ نرمال‌شده از موقعیت عابر پیاده j به سمت موقعیت عابر پیاده i است. $\overrightarrow{t_{ij}} = (-n_{ij}^2 . n_{ij}^1)$ بردار عمود بر $\overrightarrow{n_{ij}}$ است که در آن بردار $\overrightarrow{n_{ij}}$ در خلاف جهت عقربه‌های ساعت چرخانده شده است و $\Delta v_{ji}^t = (\overrightarrow{v_j} - \overrightarrow{v_i}) \cdot \overrightarrow{t_{ij}}$ اختلاف سرعت مماسی بین عابران پیاده i و j است و به‌صورت ضرب داخلی اختلاف سرعت با بردار مماسی تعریف می‌شود.

همان‌طور که رابطه (۳) بیان می‌کند، نیروی دافعه عابر پیاده i برابر با مجموع نیروی دافعه عابر پیاده i و سایر عابران پیاده است [۲۶].

موانع نیز، نیرویی مشابه یک عابر پیاده ثابت بر عابر پیاده متحرک وارد می‌کنند. هر بخش خطی از یک مانع، نیرویی بر عابر پیاده اعمال می‌کند. نیروی دافعه با کاهش فاصله به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. نیروی دافعه‌ای که از یک بخش مانع نشأت می‌گیرد، از نزدیک‌ترین نقطه روی بخش دیوار به عابر پیاده اعمال می‌شود. اما هنگامی که عابر پیاده با مانع برخورد می‌کند، نیروهای دافعه افزایش بیشتری پیدا می‌کنند. هنگامی که حداقل فاصله بین یک عابر پیاده و یک بخش از دیوار کمتر از شعاع عابر پیاده شود، یک نیروی اصطکاکی اضافی نیز به وجود می‌آید. این نیروی اصطکاکی عمود بر نیروی دافعه بوده و در راستای سرعت عابر پیاده عمل می‌کند. نیروی دافعه بین عابر پیاده i و مانع o با استفاده از رابطه(۴) تعریف می‌شود [۲۶].

رابطه(۲) $$\overrightarrow{f_{ij}} = \underbrace{[A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] + kg(r_{ij} - d_{ij})]\overrightarrow{n_{ij}}}_{\text{بخش رانشی}} + \underbrace{\kappa g(r_{ij} - d_{ij})\Delta v_{ji}^t \overrightarrow{t_{ij}}}_{\text{بخش اصطکاکی}}$$

رابطه(۳) $$\overrightarrow{F_i^{rep}} = \sum_j \overrightarrow{f_{ij}}$$

رابطه(۴) $$\overrightarrow{f_{io}} = \underbrace{[A_i \exp[(r_i - d_{io})/B_i] + kg(r_i - d_{io})]\overrightarrow{n_{io}}}_{\text{بخش رانشی}} + \underbrace{\kappa g(r_i - d_{io})(\overrightarrow{v_i} \cdot \overrightarrow{t_{io}})\overrightarrow{t_{io}}}_{\text{بخش اصطکاکی}}$$

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

در رابطه (۴)، o یک بخش از مانع، r_i شعاع عابر پیاده i، d_{io} فاصله از نزدیک‌ترین نقطه روی بخش مانع تا عابر پیاده i، و A_i، B_i، k و κ ثابت‌های مدل می‌باشند. g فاصله بین عابران هنگام تماس را نشان می‌دهد و در صورتی که تماس وجود نداشته باشد، مقدار آن صفر است ($g(x) = x\ if\ x > 0\ else\ 0$).

$\overrightarrow{n_{io}} = (n_{io}^1.n_{io}^2) = (\overrightarrow{pos_i} - \overrightarrow{pos_o})/d_{io}$ نیز برداری است که جهت آن از $\overrightarrow{pos_o}$ یا همان نزدیک‌ترین نقطه روی بخش مانع به سمت عابر پیاده i یا همان $\overrightarrow{pos_i}$ است. $\overrightarrow{t_{io}} = (-n_{io}^2.n_{io}^1)$ بردار مماس بر $\overrightarrow{n_{io}}$ است که بر آن عمود بوده و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت چرخانده شده است و v_i سرعت عابر پیاده i است.

طبق رابطه (۵)، نیروی مانع عابر پیاده i برابر با مجموع نیروی دافعه عابر پیاده i و موانع است [۲۶]:

رابطه(۵) $$\overrightarrow{F_i^{obst}} = \sum_o \overrightarrow{f_{io}}$$

با استفاده از تعریف نیروهای مؤثر بر یک فرد، می‌توان سرعت جدید ($\overrightarrow{v_{new}}$) و موقعیت جدید ($\overrightarrow{pos_{new}}$) او را به ترتیب با استفاده از رابطه (۶) و رابطه (۷) محاسبه نمود [۲۶]:

رابطه(۶) $$\overrightarrow{v_{new}} = \overrightarrow{v_i} + \left[\overrightarrow{F_i^{drv}} + \frac{\overrightarrow{F_i^{rep}} + \overrightarrow{F_i^{obst}}}{m_i}\right] \cdot \delta T$$

رابطه(۷) $$\overrightarrow{pos_{new}} = \overrightarrow{pos_i} + \overrightarrow{v_{new}} \cdot \delta T$$

در رابطه (۶) و رابطه (۷)، m_i نشان‌دهنده جرم عابر پیاده i و δT نشان‌دهنده مدت زمان یک تکرار شبیه‌سازی است. موقعیت جدید عابر پیاده در محاسبه نیروهای محرک، دافعه و موانع او در زمان بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

لازم به ذکر است که در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی تخلیه عابران پیاده با استفاده از مدل نیروی اجتماعی، موقعیت و سرعت هر یک از عابران در هر زمان با توجه به مشخصات، موقعیت و سرعت آنها در زمان قبلی، و نیز موقعیت سایر عابران و موانع به دست می‌آید. علاوه بر این، مثلث‌بندی ناحیه قابل حرکت، برای ساخت گراف اولیه و ثانویه، و مسیریابی عابران نیز صورت می‌گیرد. در تمامی موارد یاد شده، از داده‌های مکانی به منظور انجام یک تحلیل‌های مکانی استفاده می‌شود. بنابراین شبیه‌سازی تخلیه عابران پیاده با استفاده از مدل نیروی اجتماعی، مجموعه‌ای از تحلیل‌های مکانی است که با استفاده از داده‌های مکانی انجام می‌پذیرد.

