فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۶، شماره ٤، تابستان ۱٤۰٤، ص. ٤۹۱٤-٤۸۹۷

مقاله علمی-پژوهشی

بهبود ظرفیت تخلیه اضطراری جمعیت در ایستگاه‌های مترو

(مطالعه موردی: ایستگاه متروی خیابان گیلان در تهران)

علی صفری فرد، پژوهشگر دکتری تخصصی معماری، دانشکده هنر، معماری و شهرسازی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمدرضا منصوری (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه معماری، واحد ورامین(پیشوا)، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

E-mail: dr.mohammadrezamansoori@iau.ac.ir

لیلی کریمی فرد: استادیار، دانشکده هنر، معماری و شهرسازی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: ۱٤۰۳/۰٤/۱٤ پذیرش: ۱٤۰۳/۰۷/۱٤

چکیده

امروزه سامانه حمل‌ونقل ریلی مسافران، یکی از بهترین گزینه‌ها در کلان‌شهرها به شمار می‌رود. افزایش روزافزون تعداد مسافران که از این سامانه، توجه بیشتری را به موضوع ایمنی جمعیت معطوف می‌سازد. ازآنجاکه ایستگاه‌های مترو دارای محدودیت فضایی‌اند؛ بروز هر رخداد غیرمنتظره‌ای، می‌تواند موجب وحشت، آسیب و تلفات مسافران شود. لذا بهبود ظرفیت تخلیه ایستگاه¬ها، از دغدغه‌های مدیران شهری محسوب می‌شود. هدف از این پژوهش، ارزیابی و بهبود ظرفیت تخلیه اضطراری در ایستگاه‌های مترو، از طریق تجزیه‌وتحلیل عوامل کالبدی-مدیریتی، و تأثیرگذاری آن بر مدت‌زمان تخلیه کامل ایمن و جمعیت است. این مولفه ها شامل: بهره‌گیری از پله‌های برقی مخالف، هدایت بخشی از جمعیت به پله‌های فرار و حذف دستگاه‌های کنترل خروج مسافران است. روش تحقیق حاضر، به لحاظ ماهیت، کاربردی و از نوع توصیفی-تحلیلی و نتایج آن، تبیینی است. در این مقاله، با بهره‌گیری از رویکرد عامل-محور، جهت شبیه‌سازی خروج اضطراری جمعیت، بر اساس سناریوهای محتمل؛ اقدام به ارزیابی و تبیین مؤلفه‌های مؤثر بر مدت‌زمان تخلیه جمعیت در شرایط اضطراری شده است. یافته‌های این پژوهش نمایانگر آن بوده است که حذف گیت‌های کنترل مسافران در مسیر خروج، تأثیر اندکی بر مهلت خروج مسافران داشته درصورتی‌که تغییر چرخش حرکت پله‌های برقی و همسوسازی آن، این مدت را از ٤١٤ ثانیه به ٤۰۰ ثانیه تقلیل می‌دهد. امکان بهره‌برداری از پله‌های فرار در دو سوی انتهایی سکو، مهلت تخلیه را به ۲۹۹ ثانیه و تجمیع تمهیدات مذکور، مهلت تخلیه را به ۲۹۷ ثانیه می‌تواند کاهش دهد. نتیجه این‌که: با شناسایی مؤلفه‌های مؤثر و محتمل، و مدیریت آگاهانه آن‌ها، امکان کاهش مدت‌زمان تخلیه و درنتیجه کاهش آسیب‌ها و تلفات انسانی، در شرایط اضطراری وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه مترو، تخلیه اضطراری جمعیت، شبیه‌سازی تخلیه، مدیریت تخلیه

۱. مقدمه

سامانه حمل‌ونقل ریلی مسافر، از مناسب‌ترین گزینه‌ها در کلان‌شهرها برای حل مشکل جابجایی مسافران ازنظر بهره‌وری است. ظرفیت بالا و کارایی خوب، سامانه حمل‌ونقل ریلی به‌ویژه سامانه زیرزمینی حمل‌ونقل ریلی را از دیگر سامانه‌ها متمایز ساخته است. مزایایی چون ظرفیت جابجایی پرشمار مسافران، سرعت‌بالا و وقت‌شناسی موجب شده است که بسیاری از مسافران، این سامانه را به‌عنوان وسیله سفر روزانه خود برگزینند. در کلان‌شهر تهران نیز مانند بسیاری از کلان‌شهرهای جهان، از این سامانه استقبال شده و ساخت و توسعه ایستگاه‌ها و خطوط قطارهای زیرزمینی شهری [مترو] در دهه‌های اخیر در این شهر و در کلان‌شهرهای دیگر کشور، رو به رشد بوده است. آنچه در این میان چشم‌گیر می‌باشد؛ استقبال و حضور بالای جمعیت از این سامانه حمل نقل مسافری است. مزایایی مانند: ظرفیت حمل‌ونقل زیاد، سرعت‌بالا، آلودگی کم، مصرف انرژی بهینه و ترافیک آسان، ازجمله جاذبه‌هایی است که می‌تواند تعداد قابل‌توجهی از مسافران را به این سامانه، متمایل سازد. بااین‌حال صرف حضور چنین جمعیت‌هایی، بالقوه می‌تواند ایمنی مسافران را به‌ویژه در شرایط اضطراری تهدید نماید. مدل‌سازی ظرفیت تخلیه جمعیت در ایستگاه‌های مترو، در مرحله‌ی طراحی و نیز در گام بهره‌برداری، می‌تواند میزان آسیب‌ها و تلفات انسانی در شرایط اضطراری را پیش‌بینی و کاهش دهد. ازاین‌رو مدیران با درک میزان عددی خسارات و تلفات انسانی، می‌توانند اقدامات پیش‌دستانه‌ای به‌منظور حذف و یا کاهش مخاطرات انسانی فراهم سازند.

هم‌زمان با توسعه و گسترش خطوط و ایستگاه‌های مترو، برخی از ایستگاه‌ها به حداکثر ظرفیت بهره‌برداری خود رسیده‌اند به‌گونه‌ای که تخلیه عادی مسافران نیز به‌دشواری صورت می‌گیرد. در چنین ایستگاه‌هایی تخلیه اضطراری جمعیت، می‌تواند بسیار نگران‌کننده باشد. تخلیه اضطراری در ایستگاه‌های مترو، همواره به‌عنوان یک مسئله کلیدی در مقوله ایمنی مسافران، شناخته می‌شود [Shi, et al., 2012].

در این پژوهش به بررسی راهبردهای ایمنی جمعیت در شرایط اضطراری دریکی از ایستگاه‌های متروی تهران پرداخته می‌شود. این راهبرد شامل سنجش عوامل مدیریتی مؤثر بر مدت‌زمان خروج اضطراری مسافران [مهلت] و تصمیم سازی در خصوص مدیریت چنین عواملی به‌منظور کاهش مدت‌زمان مذکور خواهد بود. اگرچه شرایط اضطراری شامل گستره وسیعی از موقعیت‌های طبیعی مانند: سیل، زلزله، طوفان، بارش‌های تندری و تگرگ، نفوذ منابع آب سطحی و زیرزمینی، ریزش چاه و قنات، و حوادث انسان‌ساخت مانند: حریق و دودگرفتگی، برخورد قطار با قطار، مانع و مسافر، برق‌گرفتگی، نقص و یا خرابی تجهیزات و تأسیسات برقی و مخابراتی، انفجار، نشت آب و فاضلاب، نشت و پخش گازهای سمی است؛ اما در این پژوهش، به آتش‌سوزی اکتفا شده و تمامی مدل‌سازی‌ها بر این اساس شکل‌گرفته است.

نتایج این پژوهش برای یاری‌رساندن به طراحان و مدیران این حوزه، به‌منظور پیش‌بینی مخاطرات و تدوین راهبردهای تخلیه اضطراری جمعیت در ایستگاه‌های زیرزمینی مترو مفید خواهد بود.

۱-۱ ضرورت

فضاهای پرجمعیت –به‌ویژه فضاهای پرجمعیت زیرزمینی– بیش از ابنیه‌ی دیگر، در معرض خطر قرار دارند. ازآنجاکه بیشتر بناها بر روی زمین احداث می‌شوند؛ امکان دریافت خدمات انسانی در زمان بروز شرایط اضطراری برای ساکنان و حاضران چنین بناهایی تا حدودی سهل و آسان است. علاوه بر این، امکان گریز انسان‌ها از درون چنین ساختمان‌هایی به فضای بیرون از ساختمان و احتمال نجات آنان بیشتر است. حتی افراد گرفتار در ساختمان، می‌توانند تا رسیدن امدادگران، در فضاهای امن و پناهگاه‌های موجود، به انتظار باقی بمانند.

در فضاهای زیرزمینی مانند اغلب ایستگاه‌های مترو، به هنگام بروز شرایط اضطراری، وضعیت انسان‌ها، بحرانی‌تر از انسان‌هایی خواهد بود که در یک ساختمان متعارف باشند. در این ساختمان‌ها، غالباً فضای امن، طراحی نشده است. آسانسورهای آتش‌نشان نیز در چنین ساختمان‌هایی دیده نمی‌شود. لذا جمعیت حادثه‌دیده، جز خروج از مسیرهای پله سنگی، پله‌برقی، پله‌های اضطراری و احتمالاً آسانسورها نمی‌بینند. در چنین وضعیتی، جریان خروج جمعیت وحشت‌زده، مانعی جدی برای دسترسی امدادگران خواهند بود که می‌باید برخلاف جهت آنان، حرکت کنند.

