Original Paper

مقاله پژوهشی

ارزیابی تخلیه اضطراری در مجتمع‌های مسکونی با ساختمان‌های بلندمرتبه (مطالعه موردی: شهرک پونک زنجان)

DOR: https://dorl.net/dor/20.1001.1.23453915.1402.12.2.1.7

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۳

صفا خزائی[1*]، مهدی نجفیانی[2]

۱- دانشیار، گروه علمی مهندسی اثر، دانشکده و پژوهشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین(ع) تهران، تهران، ایران

(khazai.s@gmail.com)

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی پدافند غیرعامل، دانشکده و پژوهشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین(ع) تهران، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر به‌منظور جلوگیری از رشد افقی شهرها، ایده ساخت بناهای بلندمرتبه مطرح شده است؛ اما وقوع تهدیداتی نظیر آتش‌سوزی و حملات تروریستی در مجتمع‌های مسکونی بلندمرتبه و متراکم به دلیل کند شدن روند تخلیه ساکنان، می‌تواند باعث پیامدهای جانی و مالی ویران‌کننده‌ای شود. در این پژوهش، مجتمع مسکونی قصر فردوس در شهرک مسکونی پونک زنجان که دارای ساختمان‌های متراکم و بلندمرتبه و جمعیتی بالغ بر ۱۲۰۰ نفر است به‌عنوان نمونه موردی برای ارائه مدل تخلیه اضطراری انتخاب‌شده است. به این منظور، از نرم‌افزار Pathfinder برای شبیه‌سازی تخلیه اضطراری استفاده‌شده است. در این تحقیق، افزودن یک درب جدید به مجتمع و تغییر در چیدمان پارکینگ‌ها و قوانین رفتاری، برای کاهش زمان تخلیه و نرخ جریان تخلیه از درب اصلی مجتمع در ۶ سناریو مورد ارزیابی قرارگرفته است. نتایج حاصل از تحلیل این سناریوها نشان می‌دهد، تغییر چیدمان پارکینگ‌ها و اعمال قوانین رفتاری باعث افزایش ۸ درصدی نرخ جریان در حالت شب و ۱۵ درصدی آن در حالت روز می‌شود. علاوه بر این، افزودن یک درب جدید به مجتمع، مدت‌زمان تخلیه را در حالت‌های شب و روز به ترتیب به میزان ۱۲/۳٪ و ۲/۸٪ کاهش می‌دهد و همچنین باعث کاهش نرخ جریان تخلیه از درب اصلی به میزان ۳۱٪ و ۳۴/۵٪ به ترتیب برای حالت‌های شب و روز می‌شود.

واژه‌های کلیدی: **تخلیه اضطراری، Pathfinder، شهرک پونک، ساختمان‌های بلندمرتبه**

Evaluation of Emergency Evacuation in Residential High-Rise Buildings Communities (Case Study: Punak Town of Zanjan)

Safa Khazaei[1*], Mehdi Najafiani[2]

1. Dept. of Signature Engineering, Faculty of Passive Defense, Imam Hussein Comprehensive University, Tehran, Iran (khazai.s@gmail.com)
2. MSc. Graduated Student in Passive Defense Engineering, Faculty of Passive Defense, Imam Hussein Comprehensive University, Tehran, Iran

Abstract

In recent years, in order to prevent the horizontal growth of cities, the idea of construcing high-rise buildings has been proposed. However, the occurrence of threats such as fire and terrorist attacks in high-rise and dense residential communities can cause devastating life and financial consequences, due to the slow down of the evacuation process of the residents. In this study, to provide a model of emergency evacuation, Qasr Ferdous residential community in Punak town of Zanjan, which has dense and high-rise buildings and a population of over 1200 people, has been selected as a case study. For this purpose, Pathfinder software has been used to simulate emergency evacuation. In this study, to reduce the evacuation time and the evacuation flow rate of the main door of the community, adding a new door to the community and changing the arrangement of parking lots and behavorial rules have been evaluated in 6 scenarios. The results of the analysis of these scenarios show that, changing the arrangement of parking lots and applying behavioral rules increases the flow rate by 8% at night and 15% at day. Moreover, adding a new door to the community, reduces the evacuation flow rate of the main door for night and day times by 12.3% and 2.8%, respectively, and also reduces the evacuation time by 31% and 34.5% for night and day time respectively.

Keywords: Emergency Evacuation, Pathfinder, Punac Town, High-Rise Buildings.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر به‌منظور جلوگیری از رشد افقی شهرها، راهبرد بلندمرتبه‌سازی در ارتفاع به‌عنوان محصول رشد جمعیت و افزایش شهرنشینی و همچنین کمبود زمین مناسب برای ساخت‌وساز، رواج یافته است. رشد و شکل‌گیری این‌گونه ساختمانی با توجه به خصوصیات و ویژگی‌های این مسئله طبیعتاً در کنار آثار مثبت آن با محدودیت‌ها و تهدیداتی نیز مواجه است. بنا به تعریف سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور «هر بنایی که ارتفاع آن فاصله قائم بین تراز کف بالاترین طبقه قابل‌تصرف تا تراز پایین‌ترین سطح قابل‌دسترسی برای ماشین آتش‌نشانی از ۲۳ متر بیشتر باشد ساختمان بلند محسوب می‌شود» (فرهودی و محمدی، ۱۳۸۰). معیارهای زیر می‌توانند یک ساختمان بلند را بدون توجه به بلندی یا تعداد طبقات تعریف کنند [۱].

- نسبت کل سطح زیربنا به سطح قطعه زمینی که ساختمان روی آن بناشده است در مقایسه با عرف محل بالا باشد.

- از سیستم‌های مکانیکی (معمولاً آسانسور) برای ارتباطات عمودی استفاده شود.

- سیستم‌ها و روش‌های ویژه ساختمانی و مدیریتی با سیستم‌های مورد استفاده در ساخت‌وسازهای کم مرتبه‌ی معمولی تفاوت داشته باشد.

بلندمرتبه‌سازی گرچه می‌تواند به بسیاری از مسائل شهری مانند کمبود زمین، مسکن، بهینه نمودن هزینه تأسیسات شهری، جلوگیری از رشد افقی شهرها و ... پاسخ بدهد، اما از دیگر سو خود پدیدآور مشکلات عدیده‌ای از قبیل افزایش تراکم جمعیتی و ساختمانی، اختلال در تأسیسات زیر بنایی و خدمات شهری، تأثیرات نامطلوب کالبدی و زیست‌محیطی و... در فضای شهری باشد [۲].

یکی از موارد بسیار مهم در حفظ امنیت و جان شهروندان، امکان تخلیهٔ ایمن شهر در مواقع ضروری است. تخلیهٔ اضطراری، انتقال سریع و فوری افراد از شهر یا مکانی است که مورد تهدید واقع‌شده است. این انتقال در دو مقیاس خرد و کلان قابل‌بررسی است. مقیاس خرد، تخلیهٔ فضایی محدود مانند یک ساختمان را گویند که مورد تهدیداتی از قبیل آتش‌سوزی قرارگرفته است. مقیاس کلان شامل تخلیهٔ مجتمعی زیستی مانند شهر و روستا است که مورد تهدید واقع‌شده است. تخلیهٔ اضطراری ممکن است قبل، هنگام یا بعد از بروز بحران به دلیل تهدیدات طبیعی (نظیر زلزله، آتش‌سوزی و سیل) یا انسان‌ساخت مانند نوع حملات تروریستی انجام پذیرد. این نوع تخلیه نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و آگاهانه ازجمله محاسبهٔ زمان خروج، راه‌های خروج، وسایل نقلیه و غیره است [۳]. بدیهی است که هرچه مدت‌زمان تخلیه بیشتر شود، تلفات نیروی انسانی و ساکنان یک مجتمع مسکونی بیشتر می‌شود و افزایش سطح اطمینان و امید به زندگی در ساکنان را به دنبال دارد. لذا، تخلیه اضطراری سریع و امن مجتمع‌های مسکونی پرتراکم با ساختمان‌های بلند از اولویت‌های اساسی مدیریت بحران و پدافند غیرعامل است.

ارزیابی مناسب و سریع وضعیت موجود و اقدامات مدیریتی متعدد برای تخلیه اضطراری امن جمعیت در فضاهای محدودی از قبیل فرودگاه، ایستگاه‌های مترو و ساختمان‌های مسکونی، مستلزم استفاده از راهبرد شبیه‌سازی تخلیه اضطراری است. در سطح جهان تحقیقات متعددی در زمینه شبیه‌سازی تخلیه اضطراری صورت گرفته است که در ادامه به چند مورد از آنها اشاره می‌شود. چو و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله‌ای تحت عنوان شبیه‌سازی تخلیه اضطراری و بهینه‌سازی مدیریت در مجتمع‌های مسکونی شهری، مدلی برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تخلیه اضطراری در مجتمع‌های مسکونی پیشنهاد نمودند [۴]. این تحقیق با انجام مطالعه موردی در

یک مجتمع مسکونی واقع در شانگهای چین، نشان داده است که با استفاده از مدل پیشنهادی، ۱) راه‌پله‌ها و خیابان‌های با شلوغی و تراکم کم شناسایی می‌شوند؛ ۲) رفتارهای تخلیه خانواده‌ها که کاملاً با رفتارهای تخلیه در مکان‌های عمومی متفاوت است، قابل شبیه‌سازی است؛ ۳) تحت سناریوهای مختلف می‌توان اقدامات بهینه‌سازی مناسب را برای بهبود کارایی تخلیه و کاهش خطرات تخلیه مشخص نمود.