۲-۵- ارزیابی

در این تحقیق، به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، داده‌های حرکت عابران پیاده به عنوان داده‌های خط‌سیر[1] نمایش داده می‌شوند که می‌توان آن‌ها را از طریق یک تابع واردکننده برای فایل‌های داده خاص یا از یک *Data Frame* با ستون‌های زیر ایجاد کرد:

- *"id"*: یک شناسه عددی منحصربه‌فرد برای هر فرد
- *"frame"*: شاخص فریم ویدیوئی که موقعیت‌ها از آن استخراج می‌شوند
- *"x"* و *"y"*: موقعیت فرد (برحسب متر)

قبل از شروع تحلیل، ضروری است که اطمینان حاصل کرد تمامی خط‌سیرهای حرکت در محدوده تعیین‌شده برای حرکت قرار دارند. در غیر این صورت، ممکن است با خطاهایی مواجه شویم.

منحنی تخلیه تجمعی، معرف تعداد تجمعی عابران پیاده تخلیه‌شده در هر زمان است. این منحنی با یک تابع لجستیک که یک تابع ریاضی با کاربردهای گسترده در زمینه مدل‌سازی اجتماعی است، مطابق با رابطه (۸) برازش داده می‌شود:

رابطه(۸) $$f(t) = \frac{L}{1+e^{-k(t-t0)}}$$

در رابطه (۸)، پارامتر L حداکثر مقدار تجمعی است که نشان‌دهنده تعداد کل افراد می‌باشد، k نرخ رشد یا شیب منحنی را نشان می‌دهد و t_0 به عنوان زمانی که در آن نیمی از مقدار تجمعی رخ می‌دهد (نیمی از افراد تخلیه می‌شوند) شناخته می‌شود. هر چه مقدار k بیشتر

[1] *Trajectory Data*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

باشد، یعنی شیب منحنی بیشتر است که در نتیجه فرآیند تخلیه زودتر صورت می‌گیرد.

علاوه بر این، پس از تعیین محدوده حرکت عابران پیاده، اکنون باید مشخص کرد که کدام نواحی با جزئیات بیشتری تحلیل شود. این نواحی می‌توانند به‌صورت یک منطقه خاص یا کل منطقه قابل حرکت تعریف شوند. این نواحی به نام ناحیه اندازه‌گیری[1] تعریف می‌شوند. به عنوان مثال، منطقه اندازه‌گیری در نزدیکی هر خروجی تعریف می‌شود. برای ارزیابی روش پیشنهادی، سه شاخص از داده‌های مسیر شامل زمان تخلیه، تراکم (چگالی) و سرعت محاسبه می‌شوند. بدین ترتیب، با در نظر گرفتن تاثیر جنسیت، تصمیم‌گیری و بار کیف، تخمین واقعی‌تری از این شاخص‌ها به دست می‌آید. در ادامه، این سه شاخص ارزیابی تشریح می‌گردند.

۲-۵-۱- زمان تخلیه

زمان تخلیه، به‌طور کلی، به مدت زمان کل مورد نیاز برای تخلیه‌ی تمامی افراد یا عابران پیاده حاضر در یک فضا اشاره دارد. در مدل‌های رایج، زمان تخلیه از لحظه آغاز فرآیند تخلیه (مثلاً وقتی عابران شروع به حرکت می‌کنند) تا زمانی که آخرین عابر منطقه مورد نظر (مانند یک ساختمان، اتاق یا منطقه خطر) را ترک کند محاسبه می‌شود. در واقع، زمان تخلیه معیاری است برای سنجش این که یک جمعیت واقعی یا شبیه‌سازی‌شده چقدر طول می‌کشد تا از یک منطقه خارج شوند. معمولاً مهم‌ترین معیار در این فرآیند، زمان کل تخلیه است. در این تحقیق، زمان کل تخلیه از ساختمان مدنظر قرار می‌گیرد.

۲-۵-۲- تراکم

تراکم یک شاخص اساسی در دینامیک حرکت عابران است؛ زیرا نشان می‌دهد چه مقدار فضا برای هر عابر در یک منطقه خاص در دسترس است. تراکم بالا می‌تواند باعث کاهش سرعت حرکت، افزایش ازدحام و حتی ایجاد خطرات ایمنی شود.

همان طور که در رابطه (۹) بیان شده است، روش کلاسیک برای محاسبه تراکم $\rho_{classic}(t)$ در زمان t، شمارش تعداد عابران ($N(t)$) در یک فضای مشخص (M) و تقسیم آن بر مساحت آن فضا ($A(M)$) است.

$$\rho_{classic}(t) = \frac{N(t)}{A(M)} \qquad \text{رابطه(۹)}$$

در این تحقیق، تراکم در نزدیکی خروجی‌ها مدنظر قرار می‌گیرد.

