Accepted Manuscript

Accepted Manuscript (Uncorrected Proof)

Title: Simulation and Analysis of Emergency Evacuation Scenarios in Schools with an Emphasis on Physical and Managerial Factors: A Case Study of Hazrat Maryam Girls' Elementary School in Mashhad, Iran

Authors: Morteza Shafahi[1], Keivan Bina[2,*], Ebrahim Zeidabadi[1]

1. *Mashhad Municipality Fire and Safety Services Organization, Mashhad, Iran*
2. *Khayyam university, Mashhad, Iran*

To appear in: **Disaster Prevention and Management Knowledge**

Received date: 2026/06/11

Accepted date: 2026/09/26

First Online Published: 2026/10/28

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

This is a “Just Accepted” manuscript, which has been examined by the peer-review process and has been accepted for publication. A “Just Accepted” manuscript is published online shortly after its acceptance, which is prior to technical editing and formatting and author proofing. Archives of Rehabilitation provides “Just Accepted” as an optional service which allows authors to make their results available to the research community as soon as possible after acceptance. After a manuscript has been technically edited and formatted, it will be removed from the “Just Accepted” Website and published as a published article. Please note that technical editing may introduce minor changes to the manuscript text and/or graphics which may affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Please cite this article as:

Bueno, S., Banuls, V. A., & Gallego, M. D. [Simulation and Analysis of Emergency Evacuation Scenarios in Schools with an Emphasis on Physical and Managerial Factors: A Case Study of Hazrat Maryam Girls’ Elementary School in Mashhad, Iran]. Disaster Prevention and Management Knowledge. Forthcoming 2026.

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

نسخه پذیرفته‌شده پیش از انتشار

عنوان: شبیه سازی و تحلیل سناریوهای تخلیه اضطراری مدارس با استفاده از نرم افزار Pathfinder "مطالعه موردی دبستان دخترانه حضرت مریم (س) در شهر مشهد"

نویسندگان: مرتضی شفاهی[1]، کیوان بینا[2]*، ابراهیم زیدآبادی[1]

۱. *سازمان آتشنشانی و خدمات ایمنی شهرداری مشهد، مشهد، ایران*
۲. *دانشگاه خیام، مشهد، ایران*

نشریه: **دانش پیشگیری و مدیریت بحران**

تاریخ دریافت: 1405/3/21

تاریخ پذیرش: 1405/7/4

تاریخ انتشار اولیه: 1405/08/05

این نسخه «پذیرفته‌شده پیش از انتشار» مقاله است که پس از طی فرایند داوری، برای چاپ، قابل پذیرش تشخیص داده شده است. این نسخه در مدت کوتاهی پس از اعلام پذیرش به صورت آنلاین و قبل از فرایند ویراستاری منتشر می‌شود. نشریه آرشیو توانبخشی گزینه «پذیرفته‌شده پیش از انتشار» را به عنوان خدمتی به نویسندگان ارائه می‌دهد تا نتایج آن‌ها در سریع‌ترین زمان ممکن پس از پذیرش برای جامعه علمی در دسترس باشد. پس از آنکه مقاله‌ای فرایند آماده سازی و انتشار نهایی را طی می کند، از نسخه «پذیرفته‌شده پیش از انتشار» خارج و در یک شماره مشخص در وب‌سایت نشریه منتشر می‌شود. شایان ذکر است صفحه آرایی و ویراستاری فنی باعث ایجاد تغییرات صوری در متن مقاله می‌شود که ممکن است بر محتوای آن تأثیر بگذارد و این امر از حیطه مسئولیت دفتر نشریه خارج است.

لطفا این‌گونه استناد شود:

Bueno, S., Banuls, V. A., & Gallego, M. D. [Simulation and Analysis of Emergency Evacuation Scenarios in Schools with an Emphasis on Physical and Managerial Factors: A Case Study of Hazrat Maryam Girls' Elementary School in Mashhad, Iran]. Disaster Prevention and Management Knowledge. Forthcoming 2026.

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

Abstract

Elementary schools are considered among the sensitive environments in the face of emergencies due to the presence of young children and their dependence on educational staff in emergency situations. Safe evacuation of these spaces is not solely dependent on the physical characteristics of the building, and factors such as population distribution, management of the exit flow, guidance of individuals, and organization of educational staff also affect the performance of the evacuation process. The present study was conducted with the aim of evaluating and improving the emergency evacuation process at Hazrat Maryam Girls' Elementary School in Mashhad, with an emphasis on integrating physical and managerial interventions. The research method is quantitative and based on agent-based modeling and simulation using Pathfinder software. The required data were collected through field surveys, direct observation, and interviews with the principal and educational staff, and were simulated in the form of six evacuation scenarios. The scenarios included the existing condition, increased walking speed, controlled delay, removal of non-structural obstacles, and relocation of classrooms with the aim of achieving a more appropriate distribution of the population and improving evacuation guidance. The results showed that the evacuation time under the existing condition was 298.8 seconds, whereas in the final scenario, which included the relocation of two classrooms and population guidance by educational staff, this time decreased to 148.9 seconds, indicating a 50.1% reduction in evacuation time. The findings show that combining physical modifications and managerial interventions can, while reducing evacuation time, also help reduce population density and bottlenecks. Accordingly, agent-based modeling can be used as a tool to support emergency planning, the design of evacuation scenarios, and the training and exercising of school principals and educational staff.

Keywords: Risk assessment, Crowd management, Emergency evacuation, Primary school, Agent-based modeling, Pathfinder.

نسخه اولیه پذیرفته شده پیش از انتشار

چکیده

مدارس ابتدایی به دلیل حضور کودکان کم‌سن و وابستگی آنان به کادر آموزشی در شرایط اضطراری، از جمله محیط‌های حساس در برابر حوادث محسوب می‌شوند. تخلیه ایمن این فضاها صرفاً تابع ویژگی‌های کالبدی ساختمان نبوده و عواملی نظیر نحوه توزیع جمعیت، مدیریت جریان خروج، هدایت افراد و سازماندهی کادر آموزشی نیز بر عملکرد فرآیند تخلیه تأثیرگذار است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و بهبود فرآیند تخلیه اضطراری در دبستان دخترانه حضرت مریم (س) مشهد، با تأکید بر تلفیق مداخلات کالبدی و مدیریتی، انجام شده است. روش پژوهش کمی و مبتنی بر مدل‌سازی عامل‌محور و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Pathfinder است. داده‌های مورد نیاز از طریق برداشت میدانی، مشاهده مستقیم و مصاحبه با مدیر و کادر آموزشی گردآوری و در قالب شش سناریوی تخلیه شبیه‌سازی شد. سناریوها شامل وضعیت موجود، افزایش سرعت حرکت، ایجاد تأخیر کنترل‌شده، حذف موانع غیرسازه‌ای و جابه‌جایی کلاس‌ها با هدف توزیع مناسب‌تر جمعیت و بهبود هدایت تخلیه بود. نتایج نشان داد زمان تخلیه در وضعیت موجود ۲۹۸.۸ ثانیه است، در حالی که در سناریوی نهایی، شامل جابه‌جایی دو کلاس و هدایت جمعیت توسط کادر آموزشی، این زمان به ۱۴۸.۹ ثانیه کاهش یافت که بیانگر کاهش ۵۰.۱ درصدی زمان تخلیه است. یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب اصلاحات کالبدی و مداخلات مدیریتی می‌تواند ضمن کاهش زمان تخلیه، به کاهش تراکم و گلوگاه‌های جمعیتی نیز کمک کند. بر این اساس، مدل‌سازی عامل‌محور می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پشتیبانی از برنامه‌ریزی اضطراری، طراحی سناریوهای تخلیه و آموزش و تمرین مدیران و کادر آموزشی مدارس استفاده شود.

کلمات کلیدی: ارزیابی ریسک، ازدحام جمعیت، تخلیه اضطراری، مدرسه، مدل سازی عامل محور، Pathfinder.

نسخه ویرایش نشده پیش از انتشار

۱-مقدمه

۱-۱-جایگاه تخلیه اضطراری در مدیریت بحران

مدیریت بحران فرآیندی نظام‌مند برای کاهش خطرپذیری، آمادگی در برابر حوادث، پاسخ مؤثر هنگام وقوع حادثه و بازگشت به شرایط عادی است. در این چارچوب، مرحله پاسخ اضطراری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا تصمیم‌ها و اقدامات انجام‌شده در دقایق اولیه پس از وقوع حادثه می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش تلفات انسانی و پیامدهای ثانویه داشته باشد. یکی از مهم‌ترین اقدامات در مرحله پاسخ، در شرایطی که تداوم حضور افراد در محل حادثه ایمنی آنان را تهدید می‌کند، تخلیه اضطراری و انتقال ایمن جمعیت از محدوده خطر به محل امن است.

تخلیه اضطراری را نمی‌توان صرفاً یک فرآیند حرکتی یا کالبدی در نظر گرفت. این فرآیند مجموعه‌ای از اقدامات مدیریتی و عملیاتی شامل تشخیص شرایط اضطراری، تصمیم‌گیری برای تخلیه، هشدار و اطلاع‌رسانی، تعیین مسئولیت‌ها، هدایت جمعیت، کنترل جریان حرکت، استفاده از مسیرهای خروج و تجمع در محل امن را دربر می‌گیرد. در این میان، وجود برنامه‌های آمادگی و پاسخ، آموزش کارکنان، اجرای تمرین و مانور، تعیین نقش‌ها و مسئولیت‌ها و ارزیابی عملکرد پس از تمرین از مؤلفه‌های مهم آمادگی سازمانی محسوب می‌شوند. در مدارس ابتدایی، اهمیت این موضوع دوچندان است؛ زیرا بخش عمده جمعیت را کودکان تشکیل می‌دهند که در شرایط اضطراری ممکن است به دلیل سن پایین، سرعت حرکت کمتر، وابستگی به مربیان و تمایل به حرکت گروهی، رفتار متفاوتی نسبت به جمعیت بزرگسال داشته باشند. بنابراین، ارزیابی تخلیه اضطراری در مدارس نیازمند رویکردی یکپارچه است که در آن ویژگی‌های کالبدی، رفتار جمعیت و مداخلات مدیریتی به‌صورت همزمان مورد توجه قرار گیرد. از این منظر، مدل‌سازی تخلیه می‌تواند علاوه بر ارزیابی ظرفیت فیزیکی مسیرهای خروج، به‌عنوان ابزاری برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیران در برنامه‌ریزی اضطراری مورد استفاده قرار گیرد. به بیان دیگر، خروجی مدل شبیه‌سازی صرفاً یک مقدار زمانی برای تخلیه نیست، بلکه می‌تواند نقاط گلوگاهی، الگوی توزیع جمعیت، مسیرهای بحرانی و پیامد احتمالی مداخلات مدیریتی را آشکار سازد و از این طریق در تدوین سناریوهای اضطراری، تعیین وظایف کادر مدرسه، برنامه‌ریزی آموزش و تمرین و طراحی رویه‌های هدایت جمعیت مورد استفاده قرار گیرد.

پژوهش‌های جدید در ایران نیز نشان داده‌اند که ضعف دانش و مهارت برنامه‌ریزان و عوامل اجرایی، مشارکت ناکافی بازیگران کلیدی، ضعف ارتباطات و عدم اجرای مناسب سیستم فرماندهی حادثه می‌تواند کیفیت تمرین‌های مدیریت بحران را کاهش دهد (حسن زاده و همکاران، ۲۰۲۵). از این منظر، تخلیه اضطراری باید به‌عنوان بخشی از نظام گسترده‌تر آمادگی و پاسخ اضطراری در نظر گرفته شود و نه صرفاً به‌عنوان مسئله‌ای مربوط به هندسه ساختمان. ارزیابی‌های جدید در حوزه مدیریت خطرپذیری نیز بر ضرورت تدوین علمی برنامه‌های آمادگی، پاسخ و بازیابی، ارتقای دانش و مهارت کارکنان و تقویت برنامه‌های مدیریتی تأکید کرده‌اند (عباس آبادی عرب و همکاران، ۲۰۲۵).

۱-۲- مدلسازی فرآیند تخلیه اضطراری

یکی از چالش‌های اساسی در شرایط بحرانی، ازدحام جمعیت و عدم کنترل صحیح جریان خروج افراد است. در محیط‌های آموزشی که عمده افراد را دانش‌آموزان کم‌سن و سال تشکیل می‌دهند، نبود برنامه‌ریزی مناسب می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی، ازجمله زمین خوردگی، خفگی، گیر افتادن در مسیرهای خروج و حتی تلفات جانی شود (هلبینگ و همکاران، ۲۰۰۰). به‌عنوان مثال، در مواردی که درب‌های خروجی به‌اندازه کافی گسترده نباشند یا مسیرهای فرار به‌درستی طراحی نشده باشند، امکان ایجاد گره‌های ترافیکی انسانی وجود دارد که باعث افزایش فشار بر افراد و کاهش سرعت تخلیه می‌شود. به عنوان نمونه حوادث واقعی رخ داده می توان به فاجعه آتش سوزی در مدرسه ابتدایی کومبکونام سال ۲۰۰۴ در در ایالت تامیل نادو در کشور هند نام برد که طی آن ۹۴ دانش آموز در جریان آتش سوزی و تخلیه اضطراری مدرسه جان باختند (کومار و همکاران، ۲۰۲۰). بررسی‌های میدانی و مطالعات تجربی نشان داده‌اند که در بسیاری از مدارس، کمبود مسیرهای خروجی، نبود تابلوهای راهنما، عدم آشنایی دانش‌آموزان با مسیرهای تخلیه و رفتارهای ناهماهنگ در هنگام بحران، منجر به افزایش خطرات ناشی از ازدحام می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۲۵ و بهمنی و همکاران، ۲۰۲۶). همچنین، اضطراب و استرس ناشی از شرایط بحرانی می‌تواند باعث تصمیم‌گیری‌های نادرست و افزایش ازدحام در خروجی‌ها شود. ازاین‌رو، برنامه‌ریزی دقیق، اجرای تمرین‌های

تخلیه اضطراری و آموزش مناسب به دانش‌آموزان و کادر آموزشی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش زمان تخلیه و کاهش آسیب‌ها داشته باشد (جین و همکاران، ۱۹۹۹).