ژیائو و همکاران (۲۰۲۲) در یک مقاله با عنوان شبیه‌سازی تخلیه اضطراری از محل ساخت ساختمان‌های پیش‌ساخته [۵]، به موضوع تخلیه ایمن پرسنل ساختمانی پس از وقوع آتش‌سوزی پرداختند. در این تحقیق، از نرم‌افزار PyroSim برای شبیه‌سازی عددی وضعیت آتش‌سوزی بر اساس اندازه و حجم استفاده شد و تغییرات دید، وجود دود، غلظت مونوکسید کربن و دمای محیط در تعیین زمان تخلیه مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. همچنین از نرم‌افزار Pathfinder برای شبیه‌سازی ساختار فیزیکی محیط، ویژگی‌های فیزیکی پرسنل و تعیین سرعت تخلیه استفاده شد. بر اساس مطالعه موردی انجام‌شده در یک مجتمع مسکونی با ساختمان‌های بلندمرتبه، این تحقیق نشان داد که قابلیت دید و زمان رخداد عوامل کلیدی محدودکننده کارایی تخلیه پرسنل هستند. همچنین، زمان تخلیه را می‌توان با برنامه‌ریزی مجدد موقعیت‌های انباشته اجزای پیش‌ساخته سایت ساختمانی، تجهیزات ساختمانی و سایر موارد و کاهش تعداد پرسنل به‌طور مؤثر کاهش داد.

تن و همکاران (۲۰۱۴) در مقاله‌ای با عنوان شبیه‌سازی تخلیه عامل مبنای ساختمان از طریق ترکیب رفتار انسان با دسترسی فضایی قابل پیش‌بینی در شرایط اضطراری آتش‌سوزی [۶]، یک مدل پیشنهادی برای شبیه‌سازی تخلیه اضطراری تحت سناریوهای آتش‌سوزی خاص ارائه دادند. مدل پیشنهادی تأثیر ساختار و ارتباطات فضایی داخلی ساختمان بر کارایی تخلیه اضطراری که به سطح دانش تخلیه کنندگان و محل امکانات ایمنی آتش‌نشانی بستگی دارد را شبیه‌سازی می‌کند. مدل مذکور با استفاده از نرم‌افزار منبع باز Agent Analyst پیاده‌سازی شده و تحت سه سناریوی آتش‌سوزی برای یک ساختمان ارزیابی‌شده است. همچنین در این تحقیق، ساخت مکانی دو یا چندمنظوره به‌عنوان پناهگاه در داخل یا خارج ساختمان و قرار دادن مواد و وسایل ضروری در داخل آن و همچنین آگاه‌سازی ساکنین نسبت به چگونگی تخلیه اضطراری در بحران پیشنهادشده است.

سهین و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله‌ای با عنوان مدل‌سازی رفتار انسانی برای شبیه‌سازی تخلیه ساختمان‌ها در شرایط اضطراری [۷]، یک مدل پیشنهادی بر اساس منطق فازی را برای شبیه‌سازی رفتار فردی و گروهی در هنگام خروج از ساختمان‌ها ارائه نمودند. این تحقیق نشان می‌دهد که به‌کارگیری منطق فازی بودن در مدل‌سازی، امکان ثبت طبیعی‌تر رفتار انسان را در طول فرآیند تخلیه اضطراری فراهم می‌کند.

جایپاروتی (۲۰۲۴) در یک مقاله با عنوان مدل‌سازی تخلیه اضطراری در ساختمان‌های مرتفع با در نظر گرفتن ازدحام در پله‌ها بر اساس زنجیر مارکوف ، یک مدل زنجیره مارکوف برای ارزیابی زمان تخلیه ساکنان ساختمان‌های بلندمرتبه، ارائه نمود [۸]. پیاده‌سازی مدل مذکور با استفاده از شبیه‌ساز Egress NIST سرعت تخلیه بهینه را ۰/۷ تا ۱/۴ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. همچنین، عرض مؤثر پله بین ۱/۶ تا ۲/۴ متر پیشنهاد می‌شود.

در سطح کشور نیز تحقیقات مختلفی در زمینه تخلیه اضطراری صورت گرفته است که در

ادامه به چند مورد اشاره می‌شود. نکویی و همکاران (۱۴۰۱) در مقاله‌ای تحت عنوان مدل ارزیابی زمان تخلیه اضطراری جمعیت در اماکن پر ازدحام [۹]، در ۸ سناریو زمان تخلیه اضطراری در فرودگاه مهرآباد تهران را با استفاده از نرم‌افزار Wizardتحلیل نموده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تنها رفع موانع، روش کارآمدی برای کاهش زمان تخلیه نیست؛ بلکه باید درب اضطراری نیز اضافه شود. همچنین با ایجاد بحران و مسدود شدن مسیرها، گره‌های جمعیتی ایجاد می‌شود و صرفاً زمانی که تعداد افراد از یک هزار نفر بیشتر نباشد، تخلیه به‌طور ایمن می‌تواند صورت گیرد [۹].

خزایی (۱۳۹۸) در مقاله‌ای تحت عنوان شبیه‌سازی عامل مبنای تخلیه اضطراری شهرها در هنگام حملات تروریستی، به مدل‌سازی رفتار انسان‌ها در محیط شهری به هنگام حمله تروریستی پرداخته است [۱۰]. در این پژوهش، رفتار شهروندان، نیروهای دفاعی و تروریست‌ها شبیه‌سازی‌شده است. همچنین به‌منظور توسعه و پیاده‌سازی مدل عامل مبنای پیشنهادی از نرم‌افزار Netlogo استفاده‌شده است و مدل مذکور در منطقه ۶ شهر تهران، به‌عنوان مطالعه موردی، ارزیابی‌شده است. در این تحقیق نشان داده‌شده است که در صورت تخصیص ۶۰ درصد نیروهای دفاعی به حفاظت از مناطق شلوغ و امن و ۴۰ درصد به جستجو و مقابله با عامل‌های تروریستی در منطقه، تعداد حملات تروریستی و تعداد کشته‌شدگان به یک‌سوم کاهش می‌یابد.

بهرامی و همکاران (۱۳۹۹) در مقاله‌ای با عنوان بررسی متغیرهای مؤثر بر طراحی مسیرهای تخلیه اضطراری ساختمان‌های بلندمرتبه در برابر آتش‌سوزی بر اساس روش معادلات ساختاری MICMAC و تحلیل ANP]11[، پارامترهای اساسی تأثیرگذار در طراحی مناسب مسیرهای تخلیه اضطراری ساختمان‌های بلندمرتبه در مواقع آتش‌سوزی را ارائه نمودند. بر اساس یافته‌ای این تحقیق، جانمایی مسیر خروج اضطراری در ساختمان‌های بلندمرتبه زمانی باید در مسیرهای اصلی عبور و مرور باشد و لذا مکان‌نمایی مسیرهای تخلیه اضطراری در کنج‌ها و گوشه‌های ناخوانای ارتباطی موجب بی‌استفاده ماندن و ترس از استفاده مسیرهای تخلیه اضطراری در زمان بحران می‌شود.

همچنین در زمینه پدافند غیرعامل ساختمان‌های بلندمرتبه، تحقیقات معدودی در سطح کشور انجام‌شده است. به‌طور خاص، طالبی و خرسند (۱۳۹۳)، در مقاله‌ای با عنوان ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌های بلندمرتبه با رویکرد دفاع غیرعامل (نمونه موردی: شهرک الغدیر شهر بجنورد) [۱۲]، ضمن بررسی تهدیدات ساختمان‌های بلندمرتبه با تجزیه‌وتحلیل شاخص‌های مطلوبیت راهکار(SWOT) ، به این نتیجه رسیدند که تبدیل سواره‌روهای بین بلوک‌ها به فضاهای پیاده‌رو، تأمین و احداث پارکینگ مستقل و مجزا از بلوک‌ها و همچنین افزایش دسترسی‌ها به ورودی‌های ازجمله راهبردهای مناسب برای کاهش آسیب‌پذیری می‌باشند.

با توجه به اینکه مجتمع‌های مسکونی با ساختمان‌های بلندمرتبه معمولاً متراکم بوده و در بسیاری موارد نیز دارای درب ورود و خروج محدودی می‌باشند؛ لذا طبیعتاً در هنگام وقوع تهدیداتی نظیر حملات تروریستی و آتش‌سوزی، ساکنان مجتمع قادر نخواهند بود در مدتی کوتاه محل خطر را تخلیه کرده و در امان باشند؛ بنابراین ارائه مدل یا طرحی مناسب برای تخلیه اضطراری از مسائل و مشکلات مهم این مجتمع‌های مسکونی است. تحقیق حاضر در نظر دارد تا با انجام یک مطالعه موردی، فرایند تعیین طرح مناسب تخلیه اضطراری در مجتمع‌های مسکونی با ساختمان‌های بلندمرتبه را بر اساس

شبیه‌سازی طرح‌های مختلف تخلیه و برآورد زمان تخلیه و نرخ جریان آنها ارائه نماید. طرح‌های موردنظر در این تحقیق، افزودن درب جدید و تغییر در چیدمان پارکینگ‌ها و قوانین رفتاری ساکنین می‌باشند که شبیه‌سازی و ارزیابی کارایی آنها در هر دو حالت شب و روز مدنظر است.

۲- مبانی نظری

۲-۱- تخلیه اضطراری

تخلیه اضطراری یکی از فعالیت‌هایی است که در زمان بروز حوادث اهمیت بسیاری پیدا می‌کند. آگاهی از چگونگی انجام تخلیه اضطراری و جزئیات آن و همچنین آمادگی برای اجرای آن در هنگام بروز حوادث طبیعی و بشر ساخت، از مهم‌ترین فعالیت‌های ارتقاء آمادگی جوامع برای مقابله در هنگام بروز سوانح است. مقابله با سوانح بدون در نظر گرفتن فعالیت‌های مربوط به تخلیه، تقریباً غیرقابل‌تصور است [۱۳].