۲-۵-۳- سرعت

یکی دیگر از معیارهای مهم در دینامیک عابران پیاده، سرعت حرکت آن‌ها می‌باشد. سرعت‌های پایین می‌توانند نشان‌دهنده تراکم بالا یا وجود موانع در جریان جمعیت باشند. پس از محاسبه سرعت فردی، میانگین سرعت در ناحیه اندازه‌گیری M که دقیقاً در جلوی خروجی قرار دارد، محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است میانگین سرعت تنها زمانی قابل محاسبه است که برای هر عابر پیاده در ناحیه اندازه‌گیری، سرعت $v_i(t)$ محاسبه شده باشد. میانگین سرعت به استفاده از رابطه(۱۰) تعریف می‌شود:

$$v_{mean}(t) = \frac{1}{N}\sum_{i\in P_M} v_i(t) \qquad \text{رابطه(۱۰)}$$

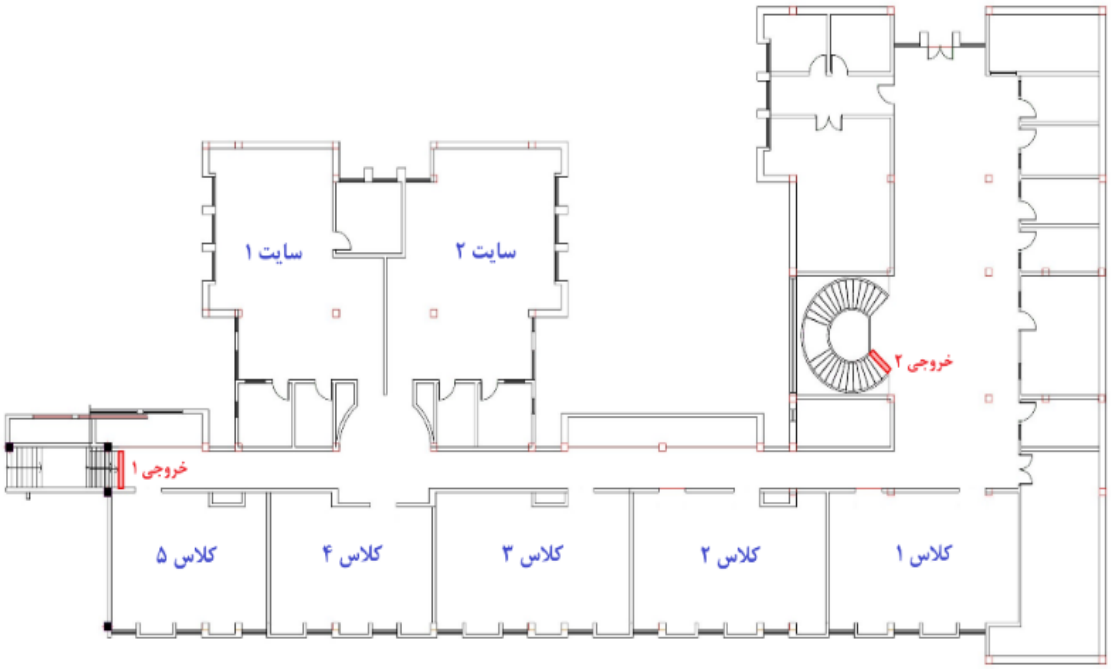
در رابطه (۱۰)، P_M مجموعه‌ای از تمام عابران پیاده داخل ناحیه اندازه‌گیری است و N تعداد عابران پیاده داخل ناحیه اندازه‌گیری ($|P_M|$) است.

۳- پیاده‌سازی و ارائه نتایج

روش پیشنهادی در دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران که در شکل (۵) نمایش داده شده، پیاده‌سازی می‌شود. این ساختمان آموزشی شامل پنج کلاس درس، دو آزمایشگاه (سایت) کامپیوتر و دو خروجی است. فرآیند تخلیه طی یک روند عادی (غیراضطراری) صورت می‌پذیرد.

[1] *Measurement Area*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]



شکل۵: منطقه مورد مطالعه

این پیاده‌سازی در بستر *Visual Studio Code* با زبان برنامه‌نویسی *Python* انجام می‌شود. مقادیر پیش‌فرض پارامترهای مدل نیروی اجتماعی [۲۶]، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: مقادیر پیش‌فرض مدل نیروی اجتماعی

پارامتر	A_i	B_i	k	κ	r_i	τ	v_i^0	m
مقدار	۲،۰۰۰	۰٫۰۸	۱۲۰،۰۰۰	۲۴۰،۰۰۰	۰٫۳	۰٫۵	۱	۸۰
واحد	N	m	$\frac{kg}{s^2}$	$\frac{kg}{m \cdot s}$	m	s	$\frac{m}{s}$	kg

در این تحقیق، عامل جنسیت به‌گونه‌ای درنظر گرفته می‌شود که طبق داده‌های عابران پیاده و نسبت جنسیت آن‌ها، تقریباً ۶۷٪ از جمعیت را مردان و باقی را بانوان تشکیل می‌دهند. طبق تحقیقات صورت گرفته [۲۷]، میانگین قد افراد ایرانی دارای سنین ۲۰-۲۹ سال برای آقایان ۶±۱۷۷٫۶ سانتی‌متر و برای بانوان ۴٫۳±۱۶۲٫۶ سانتی‌متر است. این مقدار برای جرم آن‌ها نیز به ترتیب برای آقایان و بانوان ۱۳٫۸±۸۰٫۵ و ۷٫۸±۶۳٫۱۰ کیلوگرم می‌باشد. از آنجایی که قد و جرم به طور عمومی از توزیع نرمال پیروی می‌کنند، بنابراین بازه قدی افراد مذکور برای آقایان و بانوان به ترتیب (۷٫۶-۱۶۵٫۱۸۹) و (۱۷۵-۱۴۹٫۸) سانتی‌متر و بازه جرمی نیز برای آقایان و بانوان به ترتیب (۱۰۸٫۱-۵۲٫۹) و (۸۵٫۳-۴۲٫۱) کیلوگرم درنظر گرفته می‌شود.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

در انتها این مقادیر و توزیع مکانی اولیه افراد به صورت تصادفی به عوامل اختصاص داده شده و سرعت مطلوب بین ۰٫۸ تا ۱ متر بر ثانیه [۲۶] برای همه عوامل تنظیم می‌شود.