شبیه‌سازی و ارزیابی وضعیت موجود با استفاده از روش مدل‌سازی عامل‌محور (ABM) به‌منظور شناسایی نقاط ضعف طراحی و بهبود مسیرهای خروج اضطراری در ساختمان ها و مراکز جمعیتی مانند فرودگاه، مترو، ورزشگاه ها و یا مکان های تجمع روباز ضروری است (چن و همکاران، ۲۰۲۳). ضرغامی و ریسمانیان، ۲۰۱۹ به ارزیابی مدل‌های تخلیه جمعیت ساختمان‌ها در شرایط اضطراری و مقایسه پدیده ازدحام در مکان‌هایی با میزان جمعیت بالا همچون فرودگاه‌ها، ایستگاه‌های قطار، استادیوم‌های ورزشی با تمرکز بر شش رویکرد اساسی مدلسازی شامل مدل‌های رگرسیون، دینامیک سیالات، قانون محور، نیروی اجتماع، سلول‌های خودکار و عامل محور پرداختند. وجود چنین مکان‌هایی دولت‌ها، مدیران، محققان، طراحان و دیگر متخصصان را به شدت به توسعه فناوری‌هایی برای بهبود امنیت و راحتی آن مکان‌ها و نیز در جهت مدیریت کارآمد در شرایط بحرانی مانند زلزله، آتش‌سوزی، بمب‌گذاری و عملیات تروریتی علاقه‌مند می‌کند. در این پژوهش ها در نهایت با استفاده از روش تحلیل محتوا، مزایا و معایب این رویکردها مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

ضرغامی و ریسمانیان، ۲۰۱۹ تحقیق با عنوان تأثیر متغیرهای معماری بر زمان تخلیه کلاس درس در شرایط اضطراری انجام دادند. در این مطالعه روند تخلیه‌ی یک کلاس درس با ابعاد داخلی ۷/۸ متر در ۱۲ متر و با ۴۲ دانش آموز در شرایط اضطراری به وسیله مدل‌سازی راه‌پله تخلیه، حداکثر ظرفیت دبی جریان برای خروجی‌های آتش، تعداد مورد نیاز خروجی‌های آتش و سایر راه‌حل‌های خاص معماری بررسی شد.

خاکی، ۲۰۲۱ تحقیقی با موضوع بررسی نقش ویژگی‌های کالبدی ساختمان‌های آموزشی در مدت زمان تخلیه اضطراری هنگام حوادث انجام داد. از نظر وی برای کاهش مدت زمان تخلیه در این گونه فضاها به شبیه‌سازی تخلیه اضطراری نیاز است. لذا در این مقاله و چارچوب ارائه شده در آن به شبیه‌سازی تخلیه انسانی در یک مدرسه (از نقشه‌های تیپ سازمان نوسازی مدارس، با ۲ طبقه و شبیه‌سازی ۳۴۵ نفر کاربر) به هنگام حادثه و با کمک نرم‌افزار Pathfinder استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش ارتفاع ساختمان (۳ طبقه کردن و رسیدن به ۵۱۶ نفر کاربر) مدت زمان با افزایش ۶۶ درصدی به ۲۱۷ ثانیه رسیده که ناایمن است و با افزایش ارتفاع به ۳ طبقه (۶۸۷ نفر کاربر) این مقدار با افزایش ۱۳۵ درصدی به ۳۰۷/۸ ثانیه می‌رسد که وضعیت خطرناکی را رقم می‌زند. نصب دستگاه پله فرار جداگانه هم این مدت زمان را تنها تا ۲۴۹/۵ ثانیه پایین آورده که این مقدار هم در حاشیه امن قرار ندارد. اما افزایش طول ساختمان (با ۵۱۵ نفر کاربر) با توجه به آنکه برخلاف افزایش ارتفاع ساختمان کمتر بر تراکم دانش‌آموزان به ویژه در راه‌پله اثر گذاشته، تأثیر به نسبت بیشتری (در مقایسه با گسترش عمودی ساختمان) در کاهش مدت زمان تخلیه اضطراری دارد (مدت زمان ۱۲۸ ثانیه جهت تخلیه کامل).

مطالعات جدید نشان می‌دهند که ویژگی‌های رشدی و رفتاری کودکان باید در مدل‌های تخلیه مدارس مورد توجه قرار گیرد بهمنی و همکاران،۲۰۲۶ با توسعه یک مدل عامل‌محور برای مدارس ابتدایی نشان دادند که مدل‌سازی تخلیه مدارس در صورت نادیده گرفتن ویژگی‌های رفتاری و آسیب‌پذیری‌های رشدی کودکان می‌تواند تصویر ناقصی از عملکرد واقعی تخلیه ارائه دهد. این مطالعه با استفاده از داده‌های واقعی تخلیه یک مدرسه ابتدایی، اثر رفتار کودکان، شرایط محیطی و محل استقرار راهنمایان بزرگسال را بر عملکرد تخلیه بررسی کرده است. همچنین لی و همکاران، ۲۰۲۵ نشان دادند که در محیط‌های آموزشی کودکان، افزایش نسبت کودکانی که به کمک بزرگسالان نیاز دارند موجب افزایش زمان تخلیه و کاهش جریان خروج می‌شود. این پژوهش همچنین نشان داد که نحوه استقرار و هدایت مربیان می‌تواند عملکرد تخلیه را بهبود دهد. همچنین پاولیک و همکاران، ۲۰۲۵ از مدل‌سازی عامل‌محور در یک فرآیند مشارکتی با دانش‌آموزان ۱۱ و ۱۲ ساله در ژاپن استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که افزودن داده‌های اجتماعی و رفتاری به مدل می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری درباره رفتار تخلیه ارائه کند و استفاده مشارکتی از ABM می‌تواند به افزایش آگاهی و آمادگی دانش‌آموزان در برابر بحران کمک کند.

وانومو و همکاران، ۲۰۲۰ تحقیقی با عنوان مدلسازی تخلیه اضطراری کلاس درس با مشخصات سنی مختلف انجام داد. این مطالعه با انجام چندین آزمایش در محیط کلاس درس با هدف بررسی ویژگی‌های جریان تخلیه در شرایط اضطراری بر روی پروفایل‌های سنی مختلف افراد مانند دبیرستان، دانشجویان تحصیلات تکمیلی و فوق لیسانس با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف که شامل عرض درب‌های مختلف است، انجام شد. عوامل متعددی از جمله تعداد افراد، عرض درب، میانگین سنی،

شاخص توده بدنی، نسبت زنان، تعداد دانش‌آموزان و ظرفیت کلاس در نظر گرفته شده و تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های تخلیه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و یک مدل تخلیه با استفاده از روش حداقل مربعات خطا ایجاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که متغیرهایی مانند عرض درب و تعداد دانش‌آموزان در نمایش زمان تخلیه کلاس بسیار مهم هستند. مشخص شد که رابطه بین زمان تخلیه کل (TET)[1] و عرض درب توسط یک تابع توانی نمایش داده می‌شود.

پژوهشی دیگری توسط لوروسو و همکاران، ۲۰۲۲ با عنوان تخلیه اضطراری آتش سوزی از ساختمان مدرسه با استفاده از یک پلت‌فرم واقعیت مجازی تکاملی انجام شده است. این مقاله نحوه ادغام یک پلت فرم واقعیت مجازی را با ابزارهای شبیه‌سازی عددی برای بازتولید یک سناریوی اضطراری آتش سوزی نشان می‌دهد. این در زمان واقعی بر اساس مدل اطلاعات ساختمان و یک نرم‌افزار دینامیک سیال محاسبه می‌شود. همچنین از نرم افزار خاصی برای شبیه سازی در زمان واقعی پویایی جمعیت در محیط مجازی در طول فرایند تخلیه اضطراری استفاده شد. برای نشان دادن کاربرد روش پیشنهادی، فرآیند تخلیه اضطراری آتش سوزی برای ساختمان مدرسه موجود ارائه شد. نتایج نشان داد که سیستم مبتنی بر واقعیت مجازی پیشنهادی می‌تواند برای بازتولید سناریوهای اضطراری آتش سوزی به کار گرفته شود. می‌توان از آن برای کمک به تصمیم‌گیرندگان برای تعیین برنامه‌های اضطراری و کمک به آتش‌نشانان به عنوان یک ابزار آموزشی برای شبیه سازی اقدامات تخلیه اضطراری استفاده کرد. فلاحی و همکاران، ۲۰۱۵ تحقیقی بر روی تأثیر زمان تخلیه در برنامه‌ریزی مدیریت ایمنی آتش سوزی در دو ساختمان بلندمرتبه مسکونی انجام دادند. این پژوهش به معرفی مفهوم «زمان تخلیه» در قالب دو بازه «زمان تأخیر» و «زمان حرکت» پرداخت. بدین منظور بازه زمانی تأخیر پیش از شروع حرکت به دو روش، و بازه زمانی حرکت به سه روش برای دو ساختمان بلندمرتبه مورد مطالعه محاسبه شده و مقدار بیشینه نتایج به دست آمده از هر یک، انتخاب و با هم جمع شده و به عنوان زمان کلی تخلیه در نظر گرفته شد. نتیجه‌گیری نشان داد که تسریع فرآیند تخلیه اضطراری صرفاً به مفهوم حرکت سریع‌تر افراد در خروج نیست بلکه با به حداقل رساندن زمان تأخیر پیش از تخلیه از طریق آموزشی و مانور و انجام واکنش سریع‌تر از طرف ساکنان و نیز کاربرد آسانسورها می‌توان ایمنی آتش را در تخلیه اضطراری افزایش داد.

با بررسی پیشینه پژوهش، مشخص گردید که اغلب مطالعات گذشته صرفاً بر جنبه‌های کالبدی (عرض درها و راه‌پله‌ها) تمرکز داشته‌اند و کمتر به تأثیر همزمان مداخلات مدیریتی (مانند نقش هدایت‌گری کادر آموزشی) و اصلاحات غیرسازه‌ای (مانند چیدمان کلاس‌ها و حذف موانع موقت) در یک مدل یکپارچه پرداخته‌اند. شکاف تحقیقاتی موجود نشان می‌دهد که در محیط‌های آموزشی ابتدایی، رفتار عامل‌ها به‌شدت تحت تأثیر سلسله مراتب آموزشی و آموزش‌های پیشین است، اما این متغیرهای رفتاری در شبیه‌سازی‌های رایج کمتر لحاظ شده‌اند. جدول زیر جدیدترین مطالعات انجام شده در زمینه تخلیه اضطراری جمعیت به همراه نقاط قوت و ضعف هر یک را نشان می دهد.

جدول ۱: خلاصه ای از جدیدترین تحقیقات علمی در زمینه مدلسازی تخلیه اضطراری جمعیت انسانی

پژوهشگران	روش مدل‌سازی	نرم‌افزار مورد استفاده	نتایج بدست آمده	نقاط قوت تحقیق	نقاط ضعف تحقیق
Bahmani et al., 2026	مدل‌سازی عامل‌محور با تلفیق رفتار (ABM) تصمیم‌گیری کودکان (Theory of Planned Behaviour) و مدل خطر سلامت	اختصاصی ABM چارچوب	ویژگی‌های رفتاری کودکان، شدت خطر محیطی و محل استقرار معلمان بر عملکرد تخلیه اثرگذار است. در شرایط بحرانی، افزایش راهنمایان بزرگسال می‌تواند عدم آمادگی کودکان را تا حدی جبران کند.	استفاده از داده واقعی تخلیه مدرسه، توجه همزمان به رفتار، محیط و سلامت، تمرکز مستقیم بر مدارس ابتدایی	نیازمند داده‌های رفتاری دقیق و محدودیت در تعمیم به همه مدارس و سناریوها