نگاهی به حوادث رخ‌داده در سال‌های اخیر در ایستگاه‌های زیرزمینی مترو، تائید کننده‌ی خطرپذیری ذاتی فضاهایی ازاین‌دست است:

در سال ۲۰۱۵ آتش‌سوزی در یک قطار متروی واشنگتن، موجب ایجاد وحشت و هرج‌ومرج در میان مسافران و کشته شدن یک نفر شد. در سال ۲۰۱۵ انفجاری که در یک قطار متروی استانبول رخ داد؛ موجب مرگ و زخمی شدن چند تن از مسافران شد. در همان سال حادثه‌ی مشابهی در همان شهر رخ داد و موجب تلفات و آسیب‌هایی شد. در سال ۲۰۱۵ حادثه برخورد یک قطار متروی کانتوی ژاپن با قطار متوقف‌شده‌ای،موجب آتش‌سوزی دریکی از واگن‌های قطار شد. در این حادثه یک مسافر جان باخت و بیش از ۳۰ تن زخمی شدند. در سال ۲۰۱٦ در یک قطار متروی شانگهای، به دلیل باز نشدن قطار متوقف‌شده و تلاش مسافران وحشت‌زده برای خروج از پنجره‌ها، تعدادی از مسافران زخم شدند. در سال ۲۰۱٦ یک قطار متروی توکیو، به دلیل افزایش سرعت، نتوانست در ایستگاه بعدی متوقف شود. لذا قطار به دیوار ایستگاه برخورد کرده و موجب مرگ یک تن و زخمی شدن ۱۵ تن از مسافران شد. در سال ۲۰۱٦ یک انفجار تروریستی در یکی از قطارهای بروکسل موجب تلفات و زخمی شدن تعدادی از مسافران شد. در سال ۲۰۱٦ حادثه انفجار در یک قطار متروی گوانگ ژو، موجب کشته و زخمی شدن تعدادی از مسافران شد. در سال ۲۰۱٦ حادثه آتش‌سوزی در یک قطار متروی ووهان و انفجار در قطاری دیگر موجب تلفات و جراحات انسانی شد. در سال ۲۰۱٦ دو انفجار در دو قطار متروی مسکو رخ داد و موجب کشته و زخمی شدن تعدادی از مسافران شد. در سال ۲۰۱۷ حادثه انفجار در یک قطار متروی سنت پترزبورگ موجب تلفات و جراحات بیش از ٤۰ تن از مسافران شد. در سال ۲۰۱۷ حادثه‌ی انفجار در یک قطار متروی لندن، موجب کشته و زخمی شدن تعدادی از مسافران شد. در سال ۲۰۱۸ در یک حادثه تروریستی در یک قطار متروی نیویورک چند تن زخمی شدند. در سال ۲۰۲۳ به دلیل ترمز اضطراری یک قطار متروی پکن، بیش از ۱۰۰ تن از مسافران دچار شکستگی شدند[Yu et al., 2019].

لذا جستجوی تمهیداتی در سطح مدیریتی که بتواند جان جمعیت حاضر در یک ایستگاه زیرزمینی را در شرایط اضطراری نجات دهد و یا دست‌کم، تلفات و خسارات انسانی را کاهش دهد؛ لازم و دربایست است.

۱-۲ اهداف

هدف کلی: این پژوهش در جستجوی احراز و معرفی روشی آینده‌پژوهانه است که بتوان با آن به درک محتمل‌تری از فرصت تخلیه اضطراری جمعیت و ارزیابی تأثیر مؤلفه‌های مدیریتی بر مهلت تخلیه اضطراری جمعیت در یک محیط ساخته‌شده‌ی زیرزمینی، در شرایط اضطراری دست‌یافت. بدیهی است صرف اتکا به رعایت کدها و استانداردهای منتشرشده و تساهل در درک مؤلفه‌های چون: رفتار، کالبد، تأسیسات و تجهیزات، نشانه‌ها و مدیریت، و ساده‌سازی مدل‌ها و تولید شبیه‌سازی‌هایی دور از واقعیت، نتایجی تلخ، همراه با تلفات و آسیب‌های انسانی در پی خواهد داشت.

هدف اختصاصی: دست‌یابی به مدت‌زمان تخلیه عادی جمعیت [فرصت] و دستیابی به کوتاه‌ترین مدت‌زمان‌های تخلیهٔ امن جمعیت در ایستگاه زیرزمینی متروی خیابان گیلان بر اساس شبیه‌سازی‌های انحصاری و شناسایی عوامل و مؤلفه‌های

مدیریتی که موجبات کاهش مدت‌زمان تخلیه [مهلت] را در شرایط اضطراری فراهم کرده‌اند به‌منظور کاستن از زمان تخلیه و افزایش تعداد نجات‌یافتگان، هدف اختصاصی این پژوهش می‌باشد.

نتایج این پژوهش برای یاری‌رساندن به طراحان و مدیران مربوطه، به‌منظور پیش‌بینی و طراحی راهبردهای تخلیه اضطراری جمعیت در ایستگاه‌های زیرزمینی مترو، مفید خواهد بود.

۱-۳ پرسش‌ها

این پژوهش در پی یافتن پاسخ پرسش‌های زیر است:

- مدت‌زمان تخلیه جمعیت در شرایط عادی چه میزان است و این مقدار چه فاصله‌ای با استانداردهای جهانی دارد؟
- بهره‌گیری از پله‌برقی‌های مخالف و تغییر جهت آن‌ها به سمت بالا در شرایط اضطراری چقدر بر مدت‌زمان تخلیه تأثیر می‌گذارد؟
- ازآنجاکه پله‌های فرار در زمان بهره‌برداری احداث نشده است، احداث آن، چه مقدار بر مدت‌زمان تخلیه در شرایط اضطراری مؤثر است؟

برچیدن گیت‌های کنترل بلیت در مسیر خروج و باز شدن گیت‌های کنترل بلیت در مسیر ورود، چه میزان بر مدت‌زمان تخلیه اضطراری جمعیت مؤثر است؟

چنانچه ملاحظات سه‌گانه: بهره‌گیری از پله‌های برقی مخالف، احداث پله‌های فرار و حذف گیت‌های خروج، به‌صورت هم‌زمان رعایت شود؛ به چه میزان می‌تواند به بهبود مدت‌زمان تخلیه کمک نماید؟

۲. فرایند کلی پژوهش

روش پژوهش از نوع توصیفی-تحلیلی است. در این پژوهش، ابتدا یک ایستگاه زیرزمینی مترو، به‌عنوان مطالعه موردی، انتخاب و داده‌های مکانی و توصیفی آن به‌صورت اسنادی و بازدید میدانی جمع‌آوری می‌شود. سپس طرح‌های مختلف تخلیه اضطراری جمعیت موردنظر در قالب سناریوهایی مشخص، تعریف می‌شود. در گام بعدی، مدت‌زمان تخلیه جمعیت [مهلت] برای هریک از سناریوها با بهره‌گیری از نرم‌افزار شبیه‌ساز Pathfinder برآورد می‌شود. پس از دریافت خروجی‌ها از نرم‌افزار، امکان بحث و نتیجه‌گیری خواهد بود. این روند به پاسخ پرسش‌های این پژوهش، منتج خواهد شد.

۳. ادبیات پژوهش

در در دو دهه‌ی اخیر، پژوهش‌های پرشماری درزمینهی تخلیه‌ی ایمن جمعیت به هنگام بروز شرایط اضطراری در مجتمع‌های مسکونی، ساختمان‌های اداری، آموزشی، تالارهای همایش و مانند آن انجام پذیرفته است. در این میان تعدادی از پژوهشگران، زمینه پژوهشی خویش را ایستگاه‌های زیرزمینی خطوط ریلی قرار داده‌اند. بر اساس بررسی ادبیات پژوهش، بیشتر پژوهش‌هایی که در این زمینه در سال‌های اخیر صورت گرفته است؛ بر مؤلفه‌هایی مهمی مانند رفتار مسافران، محیط کالبدی و مدیریت تخلیه متمرکز بوده‌اند. بااین‌حال نباید ازنظر دور داشت که هر ایستگاه زیرزمینی مترو، دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی است که آن را از ایستگاه‌های دیگر متمایز می‌سازد. مانند: تعداد مسافران، عمق ایستگاه، فاصله درگاه ورودی تا سکو، تقاطع با خطوط دیگر و مانند آن. لذا بهره‌گیری از یافته‌های پیشین به معنای بی‌نیاز شدن از سنجش و ارزیابی مؤلفه‌های موردنظر پژوهش حاضر، در نمونه موردی انتخابی نخواهد بود. در پی برخی از پژوهش‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر، به‌اختصار و به‌صورت دسته‌بندی موضوعی پرداخته‌شده است:

گونه شناسی تهدیدات: یو و همکاران با جمع‌آوری مواردی از حوادث شامل آتش‌سوزی، حمله تروریستی، سیل، زلزله و ازدحام جمعیتی که در ایستگاه‌های مترو و یا در قطارها در سراسر جهان رخ‌داده است، علل، پیامدها و شخصیت آن‌ها مورد تجزیه‌وتحلیل قرار داده، همچنین توصیه‌ها و اقدامات مفیدی باهدف پیشگیری از این بلایای ذکرشده ارائه نموده است[Yu et al., 2019].

هی و همکاران تاب‌آوری فضاهای زیرزمینی شهری را در شرایط سیلاب موردپژوهش قراردادند و در این خصوص فرار اضطراری

جمعیت و بازیابی شبکه حمل‌ونقل زیرزمینی را پس از بروز سیلاب، مورد تدقیق قراردادند. ایشان ساخت فضاهای زیرزمینی اسفنجی، استفاده از فناوری پیشرفته اطلاعات و سازگاری با تغییرات آب‌وهوا را پیشنهاد نمودند[He et al. 2010].