در ساختمان‌های بلندمرتبه که افراد زیادی از گروه‌های سنی مختلف در آن هستند، در صورت بروز حوادث طبیعی و یا غیرطبیعی (انسان‌ساخت)، اولین اقدام و عکس‌العملی که افراد نشان می‌دهند، تصمیم به ترک و تخلیه فوری محل است. هدف اصلی تخلیه، حرکت دادن مردم به سمت خارج از ناحیه در معرض خطر با حداکثر سرعت ممکن، به منظور اجتناب از تلفات است. لذا حداکثر نمودن میزان تخلیه از شبکه می‌تواند نقشی حیاتی در کمینه کردن آثار منفی پدیده مورد نظر را داشته باشد. فاکتورهای متفاوتی، تعیین و به‌کارگیری استراتژی‌های بهینه در فرایند تخلیه را مشکل می‌کند. تقاضای ترافیک در دوره زمانی خیلی کوتاه بعد از شروع تخلیه به‌خصوص در هنگام حملات تروریستی افزایش می‌یابد. عموماً عدم توانایی در تخلیه افراد از منطقه خطر به معنای ایجاد تلفات است که درنتیجه‌ی آن می‌توان بین تعداد افراد تخلیه نشده و تلفات رابطه‌ی مستقیم در نظر گرفت. ازاین‌رو هدف اصلی، بیشینه‌سازی از منطقه خطر است [۱۳].

زمانی که اتفاقی اضطراری (بحران) رخ می‌دهد، عوامل مختلفی وجود دارد که می‌تواند باعث تلفات و خسارات شود. برای به حداقل رساندن تلفات، اطمینان از تخلیه ایمن مردم مهم‌ترین پیش‌نیاز طراحی آتش‌نشانی است و مهم‌ترین معیار ایمنی آتش، زمان تخلیه است. زمان تخلیه یک شاخص مهم اثربخشی تخلیه است که شامل زمان تخلیه در خیابان و ساختمان است. هر دو آن‌ها را می‌توان از نتایج شبیه‌سازی تخلیه اضطراری به دست آورد. علاوه بر این، زمان تخلیه در ساختمان را می‌توان با زمان تعیین‌شده توسط استاندارد پیشگیری از آتش برای طراحی ساختمان مقایسه کرد. در چین، در مبحث حفاظت از آتش‌سوزی‌ها در تصریح‌شده است که زمان مجاز برای تخلیه ایمن ساختمان‌های مسکونی عمومی باید کمتر از ۶ دقیقه باشد [۱۴]. لازم به ذکر است که توزیع فضایی، سرعت راه رفتن و ویژگی‌های فیزیکی ساکنین بر زمان تخلیه تأثیر می‌گذارد. مشکلات مدیریت نامعقول نظیر وسایل نقلیه‌ای که به‌طور تصادفی در خیابان‌ها پارک شده‌اند و انواع وسایل مختلفی که ممکن است در راه‌پله‌ها انباشته شوند، نیز می‌تواند تأثیر منفی زیادی بر زمان تخلیه داشته باشد [۴].

۲-۲- شبیه‌سازی تخلیه اضطراری

دو رویکرد برای شبیه‌سازی تخلیه اضطراری وجود دارد: عددی و نرم‌افزاری. در روش عددی، تخلیه اضطراری می‌تواند به‌عنوان یک مسئله مسیریابی در نظر گرفته شود. امروزه رویکرد متداول برای حل این مسئله، استفاده الگوریتم‌های از قبیل

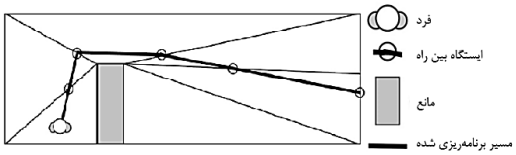
عمـق اولـین جسـتجو [۱۵]، دایجسـترا [۱۶] و بهینه‌سازی گروه مورچه‌ها [۱۷] ارائه‌شـده اسـت. این الگوریتم‌ها بـرای عـواملی ماننـد روانشناسـی، سن و روابط انسانی که تـأثیر بسـزایی در تخلیـه دارند، هیچ ملاحظه‌ای ندارنـد؛ امـا در روش دوم، محققان به‌طـورکلی از مـدل‌هـای رایانـه‌ای بـرای شبیه‌سازی فرایندهای تخلیه اسـتفاده مـی‌کننـد. رفتارهای انسان در تخلیه به دلیل محیط متفاوت، کاملاً متفاوت است. جریان حرکت انسان در پله‌ها هنگام تخلیه، می‌تواند کل رونـد تخلیـه را تحـت تأثیر قرار دهد. مدل‌سـازی جریـان‌هـای حرکتـی عـابر پیـاده بـر اسـاس نیـروی اجتمـاعی (مـدل هلبینگ) [۱۸]. و مدل اتومیتـای سـلولی [۱۹] و [۲۰]. بـه‌طـور گسـترده در شـبیه‌سـازی تخلیـه استفاده‌شـده اسـت. بـر اسـاس نتـایج تحقیقـات انجام‌شده، اختلاف اندکی ازلحاظ زمان تخلیه بین دو روش عددی و نـرم‌افـزاری وجـود دارد. دلیـل اصلی این اختلاف این اسـت کـه در شـبیه‌سـازی تخلیه نرم‌افزاری افراد بـه‌راحتـی بـه چهـار گـروه بزرگ‌سال، جوانان، زنان و بچه‌ها تقسیم می‌شـوند و به نسبت سن آنها سرعت‌هـای متفـاوت تخلیـه بـرای آنهـا تعریـف مـی‌شـود؛ امـا در محاسـبات تئوریک و عددی نمی‌توان سرعت-هـای مختلـف تخلیـه را در گـروه‌هـای مختلـف سـنی افـراد شبیه‌سازی کرد و به همین دلیل میانگین سرعت در نظر گرفتـه مـی‌شـود. همچنـین اعضـای یـک خانواده به یکـدیگر اعتمـاد مـی‌کننـد و از درجـه بالایی از وابستگی و احساس مسئولیت و انسـجام قوی برخوردار هستند. درنتیجـه، در یـک رویـداد اضطراری، ساکنان کمتـر بـدون اعضـای خـانواده خود به‌تنهایی می‌دوند. آن‌ها پس از دورهم جمـع شـدن اعضـای خـانواده، خانـه خـود را تخلیـه مـی‌کننـد. چنـین رفتـاری «حالـت کـار گروهـی خانواده» نامیده می‌شـود کـه یـک حالـت تخلیـه خـاص فقـط بـرای تخلیـه سـاکنان اسـت [۴]. به‌طورکلی، دو نوع نرم‌افزار برای شبیه‌سازی تخلیه وجود دارد: نرم‌افزارهای تجاری ماننـد AnyLogic [۲۱]، Pathfinder و [۲۲] STEPS و نرم‌افزارهـای منبـع بازماننـد [۲۳] Repast، [24] NetLogo و Swarm [25].

۲-۳- شبیه‌ساز Pathfinder

شبیه‌ساز) Pathfinder راه یاب) محصـول شـرکت Thunderhead Engineering است و یک نـرم‌افـزار عامل مبنـا بـرای شـبیه‌سـازی خـروج اضـطراری جمعیت از فضاهای محدود است. این نرم‌افزار یک رابـط کـاربر گرافیکـی بـرای طراحـی و اجـرای شبیه‌سازی و همچنـین ابـزار تجسـم دوبعـدی و سه‌بعدی برای تجزیه‌وتحلیل نتیجـه شـبیه‌سـازی فراهم می‌کند و از یک مـدل هندسـه سـه‌بعـدی (ساخته‌شده در اتوکد و ...) اسـتفاده مـی‌کنـد. در ایـن مـدل هندسـی، از یـک سـطح سـه‌بعـدی و دوبعدی پیوسته که به‌عنوان «مـش نـاوبری» یـاد می‌شود، استفاده مـی‌شـود. «مـش نـاوبری» یـک سطح یک‌طرفه نامنظم است که توسط مثلث‌های مجاور نشان داده‌شده اسـت. حرکـت عامـل (فـرد ساکن) روی این شبکه ناوبری صـورت مـی‌گیـرد [۲۶].

مسیر حاصل به‌صورت مجموعه‌ای از نقـاط بـر روی لبه‌های مثلث مشبک نشـان داده مـی‌شـود. این نقاط تولیدشـده از یـک مسـیر دندانـه‌دار بـه مقصد ساکن ایجاد می‌کند. مسیر پیاده‌روی یکـی از ساکنان هنگامی‌که این ساکن بـا موانـع روبـرو شود خم می‌شود. به‌منظور جلـوگیری از برخـورد بین سـاکن و انسـداد، مسـیر حـداقل بـا حـداقل فاصله با آن انسداد باقی می‌ماند. حـداقل فاصـله، عرض شانه افراد است. نمونه‌هایی از این نقاط بـه نام Waypoints در شکل (۱) نشان داده‌شده است که مسیر پیش‌بینی‌شده را به تصویر می‌کشد. این شکل مسیر پیش‌بینی‌شده یک ساکن در یک اتاق مستطیلی ساده را نشان می‌دهـد. فـرد در گوشـه پایین سمت چپ اتاق ایستاده و قصد دارد تـا بـه

گوشه پایین سمت راست‌راه برود. شبکه ناوبری با خطوط نازکی که در داخل ناحیه مستطیل مثلث شکل می‌گیرند، نشان داده می‌شود. انسداد مانع از این می‌شود که ساکن مستقیماً به مقصد برسد. مسیر برنامه‌ریزی‌شده فرد در شکل به‌عنوان خط تاریک و ایستگاه‌های بین‌راهی به‌عنوان دایره‌های کوچک نشان داده‌شده است. برای هر لبه یک نقطه ایجاد می‌شود که مسیر را قطع می‌کند. پس از یافتن این ایستگاه‌های بین‌راهی، Pathfinder نقاط میانی را که بین دو ایستگاه راه در یک خط مستقیم قرار دارند حذف می‌کند. این نرم‌افزار فقط در مواردی که جهت‌های راه رفتن تغییر می‌کند، یک سری ایستگاه ایجاد می‌کند [۲۶].



شکل شماره ۱- یک مسیر برنامه‌ریزی‌شده با ایستگاه بین راه برای خروج فرد (ساکن) [۲۶].

پس از به دست آوردن مسیرها، ساکنان می‌توانند به یک محیط در حال تغییر پاسخ دهند .

Pathfinderمی‌تواند چهار رفتار فرمان را تعریف کند: جستجو، جدا کردن، اجتناب از دیوارها و اجتناب از ساکنان دیگر.