[1] Total Evacuation Time

پژوهشگران	روش مدل‌سازی	نرم‌افزار مورد استفاده	نتایج بدست آمده	نقاط قوت تحقیق	نقاط ضعف تحقیق
Li et al., 2025	مدل‌سازی عامل‌محور تخلیه کودکان نیازمند کمک بزرگسالان	Agent-Based Simulation	بررسی اثر نسبت کودکان نیازمند کمک، نسبت مربی به کودک و روش هدایت بر زمان تخلیه. نتایج نشان داد افزایش نیاز به کمک باعث کاهش راندمان تخلیه می‌شود.	توجه به گروه آسیب‌پذیر، بررسی نقش مربیان و راهبردهای هدایت	تمرکز اصلی بر مهدکودک و کودکان ۳ تا ۶ ساله، نه مدارس ابتدایی
Pawlik et al., 2025	مدل‌سازی عامل‌محور مشارکتی (Participatory ABM) برای تخلیه سیلاب	ABM	افزودن داده‌های اجتماعی مانند زمان شروع تخلیه و رفتار افراد باعث افزایش دقت مدل شد. همچنین ABM به‌عنوان ابزار آموزش و افزایش آگاهی دانش‌آموزان معرفی شد.	ترکیب شبیه‌سازی با آموزش و مشارکت کاربران، توجه به آمادگی قبل از بحران	مطالعه آزمایشی محدود در یک منطقه و نیاز به توسعه برای سایر مدارس
Hasanzadeh et al., 2025	مدل‌سازی ساختاری موانع اجرای مانورهای مدیریت بحران	ISM (Interpretive Structural Modeling)	نشان داد ضعف آموزش، تمرین، هماهنگی سازمانی، ارتباطات و فرماندهی حادثه از عوامل کاهش اثربخشی مانورها هستند.	تقویت بعد مدیریتی مقاله، توجه به آمادگی و پاسخ اضطراری	فاقد مدل‌سازی حرکت فیزیکی و زمان تخلیه
Zhang et al., 2023	مدل‌سازی عامل‌محور بینایی ماشین + (ABM)	AnyLogic + YOLOv5s	کاهش ۱۸ تا ۲۵ درصدی زمان تخلیه با بهینه‌سازی مسیرها	استفاده از داده‌های واقعی و هوش مصنوعی، دقت بالا	نیاز به پردازش سنگین و داده‌های گسترده
Barth et al., 2024	Agent-Based Modeling + الگوریتم بهینه‌سازی	AnyLogic	کاهش حدود ۳۰ درصدی زمان تخلیه و کاهش ازدحام	تحلیل مناسب طراحی خروجی‌ها و سناریوهای مختلف	وابستگی زیاد نتایج به فرضیات اولیه
Chen et al., 2023	شبیه‌سازی عامل‌محور برای سالمندان	AnyLogic	کاهش ۲۲ درصدی زمان تخلیه سالمندان	توجه به گروه‌های آسیب‌پذیر و واقع‌گرایی رفتاری	تمرکز محدود بر سالمندان و عدم تعمیم کامل
Cotfas et al., 2023	مدل عامل‌محور تخلیه کشتی	AnyLogic	کاهش ۱۵ تا ۲۰ درصدی زمان تخلیه با فناوری هوشمند	ترکیب سیستم‌های هوشمند و هدایت جمعیت	عدم بررسی شرایط واقعی دریا و امواج
Yang et al., 2023	مدل‌سازی عامل‌محور سیلاب شهری	AnyLogic	کاهش تلفات با مدیریت مسیرها و اطلاع‌رسانی	استفاده از داده‌های واقعی سیلاب شهری	پیچیدگی زیاد مدل و نیاز به داده دقیق

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

پژوهشگران	روش مدل‌سازی	نرم‌افزار مورد استفاده	نتایج بدست آمده	نقاط قوت تحقیق	نقاط ضعف تحقیق
Snohová & Kucera., 2024	مقایسه الگوریتم‌های SFPE و Steering	Pathfinder	رفتار Steering مدل واقعی‌تری ارائه داد	اعتبارسنجی دقیق الگوریتم‌های تخلیه	نبود داده‌های واقعی انسانی برای مقایسه
Li et al., 2024	شبیه‌سازی آتش‌سوزی فضاهای زیرزمینی	Pathfinder	کاهش ۲۸ درصدی زمان تخلیه با تهویه بهتر	تحلیل دود، تهویه و رفتار جمعیت	محدود بودن سناریوهای آزمایش
Qiao et al., 2023	Fault Tree Analysis + ABM	Pathfinder	کاهش احتمال تلفات در مترو	ترکیب تحلیل ریسک و شبیه‌سازی عامل‌محور	پیچیدگی تحلیل خرابی سیستم‌ها
Senanayake et al., 2024	مرور سیستماتیک مطالعات ABM	AnyLogic / Pathfinder / NetLogo	دقت بالاتر مدل‌های عامل‌محور نسبت به روش‌های سنتی	بررسی جامع مقالات و روندهای جدید	فاقد مدل‌سازی عملی و اجرای میدانی
Mls et al., 2023	مرور سیستماتیک تخلیه سونامی	AnyLogic و سایر نرم‌افزارها	تأثیر عوامل روانی و اطلاع‌رسانی بر تخلیه	تحلیل رفتار انسانی در بحران‌های طبیعی	عدم ارائه مدل اجرایی و شبیه‌سازی

۱-۳-شکاف پژوهش

با وجود توسعه مطالعات مربوط به شبیه‌سازی تخلیه، بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌ها همچنان بر ویژگی‌های کالبدی ساختمان، عرض خروجی‌ها، مسیرهای حرکت و زمان نهایی تخلیه تمرکز دارند. در مقابل، مطالعات جدید نشان داده‌اند که رفتار کودکان، نیاز به کمک بزرگسالان، نحوه هدایت جمعیت و آمادگی افراد نیز می‌تواند بر عملکرد تخلیه اثرگذار باشد(بهمنی و همکاران، ۲۰۲۵، لی و همکاران، ۲۰۲۵). از سوی دیگر، برخی مطالعات جدید تلاش کرده‌اند ارتباط میان مدل‌سازی تخلیه و آمادگی در برابر بحران را تقویت کنند (پاولیک و همکاران، ۲۰۲۵) نشان داده‌اند که مدل‌سازی عامل‌محور می‌تواند علاوه بر تحلیل حرکت جمعیت، در فرآیند آموزش و افزایش آگاهی دانش‌آموزان نیز مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، ترکیب همزمان ویژگی‌های کالبدی، رفتار جمعیت، مدیریت جریان تخلیه و نقش هدایت‌گر کادر آموزشی در مدارس ابتدایی همچنان نیازمند بررسی بیشتر است. این خلأ به‌ویژه در مطالعات موردی مدارس ایران قابل توجه است. از این رو، شکاف اصلی پژوهش حاضر، صرفاً فقدان یک مدل شبیه‌سازی تخلیه نیست؛ بلکه فقدان یک رویکرد یکپارچه برای بررسی اثر مداخلات کالبدی و مدیریتی بر فرآیند تخلیه اضطراری مدارس ابتدایی است.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های مرتبط با تخلیه اضطراری در مدارس بر ویژگی‌های کالبدی نظیر عرض درها، عرض راه‌پله‌ها، تعداد خروجی‌ها، هندسه ساختمان و تأثیر این متغیرها بر زمان تخلیه تمرکز داشته‌اند. در مقابل، اگرچه در برخی مطالعات رفتار انسانی و مدل‌سازی عامل‌محور مورد توجه قرار گرفته است، ترکیب همزمان ویژگی‌های کالبدی، رفتار جمعیت و مداخلات مدیریتی در محیط‌های آموزشی، به‌ویژه مدارس ابتدایی، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. این موضوع در مدارس اهمیت بیشتری دارد، زیرا کودکان در شرایط اضطراری لزوماً رفتار مستقل و مشابه بزرگسالان ندارند و نحوه هدایت آنان توسط معلمان و مدیران می‌تواند بر شکل‌گیری جریان جمعیت و ایجاد یا کاهش

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

گلوگاه‌های تخلیه تأثیرگذار باشد. بنابراین، شکاف اصلی پژوهش حاضر نه صرفاً فقدان یک مدل شبیه‌سازی تخلیه، بلکه فقدان یک چارچوب کاربردی برای بررسی همزمان اصلاحات کالبدی و غیرسازه‌ای، ویژگی‌های رفتاری جمعیت و مداخلات مدیریتی کادر آموزشی در فرآیند تخلیه اضطراری مدارس است.

۱-۴-نوآوری پژوهش

نوآوری تحقیق حاضر در ارائه یک مدل بهبود یافته ترکیبی است که علاوه بر اصلاحات فیزیکی، سناریوهای رفتاری مبتنی بر مصاحبه‌های میدانی و مداخلات مدیریتی کادر مدرسه را وارد مدل‌سازی عامل‌محور نموده است. هدف این پژوهش، ارزیابی فرآیند تخلیه اضطراری در مدرسه حضرت مریم (س) مشهد و شناسایی مناسب ترین الگوی تخلیه از طریق هم‌افزایی "اصلاح فیزیکی" و "مدیریت انسانی" است. یافته‌های این تحقیق نه‌تنها به کاهش گره‌های جمعیتی در این واحد آموزشی کمک می‌کند، بلکه الگویی کاربردی برای تدوین پروتکل‌های مدیریت بحران در مدارس با ساختار مشابه ارائه می‌دهد. بطور خلاصه بر اساس شکاف شناسایی‌شده، نوآوری پژوهش حاضر در چهار محور تعریف می‌شود:

نخست، تلفیق مداخلات کالبدی و مدیریتی در یک چارچوب شبیه‌سازی واحد. در این پژوهش علاوه بر اصلاحات فیزیکی و غیرسازه‌ای، نقش کادر آموزشی در هدایت دانش‌آموزان نیز در سناریوی نهایی وارد شده است. این رویکرد با مطالعات جدیدی که بر اهمیت نقش راهنمایان بزرگسال در تخلیه کودکان تأکید کرده‌اند، همخوانی دارد. برخلاف رویکردهایی که عمدتاً بر هندسه ساختمان و ظرفیت مسیرهای خروج تمرکز دارند، در این پژوهش علاوه بر اصلاحات فیزیکی و غیرسازه‌ای، نقش مداخلات مدیریتی کادر آموزشی در هدایت فرآیند تخلیه نیز در سناریوهای شبیه‌سازی وارد شده است.

دوم، تفکیک گروه‌های جمعیتی شامل دانش‌آموزان و کادر آموزشی و تعریف ویژگی‌های متفاوت حرکتی و رفتاری برای آنها. در این تحقیق دانش‌آموزان و کادر آموزشی به‌عنوان گروه‌های جمعیتی متفاوت تعریف شده‌اند و پارامترهایی نظیر سرعت حرکت، ابعاد فیزیکی، زمان واکنش و نقش هدایت‌گری کادر آموزشی در مدل لحاظ شده است .

سوم، استفاده از مدل شبیه‌سازی به‌عنوان ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری مدیریتی و نه صرفاً ابزاری برای محاسبه زمان تخلیه. و چهارم، بررسی یک سناریوی ترکیبی شامل جابه‌جایی کلاس‌ها و هدایت فعال کادر آموزشی و مقایسه آن با سناریوهای صرفاً کالبدی یا رفتاری. هدف پژوهش صرفاً تعیین زمان تخلیه نیست، بلکه مقایسه سناریوهای مختلف برای شناسایی اقداماتی است که مدیران مدرسه می‌توانند در برنامه‌ریزی اضطراری، مدیریت جریان جمعیت و سازماندهی تخلیه به کار گیرند.

۲-مواد و روشها

روش تحقیق مورد استفاده در این پژوهش با رویکردی کمی و مبتنی بر شبیه‌سازی نرم افزاری و استخراج نتایج عددی است. به‌منظور پاسخگویی به پیچیدگی‌های محیطی و رفتاری در مدارس، فرآیند تحقیق در سه گام اصلی طراحی گردید:

گام اول (برداشت میدانی): در این مرحله، داده‌های پایه از طریق مطالعه موردی و پیمایش میدانی گردآوری شد. این بخش شامل برداشت دستی و دقیق پلان ساختمان (به دلیل تغییرات عدم وجود نقشه‌های مصوب)، اندازه‌گیری ابعاد درها، عرض راه‌پله‌ها و شناسایی موانع فیزیکی و غیرسازه‌ای بود. همچنین برای درک الگوهای رفتاری دانش‌آموزان و شناسایی چالش‌های عملیاتی در هنگام بحران، مشاهده ساختارمند و مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با مدیر و کادر آموزشی مدرسه انجام شد. بر اساس یافته‌های این بخش، نقاط بحرانی شناسایی و سناریوهای مناسب تدوین گردید.

گام دوم (شبیه‌سازی): داده‌های استخراج شده از مرحله قبل، به عنوان متغیرهای ورودی وارد نرم‌افزار پایروسیم و سپس پسفایندر گردید. در این مرحله، شبیه‌سازی بر پایه مدل‌سازی عامل‌محور انجام شد که در آن هر دانش‌آموز به عنوان یک "عامل" با ویژگی‌های فیزیکی و رفتاری مشخص تعریف گردید. شش سناریوی مختلف جهت ارزیابی زمان تخلیه و نرخ جریان خروجی اجرا و نتایج به‌صورت کمی استخراج شد.

۲-۱- معرفی ساختمان مورد مطالعه

ساختمان مورد مطالعه در تحقیق حاضر مدرسه دبستان دخترانه حضرت مریم واقع در بلوار توس شهر مشهد است که از دو طبقه تشکیل شده: طبقه همکف شامل ۵ کلاس و طبقه مثبت یک شامل ۱۰ کلاس. ظرفیت کلاس‌ها به‌طور عمده ۴۵ نفر است، به استثنای سه کلاس که ظرفیت ۲۵ نفر دارند. کل جمعیت حاضر در مدرسه، که شامل دانش‌آموزان، مدیر، معاونین، و معلمان می‌شود، در مجموع ۵۹۰ نفر است. شکل ۱ چیدمان میزها با حضور دانش آموزان را نشان می دهد.