در بخش مدل‌سازی کیف، کیف‌ها به دو دسته کیف دستی و کوله‌پشتی تقسیم می‌شوند. جرم این دو به صورت یک بازه قرار دارد که برای کیف دستی و کوله‌پشتی به ترتیب (۳-۵٫۰) و (۵-۲) کیلوگرم[1] درنظر گرفته می‌شود. در نهایت جرم کیف به صورت ضریبی به منظور محاسبه سرعت مطلوب اثر می‌کند؛ به طوری که جرم اثر کوله‌پشتی بیشتر از کیف دستی بوده و برای عابران پیاده‌ای که هیچگونه کیفی حمل نمی‌کنند، این اثر صفر می‌باشد. در این بخش ۹۰ ٪ عابران پیاده کیف دارند و باقی افراد بدون کیف هستند. ۷۱ ٪ و ۲۹ ٪ از عابرانی که کیف دارند به ترتیب دارای کوله‌پشتی و کیف دستی درنظر گرفته می‌شوند.[2] این درصدها به صورت تصادفی به عوامل اختصاص داده می‌شوند.

مدل تعمیم‌یافته پیشنهادی همچنین قادر به تصمیم‌گیری برای انتخاب خروجی است که در آن معیار به صورت کوتاه‌ترین فاصله اقلیدسی از هر کلاس یا مکان تا یک خروجی تعریف می‌شود. در نتیجه، به افراد کلاس‌های ۱ و ۲ (که در سمت راست قرار دارند) دستور داده می‌شود که از طریق خروجی شماره دو (سمت راست) خارج شوند. در همین حال، به افراد کلاس‌های ۴ و ۵ (که آن‌ها در سمت چپ قرار دارند) و هر دو سایت کامپیوتر دستور داده می‌شود که از طریق خروجی شماره یک (سمت چپ) خارج شوند. بر اساس توزیع مکانی جمعیت، افراد کلاس ۳ به دو گروه تقسیم می‌شوند: گروه اول (شامل نیمی از افراد) به خروجی شماره یک و گروه دوم (شامل نیم دیگر افراد) به خروجی شماره دو اختصاص داده می‌شوند.

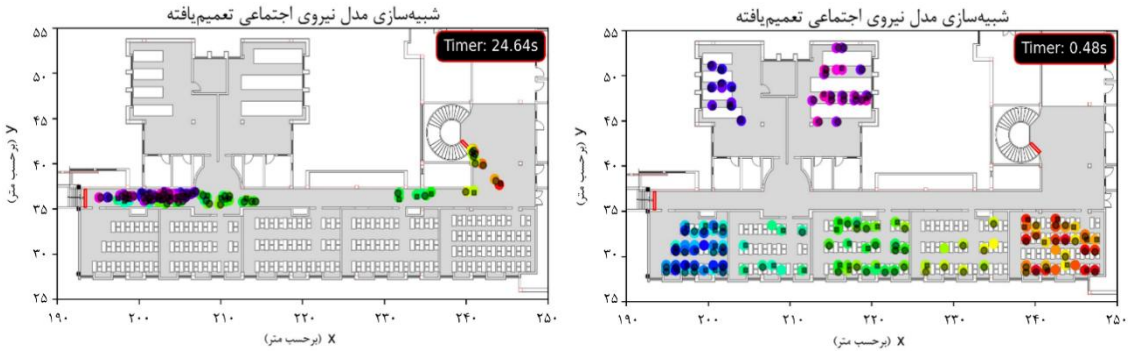
بنابراین، در سناریوی روش پیشنهادی، افراد بر اساس نزدیکی به نزدیک‌ترین خروجی تخلیه می‌شوند، تأثیر جرم کیف و جنسیت عابران نیز درنظر گرفته می‌شوند. از آنجایی که عمده دانشجویان از کیف استفاده می‌کنند، شبیه‌سازی به دنیای واقعی نزدیک‌تر است. پس تأثیر کیف به منظور تخلیه جمعیت در محیط‌های آموزشی به‌ویژه در محیط دانشگاه، غیرقابل چشم‌پوشی است. جنسیت و مشخصات متفاوت فیزیکی افراد مورد دیگری است که شبیه‌سازی را واقع‌گرایانه‌تر می‌کند. شکل (۶)، دو تصویر لحظه‌ای[3] از شبیه‌سازی روش تحقیق را در ۰٫۴۸ و ۲۴٫۶۴ ثانیه نشان می‌دهد. اشکال دایره‌ای و مربعی به ترتیب نمایانگر کوله‌پشتی و کیف دستی است. زمان تخلیه کل ۴۷٫۷۲ ثانیه به دست می‌آید.

شکل (۷)، منحنی تخلیه تجمعی را نشان می‌دهد که با یک تابع لجستیک برازش داده می‌شود. این تابع به خوبی بر داده‌های تجربی انطباق دارد. ساختار سه‌مرحله‌ای تخلیه (شروع کند، اوج و کاهش تدریجی) به وضوح در نمودار قابل تشخیص است. کاهش تدریجی ناشی از سرعت پایین یا جرم (جرم عابر پیاده بعلاوه جرم کیف) بالای افراد است.