Pathfinder دارای دو حالت شبیه‌سازی حرکت با نام‌های Steering (فرمان) و SFPE است. حالت SFPE مبتنی بر کتابچه راهنمای مهندسی حفاظت از آتش[27] (SFPE) ، مدل‌سازی رفتار انسان در هنگام آتش‌سوزی را برای خروج پیاده‌سازی می‌کند. در این حالت، سرعت راه رفتن و سرعت جریان از طریق درها و راهروها تعریف‌شده است. لازم به توضیح است که در Pathfinder، هندسه پیمایش شامل اتاق‌ها، پله‌ها و درب‌ها است. اتاق‌ها فضای باز هستند که سرنشینان می‌توانند در آن راه بروند. پله‌ها را می‌توان اتاق‌هایی تخصصی دانست که دامنه‌های آنها سرعت افراد را محدود می‌کند. درب‌ها نیز محدودکننده جریان هستند که اتاق‌ها و پله‌ها را به هم متصل می‌کنند. در حالت SFPE هیچ نوع راهرو خاصی وجود ندارد. در عوض، راهروها به‌صورت اتاق‌هایی ساخته می‌شوند که در هر دو انتها درب دارند. به‌این‌ترتیب، راهروها به همان شیوه اتاق‌ها در نظر گرفته می‌شوند که جریان حرکت توسط درها کنترل می‌شود.

حالت Steering که بر اساس ایده رفتارهای فرمان معکوس (شخصیت‌های خودمختار) [۲۶]است، به Pathfinder اجازه می‌دهد تا برای جلوگیری از انسداد و تشکیل صف، افراد رفتار پیچیده‌تری داشته باشند. در این حالت از ترکیبی از مکانیسم‌های فرمان و کنترل برخورد استفاده می‌شود و به افراد اجازه می‌دهد تا درحالی‌که همچنان در مسیر صحیح به سمت هدف خود حرکت می‌کنند، از مسیر نیز منحرف شوند و به عبارتی، هر فرد (عامل) خودش بهترین مسیر را برای رسیدن به مقصد برنامه‌ریزی کند. در حالت فرمان، درب‌ها صرفاً جریان بین اتاق‌ها را برای مشاهده نتایج ثبت می‌کنند، مگر اینکه صراحتاً برای محدود کردن جریان تنظیم‌شده باشد.

خروجی‌های متداول نرم‌افزار Pathfinder عبارت‌اند از تراکم (تعداد افراد در هر مترمربع)، کیفیت تردد یا سطح سرویس (گذرگاه‌های عابران و مسافران؛ تردد افراد به‌صورت روان و سریع انجام شود تا صف تشکیل نشود)، توزیع نرمال سرعت ، سرعت، زمان تا خروج (مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا افراد از درب خارج شوند)، میزان اشغال فضا (تجمعی و انباشته) ، میزان اشغال فضا (لحظه‌ای) [۲۶].

۳- روش‌شناسی

روش پژوهش، از نوع توصیفی-تحلیلی است. در

این پژوهش، ابتدا یک مجتمع مسکونی با ساختمان‌های بلندمرتبه به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب و داده‌های مکانی و توصیفی آن به‌صورت اسنادی و بازدید میدانی جمع‌آوری می‌شود. سپس، طرح‌های مختلف تخلیه اضطراری مجتمع مسکونی موردنظر در قالب سناریوهای مشخص، تعیین می‌شوند. در این تحقیق، طرح‌های مذکور بر اساس افزودن درب جدید و تغییر در چیدمان پارکینگ‌ها و قوانین رفتاری ساکنین برای دو حالت شب و روز در نظر گرفته‌شده‌اند. در گام بعدی، میزان زمان تخلیه و نرخ جریان تخلیه برای هر یک از سناریوهای تخلیه اضطراری با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز Pathfinder برآورد می‌شود. در واقع، Pathfinder به دلیل قابلیت‌های بالا در اعمال متغیرهای حرکت‌های افراد، در دسترس بودن و همچنین سهولت به‌کارگیری به دلیل داشتن رابط کاربر گرافیکی مناسب، برای شبیه‌سازی تخلیه اضطراری ساکنین مورد استفاده قرارگرفته است [۲۶].

۳-۱- منطقه مورد مطالعه

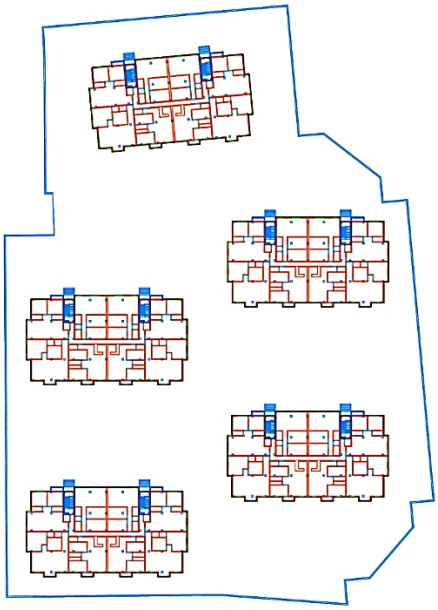
شهرک پونک بزرگ‌ترین شهرک اقماری شهر زنجان است که دارای مجتمع‌های مسکونی با ساختمان‌های بلندمرتبه است[۲۸]. مجتمع‌های مسکونی این شهرک متراکم بوده و غالباً دارای یک درب ورود و خروج می‌باشند؛ لذا طبیعتاً در هنگام وقوع بحران، ساکنین قادر نخواهند بود در مدتی کوتاه مجتمع را تخلیه کنند؛ بنابراین ارائه طرح مناسب تخلیه اضطراری از مشکلات مهم مدیریت بحران و پدافند غیرعامل این شهرک محسوب می‌شود.

در این پژوهش، مجتمع مسکونی قصر فردوس در شهرک پونک که دارای پنج ساختمان بلندمرتبه و متراکم و شامل محوطه‌ای با مساحت ۱۲۶۰۸ مترمربع است (شکل ۲)، برای مدل‌سازی انتخاب شد. هر ساختمان این مجتمع دارای ۸ طبقه مسکونی و همکف با کاربری پارکینگ است. هر طبقه نیز شامل ۸ واحد است و در ساختمان دو راه‌پله وجود دارد که از طریق راهرو به یکدیگر متصل هستند. هر ساختمان مجموعاً ۶۴ واحد است که درنتیجه در مجتمع مسکونی کوی فردوس ۳۲۰ واحد مسکونی وجود دارد.

۳-۲- داده‌ها

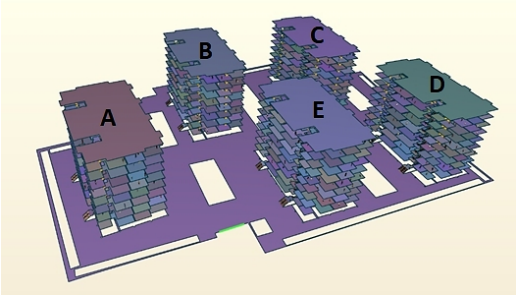
داده‌های مکانی: پلان جزئیات مجتمع قصر فردوس طی سه مرحله بازدید میدانی تهیه شد. پلان جزئیات شامل جانمایی پارکینگ‌های محوطه، جانمایی پارکینگ‌های مسکونی، راه‌پله‌های ساختمان‌ها، راهروها، محل آسانسور، جزئیات واحدها در هر طبقه، جزئیات هر واحد شامل اتاق‌ها، پذیرایی، سرویس‌ها و آشپزخانه است که در محیط Autocad تهیه شد (شکل ۳).

شکل شماره ۲- تصویر ماهواره‌ای مجتمع مسکونی قصر فردوس به همراه کدگذاری ساختمان‌ها



شکل شماره ۳- پلان مجتمع مسکونی قصر فردوس (در شهرک پونک)

شکل (۴) نیز نمایی از محیط شبیه‌سازی‌شده مجتمع مسکونی قصر فردوس در نرم‌افزار Phathfinder را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۴- نمایی از محیط شبیه‌سازی‌شده مجتمع. فضاهای خالی محل پارکینگ‌های موجود در مجتمع را نشان می‌دهند

داده‌های جمعیتی: داده‌های جمعیتی از قبیل تعداد، نسبت جنسیت و ساختار سنی ساکنان تأثیر قابل‌توجهی در نتایج شبیه‌سازی تخلیه اضطراری دارد. این داده‌ها را می‌توان از داده‌های سرشماری جامعه به دست آورد. در ضمن، در زمان اضطرار، ویژگی‌های رفتاری وقتی افراد تأثیر مستقیم بر روند تخلیه دارد. لذا، برای شبیه‌سازی دقیق روند تخلیه و پیش‌بینی زمان تخلیه، تجزیه‌وتحلیل ویژگی‌های رفتاری ساکنان در مواقع اضطراری ضروری است.

در این تحقیق، ابتدا بر اساس اطلاعات جمعیتی مرکز آمار ایران، پارامترهای جمعیتی مجتمع بررسی شد. مطابق داده‌های مرکز آمار ایران در سرشماری سال ۱۳۹۵[۲۹]، تعداد خانوار و جمعیت شهرک پونک به ترتیب ۷۳۳۸ و ۲۳۶۵۴ است؛ بنابراین، با تقسیم جمعیت بر تعداد خانوار می‌توان تعداد جمعیت هر خانواده را به دست آورد که میزان ۳/۲ است. از طرفی با توجه به مصاحبه انجام‌شده با مدیر، نگهبانان و همچنین ساکنان مجتمع قصر فردوس مشخص شد که اکثر خانوارهای مجتمع ۴ نفره هستند، لذا، جمعیت ساکنان را ۴ نفر به ازای هر خانواده یا هر واحد در نظر گرفته شد؛ بنابراین، با توجه به اینکه کل مجتمع دارای ۳۲۰ واحد (۵ ساختمان ۶۴ واحدی) است، جمعیت مجتمع ۱۲۸۰ نفر در نظر گرفته شد. همچنین، به دلیل محدودیت در تعیین نسبت‌های جنسیتی گروه‌های سنی ساکنین مجتمع مسکونی قصر فردوس شهرک پونک، فرض شد که این نسبت‌ها با نسبت‌های مذکور برای شهر زنجان یکسان می‌باشند. در جدول (۱)، نسبت گروه‌های سنی و نسبت جنسیتی از اطلاعات آماری مرکز آمار شهر زنجان ارائه‌شده است.