شکل ۱: ورودی اصلی مدرسه ابتدایی حضرت مریم(س) و چیدمان میزها با حضور دانش آموزان

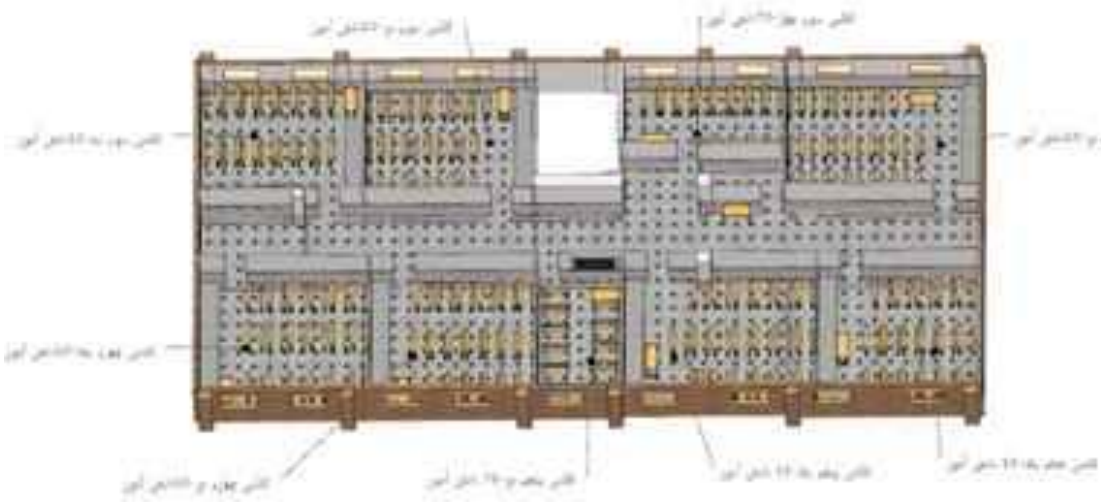
با توجه به فضای محدود کلاس‌ها، تلاش شده است که از فضاها به‌طور بهینه و فشرده استفاده شود. در بیشتر کلاس‌ها، میزها به‌صورت دو نفره چیده شده‌اند؛ اما به دلیل کمبود فضا، در برخی از کلاس‌ها برای استفاده بهینه از فضای موجود، میزها به‌طور سه نفره قرار گرفته‌اند. این چیدمان به‌گونه‌ای است که فضای کافی برای حرکت و جابجایی در داخل کلاس‌ها ایجاد شود، اما همچنان محدودیت فضا مشاهده می‌شود.

۲-۲- برپایی مدل شبیه‌سازی سه‌بعدی

مدل‌سازی سه‌بعدی مدرسه ابتدایی حضرت مریم با استفاده از نرم‌افزار PyroSim انجام شده است و تولید هندسه مدل به منظور تحلیل تخلیه اضطراری در نرم‌افزار Pathfinder صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است به دلیل عدم موجود بودن هر گونه پلان مهندسی، کلیه ابعاد و ترسیم اولیه آن بصورت بازدید میدانی و دستی صورت پذیرفت. شکلهای ۲ الی ۴ هندسه مدل در نرم افزار PyroSim و پلان و موقعیت کلاسها، راهروها و درب های خروجی در طبقات را نشام می دهد.



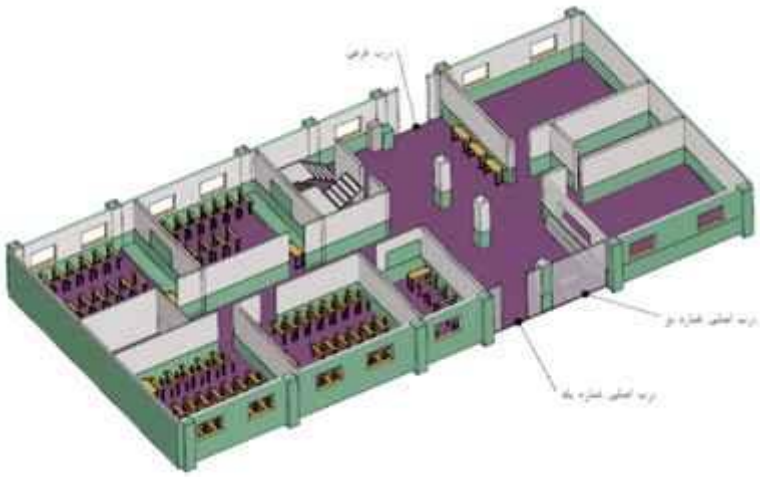
شکل ۲: مدل سه بعدی ساختمان مدرسه حضرت مریم(س)



شکل ۳: موقعیت درب های خروج اصلی و کلاس ها در طبقه همکف



شکل ۴: موقعیت درب های خروج اصلی و کلاس ها در طبقه مثبت یک



شکل ۵: نمای سه بعدی از اجزای طبقه مثبت یک

همچنین جدول ۲ ابعاد درب های خروجی ساختمان را نشان می دهد. کلیه درب کلاس ها بصورت فلزی بوده و با لولای تمام بازشو با عرض ۹۰ سانتی‌متر می باشد. درب های خروجی اصلی و فرعی از قاب فلزی با حفاظ که بخش عمده آن را شیشه

تشـکیل داده اسـت. درب‌های خروج اصـلی یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر سـرعت و کارایی فرآیند تخلیه اضـطراری در سـاختمان‌های عمومی، به‌ویژه مدارس، محسـوب می‌شـوند. این درب‌ها به‌عنوان گلوگاه‌های اصـلی مسـیرهای فرار عمل کرده و طراحی مناسـب آن‌ها می‌تواند به کاهش تراکم جمعیت، جلوگیری از ایجاد ترافیک انسـانی و افزایش نرخ جریان خروجی کمک کند.

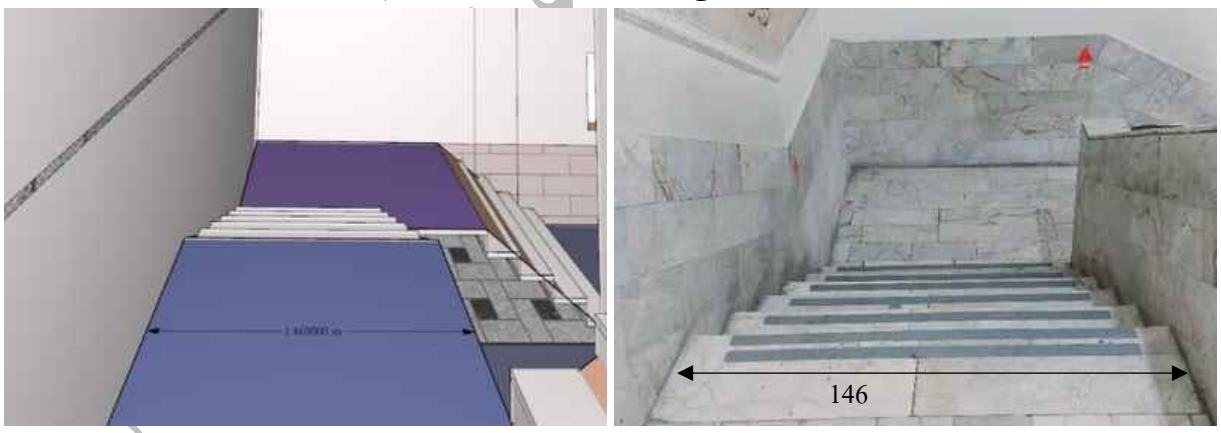
جدول ۲: مشخصات درب های خروجی اصلی ساختمان مدرسه

شماره درب خروجی	عرض مفید درب خروجی	نوع درب خروجی
درب اصلی شماره یک	۱۵۰ سانتی متر	فلزی و شیشه ای
درب اصلی شماره دو	۱۵۰ سانتی متر	فلزی و شیشه ای
درب فرعی	۱۸۰ سانتی متر	فلزی و شیشه ای
درب کلاس ها	۹۰ سانتی متر	فلزی

شکلهای ۶ و۷ فضاهای داخلی یکی از کلاس ها و راه پله ها در شرایط واقعی و مدل سازی را نشان می دهد.



شکل ۶: فضای داخلی کلاس در واقعیت و در مدل نرم افزاری



شکل ۷: عرض پله‌ها و پاگردهای ارتباطی بین طبقات همکف و مثبت یک در واقعیت و مدل نرم افزاری

نرم‌افزار Pathfinder فاقد مدل سه‌بعدی مدل شخص انسانی اختصاصی برای دانش‌آموزان دختر با پوشش اسلامی مانتو و مقنعه است. از آنجا که شبیه‌سازی واقع‌گرایانه تخلیه اضطراری نیازمند تطابق هرچه بیشتر مدل‌های انسانی با ویژگی‌های جمعیتی و پوششی افراد حاضر در محیط واقعی است، برای این منظور یک مدل سه‌بعدی اختصاصی طراحی شد. در این فرآیند، ابتدا یک مدل پایه همراه با ساختار اسکلتی مناسب در نرم‌افزار Autodesk HumanIK ایجاد گردید. سپس، اصلاحات لازم شامل بهینه‌سازی مدل، اعمال تغییرات هندسی و افزودن جزئیات پوششی در نرم‌افزار Blender انجام شد. همچنین، تکسچرهای سفارشی متناسب با پوشش بومی دانش‌آموزان مقطع ابتدایی به مدل اضافه شد تا تطابق بیشتری با

شرایط واقعی داشته باشد. در نهایت، مدل اصلاح‌شده به‌عنوان یک کاراکتر سه‌بعدی واقع‌گرایانه با پوشش بومی آماده گردید و برای استفاده در فرآیند شبیه‌سازی تخلیه اضطراری به نرم‌افزار Pathfinder منتقل شد (شکل ۸).



شکل ۸: طراحی و ایجاد مدل سه بعدی دانش آموز با پوشش اسلامی

۲-۳-ویژگی‌های جمعیتی در شبیه‌سازی

در محیط مدرسه، افراد حاضر شامل گروه‌های مختلفی با ویژگی‌های فیزیکی و رفتاری متفاوت هستند که این تفاوت‌ها بر فرآیند تخلیه اضطراری تأثیر مستقیم دارد. ازجمله مهم‌ترین این تفاوت‌ها می‌توان به سن، سرعت حرکت، ابعاد فیزیکی و نحوه تصمیم‌گیری در شرایط اضطراری اشاره کرد. به‌منظور انجام شبیه‌سازی دقیق و واقع‌گرایانه، لازم است که اطلاعات جمعیتی مورد استفاده در مدل‌سازی تا حد امکان با شرایط واقعی مدرسه مطابقت داشته باشد. بر همین اساس، اطلاعات مربوط به مشخصات افراد از طریق بررسی‌های میدانی و مشاهده مستقیم در محیط مدرسه گردآوری شده و داده‌های حاصل در بخش Profile نرم‌افزار Pathfinder تنظیم گردید. بدین منظور جمعیت مدرسه به دو گروه اصلی دانش‌آموزان (۵۷۰ نفر) و کادر آموزشی و اجرایی (۲۰ نفر) تقسیم گردید. کودکان دختر در مقطع ابتدایی بدلیل ویژگی‌های خاصی همچون جثه کوچک‌تر، سرعت حرکت کمتر نسبت به بزرگسالان، میزان وابستگی به تصمیمات مربیان در شرایط اضطراری، و تمایل به حرکت گروهی دارند. این ویژگی‌ها می‌توانند موجب ایجاد گلوگاه‌های جمعیتی و افزایش زمان تخلیه شوند. همچنین گروه کادر آموزشی شامل معلمان، مدیر و معاونین که نقش هدایت‌کننده در فرآیند تخلیه را ایفا می‌کنند، به دلیل آگاهی بالاتر و تولنایی در هدایت مسیر تخلیه، تأثیر بسزایی در کاهش ازدحام و بهبود جریان خروج دارند. با توجه به اهمیت این متغیرها در شبیه‌سازی، پارامترهای مرتبط با هر گروه از جمله سرعت حرکت، ابعاد فیزیکی، زمان واکنش به شرایط اضطراری و نحوه تعامل با سایر افراد به‌صورت دقیق در نرم‌افزار اعمال شده است تا تحلیل خروج اضطراری با بالاترین دقت انجام شود (جدول ۳). محدوده سرعت خروج اضطراری در جدول ۳ صرفاً در سناریوی دوم، با عنوان افزایش سرعت و شبیه‌سازی حرکت سریع در شرایط اضطراری، به‌منظور بررسی اثر افزایش سرعت مطلوب حرکت افراد بر زمان تخلیه و الگوی تراکم جمعیت مورد استفاده قرار گرفته است (لاروس دوتیر و ددریچس، ۲۰۱۱).