عناصر معماری: ها و لیکوترافیتس [۲۰۱۲] در پژوهشی تحلیلی و عامل¬محور، فرآیند تخلیه جمعیت را در ساختمان‌های بزرگ و چندطبقه موردبررسی قراردادند. آنان تأثیر معماری پیچیده ساختمان‌ها بر روی جابجایی افراد در شرایط اضطراری و درنهایت چگونگی تأثیر اندازه درهای اتاق، اندازه درِ خروجی اصلی، سرعت افراد و ضریب اصطکاک را بر بهبود روند تخلیه اضطراری جمعیت موردبررسی قراردادند[Ha & Lykotrafitis 2012].

مؤلفه پله ثابت و پله‌برقی: چنگ و همکاران در شبیه‌سازی‌های خود از رفتار تخلیه مسافران ایستگاه‌های مترو، بخشی از سهم خروج را به پله‌های برقی اختصاص دادند[Cheng et al., 2020].

کیائو و همکاران، بهره‌گیری از پله‌های برقی را در ترکیب با پله‌های سنگی، حیاتی دانسته و توصیه به مدیریت خطر آتش‌سوزی در اطراف پله‌های برقی و توقف حرکت آن در زمان گریز مسافران نمودند[Qiao et al., 2023].

چنگ و همکاران، پله‌های برقی را از معابر حیاتی تخلیه در ایستگاه‌های مترو دانسته‌اند و توصیه نموده‌اند که در شرایط اضطراری از آن، تنها به سمت بالا استفاده شود [Cheng et al., 2012].

کالیانوتیس و همکاران، بهره‌گیری از پله‌های برقی را تا ۵۰ درصد از کل ظرفیت خروج مسافران دانستند [Kallianiotis et al., 2018]. چن و همکاران با توجه به نتایج تخلیه و شبیه‌سازی دود ایستگاه مترو، بهره‌گیری از پله‌های برقی را موجب بهبود شرایط تخلیه و کاهش چشم‌گیر مدت‌زمان تخلیه مسافران ارزیابی کردند [Chen et al., 2020].

شی و همکاران که بیشترین پژوهش را درزمینهی بهره‌گیری از پله‌های برقی داشتند؛ نقش پله‌های برقی در حمل‌ونقل مسافران در حالت‌های عادی و اضطراری را، مؤثر دانستند و دریافتند که تغییر جهت حرکت پله‌های برقی به سمت خروج در مواقع آتش‌سوزی، بر ظرفیت جریان بین سکو و سالن بلیت‌فروشی تأثیر زیادی خواهد داشت [Shi et al., 2012].

کینسکی و همکاران پله‌های برقی را به‌عنوان گلوگاه ایستگاه مترو شناسایی نمودند [Kinsey et al., 2010]. کین و همکاران فشار تخلیه جمعیت را عمدتاً در ورودی پله‌ها دانسته‌اند [Qin et al., 2020]. سانگون و همکاران نیز راه‌پله‌ها را گلوگاه مسیر تخلیه دانستند و تعریف مناسب راه‌پله و عرض خروجی‌ها را مؤثر بر مدت‌زمان تخلیه جمعیت و موجب کاهش میزان وحشت و تعداد تلفات جمعیت دانستند [sagun et al., 2011].

رونچی و همکاران درباره تأثیر خستگی جسمی و روانی مسافران بر روند تخلیه آنان از طریق پله مطالعه کدند و این موضوع را بر فرایند کلی تخلیه، مؤثر دانستند [Enrico et al., 20].

کادوکورا و همکاران بهره‌گیری از پله‌های برقی را در ظرفیت تخلیه مسافران به‌شدت مؤثر و موجب کاهش مهلت تخلیه دانستند [Kadokura et al., 2012]. کو و همکاران نیز هندسه پله‌ها را بر سرعت تخلیه جمعیت و ماهیت جریان تخلیه مؤثر دانستند [Qu et al., 2014].

مؤلفه آسانسور: ماسبرگ و همکاران به‌منظور مرتفع ساختن چالش‌های ناشی از بالا رفتن مسافران از پله‌ها و حضور افراد دارای ناتوانی جسمی در مسیر حرکت مسافران، بهره‌گیری از آسانسورهای تخلیه را پیشنهاد دادند؛ بااین‌حال بی‌میلی مسافران به دلیل ذهنیت عدم استفاده از آسانسور در شرایط اضطراری را مانع استقبال مسافران از آسانسور دانستند [Mossberg et al., 2021].

مؤلفه گیت‌ها: اغلب ایستگاه‌های مترو دارای گیت‌های کنترل بلیت مسافران می‌باشد که در هر دو جهت ورود و خروج مسافران تعبیه‌شده و به‌صورت خودکار عمل می‌کند. ژو و

همکاران سرعت حرکت مسافران را به هنگام عبور از گیت‌های کنترلی، مقداری کمتر از سرعت پیاده‌روی معمولی دانسته‌اند[Zou et al., 2019]. در پژوهش دیگر، آنان گیت‌های کنترل بیلت را همانند راه‌پله‌ها، از گلوگاه‌ها برشمرده و مستعد ایجاد تلفات و آسیب‌های انسانی در شرایط بحرانی دانسته‌اند [Zhou et al., 2021].

فضای امن: طراحی و ایجاد فضایی که بتواند انسان‌ها را تا رسیدن نیروهای امدادی، از آسیب‌هایی مانند آتش و دود محافظت نماید در بسیاری از مجتمع‌های مسکونی و هتل‌ها، رویه‌ای تجویزی و یا اجباری است بااین‌حال تاکنون برای طراحی فضای امن در ایستگاه‌های مترو مطالعه چندانی صورت نگرفته و استاندارد ویژه‌ای تعریف‌نشده است. تنها پژوهشی که در این زمینه صورت گرفته مربوط می‌شود به سوکوهارا و همکاران. آنان پیشنهاد احداث یک طبقه‌ی جدید، پایین‌تر از سکو، به‌منظور داشتن یک مسیر تخلیه رو به پایین و در جهت مخالف دود را مطرح ساختند و آن را مؤثرترین روش تخلیه در ایستگاه‌های مترو دانستند [Tsukahara et al., 2011].

تراکم جمعیت: تراکم جمعیت از مؤلفه‌های برجسته در پژوهش‌های مربوط به تخلیه ایستگاه‌های مترو است. جین و همکاران تراکم بالای جمعیت را عامل تشدیدکننده تلفات و آسیب‌های انسانی در زمان بروز شرایط اضطراری در ایستگاه‌های مترو دانستند چراکه این موضوع می‌تواند زمینه‌ساز اثر دومینویی سقوط افراد باشد [Jin et al., 2020]. کای و همکاران نیز در پژوهشی که به‌منظور شناسایی عوامل مؤثر بر انتخاب خروجی‌های مترو انجام داده‌اند، بر مؤلفه تراکم جمعیت تأکید داشتند [Cai et al., 2022]. تراکم نقطه‌ای جمعیت نیز می‌تواند منجر به بروز حوادث شود برای مثال در سال ۱۹۹ افرادی که در محل ورودی ایستگاه مترویی در دومینسک بلاروس در برابر باران پناه گرفته بودند منجر به تلفات و آسیب‌های پرشمار انسانی شد [Guo et al., 2020].

رفتارهای روانی و فیزیکی مسافران: رفتار مسافران در فرایند تخلیه اضطراری مؤثر است. هونگ و همکاران در پژوهش خویش

رفتار مسافران را در شرایط اضطراری به پنج دسته تقسیم کرده است: مسافران برای تخلیه کوتاه‌ترین را برمی‌گزینند چراکه با غرایزشان سازگار است. مسافران از مناطق خطر، اجتناب کرده و خود را به مناطق امن می‌رسانند. مسافران مانند گله، مسافران دیگر را تعقیب می‌کنند. مسافران از مسیری که آمده‌اند مایل‌اند که از همان مسیر، تخلیه شوند. مسافران با انتخاب مسیرهای خلوت‌تر، جریان تخلیه را متعادل می‌سازند [Hong et al., 2016].

فرصت و مهلت: کالیانوتیس و همکاران، معتقدند که ایمنی جمعیت در شرایط اضطراری در ایستگاه‌های مترو، زمانی به دست می‌آید که زمان خروج ایمن موردنیاز [RSET] از مدت زمان خروج ایمن موجود [ASET] کوتاه‌تر باشد [Kallianiotis et al., 2018]. به‌عبارت‌دیگر مهلت تخلیه می‌باید کمتر از فرصت تعیین‌شده باشد. کائو و همکاران به خطر ورود سیلاب به ایستگاه‌های زیرزمینی مترو پرداختند. آنان تأثیر عمق آب، سرعت و جهت جریان سیلاب را بر مهلت خروج مسافران سنجیدند و دریافتند که افزایش عمق آب و جریان ورودی، خروج مسافران را دشوارتر می‌کند. درنتیجه افزایش تعداد خروجی‌های ایمن و گسترش عرض خروجی‌ها می‌تواند مهلت خروج را بهبود بخشد [Cao et al.,2024]. مدت زمان خروج ایمن موجود [فرصت] در کدهای متروی ایران، هنوز تعریف نشده است. این مقدار در کشورهای دیگر مانند: چین، ٦ دقیقه تعیین شده است.

ارزیابی ظرفیت تخلیه ایستگاه‌ها: چنگ و همکاران تلاش کردند تا از طریق تجزیه‌وتحلیل عوامل کلیدی مؤثر بر تخلیه اضطراری ایستگاه‌های مترو، به مدلی از ظرفیت تخلیه اضطراری مسافران دست یابند. آنان به سه جنبه: ویژگی تخلیه شوندگان، امکانات تخلیه [درگاه‌های خروجی، راه‌پله، گذرگاه‌ها]، سازمان و

مدیریت تخلیه تأکید داشتند [Cheng & Yang, 2012]. آنان دریافتند که ظرفیت تخلیه ایستگاه‌های مترو، یک عنصر کلیدی در طول تخلیه جمعیت به شمار می‌رود. بنابراین لازم است مطالعات نسبی در موزد برآورد ظرفیت تخلیه ایستگاه مترو و سطح ارزیابی خدمات تخلیه اضطراری به‌منظور بهبود سطح کلی ایمنی سیستم حمل‌ونقل ریای انجام شود [همان].