جدول شماره ۱- نسبت جمعیتی گروه‌های سنی شهر زنجان [۲۹].

گروه سنی	نسبت جمعیت مرد	نسبت جمعیت زن
کمتر از ۴ سال	٪۹	٪۹
۵-۴۴ سال	٪۶۹	٪۶۸
۴۵-۷۴ سال	٪۲۱	٪۲۱
بالای ۷۵ سال	٪۱	٪۱

۳-۳- سناریوهای تخلیه اضطراری

در این تحقیق، حالات مختلف تخلیه اضطراری، بر اساس تغییر وضعیت پارکینگ‌ها و جمعیت ساکن در ساختمان‌ها بر اساس زمان وقوع بحران (شب یا روز) و همچنین در نظر گرفتن یک درب جدید برای مجتمع و تغییر قوانین رفتاری، شش سناریو برای شبیه‌سازی در نظر گرفته‌شده است که در ادامه تشریح می‌شوند.

سناریو ۱: در این سناریو، زمان موردنظر نیمه‌شب بوده، همه‌ی ساکنین در واحدهای خود مستقر هستند و هیچ فضای خالی نیز در پارکینگ‌ها وجود ندارد. این سناریو در واقع بدبینانه‌ترین حالت ممکن برای تخلیه اضطراری است.

سناریو ۲: در این سناریو فرض بر این است که زمان تخلیه روز است، نصف پارکینگ‌ها پر هستند و ۱۰ درصد از جمعیت در نظر گرفته‌شده برای ساکنان داخل محوطه مجتمع قرار دارند و همچنین پارک کردن غیرمجاز همسایه‌ها نیز در این سناریو در نظر گرفته می‌شود.

سناریو ۳: این سناریو ترکیبی از حالت‌های شب و درب اضافه است. در این سناریو حالت‌های مختلف برای محل قرارگیری درب جدید امتحان می‌شود و نهایتاً مکانی که منجر بیشترین کاهش زمان در فرایند تخلیه می‌شود، برای قرار دادن درب جدید انتخاب می‌شود.

سناریو ۴: این سناریو ترکیب حالت‌های شب و ایجاد تغییرات در پارکینگ‌ها و اعمال قوانین در مجتمع است. در این سناریو تغییراتی در پارکینگ‌های طبقات همکف ساختمان‌ها و پارکینگ‌های محوطه، انجام می‌شود به‌نحوی‌که باعث بیشترین کاهش زمان تخلیه شود. همچنین قوانینی اعمال می‌شود مبنی بر اینکه هر یک از اعضا صرفاً از راه‌پله سمت واحد خود عبور کند.

سناریو ۵: این سناریو ترکیب حالت‌های روز و درب اضافه است. شبیه‌سازی با ایجاد تغییراتی در مدل متناسب با این سناریو انجام می‌شود. در این سناریو حالت‌های مختلف برای محل قرارگیری درب جدید امتحان می‌شود و نهایتاً مکانی که باعث بیشترین کاهش زمان در فرایند تخلیه شود، برای قرار دادن درب جدید انتخاب‌شده و شبیه‌سازی مطابق با این تغییرات انجام می‌شود.

سناریو ۶: این سناریو ترکیب حالت‌های روز و ایجاد تغییرات در پارکینگ‌ها و اعمال قوانین در مجتمع است. در این سناریو تغییراتی در پارکینگ‌های طبقات همکف ساختمان‌ها و پارکینگ‌های محوطه، انجام می‌شود به‌نحوی‌که باعث بیشترین کاهش زمان تخلیه شود. همچنین قوانینی اعمال می‌شود مبنی بر اینکه هر یک از اعضا صرفاً از راه‌پله سمت واحد خود عبور کند.

۴-۳- تنظیم حالت و سرعت حرکت در Pathfinder

برای شبیه‌سازی شش سناریوی فوق‌الذکر در Pathfinder لازم است که حالت حرکتی و همچنین سرعت حرکت افراد در هنگام وقوع بحران به‌طور مناسب تنظیم شود.

حالت حرکت: در این تحقیق، برای انجام شبیه‌سازی تخلیه اضطراری با Pathfinder از حالت فرمان (steering) برای حرکت افراد در هنگام خروج استفاده شد. با استفاده از حالت فرمان در مبحث تخلیه اضطراری ساختمان‌ها، هر فردی در مدل به‌عنوان نماینده با مشخصات (مانند اندازه و سرعت پیاده‌روی) و رفتار خود، از محیط محلی خود برای تصمیم-گیری در مسیر خروج استفاده می‌کند. به‌عنوان‌مثال، افراد می‌توانند به‌صورت پویا از صف‌های طولانی جلوگیری کنند یا به بسته شدن درب‌ها پاسخ دهند. همچنین، به‌طور پیش‌فرض، هر فرد (عامل) از ترکیبی از پارامترها برای انتخاب مسیر فعلی خود برای خروج استفاده می‌کند. در واقع، فرد به‌صورت پویا به صف‌های متغیر، باز و بسته شدن درب‌ها و تغییرات

محدودیت سرعت اتاق (شبیه‌سازی دود و آوار) پاسخ می‌دهد. به عبارتی، فرد می‌تواند با تغییر وزن پارامترهای پیش‌فرض، رفتار خود را تغییر دهد. برای مثال، ساکنان طبقه‌های پایین‌تر می‌توانند از پله‌ها استفاده کنند، درحالی‌که اکثر ساکنان طبقه‌های بالاتر می‌توانند از آسانسور استفاده کنند.

سرعت حرکت: در نشریه ۱۴۴ سازمان برنامه و بودجه [۳۰]، سرعت عابران پیاده در ۲۵ نقطه از شهر تهران اندازه‌گیری شده است که حداکثر سرعت رده سنی ۱۹ تا ۲۵ سال با ۱/۲ متر بر ثانیه و حداقل سرعت عابران پیاده مربوط به رده سنی بالای ۵۵ سال با سرعت ۱/۰۵ متر بر ثانیه بوده است.

در این مطالعات ازنظر توزیع جنسی متوسط سرعت پیاده‌روی خانم‌ها حدود ده درصد کمتر از آقایان گزارش‌شده است؛ اما مطالعاتی که در این زمینه در سرتاسر جهان انجام‌شده، در هنگام تخلیه اضطراری سرعت خروج افراد از مسیرهای خروجی از ۰/۶ تا ۲/۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته‌شده است [۴، ۷ و ۱۴].

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات انجام‌شده، در این تحقیق در مدل‌سازی و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مقدار سرعت افراد در هنگام حرکت به سمت مسیرها و درب‌های خروج، با توجه به جدول ۱، در سه گروه متفاوت تعریف شد (جدول ۲). شایان‌ذکر است که سرعت حرکت عابران پیاده در حالت عادی و نرمال است، لذا طبیعی است که این سرعت در مواقع ایجاد خطر بسته به توانایی و خصوصیات فیزیکی و روحی افراد و همچنین نوع عکس‌العمل آنها بیشتر خواهد شد؛ اما به دلیل وجود موانع طبیعی و وسایل همراه ساکنان طبیعی است در موقع خروج سرعت افراد نمی‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یابد.

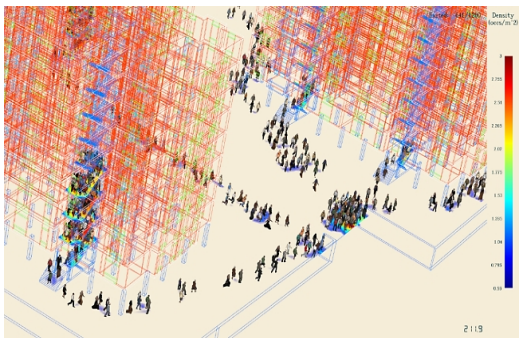
جدول شماره ۲- سرعت حرکت افراد در گروه‌های سنی تحقیق

گروه سنی	مرد (متر بر ثانیه)	زن (متر بر ثانیه)
کمتر از ۴ سال	۰/۸ تا ۱/۱	۰/۸ تا ۱/۱
۵-۴۴ سال	۱/۴ تا ۲/۱	۱/۱ تا ۱/۶
بیشتر از ۴۵ سال	۰/۶ تا ۰/۹	۰/۶ تا ۰/۸

۴- نتایج و بحث

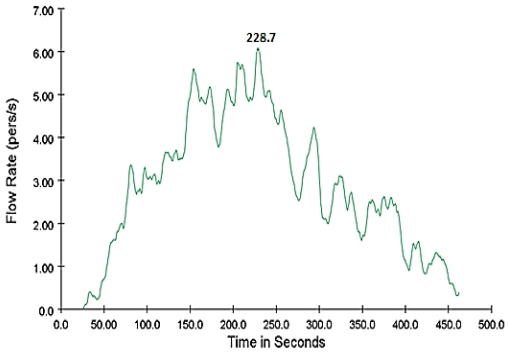
نتایج سناریو ۱

در این سناریو، تخلیه اضطراری در نیمه‌شب که تمامی خودروها در محوطه پارک هستند و ساکنان شهرک نیز ۱۰۰ درصد داخل واحدها قرار دارند و کسی داخل محوطه حضور ندارد، شبیه‌سازی‌شده است. شکل (۵) نمودار تراکم جمعیت را برای این سناریو نشان می‌دهد. مطابق این شکل، تراکم حداقل از ۰/۵۵ نفر در هر مترمربع تا ۳ نفر در هر مترمربع به وجود آمده است. با توجه به متغیر بودن تراکم جمعیت در نقطه خروج در لحظات مختلف نمودار تراکم نیز متغیر خواهد بود. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود در مدت‌زمان ۲۱۲ ثانیه حدود ۶۴۱ نفر از سالن ایستگاه تخلیه‌شده‌اند.