جدول۳ : تنظیمات مربوط به پروفایل جمعیت

مشخصات	محدوده سرعت نرمال (متر برثانیه)	محدوده سرعت اضطراری (متر بر ثانیه)	محدوده قد (سانتی متر)	تعداد (نفر)	تناسب از جمعیت کل (درصد)
دانش آموزان	۱.۳-۱.۱	۲.۲-۲	۱.۴۵-۱.۲۵	۵۷۰	۹۶.۶۱
کادر آموزشی و اجرایی	۱.۳-۱.۲	۲.۲-۲	۱۸۰-۱۶۵	۲۰	۳.۳۹

۲-۴- الگوریتم و مسیر یابی جمعیت

در این پژوهش برای شبیه‌سازی حرکت دانش‌آموزان از حالت Steering (رفتارهای هدایت کننده) در نرم‌افزار Pathfinder استفاده شد. در این حالت، هر دانش‌آموز به‌عنوان یک عامل مستقل، مسیر خود را در شبکه حرکتی به سمت خروجی تعیین‌شده دنبال می‌کند و در حین حرکت، با استفاده از سازوکارهای رفتار هدایت کننده و اجتناب از برخورد با سایر افراد، حرکت خود را متناسب با حضور سایر افراد و موانع موجود در محیط تنظیم می‌نماید. بنابراین، مسیر حرکت عامل صرفاً یک مسیر هندسی ثابت نیست و امکان انحراف از مسیر اولیه در پاسخ به موانع و تراکم جمعیت وجود دارد. مدل رفتارهای هدایت‌کننده مجموعه‌ای از قواعد حرکتی در مدل‌سازی عامل‌محور هستند که برای شبیه‌سازی نحوه تصمیم‌گیری و تنظیم لحظه‌ای حرکت افراد در محیط به کار می‌روند. در این رویکرد، هر عامل علاوه بر حرکت به سمت هدف یا خروجی تعیین‌شده، موقعیت سایر افراد و موانع موجود را نیز در نظر گرفته و بر اساس آن سرعت و جهت حرکت خود را به‌صورت پویا تغییر می‌دهد. از مهم‌ترین رفتارهای هدایت‌کننده این مدل می‌توان به حرکت به سمت هدف، اجتناب از موانع، اجتناب از برخورد با سایر افراد و حفظ فاصله مناسب از دیگران اشاره کرد. در نتیجه، برخلاف مدل‌های صرفاً مبتنی بر کوتاه‌ترین مسیر، مسیر حرکت عامل می‌تواند در طول شبیه‌سازی تغییر کند و پدیده‌هایی مانند تغییر مسیر، برخورد، تراکم و تشکیل صف را واقع‌بینانه‌تر بازنمایی کند. این ویژگی باعث می‌شود مدل مذکور به‌ویژه برای شبیه‌سازی تعاملات خردمقیاس افراد در محیط‌های متراکم و تخلیه اضطراری کاربرد داشته باشد. در مقابل، حالت SFPE در Pathfinder یک رویکرد جریان‌محور مبتنی بر روابط چگالی–سرعت و ظرفیت خروجی‌هاست. این مدل در مقایسه با مدل‌های عامل‌محور رفتاری مانند Steering و Social Force قابلیت محدودتری در شبیه‌سازی تعاملات پیچیده افراد، تصمیم‌گیری لحظه‌ای و واکنش‌های رفتاری ناشی از اضطراب دارد، با توجه به هدف پژوهش حاضر که بررسی رفتار فردی دانش‌آموزان، تعامل میان افراد و شکل‌گیری تراکم در مسیرهای خروج است، حالت *رفتارهای هدایت کننده* برای شبیه‌سازی انتخاب شد (شرکت مهندسی تاندرهد، ۲۰۲۴).

۲-۵-تنظیمات مربوط به رفتار افراد

در شرایط عادی، افراد حاضر در یک محیط تجمعی ممکن است رفتارهایی به‌طور طبیعی بر اساس آموزش‌ها و تجربیات گذشته خود از خود نشان دهند. در مکان‌هایی همچون مدارس، معلمان به‌عنوان افرادی مسئول در تخلیه اضطراری نقش مهمی ایفا می‌کنند. معمولاً در شرایط عادی، ممکن است معلمان حتی زودتر از دانش‌آموزان مدرسه را ترک کنند. در شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری معمولاً رفتارهای افراد بر اساس تنظیمات پیش‌فرض این نرم‌افزارها تحلیل و ارزیابی می‌شود، که می‌تواند شامل رفتارهای عادی در زمان‌های غیر اضطراری باشد. این تنظیمات پیش‌فرض ممکن است شامل سرعت حرکت، تصمیمات مربوط به مسیر و رفتارهای عمومی افراد باشد (ژائو و همکاران، ۲۰۱۸).

در هنگام وقوع بحران‌ها و شرایط اضطراری، رفتار افراد تغییرات قابل‌توجهی از خود نشان می‌دهد که از جمله این تغییرات می‌توان به افزایش سرعت حرکت و تغییر مسیر به‌صورت سریع‌تر اشاره کرد (دیمیتریو و همکاران، ۲۰۲۱). در سناریوی تخلیه نرمال و عادی، تنظیمات رفتاری و سرعت حرکت افراد بر اساس مدل‌های پیش‌فرض نرم‌افزار و براساس جدول ۲ شبیه‌سازی انجام شده است. در این سناریو، معلمان حتی ممکن است زودتر از دانش‌آموزان از کلاس‌ها خارج شوند و هیچ‌گونه نقش حمایتی برای کادر آموزشی در نظر گرفته نشده است. در شبیه سازی شرایط اضطراری نیز بدون در نظر گرفتن نقش حمایتی، معلمان به‌طور خودکار با سرعت مطابق جدول ۳ به سمت خروجی‌ها حرکت می‌کنند. اما در سناریوهای بهینه‌شده، کادر آموزشی به‌عنوان افراد حمایت‌کننده و هدایت‌کننده در نظر گرفته می‌شوند. در این سناریوها، معلمان تا زمانی که آخرین دانش‌آموز از کلاس خارج نشده، کلاس و ساختمان مدرسه را ترک نمی‌کنند. مدیر و معاونین نیز نقش حمایتی ایفا کرده و تا اطمینان از تخلیه کامل جمعیت از مدرسه، از آنجا خارج نمی‌شوند. این تنظیمات با هدف به حداقل رساندن تلفات و آسیب‌های احتمالی و همچنین هدایت بهتر جمعیت به‌ویژه در شرایط اضطراری طراحی شده است. سرعت افراد به جز در حالت نرمال در دیگر سناریوها بر اساس شرایط اضطراری و مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده است.

۲-۶-سناریوهای تخلیه جمعیت

در فرآیند شبیه‌سازی تخلیه جمعیت، تعریف سناریوهای مختلف نقش اساسی در ارزیابی ایمنی و کارایی مسیرهای خروجی دارد. انتخاب سناریوهای مناسب، امکان تحلیل رفتار افراد در شرایط مختلف را فراهم می‌کند و به بهبود فرآیند تخلیه کمک می‌نماید (کولیگوفسکی و همکاران، ۲۰۲۰). مدل‌سازی تخلیه اضطراری بر اساس این سناریوها به تصمیم‌گیران و مدیران اماکن عمومی، مانند مدارس، اجازه می‌دهد تا نقاط ضعف و قوت مسیرهای خروجی را شناسایی کرده و اقدامات پیشگیرانه برای کاهش ریسک انجام دهند (رونچی و نیلسن، ۲۰۱۸). یکی از جنبه‌های کلیدی در تعریف سناریوهای تخلیه، بررسی تأثیر عوامل مختلف مانند چگالی جمعیت، الگوی رفتاری افراد، وجود نقش‌های حمایتی (مانند معلمان در مدارس)، و ساختار فیزیکی ساختمان است. به‌عنوان‌مثال، مطالعات نشان داده‌اند که حضور افراد راهنما و حمایت‌گر می‌تواند زمان تخلیه را کاهش داده و از بروز ازدحام در مسیرهای خروجی جلوگیری کند (جین و همکاران،۲۰۱۷). علاوه بر این، مقایسه بین تخلیه‌های عادی، اضطراری، و بهینه می‌تواند نشان دهد که چگونه تغییر در رفتار جمعیت یا اصلاح مسیرهای خروجی منجر به بهبود فرآیند تخلیه می‌شود (لورگلیو و همکاران، ۲۰۱۹).

در این پژوهش، شش سناریوی مختلف بشرح زیر برای تخلیه مدرسه مورد مطالعه تعریف شده است که هر یک شرایط متفاوتی از نظر نقش کادر آموزشی، سرعت تخلیه، ابعاد درب‌های خروجی اصلی و فرعی، و چگالی جمعیت در راهروها و پله‌ها، اجزای غیرسازه ای و تأخیر در خروج کلاس ها را شامل می‌شود. این سناریوها در محیط نرم‌افزار شبیه‌سازی شده و نتایج آن‌ها برای ارزیابی ایمنی تخلیه اضطراری مورد تجزیه‌وتحلیل قرار خواهند گرفت.

-سناریوی اول «وضعیت پایه – تخلیه عادی»:

مطالعه‌های پایه‌ای در زمینه الگوهای رفتاری افراد در شرایط عادی که نشان می‌دهند افراد معمولاً به آرامی و بدون عجله مسیر خروج را طی می‌کنند (جین و همکاران، ۲۰۱۹). در این سناریو، هیچ تغییری در شرایط موجود مدرسه ایجاد نمی‌شود و فرآیند تخلیه بر اساس الگوی فعلی، با سرعت نرمال حرکت افراد و بدون مداخله در ساختارهای فضایی یا رفتاری انجام می‌شود. این سناریو به عنوان مبنای مقایسه‌ای برای سایر سناریوها در نظر گرفته شده است.

-سناریوی دوم «افزایش سرعت – شبیه‌سازی شرایط اضطراری»:

تحقیقات نشان داده‌اند که در شرایط اضطراری، افزایش سرعت حرکت افراد می‌تواند تأثیر مثبت و منفی داشته باشد. از یک‌سو می‌تواند زمان تخلیه را کاهش دهد، اما از سوی دیگر ممکن است باعث ایجاد تراکم و کاهش نرخ خروج در برخی نقاط شود (شی و همکاران، ۲۰۲۰). در این سناریو، سرعت حرکت کلیه افراد افزایش می‌یابد تا شرایط اضطراری و واکنش سریع‌تر متصرفین شبیه‌سازی شود. این سناریو بررسی می‌کند که افزایش سرعت حرکت چگونه بر روند خروج و میزان ازدحام در مسیرهای تخلیه ساختمان مورد مطالعه تأثیر می‌گذارد.

-سناریوی سوم «کاهش ازدحام با تأخیر در خروج کلاس‌ها»:

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که راهکارهای مدیریت جمعیت مانند تأخیر در خروج گروه‌های مختلف می‌تواند از تراکم بیش‌ازحد در مسیرهای خروج جلوگیری کند (حقانی و سروی، ۲۰۱۸). در این سناریو، با ایجاد تأخیرهای برنامه‌ریزی‌شده در تخلیه کلاس‌ها، تلاش می‌شود که از ایجاد گره‌های جمعیتی و ازدحام در خروجی‌ها جلوگیری شود. این سناریو بررسی می‌کند که آیا تنظیم زمان خروج کلاس‌ها می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیند تخلیه کمک کند یا خیر.

در این سناریو هدف، تعیین یک مقدار بهینه ریاضی برای تأخیر خروج نبوده، بلکه بررسی حساسیت عملکرد تخلیه نسبت به تغییرات زمان پیش از حرکت و عدم قطعیت رفتاری دانش‌آموزان بوده است. با توجه به ماهیت تصادفی رفتار افراد در شرایط اضطراری، هر حالت تأخیر بیش از ۳۰ بار تکرار شد و مقدار میانگین زمان تخلیه برای هر حالت محاسبه گردید. انتخاب سناریوی نهایی بر اساس کمترین زمان تخلیه میانگین و همچنین حفظ شرایط منطقی از نظر رفتار انسانی انجام شد. در این سناریو، مقادیر مختلف زمان تأخیر پیش از حرکت در مدل اعمال و برای هر مقدار، شبیه‌سازی‌های تکراری انجام شد. سپس زمان تخلیه حاصل از تکرارها مورد مقایسه قرار گرفت. معیار انتخاب سناریوی نهایی، کمترین زمان تخلیه میانگین در میان حالت‌های مورد بررسی، مشروط به منطقی بودن مقدار زمان پیش از حرکت از نظر رفتاری بود.

-سناریوی چهارم «اصلاح موانع غیرسازه‌ای در خروجی‌ها»:

تحقیقات روی نقش موانع غیرسازه‌ای در کاهش کارایی مسیرهای خروجی نشان داده‌اند که حتی اشیای کوچک نیز می‌توانند نرخ خروج را کاهش دهند (کولیگوفسکی و همکاران، ۲۰۱۸). برخی اجزای غیرسازه‌ای در نواحی خروجی کلاس‌ها باعث کاهش نرخ خروج افراد از ساختمان می‌شوند. در این سناریو، این موانع اصلاح شده تا تأثیر آن‌ها بر زمان تخلیه و چگالی جمعیت در خروجی‌ها بررسی شود.

-سناریوی پنجم «جابجایی یک کلاس طبقه مثبت یک با اتاق مدیر در همکف»:

مطالعاتی که بهبود چیدمان فضاهای آموزشی را بررسی کرده‌اند، نشان داده‌اند که تغییر موقعیت کلاس‌ها می‌تواند باعث کاهش زمان تخلیه و بهبود جریان خروجی شود (رونچی و همکاران، ۲۰۱۶). در این سناریو، موقعیت یکی از کلاس‌های طبقه مثبت یک با اتاق مدیر در طبقه همکف جابه‌جا می‌شود تا تأثیر تغییر در توزیع فضایی جمعیت بر مدت‌زمان تخلیه و توزیع جریان حرکت مورد ارزیابی قرار گیرد.

- سناریوی ششم «جابجایی دو کلاس طبقه مثبت یک با اتاق‌های مدیر و معاونین در همکف»:

در این حالت، دو کلاس از طبقه مثبت یک به همکف منتقل شده و به‌جای آن‌ها اتاق‌های مدیر و معاونین به طبقه بالا انتقال می‌یابند .هدف این سناریو بررسی تأثیر تغییرات گسترده‌تر در سازماندهی فضایی مدرسه بر کاهش ازدحام و بهبود تخلیه است.

۲-۷- اعتبارسنجی و ارزیابی قابلیت اعتماد مدل

مدل‌های شبیه‌سازی تخلیه اضطراری، به دلیل ماهیت پیچیده رفتار انسانی و وابستگی نتایج به پارامترهای رفتاری، هندسی و مدیریتی، نیازمند ارزیابی قابلیت اعتماد هستند. در این پژوهش، اعتبار مدل در سه سطح شامل اعتبار داده‌های ورودی، بررسی رفتار منطقی مدل و مقایسه نتایج با مطالعات مشابه انجام شده است.