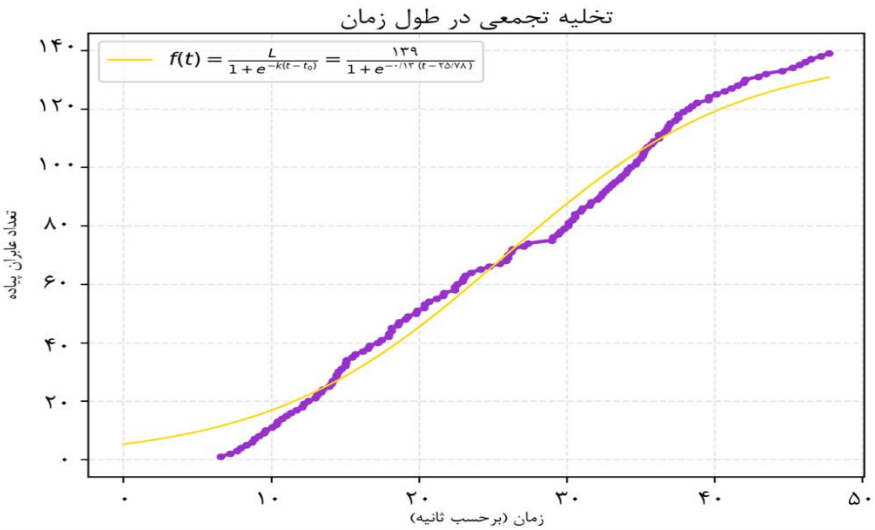
در ادامه، نمودار توزیع زمان تخلیه که یک محور آن تعداد عابران پیاده و محور دیگر زمان است، در شکل(۸) ترسیم شده است. هر چه تعداد افراد با زمان تخلیه بیشتر، کمتر باشد، فرآیند تخلیه سریع‌تر می‌شود.

[1] *https://acgih.ir/?p=4*
[2] *https://www.retailitinsights.com/doc/survey-looks-college-students-backpacks-budgets-back-school-0001?*
[3] *Snapshot*

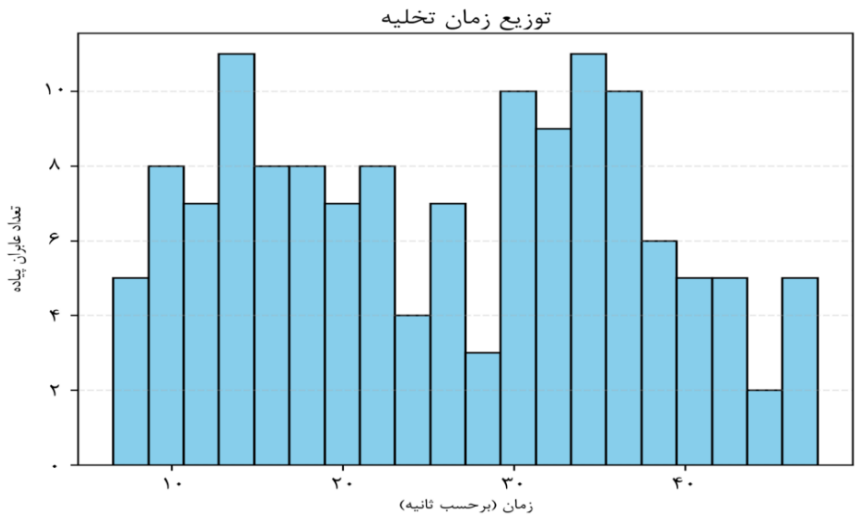
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]



شکل ۴: تصویر لحظه‌ای از شبیه‌سازی حاصل از اعمال روش تحقیق



شکل ۵: زمان تخلیه تجمعی حاصل از اعمال روش تحقیق

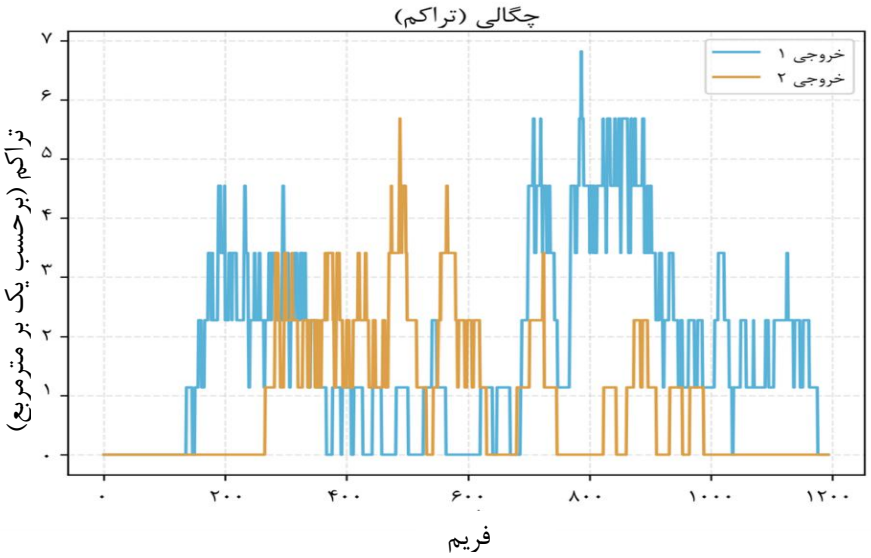


شکل ۶: نمودار توزیع زمان تخلیه حاصل از اعمال روش تحقیق

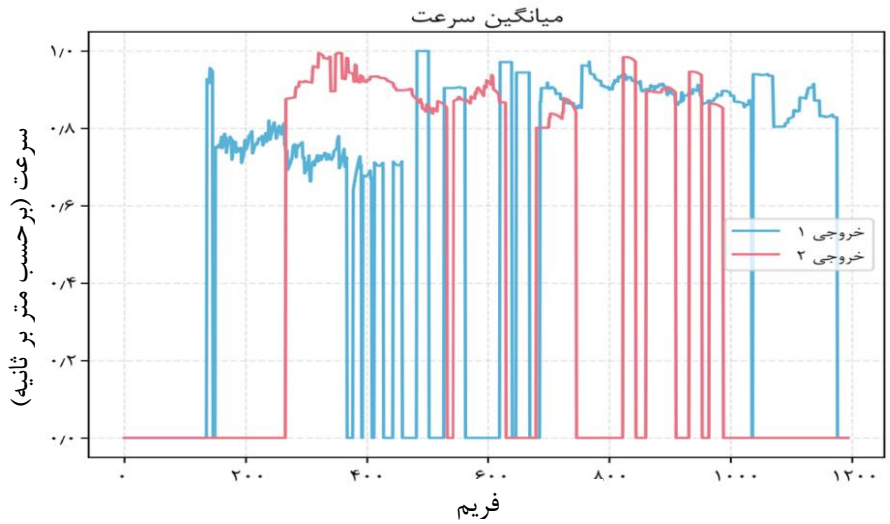
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

نزدیک هر خروجی، یک ناحیه اندازه‌گیری به ابعاد هر خروجی برای محاسبه تراکم عابر پیاده تعریف می‌شود. شکل (۹)، تراکم افراد در این ناحیه را به تفکیک هر فریم نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که بیشینه تراکم در خروجی شماره یک نزدیک به ۷ و در خروجی شماره دو نزدیک به ۶ نفر بوده است. تا نیمه زمان تخلیه (فریم)، تعادل کاملاً برقرار است که مطلوب می‌باشد.