شکل شماره ۵- نمودار تراکم در مدل شبیه‌سازی‌شده. تراکم از نیم مترمربع برای هر مسافر و در حالت بحرانی ۳ نفر در هر مترمربع با رنگ‌ها مشخص‌شده است

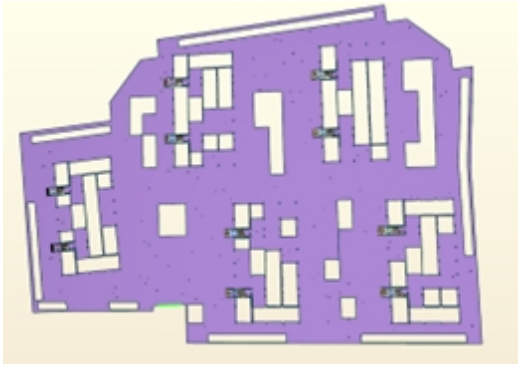
زمان تخلیه ۱۲۸۰ نفر ساکن مجتمع مسکونی در این حالت ۴۶۲/۵ ثانیه است. نرخ جریان برای درب خروجی در این حالت مطابق شکل (۶) است. با توجه به این شکل بیشترین تعداد افرادی که به‌طور هم‌زمان از درب خارج می‌شوند، معادل ۶ نفر در ثانیه در ثانیه ۲۲۸/۷ ام فرایند تخلیه است؛ و به‌طورکلی در اواسط فرایند تخلیه بیشترین حجم عبوری از درب را شاهد هستیم. در نتایج شبیه‌سازی می‌توان اطلاعات مختلفی از قبیل زمان تخلیه اولین و آخرین نفر از گروه‌های مختلف سنی و جنسیتی، مسافت سفر برای اولین و آخرین نفر از گروه‌های سنی و جنسیتی مختلف و جزئیات فرایند تخلیه برای هر یک از درب‌های موجود در مدل را به دست آورد.



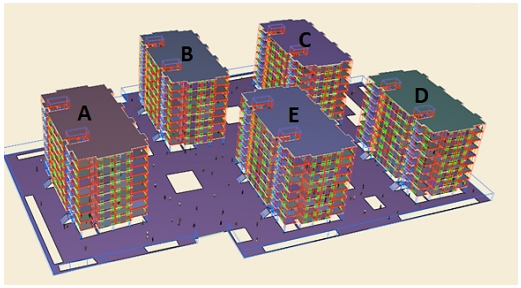
شکل شماره ۶- نمودار نرخ جریان برای درب اصلی مجتمع در سناریو ۱

نتایج سناریو ۲

در این سناریو فرض بر این است که تهدید متصور برای مجتمع مسکونی در روز اتفاق بیافتد. در این حالت تعدادی از پارکینگ‌های مجتمع خالی از خودرو هستند و ده درصد از جمعیت ساکنان در داخل محوطه قرار دارند. شکل (۷) نحوه چیدمان پارکینگ‌های موجود در مجتمع را نشان می‌دهد که در حالت روز بعضی از آن‌ها پر هستند و بعضی خالی از خودرو هستند. شکل (۸) نیز نمایی از محیط شبیه‌سازی‌شده اولیه ساکنان شهرک در حالت روز را نشان می‌دهند.

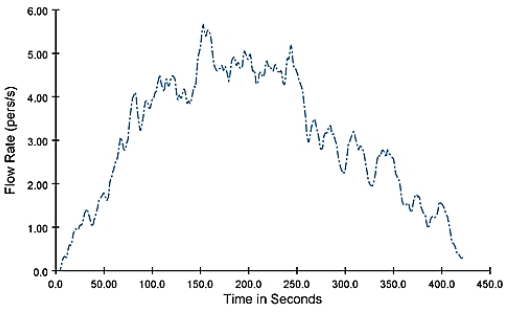


شکل ۷- سناریو ۲: فضاهای خالی محل پارکینگ‌های خالی از خودرو هستند. ۱۰٪ از جمعیت به‌صورت تصادفی در محوطه هستند.



شکل شماره ۸- نمای سه‌بعدی مدل شبیه‌سازی‌شده در سناریو ۲

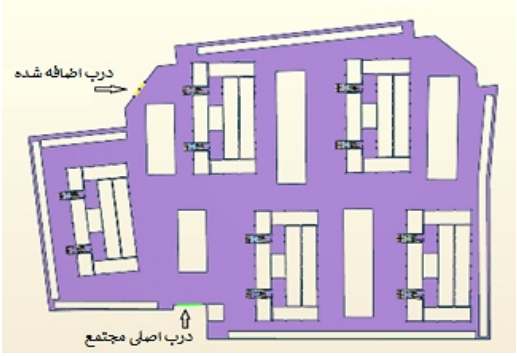
زمان تخلیه ۱۲۸۰ نفر ساکن مجتمع مسکونی که در سناریو ۲، ۱۰٪ از آن‌ها در داخل محوطه حضور دارند، ۴۲۲/۵ ثانیه است. نرخ جریان برای درب خروجی در این حالت مطابق شکل (۹) است. با توجه به این شکل بیشترین تعداد افرادی که به‌طور هم‌زمان از درب خارج می‌شوند، معادل ۵/۸ نفر در ثانیه در ثانیه ۱۵۹ ام فرایند تخلیه است.



شکل شماره ۹- نرخ جریان برای درب اصلی در سناریو ۲

نتایج سناریو ۳

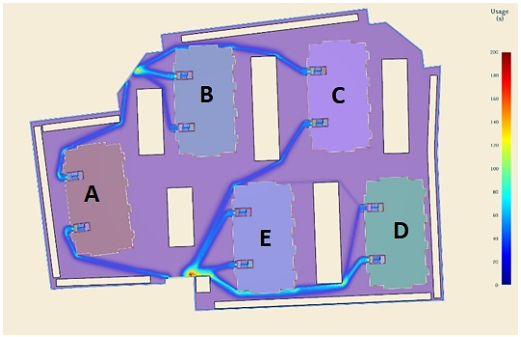
در ساختمان‌های مجتمع مسکونی قصر فردوس در طبقه همکف، دو راه‌پله با جهت‌های مقابل در هریک از راه‌پله‌های ساختمان‌ها وجود دارد. با توجه به اینکه دورترین مسافت در شبیه‌سازی حالت شب، مربوط به ساختمان D است. ایجاد یک درب جدید در بین ساختمان‌های C و D منطقی به نظر می‌رسد؛ اما با توجه به اینکه راه‌پله‌ای که در جهت این درب قرار دارد به علت پارک خودروها در طبقه همکف ساختمان‌ها قابل‌استفاده نیست و درنتیجه زمان تخلیه بیشتر نیز می‌شود. نهایتاً یک درب با عرض ۶ متر در نقطه‌ای با بیشترین کارایی برای تخلیه در بین ساختمان‌های A و B در نظر گرفته شد (شکل ۱۰).



شکل شماره ۱۰- محل قرارگیری درب جدید در سناریو ۳

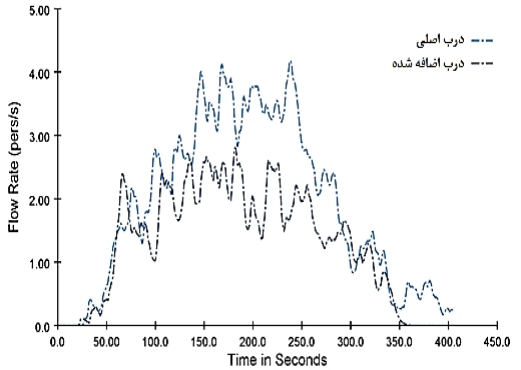
در این سناریو با افزودن درب جدید به مجتمع در ضلع شرقی، مدت‌زمان تخلیه به ۴۰۶ ثانیه کاهش یافت. درنتیجه با انجام این تغییر در محوطه مجتمع می‌توان زمان تخلیه ساکنان در مواقع بحران را ۱۲/۳٪ کاهش داد.

در شکل (۱۱) میزان استفاده از مکان برای خروج نشان داده‌شده است. با توجه به نتایج سناریو ۳ میزان استفاده از مکان با افزودن درب جدید کاهش‌یافته است. نمودار نشان داده‌شده در شکل، نشان‌دهنده این است که توزیع مناسبی



شکل شماره ۱۱- نمودار حداکثر میزان استفاده از فضا بر حسب ثانیه در سناریو ۳

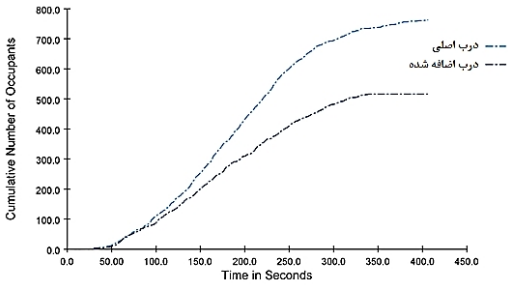
بین ساکنان در استفاده از درب‌ها انجام‌شده است. معیار و سنجش نرخ جریان، تعداد ساکنان مجتمع هستند که قادر خواهند بود از مسیر و درب‌های خروجی مشخص‌شده در واحد زمان عبور کنند. عوامل مختلف در جریان حرکت تأثیرگذار هستند، ازجمله آشنایی افراد با راهروها و درب‌های خروج، اکثر ساکنان در هنگام خطر مسیری را انتخاب می‌کنند که با آن آشنایی دارند؛ حتی اگر مسیرهای دیگر کوتاه‌تر باشند. همچنین مسیر و درهایی را انتخاب می‌کنند که روزانه معمولاً از آن تردد دارند. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، در درب اصلی بالاترین نرخ جریان در ثانیه ۲۳۸ ام اتفاق افتاد که حدود ۴/۲ نفر در هر ثانیه از این درب خارج شدند و در درب خروجی اضافه‌شده این اتفاق در ثانیه ۱۸۱ ام روی داد که حدود ۲/۸ نفر در هر ثانیه از این در خارج می‌شوند که ۳۱٪ درصد، کاهش را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۱۲- نمودار نرخ جریان درب‌های خروجی

سناریو ۳

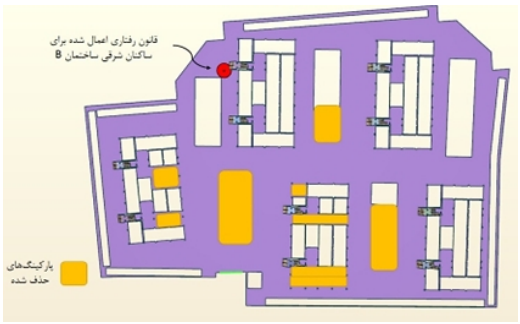
در شکل (۱۳) نمودار تعداد تجمعی نفراتی که در طول فرایند تخلیه از درب‌های اصلی و فرعی عبور کرده‌اند نشان داده‌شده است. با توجه به این شکل، ۷۶۴ نفر کل جمعیت ساکنان مجتمع مسکونی از درب اصلی و ۵۱۶ نفر از درب اضافه‌شده خارج می‌شوند.