ژانگ و همکاران به ارزیابی ظرفیت تخلیه اضطراری ایستگاه‌های متروی شهری بر اساس وزن‌های ترکیبی در محیط فازی بصری پرداختند و سرانجام به ١٦ مؤلفه شامل: عوامل انسانی، تجهیزات، محیط کالبدی و شیوه مدیریت دست یافتند. آنان توانستند تدابیر ویژه‌ای برای بهبود ظرفیت گریز اضطراری ارائه نمایند [Zhang et al., 2023].

کالیانوتیس و همکاران به ارزیابی روش‌های تخلیه در ایستگاه‌های مترو پرداختند. آنان با بهره‌گیری از نرم‌افزار Pathfinder، و با چندین سناریو، سرعت و در دسترس بودن مسیر خروج را شبیه‌سازی کردند و با این روش، امکان ارزیابی کلی شرایط بحرانی را ممکن دانستند [Kallianiotis et al., 2018]. شی و همکاران مدل‌سازی ظرفیت تخلیه ایستگاه‌های مترو را با استفاده از مدل‌های محاسباتی، اقدام مؤثری برای تضمین ایمنی تخلیه مترو در آینده دانسته‌اند [Shi et al., 2012].

مدیریت تخلیه: وی و همکاران موضوع خطرپذیری حاضران در فضاهای زیرزمینی را موردپژوهش قراردادند و دریافتند که رفتار حاضران در چنین فضاهایی با بهره‌گیری از روش‌های مدیریت اضطراری، قابل پیش‌بینی است [Wei et al., 2024]

نوری و همکاران در یک مطالعه نظام‌مند و باهدف شناسایی عوامل محیطی و مدیریت سازمانی مؤثر بر تخلیه اضطراری جمعیت در ایستگاه‌های مترو به هشت مؤلفه شامل: ویژگی‌های زیرساختی، منابع کمک‌کننده تخلیه، پیشگیری از صدمات و کاهش آسیب‌ها، آمادگی برای تخلیه اضطراری، واکنش اضطراری و بازسازی و نگهداری امکانات تخلیه پرداختند. آنان دریافتند که طراحی یک مسیر بهینه برای تخلیه اضطراری، موضوع اصلی اکثر مطالعات با تمرکز بر عوامل محیطی است. درحالی‌که یک رویکرد سیستمی برای طراح برای تخلیه اضطراری مؤثر مترو موردنیاز است. همچنین عوامل مرتبط با انسان با تمرکز بر پیشگیری از آسیب نیز بسیار مهم دانسته شد [Nouri et al., 2019]. شس و همکاران درک دقیق مدیریت راهبردی تخلیه، مانند استراتژی استفاده از پله‌های برقی، تعیین افرادی که باید تخلیه شوند، و رفتارهای تخلیه برای طراحی ایمنی مترو مفید و بااهمیت بالایی دانسته‌اند [Shi et al., 2012].

رویکردها: انتخاب سطح مناسب در نگاه به رفتار جمعیت و همچنین انتخاب مدل و سیستم مناسب شبیه‌سازی رفتار جمعیت، امکان دستیابی به واقعی‌ترین خروجی‌ها و محتمل‌ترین رخدادها را برای شرایط اضطراری فراهم می‌سازد. پژوهشگرانی که مقالات آنان در دسترس بوده و موردمطالعه قرارگرفته شده است، در سه سطحِ کلان، میان و خرد، به رفتار جمعیت نگاه کرده و به‌تناسب موضوع تحقیق خویش، مدلی را برای کمک به شبیه‌سازی جمعیت، پیشنهاد داده‌اند. چکیده‌ای از تقسیم‌بندی این‌چنین رویکردهایی در پی می‌آید.

چنگ و همکاران برای ارزیابی خطر تخلیه مسافران از ایستگاه‌های مترو با رویکردی میان‌نگرانه، مدل نیروهای اجتماعی را به‌منظور شبیه‌سازی برگزیدند [Cheng et al., 2020]. هونگ و همکاران، مدل اتوماتای سلولی و مدل نیروهای اجتماعی را از محبوب‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی دانستند و در پژوهش خود از ترکیب این دو مدل بهره بردند [Hong et al., 2016]. کیائو و همکاران به‌منظور تجزیه‌وتحلیل درخت خطا در زمان تخلیه آتش‌سوزی مترو، با رویکرد خُردنگرانه به شبیه‌سازی مبتنی بر عامل پرداختند [Qiao et al., 2023]. چن و همکاران به‌منظور مدل‌سازی و تحلیل خروج اضطراری از ایستگاه‌های مترو با رویکردی خردنگرانه از روش شبیه‌سازی مبتنی بر عامل بهره بردند [Chen et al., 2017]. چن و

همکاران نیز با رویکردی خردنگرانه، با روش شبیه‌سازی مبتنی بر عامل، فرایند تخلیه ایستگاه را به انجام رساندند [Chen et al., 2020]. هوی و همکاران به‌منظور مقایسه مدت‌زمان تخلیه نظری و مدت‌زمان تخلیه شبیه‌سازی‌شده، با رویکردی خردنگرانه از روش شبیه‌سازی مبتنی بر عامل سود جسته‌اند [Hui et al., 2023].

مانورهای تخلیه: انجام مانورهای تخلیه جمعیت با اهداف پژوهشی به دلیل هزینه‌ی بالا و مشکلات دیگر، به‌ندرت صورت می‌گیرد. در میان شیائوشیا و همکاران توانستند به‌منظور مطالعه رفتار جمعیت تخلیه شونده از یک ایستگاه مترو، از روش مانور تخلیه بهره ببرند. آنان مؤلفه‌هایی مانند: رفتار گله‌ای، سن، جنس و تجربه را از عوامل تأثیرگذار بر مدت‌زمان تخلیه، ارزیابی نمودند [Xia0-xia et al. 2011].

نرم‌افزارها: جیانگ و همکاران به‌منظور تعیین تأثیر دو مؤلفه عرض راه‌پله مورداستفاده برای هر نفر و حداکثر سرعت راه رفتن به سمت لابی در ایستگاه‌های مترو از نرم‌افزار EXODUS بهره بردند [Jiang et al., 2009]. می و همکاران با کمک نرم‌افزار Pathfinder تخلیه اضطراری جمعیت را در ایستگاه مترو شبیه‌سازی کردند. آنان رابطه کمّی بین زمان تخلیه، تعداد مسافران تخلیه‌شده و نرخ جریان مسافر را به دست آوردند [Mei et al., 2018]. کین و همکاران جریان مسافران را در ایستگاه مترو با کمک نرم‌افزار Pathfinder شبیه‌سازی نمودند و موقعیت بیشترین فشار تخلیه را به دست آوردند [Qin et al., 2020]. یانگ و همکاران از نرم‌افزار Pathfinder برای شبیه‌سازی و تجزیه‌وتحلیل تأثیر موانع بر تخلیه اضطراری در ایستگاه مترو بهره بردند [Yang et al., 2019]. کالیانیوتیس و همکاران شبیه‌سازی فرایند تخلیه را با استفاده از نرم‌افزار Pathfinder و با تنظیم مؤلفه‌های گوناگون، امکان‌پذیر می‌داند [Kallianiotis et al., 2018]

٤. چارچوب نظری

به ایستگاه‌های مترو نیز مانند هر ساختمان دیگری در معرض خطرات و حوادث گوناگون قرار دارد. برخی از این حوادث، طبیعی بوده مانند: سیل و زلزله، و برخی انسانی مانند: حملات تروریستی و یا صدمات ناشی از ازدحام جمعیت. در این میان حوادثی نیز مانند آتش‌سوزی رخ می‌دهد که می‌تواند عمدی و یا غیرعمدی آغازشده باشد. بدیهی است راهکار مقابله با هر حادثه‌ای، متفاوت خواهد بود. در زمان حملات تروریستی، بسته به این‌که آن حادثه در ترازهای بالایی و یا پایینی رخ‌داده باشد؛ جهت گریز جمعیت نیز متفاوت خواهد بود. و چنانچه حادثه‌ای مانند حریق رخ دهد؛ جهت گریز جمعیت، به سمت بالا خواهد بود. ازاین‌رو در حادثه‌ای مانند سیل گرفتگی، جهت حرکت مردم و سیل، مخالف یکدیگر و در حادثه‌ی آتش‌سوزی که با تولید دود همراه است؛ جهت حرکت مردم، موافق یکدیگر خواهد بود. به‌هرروی و به‌صورت غریزی، مردم ترجیح می‌دهند که در حادثه‌ای از ایستگاه مترو خارج شوند و به فضای امن و باز برسند.

ازآنجاکه ایستگاه‌های زیرزمینی مترو، برخلاف ابنیه‌ی دیگر که بر روی زمین احداث می‌شود، دارای محدودیت دسترسی برای امدادگران می‌باشد و چه‌بسا جهت حرکت مردم، مانعی جدی برای ورود امدادگران به ایستگاه باشد. لذا تخلیه جمعیت، غالباً، بهترین راه برای کاهش آسیب‌ها و تلفات انسانی خواهد بود.