شکل (۱۰)، میانگین سرعت افرادی را که از خروجی شماره یک و خروجی شماره دو خارج می‌شوند، نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، عابرانی که از خروجی شماره دو خارج شده‌اند دارای میانگین سرعت بیشتری می‌باشند.



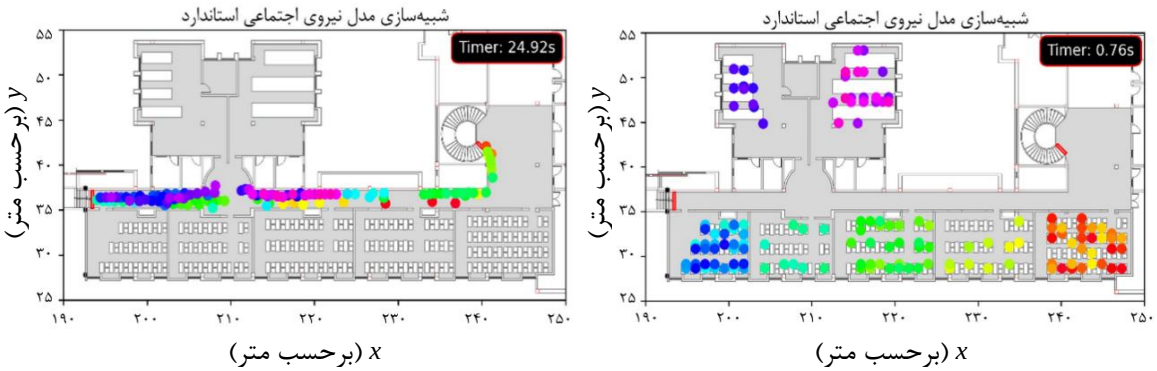
شکل ۷: چگالی حاصل از اعمال روش تحقیق



شکل ۸: میانگین سرعت حاصل از اعمال روش تحقیق

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

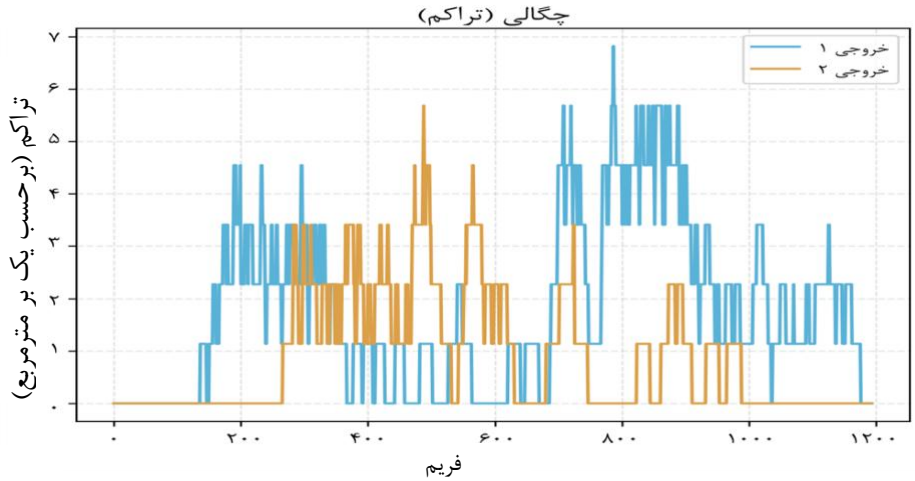
در ادامه، نتایج روش پیشنهادی با نتایج روش *SFM* استاندارد، مقایسه می‌شود. در سناریوی *SFM* استاندارد، همانند روش پیشنهادی، فرض بر این است که موانعی مانند دیوارها، ستون‌ها، میزها و صندلی‌ها در محدوده مورد مطالعه وجود دارند. در این سناریو، برخلاف سناریوی روش پیشنهادی، جنسیت افراد درنظر گرفته نمی‌شود و به همه عابران پیاده مقادیر سرعت و جرم یکسانی اختصاص داده می‌شود. همچنین، این روش قادر به تصمیم‌گیری برای انتخاب نزدیک‌ترین خروجی از هر محل نیست و کیف در آن مدل نمی‌شود. شکل (۱۱)، دو تصویر از شبیه‌سازی روش استاندارد را در زمان‌های ۰٫۷۶ و ۲۴٫۹۲ ثانیه نشان می‌دهد.



شکل ۹: تصویر لحظه‌ای از شبیه‌سازی *SFM* استاندارد

در سناریوی *SFM* استاندارد، زمان تخلیه کل به میزان ۶۴٫۵۶ ثانیه به دست می‌آید. نتایج نشان می‌دهد که برخی افراد با وجود نزدیک‌تر بودن به خروجی دیگر، ترجیح می‌دهند از خروجی دورتر خارج شوند که در نتیجه منجر به زمان تخلیه طولانی‌تر می‌شود. این امر همچنین منجر به افزایش تداخل عابران پیاده در راهرو می‌شود.