شکل شماره ۱۳- نمودار تجمعی تعداد افراد خارج‌شده از درب‌های خروجی مجتمع در سناریو ۳

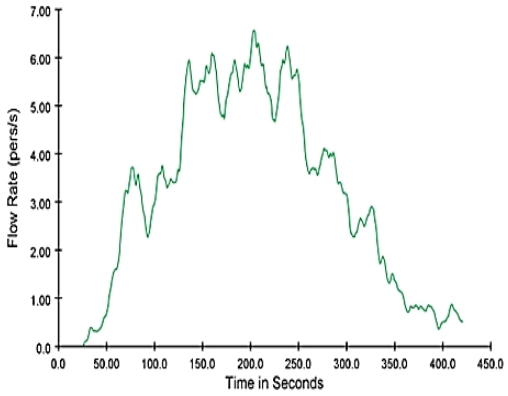
نتایج سناریو ۴

در این سناریو فرض بر این است که با ایجاد تغییراتی در چیدمان پارکینگ‌های مجتمع، کاهش آن‌ها و یا اعمال قوانین در مجتمع به نحوی بتوان مدت‌زمان تخلیه را کاهش داد. در این سناریو پارکینگ‌هایی که مستقیماً در مسیر عبور ساکنان قرار داشتند مطابق شکل (۱۴) حذف شد. همچنین طی پردازش‌های اولیه سناریو ۴ مشخص شد، تعدادی از ساکنان ساختمان B به علت احساس نزدیک‌تر بودن راه‌پله غربی به درب خروج مجتمع، سعی در خروج از ساختمان با استفاده از آن راه‌پله دارند که درنتیجه به علت ایجاد ازدحام در راه‌پله غربی ساختمان B تردد آن‌ها با تأخیر انجام‌شده و آخرین افرادی که از مجتمع خارج می‌شدند، ساکنان ساختمان B هستند. برای جلوگیری از این اتفاق می‌توان با اعمال قوانین در مجتمع مبنی بر اینکه هیچ ساکنی حق عبور از راه‌پله سمت غیر از محل قرارگیری واحد خود را نداشته باشد، می‌توان با درصد قابل قبولی مدت‌زمان خروج را کاهش داد. لازم به ذکر است ساکنان دیگر ساختمان‌ها، با توجه به اینکه عبور از هریک از راه‌پله‌ها تأثیری در زمان خروجشان ندارد، معمولاً از راه‌پله سمت واحد خودشان استفاده می‌کنند؛ اما با توجه به اعمال قانون در ساختمان B، برای عدم ایجاد حساسیت در ساکنان، باید قانون را در تمامی ساختمان‌های مجتمع اعمال کرد.



شکل شماره ۱۴- تغییرات اعمال‌شده بر مدل شبیه‌سازی‌شده در سناریو ۴

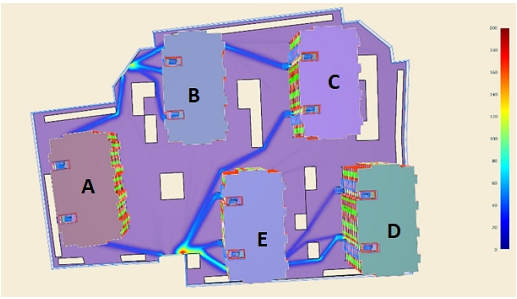
نمودار نرخ جریان برای درب اصلی در سناریو ۴ مطابق شکل (۱۵) است. با توجه به این نمودار حداکثر نرخ جریان برای درب اصلی به ۶٫۵ نفر در ثانیه در ثانیه ۲۰۳ فرایند تخلیه رخ می‌دهد که نسبت به حالت اصلی ۰/۵ نفر در ثانیه معادل ۸٪ افزایش یافت.



شکل شماره ۱۵- نمودار نرخ جریان برای درب اصلی در سناریو ۴

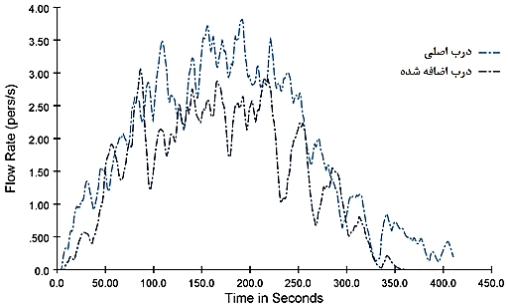
نتایج سناریو ۵

در این سناریو یک درب با عرض ۶ متر در ناحیه‌ای بین ساختمان‌های A و B قرار گرفت. با توجه به اینکه در حالت روز تعدادی از پارکینگ‌های محوطه و طبقات همکف ساختمان‌ها خالی هستند و همچنین ۱۰ درصد از جمعیت در محوطه قرار دارند، افزودن درب جدید باعث تغییر زیادی در زمان تخلیه ساکنان مجتمع نشد. زمان تخلیه جدید ۴۱۱ ثانیه است که نسبت به حالت قبلی ۱۲ ثانیه معادل ۲/۸ درصد کاهش‌یافته است. در شکل (۱۶) میزان حداکثر استفاده از مکان برای خروج نشان داده‌شده است. با توجه به نتایج سناریو ۵ میزان استفاده از مکان با افزودن درب جدید اندکی کاهش‌یافته است.

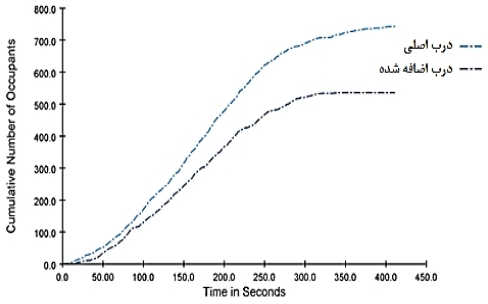


شکل شماره ۱۶-. نمودار حداکثر استفاده از مکان در سناریو ۵

در شکل (۱۷) نمودار نرخ جریان برای درب اصلی و درب اضافه‌شده ارائه‌شده است. با توجه به این شکل بیشترین نرخ جریان برای درب اصلی، معادل ۳/۸ نفر در ثانیه است که در ثانیه ۱۹۲ ام تخلیه اتفاق می‌افتد، همچنین بیشترین نرخ جریان برای درب اضافه‌شده، معادل ۳ نفر در ثانیه است که در ثانیه ۸۷ ام تخلیه رخ می‌دهد که٪ ۳۴/۵ درصد، کاهش نرخ جریان را نشان می دهد. همچنین، با توجه به شکل (۱۸) که نمودار تجمعی تعداد افراد خارج‌شده از مجتمع را به تفکیک درب‌های اصلی و اضافه‌شده نشان می‌دهد، مجموعاً ۷۴۴ نفر از درب اصلی و ۵۳۶ نفر از درب اضافه‌شده عبور می‌کنند.



شکل شماره ۱۷- نمودار نرخ جریان برای درب اصلی و درب اضافه‌شده در سناریو ۵



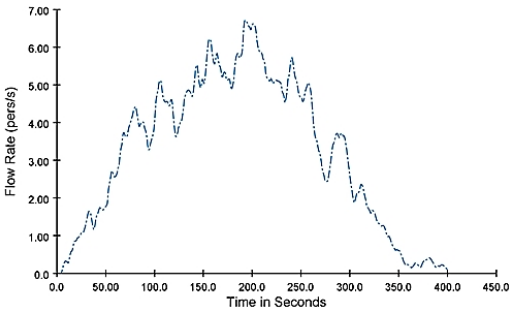
شکل شماره ۱۸- نمودار تجمعی تعداد افراد خارج از طریق درب اصلی و درب اضافه‌شده در سناریو ۵

نتایج سناریو ۶

در این سناریو قوانینی برای منع پارک خودروها در نقاطی که طبق شکل (۱۹) مشخص است، انجام شد. همچنین رفتاری جدید برای ساکنان ساختمان B اعمال شد تا از راه‌پله سمت واحدهای خود استفاده کنند.