در مرحله نخست، داده‌های ورودی مدل شامل مشخصات هندسی ساختمان، تعداد و توزیع جمعیت، مسیرهای حرکت، ظرفیت خروجی‌ها، سرعت حرکت افراد و زمان پیش‌ازحرکت، از طریق برداشت مستقیم از ساختمان، مشاهده میدانی و مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با مدیر و کارکنان مدرسه جمع‌آوری شد. بدین ترتیب تلاش شد پارامترهای مدل تا حد امکان مطابق شرایط واقعی محیط مورد مطالعه تعریف شوند. در مرحله دوم، رفتار مدل از طریق بررسی واکنش آن نسبت به تغییر پارامترهای اصلی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل نسبت به تغییرات مورد انتظار در شرایط تخلیه، رفتار منطقی از خود نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که افزایش تراکم جمعیت، کاهش ظرفیت مسیرهای خروج و افزایش زمان پیش‌ازحرکت باعث افزایش زمان تخلیه شده، در مقابل اصلاح سازماندهی مسیرها، کاهش موانع و هدایت مناسب‌تر جمعیت موجب کاهش زمان تخلیه شده است. این رفتار با اصول پذیرفته‌شده در مدل‌سازی تخلیه اضطراری و یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی دارد.

۲-۷-۱- مقایسه کمی نتایج مدل با مطالعات مشابه

به منظور ارزیابی بیشتر قابلیت اعتماد مدل، نتایج حاصل از پژوهش حاضر با نتایج مطالعات مشابه در زمینه تخلیه ساختمان‌های آموزشی و محیط‌های مشابه مقایسه شد.

در پژوهش حاضر، زمان تخلیه وضعیت موجود مدرسه برابر ۲۹۸.۸ ثانیه (حدود ۵ دقیقه) به دست آمد. پس از اعمال سناریوی پیشنهادی شامل اصلاح سازماندهی فضایی، بهبود مسیرهای خروج و نقش فعال‌تر کادر آموزشی، زمان تخلیه به ۱۴۸.۹ ثانیه (حدود ۲.۵ دقیقه) کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش حدود ۵۰ درصدی زمان تخلیه است.

نتایج این مطالعه از نظر مرتبه زمانی با مطالعات مشابه همخوانی دارد. برای مثال، بهمنی و همکاران، ۲۰۲۶ با استفاده از مدل‌سازی عامل‌محور برای تخلیه مدارس ابتدایی نشان دادند که وارد کردن ویژگی‌های رفتاری کودکان و نقش راهنمایان بزرگسال می‌تواند عملکرد تخلیه را بهبود دهد. در این مطالعه نیز مشابه پژوهش حاضر، نقش عوامل انسانی و سازماندهی جمعیت در کنار ویژگی‌های کالبدی مورد تأکید قرار گرفته است.

همچنین لی و همکاران، ۲۰۲۵ نشان دادند که افزایش نیاز کودکان به کمک بزرگسالان باعث افزایش زمان تخلیه شده و نحوه استقرار مربیان می‌تواند بر عملکرد خروج اثرگذار باشد. این یافته با نتایج پژوهش حاضر که نشان می‌دهد حضور و سازماندهی کادر آموزشی می‌تواند زمان تخلیه را کاهش دهد، همخوانی دارد.
مطالعه اسنوهوا و کونچرا، ۲۰۲۴ با مقایسه الگوریتم‌های حرکتی در نرم‌افزار Pathfinder نشان داد که الگوریتم‌های مبتنی بر رفتار انسانی، نسبت به روش‌های ساده حرکتی، توانایی بیشتری در بازنمایی رفتار واقعی افراد دارند. این موضوع از رویکرد انتخاب‌شده در پژوهش حاضر برای استفاده از Pathfinder و مدل‌سازی رفتار افراد حمایت می‌کند.
به طور کلی، اگرچه به دلیل نبود داده حاصل از یک مانور واقعی، امکان مقایسه مستقیم مقدار زمان تخلیه مدل با یک مقدار تجربی وجود نداشت، اما مقایسه روند تغییرات، جهت اثر پارامترها و مرتبه زمانی نتایج با مطالعات پیشین، سازگاری قابل قبولی را نشان می‌دهد.

۲-۷-۲-اعتبارسنجی داده‌های ورودی

داده‌های هندسی مدل شامل ابعاد فضاها، موقعیت خروجی‌ها، عرض مسیرهای حرکت و موانع موجود، از طریق برداشت مستقیم ساختمان تهیه شد. داده‌های جمعیتی شامل تعداد دانش‌آموزان، کارکنان، نحوه استقرار کلاس‌ها و گروه‌بندی افراد نیز بر اساس شرایط واقعی مدرسه وارد مدل شد. برای افزایش واقع‌گرایی رفتاری مدل، اطلاعات مربوط به فرآیند تخلیه، نحوه واکنش دانش‌آموزان، نقش کارکنان و محدودیت‌های اجرایی از طریق مشاهده محیط و مصاحبه با مدیر و کارکنان آموزشی جمع‌آوری شد.

۲-۷-۳-محدودیت اعتبارسنجی تجربی

با وجود تلاش برای نزدیک‌سازی پارامترهای مدل به شرایط واقعی، محدودیت اصلی پژوهش حاضر نبود داده تجربی حاصل از اجرای یک مانور کامل تخلیه همزمان با ثبت زمان خروج، تراکم جمعیت و مسیرهای واقعی حرکت افراد است (مجوز برگزاری مانورصادر نگردید). انجام مانور واقعی تخلیه و مقایسه زمان، الگوی جریان و نقاط تراکم مشاهده‌شده با نتایج مدل، می‌تواند در پژوهش‌های آینده به افزایش قابلیت اعتماد مدل کمک کند.

۳- یافته ها و بحث

در این بخش یافته های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های بر اساس سناریوهای مختلف، که شامل تخلیه با شرایط عادی، افزایش سرعت حرکت، اصلاح اجزای غیر سازه‌ای، کاهش ازدحام خروجی‌ها، و جابجایی کلاس‌ها هستند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱-تحلیل نتایج سناریو اول: تخلیه با شرایط عادی و سرعت نرمال

در این سناریو، کلیه خروجی‌ها به‌جز خروجی اصلی شماره دو که به دلیل طراحی فضای مناسبتی و استفاده از تم خاص در این قسمت مسدود شده است، در دسترس قرار دارند. بنابراین، تنها خروجی‌های باز، درب اصلی شماره یک و درب فرعی هستند که برای تخلیه افراد استفاده می‌شوند. در این سناریو، با توجه به شرایط فعلی و بدون هیچ‌گونه تغییر در تنظیمات و رفتار افراد، تخلیه جمعیت انجام شده است. تنظیمات پروفایل افراد بر اساس جدول ۲ انجام شده و رفتار افراد مطابق با مدل پیش‌فرض نرم‌افزار برای حرکت به سمت خروجی‌های کلاس‌ها و اتاق‌ها و سپس طی مسیرهای خروجی به سمت درب‌های اصلی ساختمان، تنظیم گردیده است. جدول ۴، ۵ و۶ زمان اولین نفر و آخرین نفر خروجی از درب‌ها، میزان استفاده از درب‌ها، میانگین نرخ جریان خروجی در هر درب و تعداد افرادی که از هر درب خارج شده‌اند در طبقات همکف و اول را در سناریوی اول نشان می‌دهد.

جدول ۴: زمان خروج و میزان استفاده از درب‌های اصلی و فرعی خروجی در سناریو اول

شماره درب خروجی	خروج اولین نفر (ثانیه)	خروج آخرین نفر (ب ثانیه)	تعداد نفرات خارج شده (نفر)	میانگین نرخ جریان خروجی (نفر بر ثانیه)
درب اصلی یک	۱۲.۲	۱۰۲.۶	۱۴۳	۱.۵۸
درب اصلی دو	۰	۰	۰	۰
درب فرعی	۱۲.۴	۲۹۸.۸	۴۴۷	۱.۵۶

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می شود، اولین نفر خارج شده از ساختمان از درب اصلی شماره یک و در زمان ۱۲.۲ ثانیه و آخرین نفر خارج شده از درب فرعی در زمان ۲۹۸.۸ ثانیه بوده است که نتایج نشان می دهد با توجه به نزدیک بودن خروجی فرعی به خروجی پله های طبقه مثبت یک، عموما افراد تمایل به خروج از این درب داشته و در نهایت تعداد ۴۴۷ نفر از کل جمعیت از درب فرعی و تعداد ۱۴۳ نفر از درب اصلی شماره یک جهت خروج استفاده نموده اند.

نتایج سناریوی اول در شرایط نرمال، که به تخلیه عادی ساختمان با سرعت نرمال و بدون تغییرات خاص پرداخته است، نشان می‌دهد که زمان کلی تخلیه برای تمامی افراد حاضر در ساختمان ۲۹۸.۸ ثانیه می‌باشد. این زمان کلی به معنای مدت زمانی است که از آغاز فرآیند تخلیه تا خروج آخرین نفر از ساختمان طول می‌کشد. به دلیل تراکم جمعیت در برخی از خروجی‌ها در محدوده ۴ نفر بر متر مربع، احتمال بروز مشکلات جدی مانند فشار و ازدحام در نواحی خروجی‌ها وجود دارد (شکل ۹و۱۰). این تراکم می‌تواند منجر به آسیب‌های جانی یا فیزیکی افراد در حین تخلیه ساختمان شود. به‌ویژه در نواحی مانند پله‌ها که عرض خروجی‌ها محدود است، تراکم جمعیت به شدت افزایش می‌یابد و امکان بروز حادثه و له شدن افراد به دلیل فشار جمعیت بیشتر می‌شود.

جدول ۵: زمان خروج و میزان استفاده از درب‌های خروجی کلاس‌های طبقه همکف در سناریو اول

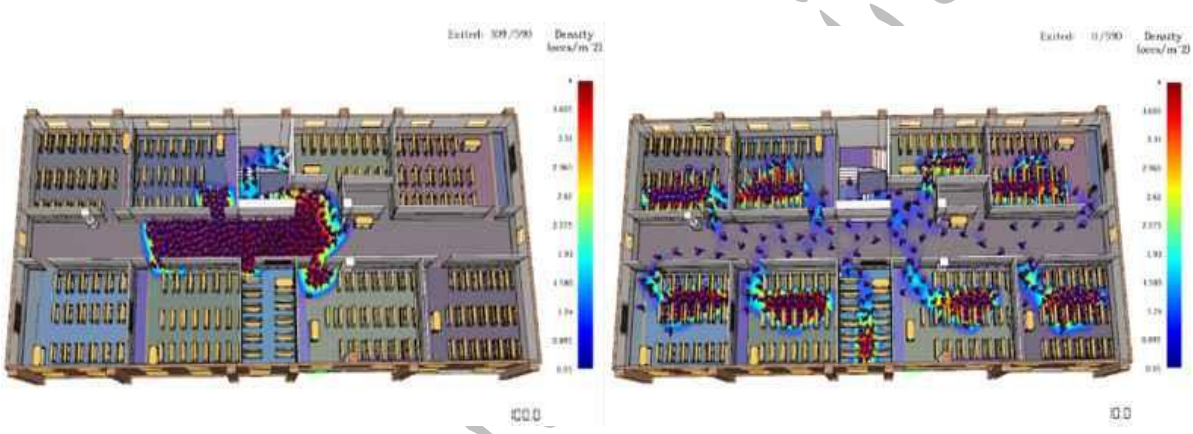
شماره درب خروجی	خروج اولین نفر (به ثانیه)	خروج آخرین نفر (به ثانیه)	تعداد نفرات خارج شده (نفر)	میانگین نرخ جریان خروجی (نفر بر ثانیه)
کلاس اول یک	۳.۵	۸۸.۱	۴۶	۰.۵۴
کلاس اول دو	۵.۱	۶۱.۵	۴۶	۰.۸۲
کلاس دوم یک	۲.۹	۷۸.۴	۴۶	۰.۶۱
کلاس دوم دو	۳.۳	۶۰.۶	۴۶	۰.۸۰
کلاس سوم یک	۳	۸۴.۲	۲۶	۰.۴۱

مطابق نتایج مدل، بیشترین تراکم و ازدحام جمعیت در ناحیه ورود پله‌ها در طبقه مثبت یک قرار دارد، جایی که افراد برای طی مسیر از پله‌ها به سمت طبقه همکف و خروج از درب‌های اصلی حرکت می‌کنند. این وضعیت ازدحام تا لحظات پایانی تخلیه ساختمان ادامه دارد. همچنین در خروجی‌های اصلی ساختمان ازدحام قابل‌توجهی مشاهده نمی‌شود. بااین‌حال، تراکم جمعیت عمدتاً در نواحی خروجی هر کلاس و مسیرهای بین میزها به چشم می‌خورد. این امر نشان‌دهنده تأثیر چیدمان داخلی کلاس‌ها بر توزیع جمعیت و سرعت خروج در فرآیند تخلیه اضطراری است.