در این میان، عواملی مانند رفتار جمعیت، محیط کالبدی، تأسیسات و تجهیزات، و روش مدیریتی می‌تواند بر فرایند تخلیه جمعیت تأثیر مثبت و یا منفی داشته باشد. اما نباید ازنظر دور داشت که شناسایی و درک این مؤلفه‌ها، می‌باید به‌صورت آینده‌پژوهانه صورت پذیرد. به عبارتی می‌باید پیش از آن‌که حادثه‌ای رخ دهد؛ میزان آسیب‌ها و تلفات احتمالی شناسایی‌شده و دستورالعمل‌های لازم، تدوین شود.

ازآنجاکه کالبد هر ایستگاه زیرزمینی مترو، محدود و غیرقابل توسعه و امکان مداخلاتی مانند: افزایش تعداد و عرض درگاه‌ها

و مسیرهای خروج، تقریباً غیرممکن است؛ لذا بهبود ظرفیت تخلیه جمعیت، می‌تواند راهکاری در دسترس و کم‌هزینه باشد. بخشی از فرایند بهبود ظرفیت تخلیه جمعیت، در حوزه مدیریت تعریف می‌شود. چنانچه با تصمیم‌گیری‌های مناسب مدیریتی، بتوان مدت‌زمان تخلیه‌ی کامل جمعیت را ازآنچه پیش‌تر بوده، کاهش داد. می‌توان نتیجه گرفت که به هر تعداد که افراد بیشتری که بتوانند در مدت‌زمان کمتری تخلیه شوند؛ احتمال آسیب و تلفات کاهش خواهد یافت.

مدت‌زمان تخلیه کامل هر ایستگاه بر اساس استاندارد بریتانیا ٦ دقیقه در نظر گرفته‌شده است[GB50157-2013]. این مدت‌زمان، شامل بخش‌های کوچک‌تری مانند: زمان آگاه شدن از خطر، زمان تصمیم‌گیری و مدت‌زمان حرکت به سمت درگاه خروج، خواهد بود.

نحوه دست‌یابی به مدت‌زمان خروج [مهلت] به روش‌هایی مانند: انجام مانور تخلیه، مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای رایانه‌ای امکان‌پذیر است. ازآنجاکه انجام مانور تخلیه بسیار پرهزینه بوده و در رفتار جمعیت مانور دهنده نیز، تصنعی و غیرقابل استناد می‌باشد. از سوی دیگر مدل‌سازی ریاضی، بسیار پیچیده بوده و امکان سهو و خطا در آن می‌رود. لذا بهره‌گیری از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز، گزینه‌ی مناسب‌تری به نظر می‌رسد. بدیهی است نرم‌افزار مربوطه، می‌باید منطبق با استانداردهای مرجع بوده و از روایایی و پایایی لازم برخوردار باشد.

امروزه نرم‌افزار Pathfinder، نرم‌افزاری است که می‌تواند باقابلیت‌های گرافیکی ممتازی که دارد؛ فرایند شبیه‌سازی را در ابنیه‌ی گوناگون، ازجمله ایستگاه‌های زیرزمینی مترو به انجام برساند. این نرم‌افزار، عامل محور بوده و برای پژوهش‌هایی که با رویکرد خُردنگرانه صورت می‌گیرد؛ بسیار توانمند می‌باشد.

به‌منظور دست‌یابی به نتایجی که بتوان به پرسش‌های این پژوهش، پاسخی مناسب یافت و در راستای هدف‌های این پژوهش حرکت کرد؛ سناریوهایی مدیریتی، تعریف کرده و به ازای هر سناریو، می‌باید شبیه‌سازی مربوطه صورت گیرد.

با بهره‌گیری از نتایج دریافتی پس از شبیه‌سازی در نرم‌افزار Pathfinder بحث و تحلیل نتایج، می‌توان میزان تأثیرگذاری مؤلفه‌های مدیریتیِ موردنظر را ارزیابی نموده و به بهبود ظرفیت تخلیه ایستگاه‌های مترو زیرزمینی –در اینجا، ایستگاه متروی خیابان گیلان تهران– یاری رساند.

۵. روش پژوهش

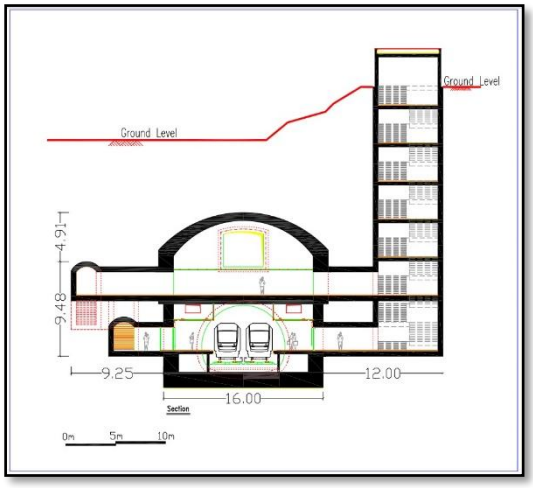
روش پژوهشی در این تحقیق، به لحاظ ماهیت، کاربردی و از نوع توصیفی–تحلیلی و نتایج آن، تبیینی است. در این پژوهش، ابتدا یک ایستگاه زیرزمینی مترو از خط سه شمالی تهران به جهت امکان مطالعه‌ی موردی انتخاب شد. سپس داده‌های مکانی و توصیفی آن به‌صورت اسنادی و بازدید میدانی گردآوری شد.

با بهره‌گیری از رویکرد عامل¬محور جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی خروج اضطراری جمعیت، بر اساس سناریوهای محتمل، با ارزیابی مؤلفه‌های مدیریتی مؤثر، باهدف بهبود و کاستن از مدت‌زمان تخلیه کامل جمعیت، صورت گرفت و نتایج حاصله موردبحث و تحلیل قرار گرفت.

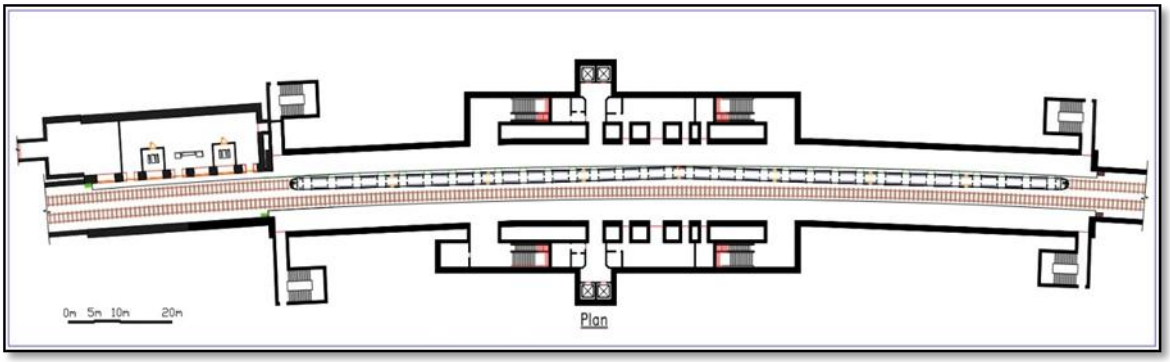
الف. شناخت و تعریف جامعه آماری: در این پژوهش، جمعیت حاضر در ایستگاه با فرض توقف یک قطار در سکو ٦٠٠ نفر لحاظ می‌شود به این شرح که ۵۰۰ نفر به‌صورت نشسته و ایستاده در داخل قطار، ۳۰ مسافربر روی سکوی موافق، ۳۰ مسافربر روی سکوی مخالف و ٤٠ مسافر در حال تردد در مسیر پله‌ها و سالن بلیت‌فروشی. ۱۰ نفر نیز به‌عنوان کارمند فرض می‌شوند. ازآنجاکه این افراد می‌باید در زمان بروز شرایط اضطراری به هدایت مسافران و مدیریت تخلیه مشغول باشند، لذا خروجشان منتفی بوده و در آمار جمعیت تخلیه شونده لحاظ نمی‌شوند. جمعیت موردنظر در سنین مختلف بوده اما افراد کم‌توان در میان آن‌ها دیده نمی‌شود.

ب. گردآوری مستندات ترسیمی: نقشه‌ها و مدارک ترسیمی مربوط به ایستگاه مترو خیابان گیلان، از مشاور مربوطه تهیه شد.

این ساختمان اکنون در حال بهره‌برداری بوده و دارای یک سالن فروش بلیت به مساحت ۵۱۸ مترمربع، دو سکو به مساحت هرکدام ٦٥٤ مترمربع، چهار دستگاه پله دسترسی از سکو به سالن بلیت‌فروشی، یک دستگاه پله دسترسی از سکو به درگاه ورودی، چهار دستگاه آسانسور مسافربر و دو دستگاه پله فرار از سکوها به سالن بلیت‌فروشی و دو دستگاه پله فرار از سکوها تا سطح زمین و ده دستگاه پله‌برقی است.. ارتفاع داخلی این ساختمان ۳۹ متر می‌باشد [تصاویر ۱ و ۲].