شکل شماره ۱۹- تغییرات اعمال‌شده بر مدل شبیه‌سازی‌شده در سناریو ۶

نمودار نرخ جریان برای درب اصلی در سناریو ۶ مطابق شکل (۲۰) است. با توجه به این نمودار حداکثر نرخ جریان برای درب اصلی به ۶/۷ نفر در ثانیه در ثانیه ۱۹۳ فرایند تخلیه رخ می‌دهد که نسبت به حالت اصلی ۰/۹ نفر در ثانیه معادل ۱۵٪ افزایش یافت. همچنین، درنتیجه این تغییرات مدت‌زمان تخلیه، به ۴۰۱ ثانیه کاهش یافت که نسبت به حالت اولیه ۲۱ ثانیه، معادل ۵٪ کاهش را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۲۰- نمودار نرخ جریان برای درب اصلی در سناریو ۶

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، مجتمع مسکونی قصر فردوس واقع در شهرک پونک زنجان که دارای ساختمان‌های متراکم و بلندمرتبه و جمعیتی بالغبر ۱۲۰۰ نفر است، برای تجزیه‌وتحلیل تخلیه اضطراری در مواقع بحران مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، با تهیه جزئیات معماری و برآورد پارامترهای جمعیتی، شبیه‌سازی تخلیه اضطراری نیز با استفاده از نرم‌افزار Pathfinder انجام گرفت. تحلیل‌های انجام‌شده بر اساس ۶ سناریو با افزودن یک درب جدید به مجتمع و تغییر در چیدمان پارکینگ‌ها و قوانین رفتاری، برای کاهش زمان تخلیه و نرخ جریان درب اصلی مجتمع در دو حالت شب و روز، انجام گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق، چنانچه تخلیه اضطراری (با توجه به وقوع تهدید) در زمان شب صورت بگیرد، افزودن درب در مجتمع بود، مدت‌زمان تخلیه را ۱۲/۳٪ و حداکثر نرخ جریان برای درب اصلی را ۳۱٪ درصد، کاهش می‌دهد. همچنین، تغییر چیدمان پارکینگ‌های محوطه و طبقات همکف و همچنین، اعمال قوانین رفتاری برای ساکنان مجتمع مبنی بر عبور از راه‌پله سمت واحد خود، مدت‌زمان تخلیه را ۸/۳٪ کاهش می دهد؛ اما حداکثر نرخ جریان برای درب اصلی ۸٪ افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، چنانچه تهدید متصور در روز اتفاق بیافتد، افزودن یک درب در مجتمع مدت‌زمان تخلیه را ٪ ۲/۸ و حداکثر نرخ جریان برای درب اصلی را ٪ ۳۴/۵ درصد کاهش می‌دهد. همچنین، تغییر چیدمان پارکینگ‌های محوطه و طبقات همکف و همچنین، اعمال قوانین رفتاری برای ساکنان مجتمع مبنی بر عبور از راه‌پله سمت واحد خود، مدت‌زمان تخلیه را ٪۵ کاهش می‌دهد؛ اما حداکثر نرخ جریان برای درب اصلی مجتمع ۱۵٪ را افزایش می‌دهد.

این تحقیق نشان داد که مدل و فرایند ارائه‌شده در ارزیابی تخلیه اضطراری می‌تواند در مجتمع‌های مسکونی با ساختمان‌های بلندمرتبه هم‌زمان با مطالعات طرح هندسی مسیر و معماری اجرایی شود. همچنین راهکارها و تمهیدات مدیریتی لازم می‌تواند با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری ارزیابی شود تا در مواقع وقوع بحران، تلفات مالی و جانی به حداقل برسد.

در پایان، برای توسعه این تحقیق، پیشنهادها ذیل ارائه می‌شود:

- جمع‌آوری آمار و اطلاعات دقیق به‌ویژه نسبت‌های جنسیتی گروه‌های سنی ساکنین به منظور برآورد واقعی‌تر زمان تخلیه اضطراری.

-انتخاب و ارزیابی سناریوهای تخلیه اضطراری دیگر به‌منظور کاهش مدت‌زمان تخلیه اضطراری و درنتیجه کاهش تلفات احتمالی در شرایط اضطرار.

- استفاده از نرم‌افزارهای منبع باز و به‌ویژه نرم‌افزارهایی مبتنی بر هوش مصنوعی برای اعمال

متغیرهـای رفتـاری افـراد بیشـتر، ماننـد کـاهش قابلیت دید به دلیل دود، امکان برخـورد افـراد بـا هـم تجمـع افـراد در راه‌پلـه، ازدحـام در کـف ساختمان و همچنین بروز رفتارهـای ناهنجـار، بـا هـدف واقعـی‌تـر نمـودن بـرآورد زمـان تخلیـه اضطراری.

۶- منابع

۱- فرهودی رحمت اله، محمدی علیرضا (۱۳۸۰)، تأثیر احداث ساختمان‌های بلندمرتبه بر کاربری‌های شهری مطالعه موردی: مناطق ۱،۲ و ۳ شهر تهران، نشریه پژوهشهای جغرافیایی، شماره ۴۱، ص ۷۱-۸۲

۲- فلاح زاده سجاد، محمودی پاتی فرزین (۱۳۹۴)، اولویت بندی سیاست‌های مشارکتی در بازآفرینی شهری با تأکید بر احتمال وقوع ناسازگاری میان بهره وران؛ مطالعه موردی: برنامه بازآفرینی بافت قدیم آمل، دوره ۴، شماره ۱۵، ۵-۱۶.

۳- انجمن علمی پدافند غیرعامل کشور (۱۳۹۷)، آنچه شهرداران باید از پدافند غیرعامل بدانند.

4. Chu, H., Yu, J., Wen, J., Yi, M., & Chen, Y. (2019). Emergency evacuation simulation and management optimization in urban residential communities. Sustainability, 11(3), 795.

5. Xiao, M., Zhou, X., Pan, X., Wang, Y., Wang, J., Li, X., Sun, Y. and Wang, Y. (2022). Simulation of emergency evacuation from construction site of prefabricated buildings. Scientific Reports, 12(1), 2732.

6. Tan, L., Hu, M., & Lin, H. (2014). Agent-based simulation of building evacuation: Combining human behavior with predictable spatial accessibility in a fire emergency. Information Sciences, 295, 53-66.

7. Şahin, C., Rokne, J. and Alhajj, R. (2019). Human behavior modeling for simulating evacuation of buildings during emergencies. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 528, 121432.

8. Jayaparvathy, R. (2024). Modeling of emergency evacuation in high rise buildings considering congestion at stairs based on Markov chains. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 633, 129352.

۹- نکویی محمدعلی جعفری پرویز ، حامدی محدثه (۱۴۰۱) مدل ارزیابی زمان تخلیه اضطراری جمعیت در اماکن پر ازدحام، فصلنامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران، شماره ۴، ۴۷۰-۴۵۵

۱۰- خزایی صفا (۱۳۹۸)، شبیه‌سازی عامل‌مبنای تخلیه اضطراری شهرها در هنگام حملات تروریستی، نشریه مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، شماره ۷، ص ۱۹۵-۲۲۱

۱۱- بهرامی وحید، اعتصام ایرج، شاه‌چراغی آزاده (۱۳۹۹). بررسی متغیرهای مؤثر بر طراحی مسیرهای تخلیه اضطراری ساختمان‌های بلندمرتبه در برابر آتش‌سوزی بر اساس روش معادلات ساختاری MICMAC و تحلیل ANP.معماری و شهرسازی پایدار، ۸(۲)، ۶۶-۸۰.

۱۲- طالبی، یاسر، خرسند نرجس (۱۳۹۳)، ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌های بلندمرتبه با رویکرد دفاع غیرعامل، نمونه موردی شهرک الغدیر شهر بجنورد، دومین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی.

۱۳- فرازمند، علیرضا، شیرمردی کیانوش، قاقازانی مجید (۱۳۹۷)، تخلیه اضطراری در سوانح، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، کارگروه تخصصی بهداشت و درمان، واحد حوادث و مدیریت بحران.

14. Xie, J., Chen, K., Kwan, T. H., & Yao, Q. (2021). Numerical simulation of the fire emergency evacuation for a metro platform accident. Simulation, 97(1), 19-32.

15. Kurdi, H., Almulifi, A., Al-Megren, S. and Youcef-Toumi, K., (2021). A balanced evacuation algorithm for facilities with multiple exits. European Journal of Operational Research, 289(1), 285-296.

16. Mirahadi, F. and McCabe, B.Y. (2021). EvacuSafe: A real-time model for building evacuation based on Dijkstra's algorithm. Journal of Building Engineering, 34, p.101687.

17. Xu, L., Huang, K., Liu, J., Li, D. and Chen, Y.F. (2022). Intelligent planning of fire evacuation routes using an improved ant colony optimization algorithm. Journal of Building Engineering, 61, 105208.

18. Helbing, D., and Johansson, A. (2011). Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics. Extreme Environmental Events, 697–716.

19. Wei-Guo, S., Yan-Fei, Y., Bing-Hong, W., & Wei-Cheng, F. (2006). Evacuation behaviors at exit in CA model with force essentials: A comparison with social force model. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 371(2), 658-666.

20. Gao, D.L., Lee, E.W.M. and Lee, Y.Y., 2022. Integration of cumulative prospect theory in cellular automata model for building evacuation. International Journal of Disaster Risk Reduction, 74, p.102904.

21. Mahmood, I., Nadeem, T., Bibi, F. and Hu, X., (2019). Analyzing emergency evacuation strategies for large buildings using crowd simulation framework. In 2019 Winter Simulation Conference (WSC) , December

3116-3127.
22. Du, C.B., Zhu, G.Q., Li, J.Y. (2015). Comparative study on evacuation simulation software STEPS and pathfinder. Fire Sci. Technol. 34, 456–460.
23. Ren, C., Yang, C. and Jin, S., (2009). Agent-based modeling and simulation on emergency evacuation. In Complex Sciences: First International Conference, Complex, Shanghai, China, February 23-25, Revised Papers, Part 2 1 , 1451-1461. Springer Berlin Heidelberg.
24. Lestari, D.P., Sabri, A., Handhika, T., Sari, I. and Fahrurozi, A., 2020, May. The simulation of evacuation from multistorey building using NetLogo. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 854(1), 012060.
25. Hu, M.W. and Shi, Q.X. (2009). Comparative study of pedestrian simulation model and related software. Transportation Information and Security, 4(27), 122-127.
26. Pathfinder Technical Reference Manual Version (2021). Version: 2021-2, Manhattan, KS 66502, USA.
27. Society of Fire Protection Engineers (2016). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. Springer-Verlag New York.
۲۸- پایگاه خبری تحلیلی موج رسا، (۱۳۹۶)، بزرگ‌ترین شهرک اقماری زنجان در محاصره مشکلات، mojresa.ir
۲۹- مرکز آمار ایران (۱۳۹۵)، سالنامه آماری کشور سال ۹۵
۳۰- دفتر تحقیقات و معیارهای فنی، (۱۳۷۵)، نشریه ۱۴۴- تسهیلات پیاده‌روی، سازمان برنامه‌وبودجه کشور.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License