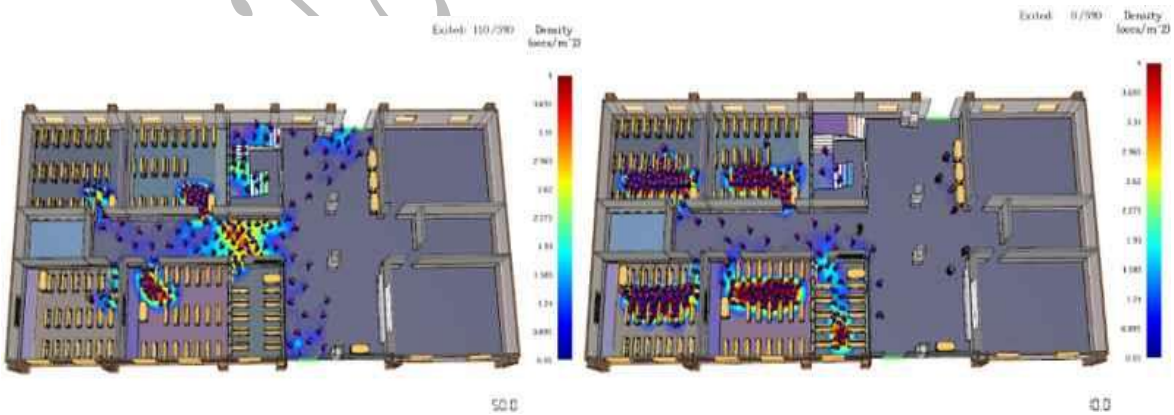
نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

جدول ۶: زمان خروج و میزان استفاده از درب‌های خروجی کلاس‌های طبقه مثبت یک در سناریو اول

شماره درب خروجی	خروج اولین نفر (به ثانیه)	خروج آخرین نفر (به ثانیه)	تعداد نفرات خارج شده (نفر)	میانگین نرخ جریان خروجی (نفر بر ثانیه)
کلاس سوم دو	۳.۴	۲۲۱.۹	۴۶	۰.۲۱
کلاس سوم سه	۲.۹	۵۴.۳	۴۶	۰.۲۱
کلاس سوم چهار	۳	۴۹.۶	۲۶	۰.۵۶
کلاس چهارم یک	۲.۲	۵۲.۹	۴۶	۰.۹۱
کلاس چهارم دو	۳.۹	۱۳۸.۳	۴۶	۰.۳۴
کلاس پنجم یک	۲.۴	۱۱۹.۳	۴۶	۰.۳۹
کلاس پنجم دو	۳.۶	۱۷۷.۹	۲۶	۰.۱۷
کلاس ششم یک	۳.۱	۵۲.۳	۴۶	۰.۹۴
کلاس ششم دو	۳.۶	۶۶.۱	۴۶	۰.۷۴



شکل ۹: خروجی مدل در سناریوی اول در طبقه همکف، سمت راست ۱۰ ثانیه بعد ازشروع تخلیه و سمت چپ ۱۰۰ ثانیه پس از شروع تخلیه همراه با نمایش تراکم جمعیت در خروجی ها (نفر بر متر مربع)



شکل ۱۰: خروجی مدل در سناریوی اول در طبقه ۱+ ، سمت راست ۱۰ ثانیه بعد ازشروع تخلیه و سمت چپ ۵۰ ثانیه پس از شروع تخلیه همراه با نمایش تراکم جمعیت در خروجی ها (نفر بر متر مربع)

۳-۲-تحلیل نتایج سناریو دوم: افزایش سرعت حرکت در شرایط اضطراری

در این سناریو، شرایط دسترسی به خروجی‌ها مشابه سناریوی اول بوده و درب اصلی شماره دو همچنان مسدود است. بنابراین، تخلیه کلی ساختمان از طریق درب اصلی شماره یک و درب فرعی انجام گرفته است. افزایش سرعت حرکت افراد موجب تغییر در نرخ جریان خروجی از درب‌ها و الگوی تراکم در مسیرهای تخلیه شده است. جداول ۷، ۸ و ۹ به ترتیب زمان اولین و آخرین نفر خروجی از درب‌ها، میزان استفاده از هر درب، میانگین نرخ جریان خروجی و تعداد افرادی که از هر درب خارج شده‌اند را در طبقات همکف و اول نمایش می‌دهند.

جدول ۷: زمان خروج و میزان استفاده از درب‌های اصلی و فرعی خروجی در سناریو دوم

شماره درب خروجی	خروج اولین نفر (به ثانیه)	خروج آخرین نفر (به ثانیه)	تعداد نفرات خارج شده (نفر)	میانگین نرخ جریان خروجی (نفر بر ثانیه)
درب اصلی یک	۷.۹	۶۱.۶	۱۲۶	۲.۳۵
درب اصلی دو	۰	۰	۰	۰
درب فرعی	۷.۶	۱۹۰	۴۶۴	۲.۵۴

جدول ۸: زمان خروج و میزان استفاده از درب‌های خروجی کلاس‌های طبقه همکف در سناریو دوم

شماره درب خروجی	خروج اولین نفر (به ثانیه)	خروج آخرین نفر (به ثانیه)	تعداد نفرات خارج شده (نفر)	میانگین نرخ جریان خروجی (نفر بر ثانیه)
کلاس اول یک	۲.۴	۵۱.۸	۴۶	۰.۹۳
کلاس اول دو	۱.۸	۳۶.۷	۴۶	۱.۳۲
کلاس دوم یک	۱.۷	۵۱.۸	۴۶	۰.۹۲
کلاس دوم دو	۱.۹	۳۵.۲	۴۶	۱.۳۸
کلاس سوم یک	۲.۵	۵۱.۹	۲۶	۰.۶۷

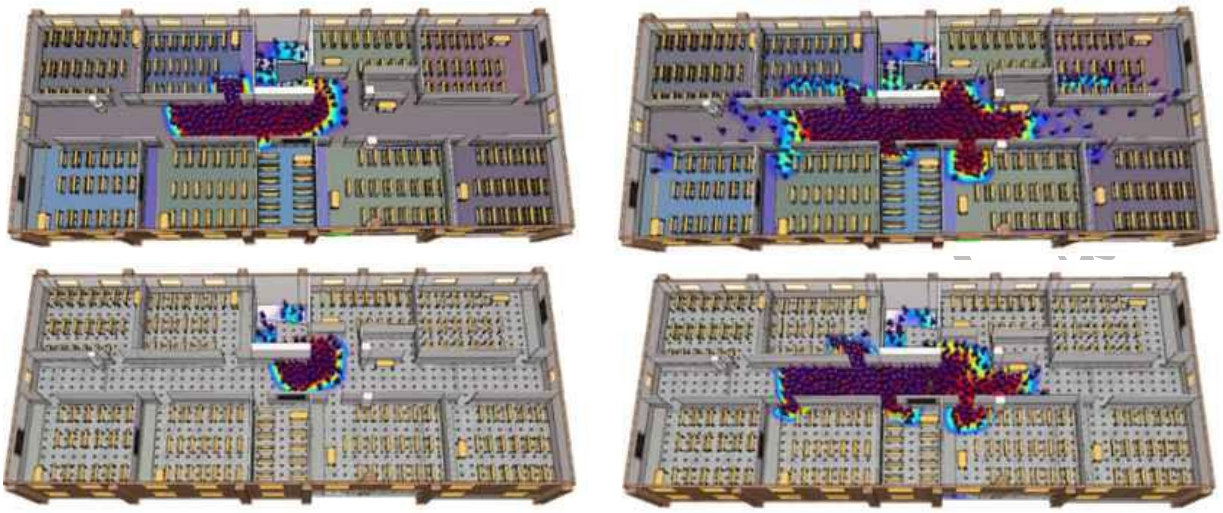
جدول ۹: زمان خروج و میزان استفاده از درب‌های خروجی کلاس‌های طبقه مثبت یک در سناریو دوم

شماره درب خروجی	خروج اولین نفر (به ثانیه)	خروج آخرین نفر (به ثانیه)	تعداد نفرات خارج شده (نفر)	میانگین نرخ جریان خروجی (نفر بر ثانیه)
کلاس سوم دو	۲.۳	۱۴۲.۲	۴۶	۰.۳۳
کلاس سوم سه	۱.۸	۳۴.۶	۴۶	۰.۳۳
کلاس سوم چهار	۱.۹	۳۱.۵	۲۶	۰.۸۸
کلاس چهارم یک	۱.۶	۳۷.۳	۴۶	۱.۲۹
کلاس چهارم دو	۳.۱	۹۷.۶	۴۶	۰.۴۹
کلاس پنجم یک	۱.۸	۷۸	۴۶	۰.۶۰
کلاس پنجم دو	۲.۷	۱۴۳	۲۶	۰.۲۱
کلاس ششم یک	۲.۱	۳۵.۶	۴۶	۱.۳۷
کلاس ششم دو	۲.۷	۴۵.۸	۴۶	۱.۰۷

نتایج حاصل از سناریوی دوم نشان می‌دهد که افزایش سرعت حرکت افراد تأثیر مستقیمی بر کاهش زمان تخلیه دارد. به‌طور مشخص، زمان تخلیه در سناریوی اول ۲۹۸.۸ ثانیه بوده، درحالی‌که در سناریوی دوم این مقدار به ۱۹۰ ثانیه کاهش یافته است. این تغییر نشان‌دهنده کاهش ۳۶.۴ درصدی در زمان تخلیه است. بااین‌حال، کاهش زمان تخلیه لزوماً به معنای افزایش ایمنی افراد نیست، چراکه افزایش سرعت حرکت در شرایط اضطراری منجر به ازدحام شدید در خروجی‌ها شده و احتمال وقوع

نسخه پیش از انتشار

آسیب‌های جدی را افزایش می‌دهد. در چنین شرایطی، فشار ناشی از تراکم جمعیت می‌تواند موجب افتادن افراد، ایجاد خفگی ناشی از فشردگی بیش‌ازحد و آسیب‌های فیزیکی گردد. بنابراین، هرچند افزایش سرعت می‌تواند زمان کلی تخلیه را کاهش دهد، اما به دلیل افزایش شدت تراکم در نقاط کلیدی، ممکن است خطرات بیشتری برای افراد به همراه داشته باشد. شکل ۱۱ و ۱۲ مقایسه تراکم بحرانی جمعیت در سناریوی اول و دوم در ثانیه ۵۰ و ۱۵۰ شبیه سازی در نقاط مختلف را نشان می دهد.



شکل ۱۱: سمت راست، تراکم و ازدحام جمعیت در سناریوی اول و پایین، تراکم و ازدحام جمعیت در سناریوی دوم-(ثانیه ۵۰)

شکل ۱۲: سمت چپ، تراکم و ازدحام جمعیت در سناریوی اول و پایین، تراکم و ازدحام جمعیت در سناریوی دوم-(ثانیه ۱۵۰)

مقایسه شکل‌های مرتبط با سناریوی اول و دوم نشان می‌دهد که باوجود افزایش سرعت حرکت و کاهش زمان تخلیه، میزان ازدحام جمعیت در بخش‌های کلیدی همچنان قابل‌توجه است. هرچند در سناریوی دوم، تراکم جمعیت در برخی نقاط کاهش یافته، اما الگوی تجمعی در بخش‌های خاص، به‌ویژه در کنج دیوار منتهی به پله‌ها، همچنان مشهود است. این تمرکز جمعیتی می‌تواند منجر به ایجاد گلوگاه‌های بحرانی، افزایش فشار بر افراد و در نهایت، افزایش خطر سقوط یا آسیب‌دیدگی شود.
در طبقه مثبت یک، با توجه به اینکه عمده کلاس‌ها در سمت چپ تصویر واقع شده‌اند، تجمع افراد به‌صورت نامتوازن و عمدتاً در این ناحیه شکل گرفته است. این مسئله موجب افزایش فشار و ازدحام در مسیرهای منتهی به خروجی‌ها، به‌ویژه در بخش‌های باریک و نقاط گلوگاهی، شده است که می‌تواند موجب کاهش کارایی فرآیند تخلیه و افزایش احتمال وقوع حوادث ناشی از تراکم بیش‌ازحد گردد. بررسی تصاویر شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در چنین شرایطی، استراتژی‌های کنترل جریان و هدایت افراد به‌صورت توزیع‌یافته‌تر می‌تواند نقش مؤثری در کاهش تراکم و بهبود ایمنی خروج ایفا کند.

۳-۳-نتایج سناریوی سوم: تأثیر تأخیر مرحله‌ای در خروج بر کاهش ازدحام جمعیت

در این سناریو به‌منظور کاهش ازدحام و توزیع یکنواخت‌تر جریان خروجی، برای برخی کلاس‌های واقع در طبقه مثبت یک تأخیر زمانی در نظر گرفته شد. این تأخیرها به‌صورت مرحله‌ای اعمال شدند تا از ورود همزمان تعداد زیادی از دانش‌آموزان به پله‌ها و خروجی‌های اصلی جلوگیری شود. کلاس‌های واقع در طبقه همکف و برخی از کلاس‌های واقع در طبقه مثبت یک بدون هیچ تأخیری از همان لحظات اولیه تخلیه را آغاز کردند. اما در طبقه مثبت یک، تأخیرهای مختلفی برای کلاس‌ها اعمال گردید که جزئیات آن در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰: اعمال تأخیر زمانی در تخلیه کلاس ها در سناریوی سوم

	مشخصات کلاس	میزان تأخیر زمانی (به ثانیه)
طبقه همکف	کلاس اول یک	۰
	کلاس اول دو	۰
	کلاس دوم یک	۰
	کلاس دوم دو	۰
	کلاس سوم یک	۰
طبقه مثبت یک	کلاس سوم دو	۱۲۰
	کلاس سوم سه	۴۰
	کلاس سوم چهار	۰
	کلاس چهارم یک	۴۰
	کلاس چهارم دو	۱۲۰
	کلاس پنجم یک	۰
	کلاس پنجم دو	۲۰
	کلاس ششم یک	۸۰
	کلاس ششم دو	۸۰

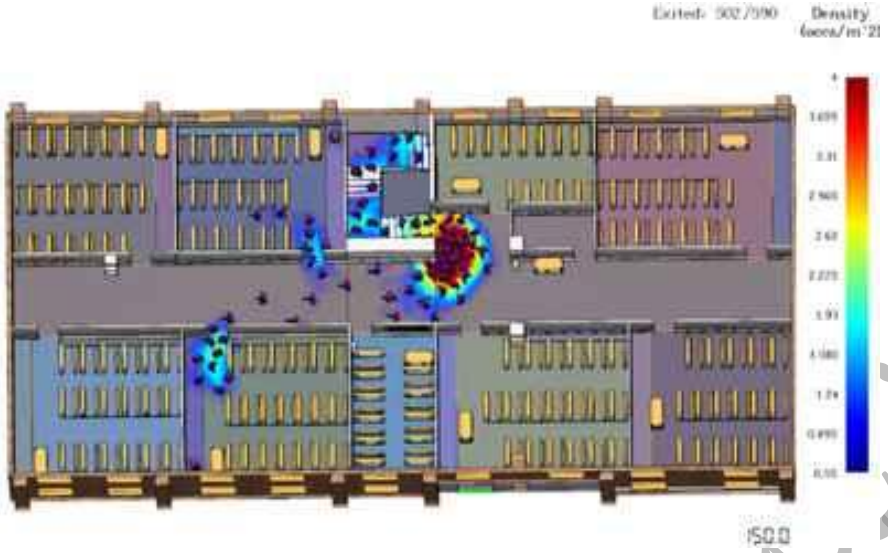
اعمال تأخیرهای جدول فوق در شـــبیه ســـازی باعث کاهش تراکم در ورودی پله‌ها شـــده و جریان خروجی را روان‌تر نمود. شـــکل‌های ۱۳ و۱۴ توزیع جمعیت و وضـــعیت ازدحام در طبقه مثبت یک در ثانیه ۵۰ و ۱۵۰ را نمایش می دهد. به وضـــوح مشخص است توزیع افراد در مسیرهای خروجی یکنواخت‌تر شده و میزان ازدحام در نقاط پرتراکم نسبت به سناریوهای قبلی کاهش یافته است.همچنین مسیر تردد و حرکت هر یک از دانش آموزان در این سناریو در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. این شکل نشان دهنده مسیر پیمایش افراد و بیشترین مصرف مسیر ناشی از وجود چگالی جمعیت در نقاط مختلف است.