در شکل (۱۲)، بیشینه تراکم ثبت شده در سناریوی *SFM* استاندارد در خروجی شماره یک ۴٫۵ نفر است، در حالی که خروجی شماره دو بیشینه تراکم ۵٫۵ نفر را ثبت کرده است.

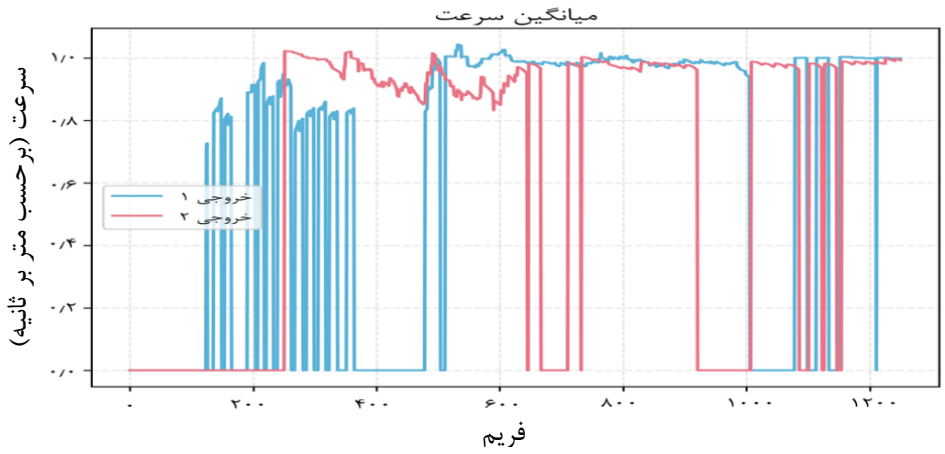


شکل ۱۰: چگالی حاصل از اعمال *SFM* استاندارد

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

این مشاهده نشان می‌دهد که توزیع تراکم بین دو خروجی نسبتاً متعادل است که آنچنان مطلوب نمی‌باشد.

شکل(۱۳) میانگین سرعت عابران پیاده را در سناریوی استاندارد *SFM* نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: میانگین سرعت حاصل از اعمال *SFM* استاندارد

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به شبیه‌سازی تخلیه جمعیت عابران پیاده در یک ساختمان آموزشی با استفاده از مدل نیروی اجتماعی پرداخته می‌شود که در آن تاثیر جنسیت عابران، جرم کیف آن‌ها و تصمیم‌گیری عابران پیاده نیز درنظر گرفته می‌شود. قد، جرم و سرعت راه‌رفتن عابران پیاده بر اساس جنسیت آن‌ها تعیین می‌گردد و در نتیجه تفاوت بین عابران پیاده مختلف درنظر گرفته می‌شود. گنجاندن متغیرهای مرتبط با جنسیت (مانند قد، جرم و سرعت) و کیف در شبیه‌سازی، با در نظرگرفتن تنوع در ویژگی‌های فیزیکی بین افراد، آن را واقع‌گرایانه‌تر می‌کند. علاوه بر این، این مدل انتخاب نزدیک‌ترین خروجی را به عنوان تصمیم‌گیری مبتنی بر آگاهی عابران پیاده در طول فرآیند تخلیه درنظر می‌گیرد. روش پیشنهادی با استفاده از داده‌های دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران ارزیابی می‌شود. نتایج حاکی از این است که زمان تخلیه حاصل از اعمال روش تحقیق برابر با ۴۷٫۷۲ ثانیه است که نشان‌دهنده بهبود ۲۶٫۰۸ درصدی در مقایسه با *SFM* استاندارد است که در آن جنسیت، کیف و تصمیم‌گیری مبتنی بر آگاهی عابران پیاده با زمان تخلیه ۶۴٫۵۶ ثانیه، درنظر گرفته نمی‌شود. از سوی دیگر، از نظر تراکم، روش پیشنهادی با موفقیت نسبی به توزیع متعادلی بین دو خروجی دست می‌یابد. بنابراین، هنگام طراحی یا ساخت یک ساختمان یا به منظور مدیریت و کنترل تخلیه جمعیت، توجه دقیق به خروجی‌ها و ویژگی‌هایی که باید داشته باشند (مانند فضای کافی و دسترسی) ضروری است. با استفاده از تراکم و سرعت، می‌توان نقاط حساس ازدحام را شناسایی کرد و برنامه‌های کلاس را به گونه‌ای سازماندهی کرد که افراد در هر کلاس بتوانند راحت‌تر و با ازدحام کمتر ساختمان را تخلیه کنند.

مطالعات آتی می‌تواند توصیه‌های طراحی معماری را برای بهبود سرعت جریان تخلیه بررسی کند. می‌توان اثرات راهروهای باریک و طولانی بر تخلیه را نیز ارزیابی کرد. همچنین با تجزیه و تحلیل چیدمان کلاس‌های درس در دو طرف راهروها (روبروی هم) در مقایسه با قرارگیری در یک طرف راهرو، می‌توان تاثیر آن را بر حرکت عابران پیاده ارزیابی نمود.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

مراجع

[1] X. Zheng, T. Zhong, and M. Liu, "Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches," Building and environment, vol. 44, no. 3, pp. 437-445, 2009.

[2] J. Xueling, "Simulation model of pedestrian evacuation in high-rise building: Considering group behaviors and real-time fire," Int. J. Smart Home, vol. 9, pp. 81-92, 2015.

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

[4] A. Soltanzadeh, M. Alaghmandan, and H. Soltanzadeh, "Performance evaluation of refuge floors in combination with egress components in high-rise buildings," Journal of Building Engineering, vol. 19, pp. 519-529, 2018.

[5] H. Yue, J. Zhang, W. Chen, X. Wu, X. Zhang, and C. Shao, "Simulation of the influence of spatial obstacles on evacuation pedestrian flow in walking facilities," Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 571, p. 125844, 2021.

[6] Z. Shi, J. Zhang, Z. Shang, and W. Song, "Collision avoidance behaviours of luggage-laden pedestrians," Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 639, p. 129664, 2024.