شکل ۱. برش عرضی ایستگاه



شکل ۲. پلان ایستگاه در سطح سکو

پ. شبیه‌سازی: در آغاز به‌منظور دست‌یابی به نتایج معیار، فرایند تخلیه جمعیت در حالت عادی [غیر اضطراری] و با جمعیت معیار [٦۰۰ مسافر] و بدون لحاظ کردن جمعیت کارمندی شبیه‌سازی شد. پراکندگی جمعیت در این ایستگاه بدین گونه فرض شده است: ۵۰۰ تن در داخل قطار متوقف‌شده‌اند که از این میان ۳۰۰ تن به‌صورت نشسته و ۲۰۰ تن به‌صورت ایستاده‌اند. ۳۰ تن در سکوی موافق و ۳۰ تن دیگر در سکوی مخالف، در انتظارند. ٤۰ تن در مسیر پله‌ها و یا در سالن بلیت‌فروشی حضور دارند. مجمع این تعداد به ٦۰۰ تن می‌رسد. در این سناریو تمام جمعیت همگن و بدون افراد کم‌توان فرض شد. در این حالت، مسیر اصلی خروج مسافران، پله‌های ثابت و پله‌های برقی همسو تعریف شدند. امکان استفاده از پله‌های برقی رو به پایین، آسانسورهای مسافربر و پله‌های فرار [که در حال حاضر احداث نشده‌اند] در این حالت منتفی است. تخلیه جمعیت در این حالت، سناریوی عادی در نظر گرفته شد و مدت‌زمان تخلیه در این سناریو، فرصت و معیار مدت‌زمان تخلیه ایمن جمعیت در نظر گرفته شد. پس‌ازآن مجدداً شبیه‌سازی با

اعمال متغیرهای مدیریتی صورت گرفت و نتایج حاصله با نتایج معیار، مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت.

ت. سناریوهای پژوهش: به‌منظور ارزیابی مؤلفه‌های مدیریتی، چهار سناریو علاوه بر سناریوی نخست تعریف شد؛ بدین گونه که در سناریوی دوم، گیت‌های کنترل خودکار بلیت در مسیر خروج حذف شدند و مسیر خروج جمعیت، مشابه سناریوی یکم در نظر گرفته شد. در سناریوی سوم، مشابه سناریوی نخست طراحی شد با این تفاوت که این بار مسافران می‌توانستند از پله‌های فرار نیز استفاده کنند. توضیح این‌که معمولاً پله‌های فرار در مرحله طراحی برای ایستگاه‌ها در نظر گرفته می‌شود ولی در زمان اجرا، از اجرای آن صرف‌نظر می‌شود. در سناریوی چهارم، مسیر پله‌های برقی پایین‌رو، به سمت بالا تغییر جهت داده شد و الباقی موارد مشابه سناریوی نخست در نظر گرفته شد. سناریوی چهارم به‌نوعی تجمیعی از سه

سناریوی پیشین به شمار می‌رود به این صورت که در این سناریو، گیت‌های کنترل بلیت در مسیر خروج برداشته شد، جهت پله‌های برقی مخالف، با مسیر حرکت مسافران همسو شد و امکان استفاده از پله‌های فرار نیز مهیا شد.

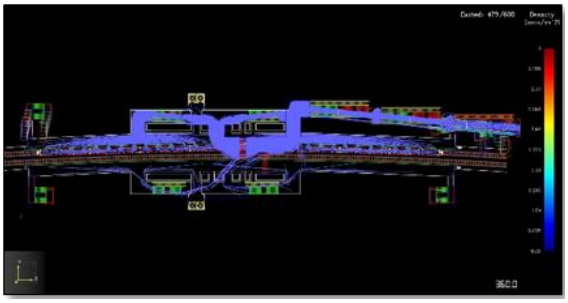
در تمام سناریوها فرض بر این قرار گرفت که یک فقط یک قطار در سکو حضورداشته باشد. کانون آتش در درون قطار باشد. به‌محض حضور قطار در ایستگاه، هشدارهای لازم در تمام ایستگاه داده شود. تمام درهای قطار بلافاصله باز شود. از ورود مسافران جدید به ایستگاه ممانعت به عمل آید و تمام مسافران حاضر در ایستگاه به سمت درگاه خروج هدایت شوند.

ج. نرم‌افزار: به‌منظور شبیه‌سازی از نرم‌افزار Pathfinder-2023.2.0816-x64-en بهره برده شد. در میان برنامه‌هایی که برای مدل‌سازی عامل محور نوشته‌شده است، Pathfinder بیش از دیگر برنامه‌ها مورد اقبال پژوهشگران قرارگرفته است. این برنامه، یک شبیه‌ساز خروج مبتنی بر عامل(ABM) است که برای مدل‌سازی ساختمان‌های پیچیده‌تر طراحی‌شده و روایایی و پایایی آن با ضوابط سازمان بین‌المللی دریانوردی منطبق است [ریسمانیان و زهرا ترکمن، ۱۴۰۲] این شبیه‌ساز ، با رویکردی خُردنگرانه، برای شبیه‌سازی جریان جمعیت، مناسب بوده و شامل مجموعه‌ای از عناصر هوشمند و دارای قدرت تصمیم‌گیری است[Haghani & sarvi, 2019]. این برنامه یک سیستم ارزیابی تخلیه اضطراری جمعیت است که به‌طور شهودی و ساده توسط شرکت Thunderhead Engineering در ایالات متحده توسعه یافته است. این نرم‌افزار دارای یک رابط کاربری پیشرفته با قابلیت‌های بصری، شامل افکت‌های انیمیشن سه‌بعدی است. خروجی‌های واقع‌گرایانه‌ای که این برنامه از افراد تولید می‌نماید و احساس ملموسی از واقعیت را به کاربران ارائه می‌دهد. PATHFINDER از کارت‌های گرافیکی استاندارد پشتیبانی می‌کند و امکان شبیه‌سازی انیمیشن‌های روان و آنی از هزاران نفر را فراهم می‌آورد و به‌این‌ترتیب داده‌های علمی بیشتری را در زمینه مدل‌سازی و تحلیل شبیه‌سازی ارائه می‌دهد [Zhang, Lee & Kong, 2024].

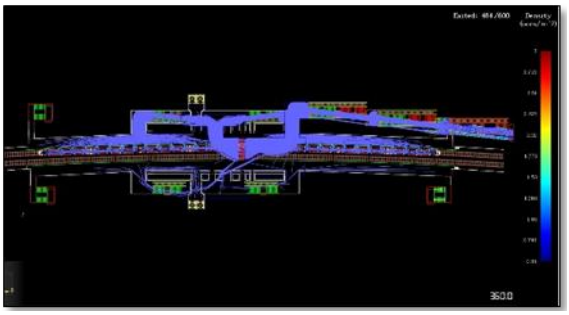
٦. یافته‌ها

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده آن بود که در سناریوی نخست ، مدت‌زمان تخلیه عادی جمعیت ٦٠٠ نفره حاضر در ایستگاه، برابر با ٤١٤ ثانیه بود. در این شبیه‌سازی روشن شد که در ثانیه ٣٦٠، ٤٧٩ تن از مسافران توانسته‌اند بدون آسیب از ایستگاه خارج شوند. در صورت بروز شرایط اضطراری در این سناریو، ۱۲۱ تن از مسافران نمی‌توانستند بدون آسیب و صدمه از ایستگاه خارج شوند [شکل ۳].

و در سناریوی دوم که با برچیدن گیت‌های کنترل خودکار بیلت در مسیر خروج مسافران صورت گرفت؛ مدت‌زمان خروج اضطراری جمعیت به ٤١٣ ثانیه رسید. در این شبیه‌سازی روشن شد که در ثانیه ٣٦٠، ٤٨٤ تن از مسافران توانسته‌اند بدون آسیب از ایستگاه خارج شوند. در صورت بروز شرایط اضطراری در این سناریو، ١١٦ تن از مسافران نمی‌توانستند بدون آسیب و صدمه از ایستگاه خارج شوند [شکل ٤].

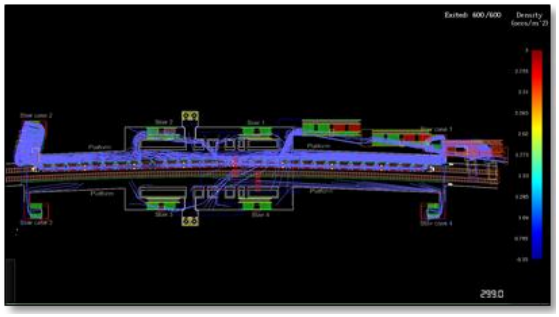


شکل ۳. شبیه‌سازی سناریوی یکم در ثانیه ۳۶۰



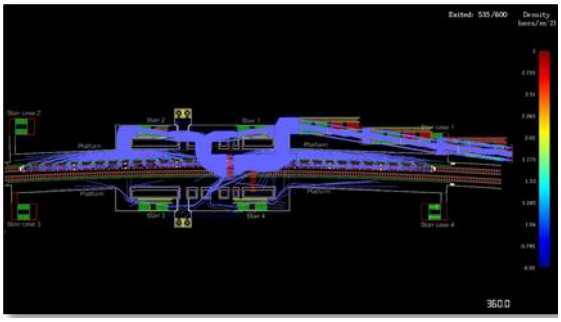
شکل ٤. شبیه‌سازی سناریوی دوم در ثانیه ۳۶۰

در سناریوی سوم که مسافران توانسته بودند علاوه بر پله‌های ثابت از پله‌های فرار نیز استفاده کنند؛ مدت‌زمان تخلیه اضطراری به ۲۹۹ ثانیه کاهش یافت [شکل ۵].



شکل ۵. شبیه‌سازی سناریوی سوم در ثانیه ۳۶۰

در سناریوی چهارم مدت‌زمان تخلیه اضطراری مسافران به ٤۰۰ ثانیه رسید. در این سناریو، جهت پله‌های برقی مخالف نیز به‌صورت همسو تغییر داده شد و مسافران توانستند از پله‌های ثابت و از همه پله‌های برقی برای حرکت خود بهره برند. در این شبیه‌سازی روشن شد که ۵۳۵ تن از مسافران، توانسته‌اند در ۳۶۰ ثانیه تخلیه شوند و ٦۵ نفر دچار آسیب شوند [شکل ٦].