[7] G. Santos and B. E. Aguirre, "A critical review of emergency evacuation simulation models," Disaster Research Center, Other Preliminary Paper; 339, 2004.

[8] H. Lian, S. Zhang, G. Li, and Y. Zhang, "Pedestrian simulation on evacuation behavior in teaching building of primary school emergencies and optimized design," Buildings, vol. 13, no. 7, p. 1747, 2023.

[9] D. Helbing and P. Molnar, "Social force model for pedestrian dynamics," Physical review E, vol. 51, no. 5, p. 4282, 1995.

[10] V. J. Blue and J. L. Adler, "Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrian flows," Transportation Research Record, vol. 1678, no. 1, pp. 135-141, 1999.

[11] Z. Zhou, X. Zhu, and X. Li, "Impact of Classroom Facilities on Evacuation and Its Simulation," in 2020 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG), 2020: IEEE, pp. 393-397.

[12] C. Delcea and L.-A. Cotfas, "Increasing awareness in classroom evacuation situations using agent-based modeling," Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 523, pp. 1400-1418, 2019.

[13] Y. Huang, Z. Guo, H. Chu, and R. Sengupta, "Evacuation simulation implemented by ABM-BIM of unity in students' dormitory based on delay time," ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 12, no. 4, p. 160, 2023.

[14] Y. Zang, Q. Mei, and S. Liu, "Evacuation simulation of a high-rise teaching building considering the influence of obstacles," Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 112, p. 102354, 2021.

[15] K. Wang, Z. Fu, Y. Li, and S. Qian, "Influence of human-obstacle interaction on evacuation from classrooms," Automation in Construction, vol. 116, p. 103234, 2020.

[16] D. C. Schwebel, D. D. Pitts, and D. Stavrinos, "The influence of carrying a backpack on college student pedestrian safety," Accident Analysis & Prevention, vol. 41, no. 2, pp. 352-356, 2009.

[17] Z. Shang, J. Zhang, Z. Shi, X. Li, and W. Song, "Enhancing Evacuation Efficiency: Investigating How Luggage Influences Exit Strategies and Crowd Dynamics," Simulation Modelling Practice and Theory, p. 103142, 2025.

[18] L. P. Chew, "Constrained delaunay

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

triangulations," in Proceedings of the third annual symposium on Computational geometry, 1987, pp. 215-222.

[19] J. R. Shewchuk, "General-dimensional constrained Delaunay and constrained regular triangulations, I: Combinatorial properties," in Twentieth anniversary volume: discrete & computational geometry: Springer, 2008, pp. 1-58.

[20] B. Delaunay, "Sur la sphère vide. A la mémoire de Georges Voronoï," Известия Российской академии наук. Серия математическая, no. 6, pp. 793-800, 1934.

[21] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael, "A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths," IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics, vol. 4, no. 2, pp. 100-107, 1968.

[22] J. Hershberger and J. Snoeyink, "Computing minimum length paths of a given homotopy class," Computational geometry, vol. 4, no. 2, pp. 63-97, 1994.

[23] T. Tian, H. Wu, H. Wei, F. Wu, and J. Shang, "An Efficient Path Planning Algorithm Based on Delaunay Triangular NavMesh for Off-Road Vehicle Navigation," World Electric Vehicle Journal, vol. 16, no. 7, p. 382, 2025.

[24] D. L. Poole and A. K. Mackworth, Artificial Intelligence: foundations of computational agents. Cambridge University Press, 2010.

[25] A. Schadschneider, M. Chraibi, A. Seyfried, A. Tordeux, and J. Zhang, "Pedestrian dynamics: From empirical results to modeling," in Crowd Dynamics, Volume 1: Theory, Models, and Safety Problems: Springer, 2019, pp. 63-102.

[26] D. Helbing, I. Farkas, and T. Vicsek, "Simulating dynamical features of escape panic," Nature, vol. 407, no. 6803, pp. 487-490, 2000.

[27] M. Mohamadzadeh et al., "Comprehensive evaluation of body composition in a wide age range of Iranian adults using bioelectrical impedance analysis: Tehran Lipid and Glucose Study," Public Health Nutrition, vol. 27, no. 1, p. e24, 2024.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.13, No.3, Autumn 2025

Research Paper

Developing a Social Force Model for Indoor Pedestrians Evacuation Simulation

Ali Aryaeinezhad [1], Zahra Bahramian [2]*

1- MSc. student of GIS in School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran
2- Assistant professor in School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran

Abstract

Nowadays, the evacuation of the pedestrian crowd in indoor building environments poses a critical challenge for architects and safety engineers. In this study, the pedestrian evacuation from a building is simulated using a social force model (SFM). For this purpose, the simulation incorporates various factors, including the building layout (location of walls, columns, and exits), the obstacle arrangement (desks and chairs), the spatial distribution and gender of the pedestrains, as well as the mass of their bags are considered. Accordingly, the pedestrian gender—and consequently their height and body mass—as well as their bag mass, which affect their walking speed, are modeled. In addition, the evacuation process is based on the pedestrians' decision-making to assign to the nearest exit and expanding awareness and knowledge throughout the evacuation. The research method evaluates evacuation performance based on the total evacuation time, crowd density, and pedestrians speed, using real-world data from the School of Surveying and Geospatial Engineering at the University of Tehran. The results indicate that taking gender diversity, decision-making and bag load into consideration reduces the evacuation time by 26.08% compared to a homogeneous baseline model. This indicates the importance of taking gender, bag load, as well as decision-making based on pedestrian awareness into consideration in evacuation modeling to increase realism.

Key words: *Pedestrians Crowd Evacuation Simulation, Social Force Model, Bag, Gender, Decision-Making.*

Correspondence Address *: GIS Department, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.*
Tel*: +98 21 61114529*
Email*: zbahramian@ut.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-05-21]