شکل ٦. شبیه‌سازی سناریوی چهارم در ثانیه ۳۶۰

در سناریوی پنجم و یا سناریوی تجمیعی که مسافران می‌توانستند از پله‌های ثابت، پله‌های فرار، تمام پله‌های فرقی استفاده کنند و گیت‌های سمت خروج نیز برچیده شده بود، مدت‌زمان تخلیه اضطراری جمعیت به ۲۹۷ ثانیه رسید [شکل ۷].

شکل ۷. شبیه‌سازی سناریوی پنجم در ثانیه ۲۹۷

۷. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های این پژوهش، جمعیت حاضر در ایستگاه‌های زیرزمینی متروی شهر تهران در شرایط اضطراری، آسیب پذیرند. این شرایط، براثر تهدیدات انسان‌ساخت و یا طبیعی، ممکن است حادث شود. فارغ از این‌که سرچشمه این شرایط، چه باشد؛ توجه و تدبیر در خصوص تخلیه اضطراری جمعیت حاضر در ایستگاه‌ها می‌تواند به میزان قابل‌توجهی از آسیب‌های انسانی، پیشگیری نماید و یا آن را کاهش دهد. ازآنجاکه هدف‌گذاری مدت‌زمان تخلیه اضطراری مطابق با کدها و استانداردهای موجود، حداکثر ۳٦۰ثانیه می‌باشد، شبیه‌سازی نخست که مطابق با وضع کنونی ایستگاه صورت گرفت بیانگر آن است که ۱۲۱نفر از مسافران، امکان خروج امن از ایستگاه را نخواهند داشت. لذا در اینجا ضرورت مداخله رفتاری، کالبدی و یا مدیریتی به‌منظور

کاهش مدت‌زمان تخلیه و دست‌یابی به فرصت ۳۶۰ثانیه‌ای تخلیه به‌روشنی دیده می‌شود. در سناریوی دیگر به اثربخشی برچیدن گیت‌های کنترل بلیت در مسیر خروج مسافران پرداخته شد و مدت‌زمان ٤١٣ثانیه‌ای حاصله، نشان‌دهنده بی‌تأثیری آن بوده است. بااین‌حال نباید از نظر دور داشت که بر مبنای مفروضات نخستین، تنها یک قطار در ایستگاه متوقف بوده است و از بین مسافران، هیچ‌کدام دارای معلولیت حرکتی نبوده‌اند. لذا در صورت تغییر مفروضات، تأثیر برچیدن گیت‌ها نیازمند ارزیابی مجدد خواهد بود. در سناریوی سوم، پله‌های فرار نیز به ظرفیت دسترسی‌های خروج افزوده شد و تأثیر چشم‌گیر آن مشاهده شد. توضیح این‌که در طرح ایستگاه، چهار دستگاه راه‌پله اضطراری در ابتدا و انتهای تراز سکو پیش‌بینی شده است که این پله‌ها در تراز بلیت‌فروشی در دو دستگاه راه‌پله شرقی و غربی تجمیع شده و تا سطح زمین ادامه می‌یابند. بااین‌حال عملیات اجرایی آن تاکنون تکمیل نشده و قابل بهره‌برداری نیست. در صورت تکمیل و بهره‌برداری از راه‌پله‌های فرار، مدت‌زمان تخلیه از ٤١٤ ثانیه معیار به ۲۹۹ ثانیه کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند تضمین‌کننده خروج امن تمام مسافران حاضر در ایستگاه باشد. در سناریوی چهارم مسیر پله‌های برقی رو به پایین، تغییر کرده و همسو با جریان خروج جمعیت رو به بالا می‌شود. مدت‌زمان حاصله در این مرحله برابر با ٤۰۰ ثانیه بوده است که ١٤ ثانیه کمتر از فرصت تعیین شده می‌باشد. در این ایستگاه ۱۰ دستگاه پله‌برقی وجود دارد که در شرایط عادی، نیمی از آن‌ها رو به پایین و نیم دیگر رو به بالا حرکت می‌کنند. با مدیریت صحیح و آموزش کارکنان ایستگاه، این امکان میسر است که در شرایط اضطراری مسیر حرکت پله‌برقی‌های مخالف، همسو با جریان خروج جمعیت تغییر یابد و به تسریع حرکت مردم، یاری رساند. از سوی دیگر خروجی‌های نرم‌افزار نشان‌دهنده آن بوده است که مسافران برای خروج کامل، نیازمند طی کردن مسیری به طول ٨٤ تا ٢٤٣متر می‌باشند. متوسط مسیر پیموده شده توسط هر مسافر برابر با ۱۹۱متر است. ازآنجاکه تقریباً بیشتر این مسیر عمودی و رو به بالا است و امکان خستگی مسافران و کاهش سرعت جریان حرکت آنان وجود دارد، لذا بهره‌گیری از ظرفیت پله‌های برقی مخالف و همسوسازی آن، بر مدت‌زمان تخلیه مؤثر است.

با رویکردی مبتنی بر داده، سناریوی پنجم تعریف شد. این سناریو، تجمیعی از سناریوهای دو، سه و چهار بوده و در آن گیت‌های کنترل بلیت در مسیر خروج، حذف شده است امکان خروج از پله‌های فرار نیز فراهم شده و پله‌های برقی مخالف نیز، با جریان جمعیت همسو می‌شوند. مدت‌زمان حاصله در این سناریو، ۲۹۷ ثانیه می‌باشد که کمترین و بهینه‌ترین مدت‌زمان تخلیه بوده و می‌تواند تخلیه ایمن تمام مسافران را تضمین نماید. در این سناریو، همچنان مؤلفه بهره‌برداری از پله‌های فرار در دو سوی ایستگاه، بیشترین وزن تأثیرگذاری را داراست.

نمودار زیر مقایسه‌ی مدت‌زمان‌های تخلیه را در سناریوهای پنج‌گانه به نمایش می‌گذارد. بیشترین مدت‌زمان تخلیه مربوط به سناریوی شماره یک یا سناریوی تخلیه در حالت عادی است که مدت آن ٤١٤ ثانیه است و کمترین مدت‌زمان تخلیه مربوط به سناریوی شماره پنج یا سناریوی تجمیعی است [شکل ۸].

شکل ۸. نمودار مقایسه مدت‌زمان تخلیه در سناریوهای مختلف

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، فراتر از مؤلفه‌های مدیریتی، به مؤلفه‌های دیگر در حوزه‌های رفتار جمعیت، محیط ساخته‌شده و زیرساخت‌های الکتریکال و مکانیکال موجود در ایستگاه‌ها نیز توجه شود. چراکه در هر حوزه‌ای مؤلفه‌های ویژه‌ای یافت می

شوند که می‌توانند بر مدت‌زمان تخلیه جمعیت، تأثیرات کلی بگذارند.

۸. سپاس‌گزاری

از کارشناسانی که ما را در انجام این پژوهش یاری رساندند آقای دکتر مهدی ریسمانیان و سرکار خانم مریم مظفرزاده صمیمانه قدردانی می‌شود.

۹. مراجع

- Cai, Z., Zhou, R., Cui, Y., Wang, Y., & Jiang, J. (2022). Influencing factors for exit selection in subway station evacuation. Tunnelling and Underground Space Technology, 125, 104498. ISSN 0886-7798. doi:10.1016/j.tust.2022.104498.

- Cao, S., Wang, M., Zeng, G., & Li, X. (2024). Simulation of Crowd Evacuation in Subway Stations under Flood Disasters. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. doi: 10.1109/TITS.2024.3372994.

- Chen, S., Di, Y., Liu, S., & Wang, B. (2017). Modelling and Analysis on Emergency Evacuation from Metro Stations. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 1–11. doi:10.1155/2017/2623684

- Chen, Y., Wang, C., Hui Yap, J. B., Li, H., & Zhang, S. (2020). Emergency evacuation simulation at starting connection of cross-sea bridge: Case study on Haicang Avenue Subway Station in Xiamen Rail Transit Line. Journal of Building Engineering, 101163. doi:10.1016/j.jobe.2019.101163

- Cheng, H., Yang, X., (2012). Emergency Evacuation Capacity of Subway Stations. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 43, 339-348. ISSN 1877-0428. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.107.

- Cheng, Z., Lu, J., & Zhao, Y. (2020). Pedestrian Evacuation Risk Assessment of Subway Station under Large-Scale Sport Activity. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(11), 3844. https://doi.org/10.3390/ijerph17113844

- Enrico, R. (2015). A conceptual fatigue-motivation model representing pedestrian movement during stair evacuation. Applied Mathematical Modelling, 40(7-8), 4380-4396.

- Feng, J. R., Gai, W. M., & Yan, Y. B. (2021). Emergency evacuation risk assessment and mitigation strategy for a toxic gas leak in an underground space: The case of a subway station in Guangzhou, China. Safety Science, 134, 105039. ISSN 0925-7535. doi:10.1016/j.ssci.2020.105039.
GB50157-2013, Code for Design of Metro, 2013

- Guo, I., Amin, S., Hao, Q., & Haas, O. (2020). Resilience assessment of safety system at subway construction sites applying analytic network process and extension cloud models. Reliability Engineering & System Safety, 201, 106956. ISSN 0951-8320. doi:10.1016/j.ress.2020.106956.

- Ha, V., & Lykotrafitis, G. (2012). Agent-based modeling of a multi-room multi-floor building emergency evacuation. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 391(8), 2740–2751. doi:10.1016/j.physa.2011.12.034

- Haghani, M., & Sarvi, M. (2019). Simulating dynamics of adaptive exit-choice changing in crowd evacuations: Model implementation and behavioural interpretations. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 103, 56–82. doi:10.1016/j.trc.2019.04.009.

- He, L., Zhong, M., Shi, C., Shi, J., Chen, H., & Xu, Q. (2010). Experimental research on investigation of metro passenger evacuation behaviors in case of emergency. In Proceedings of the Fifth International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED 2010). Gaithersburg, MD, USA.

- Hong, L.; Gao, J.; Zhu, W. (2016). Simulating emergency evacuation at metro stations: an approach based on thorough psychological analysis. Transportation Letters, (), 1–11. doi:10.1179/1942787515y.0000000016

- Hui, Y., Yu, Q., & Peng, H. (2023). Data-driven Time Model for Subway Emergency Evacuation: A Case Study and Simulation. Preprints 2023, 2023041151. https://doi.org/10.20944/preprints202304.1151.v1

- Jiang, C S; Ling, Y; Hu, C; Yang, Z; Ding, H; Chow, W K (2009). Numerical Simulation of Emergency Evacuation of a Subway Station: A Case Study in Beijing. Architectural Science Review, 52(3), 183–193. doi:10.3763/asre.2008.0047

- Jiang, C. S., Deng, Y. F., Hu, C., Ding, H., & Chow, W. K. (2009). Crowding in platform staircases of a subway station in China during rush hours. Safety Science, 47(7), 931-938. doi:10.1016/j.ssci.2008.10.003

- Jin, B., Wang, J., Wang, Y., Gu, Y., & Wang, Z. (2020). Temporal and spatial distribution of pedestrians in subway evacuation under node failure by multi-hazards. Safety Science, 127, 104695. ISSN 0925-7535. doi:10.1016/j.ssci.2020.104695.

- Jin, B., Wang, J., Wang, Y., Gu, Y., & Wang, Z. (2020). Temporal and spatial distribution of pedestrians in subway evacuation under node failure by multi-hazards. Safety Science, 127, 104695. ISSN 0925-7535. doi:10.1016/j.ssci.2020.104695.

- Kadokura, H., Sekizawa, A., & Takahashi, W. (2011). Study on availability and issues of evacuation using stopped escalators in a subway station. Fire and Materials, 36(5-6), 416–428. doi:10.1002/fam.1097

- Kadokura, H., Sekizawa, A., & Takahashi, W. (2012). Study on availability and issues of evacuation using stopped escalators in a subway station. Fire Mater, 36, 416-428.

- Kallianiotis, A., Papakonstantinou, D., Arvelaki, V., & Benardos, A. (2018). Evaluation of evacuation methods in underground metro stations. International Journal of Disaster Risk Reduction, 31, 526–534. doi:10.1016/j.ijdrr.2018.06.009

- Kallianiotis, A., Papakonstantinou, D., Arvelaki, V., & Benardos, A. (2018). Evaluation of evacuation methods in underground metro stations. International Journal of Disaster Risk Reduction, 31, 526–534. doi:10.1016/j.ijdrr.2018.06.009

- Kaur, N., & Kaur, H. (2022). A Multi-agent Based Evacuation Planning for Disaster Management: A Narrative Review. Archives of Computational Methods in Engineering, 29, 4085–4113. doi:10.1007/s11831-022-09729-4.

- Kinsey, M. J., Galea, E. R., & Lawrence, P. J. (2010). Stairs or lifts? A study of human factors associated with lift/elevator usage during evacuations using an online survey. In: Fifth International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED 2010), Gaithersburg, MD, USA.

- Mei, Y. L., Xie, K. F., & Liu, S. (2018). Analysis Model and Simulation of Emergency

- Sagun, A., Bouchlaghem, D., & Anumba, C. J. (2011). Computer simulations vs. building guidance to enhance evacuation performance of buildings during emergency events. Simulation Modelling Practice and Theory, 19(3), 1007-1019.
https://doi.org/10.1016/j.simpat.2010.12.001.

- Shi, C., Zhong, M., Nong, X., He, L., Shi, J., & Feng, G. (2012). Modeling and safety strategy of passenger evacuation in a metro station in China. Safety Science, 50(5), 1319-1332.
https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.07.017

- Shi, J., Ren, A., & Chen, C. (2009). Agent-based evacuation model of large public buildings under fire condition. Automation in Construction, 18(3), 338–347.
doi:10.1016/j.autcon. 2008.09.009

- Tsukahara, M., Koshiba, Y., & Ohtani, H. (2011). Effectiveness of downward evacuation in a large-scale subway fire using Fire Dynamics Simulator. Tunnelling and Underground Space Technology, 26(4), 573-581. ISSN 0886-7798.
doi:10.1016/j.tust.2011.02.002.

- Wang, Jing-hong; Yan, Wen-yu; Zhi, You-ran; Jiang, Jun-cheng (2016). Investigation of the Panic Psychology and Behaviors of Evacuation Crowds in Subway Emergencies. Procedia Engineering, 135(), 128–137.
doi:10.1016/j.proeng.2016.01.091

- Wei, L., Guo, D., Zha, J., Bobylev, N., Chen, Z., & Huang, S. (2024). Estimation of the ecological carbon sink potential of using urban underground Space: A case study in Chengdu City, China. Tunnelling and Underground Space Technology, 144, 105533. ISSN 0886-7798.
doi:10.1016/j.tust.2023.105533.

Evacuation Capacity of Dense Crowds in Subway Stations. Journal of Wuhan University of Technology (Information and Management Engineering Edition), 40(4), 370-375+382.

- Mossberg, A., Nilsson, D., & Wahlqvist, J. (2021). Evacuation elevators in an underground metro station: A Virtual Reality evacuation experiment. Fire Safety Journal, 120, 103091. ISSN 0379-7112.
doi:10.1016/j.firesaf.2020.103091.

- Nouri, F., Khorasani-Zavareh, D., Kavousi, A., & Mohammadi, R. (2019). A system approach on safe emergency evacuation in Subways: A systematic literature review. Archives of Trauma Research, 8(3), 119-143.

- Qiao, Y., Weng, Y., Shi, X., et al. (2023). Fault tree analysis for subway fire evacuation with agent-based modeling. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 4(7), 1-12.
https://doi.org/10.1186/s43065-023-00073-w

- Qin, J., Liu, C., & Huang, Q. (2020). Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on Pathfinder. Case Studies in Thermal Engineering, 21, 100677.
doi:10.1016/j.csite.2020.100677.

- Qu, Y., Gao, Z., Xiao, Y., & Li, X. (2014). Modeling the pedestrian's movement and simulating evacuation dynamics on stairs. Safety Science, 70, 189–201.
doi:10.1016/j.ssci.2014.05.016

- Ronchi, E., Reneke, P. A., & Peacock, R. D. (2016). A conceptual fatigue-motivation model to represent pedestrian movement during stair evacuation. Applied Mathematical Modelling, 40(7-8), 4380-4396.
https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.11.040

- Xiao-xia, G., Wei, D., & Hong-yu, J. (2011). Study on the Social Psychology and Behaviors in a Subway Evacuation Drill in China. Procedia Engineering, 11, 112–119. doi:10.1016/j.proeng.2011.04.635

- Yang, S., Jin, J., & Lu, X. (2019). Research on the spatial arrangement of metro station floor facilities based on Pathfinder. American Journal of Civil Engineering, 7(6), 147-151.

- Yu, H., Wang, Y., Qiu, P., & Chen, J. (2019). Analysis of natural and man-made accidents happened in subway stations and trains: based on statistics of accident cases. MATEC Web of Conferences, 272, 01031. doi:10.1051/matecconf/20192720103

- Zhang, G., Zhu, G., Yuan, G., & Wang, Y. (2016). Quantitative risk assessment methods of evacuation safety for collapse of large steel structure gymnasium caused by localized fire. Safety Science, 87, 234-242.

- Zhang, J., (2023). Evaluation of emergency evacuation capacity of urban metro stations based on combined weights and TOPSIS-GRA method in intuitive fuzzy environment. International Journal of Disaster Risk Reduction, 95, 103864. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103864

- Zhang, Z., Lee, J. W., & Kong, H. S. (2024). Evaluation of evacuation safety in university libraries based on Pathfinder. The International Journal of Internet, Broadcasting and Communication, 16(2), 237-246. https://doi.org/10.7236/IJIBC.2024.16.2.237

- Zhou, R., Cui, Y., Wang, Y., & Jiang, J. (2021). A modified social force model with different categories of pedestrians for subway station evacuation. Tunnelling and Underground Space Technology, 110, 103837. doi:10.1016/j.tust.2021.103837

- Zou, Qiling; Fernandes, Daniel S.; Chen, Suren (2019). Agent-based evacuation simulation from subway train and platform. Journal of Transportation Safety & Security, 1–22. doi:10.1080/19439962.2019.1634661.

علی صفری فرد، درجه کارشناسی ارشد پیوسته در رشته معماری را در سال ۱۳۸۰ از دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین اخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۹۷ دوره پژوهشگری دکتری تخصصی معماری را در واحد تهران- جنوب دانشگاه آزاد اسلامی آغاز نموده است. وی کارشناس رسمی دادگستری بوده و زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، ایمنی جمعیت، مدلسازی خروج ایمن جمعیت، طراحی مجموعه های تجاری و مذهبی، و تکنولوژی مصالح ساختمانی است.

محمدرضا منصوری، درجه کارشناسی ارشد پیوسته در رشته معماری را از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه دکتری تخصصی معماری را از واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی اخذ نموده است. وی کارشناس رسمی دادگستری بوده و زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، طراحی صنعتی ساختمان بوده و هم اکنون استادیار دانشکده معماری دانشگاه آزاد اسلامی در واحد ورامین می باشد.

لیلی کریمی فرد، درجه کارشناسی ارشد پیوسته در رشته معماری را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهرانمرکز و درجه دکتری تخصصی معماری را از دانشگاه بردو فرانسه نموده است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، طراحی محیطی بوده و هم اکنون استادیار دانشکده معماری دانشگاه آزاد اسلامی در واحد تهرانجنوب می باشد.