همان‌طور که در شـکل‌های۱۳ تا ۱۵ مشـاهده می‌شـود، اعمال مدیریت جمعیت و تأخیر زمانی در خروج برخی کلاس‌ها تأثیر چشـمگیری در کاهش ازدحام داشـته اسـت. این راهکار منجر به توزیع بهتر جریان خروجی و کاهش تراکم در نقاط پرترافیک، به‌ویژه در محدوده راهروها و پله‌ها شده است. نکته قابل‌توجه این است که زمان کلی تخلیه همچنان برابر با ۱۹۰ ثانیه (مشابه سـناریوی دوم) باقی مانده اسـت، اما در این سـناریو، مدیریت بهینه جمعیت موجب شـده تا مسـیرهای خروجی روان‌تر شـده و احتمال آسیب‌های ناشی از تراکم جمعیت به حداقل برسد.



شکل ۱۳: توزیع جمعیت و رفع ازدحام در طبقه ثبت یک در سناریوی سوم (ثانیه۵۰)

نسخه پژوهشی



شکل ۱۴: توزیع جمعیت و رفع ازدحام در طبقه ثبت یک در سناریوی سوم (ثانیه۱۵۰)



شکل ۱۵: نمایش مسیرهای تردد و پیمایش جمعیت در طبقه مثبت یک در سناریوی سوم

۳-۴-تحلیل نتایج سناریوی چهارم: اصلاح اجزای غیر سازه‌ای و بهبود نرخ خروج

در فرآیند تخلیه اضطراری، اجزای غیرسازه‌ای مانند مبلمان، تجهیزات، قفسه‌ها، درهای نامناسب، میزها، صندلی و موانع فیزیکی می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر نرخ خروج افراد از ساختمان داشته باشند. مطالعات نشان داده‌اند که این عناصر می‌توانند مسیرهای خروج را محدود کرده، سرعت حرکت افراد را کاهش داده و موجب افزایش تراکم و گره‌های جمعیتی در نقاط بحرانی شوند (جین و همکاران،۲۰۱۷). در برخی موارد، این موانع می‌توانند به دلیل ریزش، مسدود کردن مسیرها یا کاهش عرض مؤثر راهروها منجر به افزایش زمان تخلیه و ایجاد شرایط خطرناک برای افراد شوند (رونچی و نیلسن، ۲۰۱۹).

در این سناریو، با هدف بهبود نرخ خروج، اصلاحاتی در اجزای غیرسازه‌ای که مانع از تخلیه مؤثر جمعیت می‌شدند، انجام شد. این اصلاحات شامل جابجایی یا حذف موانع فیزیکی در نزدیکی درب‌های خروجی، تغییر مکان تجهیزات حجیم، و بهبود چیدمان مسیرهای خروج بود. به‌طور خاص، تعدادی از میزهای معلم و دانش‌آموز، سطل‌های زباله و کمدها که در مسیر درب‌های خروجی کلاس‌ها قرار داشتند و منجر به کاهش نرخ خروج می‌شدند، جابجا یا حذف گردیدند. شکل ۱۶ تعدادی از موانع فیزیکی را نمایش می‌دهد. جدول ۱۱ نرخ خروج کلیه درب های اصلی با بازشدن درب اصلی دوم را نمایش می‌دهد. همچنین در این سناریو، درب اصلی دوم باز گردید و به‌علاوه، سه درب اصلی اول و دوم و درب فرعی تعریض شدند. درب اصلی اول و دوم از ۱۵۰ سانتی متر به ۳۰۰ سانتی متر و درب فرعی از ۱۸۰ سانتی متر به ۳۰۰ سانتی متر افزایش پیدا کرد. این اصلاحات باعث افزایش ظرفیت عبور جمعیت از درب‌های خروجی گردید و به‌طور مستقیم موجب بهبود نرخ خروج جمعیت

شد. تعریض درب‌ها و بازگشایی درب اصلی دوم با هدف تسهیل تخلیه سریعتر و کاهش ازدحام جمعیت در نقاط بحرانی انجام شد. این تغییرات ساختاری به طور قابل توجهی به بهبو د کاهش ازدحام در خروجی ها کمک نمود.



شکل ۱۶: برخی موانع فیزیکی در کلاس ها، مسیرها و دسترسی های خروج در طبقه همکف و مثبت یک

جدول ۱۱: زمان خروج و میزان استفاده از درب‌های خروجی اصلی ساختمان در سناریوی چهارم

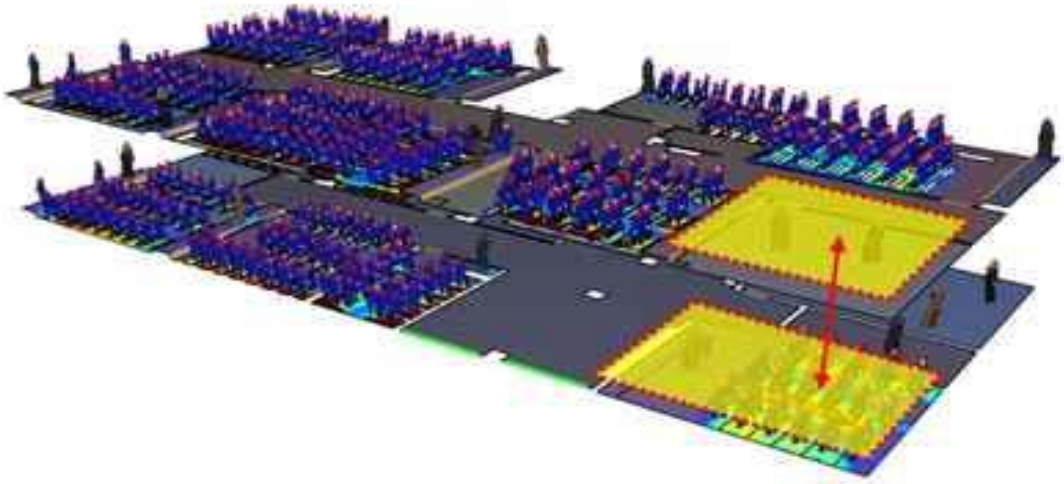
شماره درب خروجی	خروج اولین نفر (به ثانیه)	خروج آخرین نفر (به ثانیه)	تعداد نفرات خارج شده (نفر)	میانگین نرخ جریان خروجی (نفر بر ثانیه)
درب اصلی یک	۷.۶	۶۳.۲	۱۵۸	۲.۸۴
درب اصلی دو	۷.۳	۴۸.۹	۱۱	۰.۲۶
درب فرعی	۷.۶	۱۸۸.۹	۴۲۱	۲.۳۲

۳-۵-تحلیل نتایج سناریو پنجم: جابجایی یک کلاس و ارزیابی تأثیرات آن

در این سناریو، کلاس ششم یک با مساحت حدود ۳۱ مترمربع و ۴۵ دانش‌آموز که در طبقه مثبت یک واقع شده بود، به اتاق مدیر مدرسه در طبقه همکف منتقل شد (شکل۱۷). مساحت اتاق مدیر حدود ۴۷ مترمربع است. با این تغییر، دانش‌آموزان از هر سه درب اصلی ساختمان برای خروج استفاده کردند و این تغییر منجر به کاهش قابل توجه زمان تخلیه و کاهش ازدحام جمعیت در ناحیه پله‌ها در طبقه مثبت یک گردید. زمان تخلیه در سناریوی قبلی (۱۸۹.۹ ثانیه) پس از اعمال جابجایی به ۱۶۷ ثانیه کاهش یافت. این تغییر در زمان تخلیه موجب کاهش ۱۱.۹ درصد در زمان کلی تخلیه شد. این کاهش در زمان تخلیه نشان‌دهنده تأثیر مثبت جابجایی کلاس‌ها و استفاده بهینه از ظرفیت‌های موجود در ساختمان است که بهبود عملکرد سیستم تخلیه را در شرایط بحرانی و اضطراری ممکن می‌سازد.

در سناریو پنجم که به بررسی تأثیر جابجایی کلاس‌ها پرداخته شده است، نتایج نشان می‌دهند که جابجایی کلاس ششم یک به طبقه همکف با استفاده از هر سه درب اصلی برای خروج، باعث کاهش قابل توجه زمان تخلیه و ازدحام در نواحی خاصی مانند ورودی پله‌ها شده است. این سناریو به کاهش ۱۱.۹ درصدی زمان تخلیه به نسبت سناریوهای قبلی منجر شده است، که تأثیر مثبتی در بهبود روند تخلیه در مواقع اضطراری دارد.

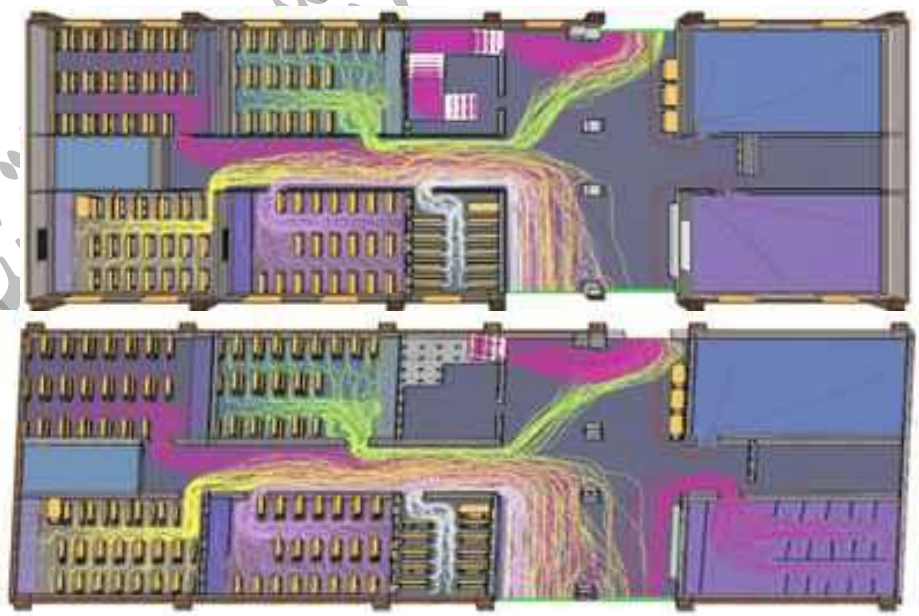
نتایج این سناریو بر اهمیت مدیریت فضای داخلی و نحوه چیدمان کلاس‌ها در کاهش زمان تخلیه و جلوگیری از ازدحام تأکید دارد. با تغییر مکان کلاس‌ها و بهینه‌سازی مسیرهای خروج، می‌توان شرایط بهتری برای تخلیه جمعیت در شرایط بحرانی فراهم کرد. جابجایی‌های مشابه در سایر مطالعات نیز نشان داده‌اند که طراحی صحیح فضا و مسیرهای خروج می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش زمان تخلیه و افزایش ایمنی افراد در مواقع اضطراری داشته باشد.



شکل ۱۷: انتقال و جابجایی کلاس ششم از طبقه مثبت یک به اتاق مدیریت مدرسه در طبقه همکف

شکل ۱۸ میزان تردد و استفاده گروه‌های جمعیتی از مسیرهای خروج در طبقات اول و همکف را در مقایسه با سناریوی چهارم نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده از این مقایسه بیانگر تغییرات قابل‌توجهی در نحوه استفاده از مسیرهای خروجی پس از اعمال اصلاحات در اجزای غیرسازه‌ای و بهبود نرخ خروج است. در سناریو چهارم، با توجه به جابجایی موانع و تغییرات در مسیرهای خروج، شاهد توزیع بهتری از افراد در طول مسیرهای خروجی به نسبت سناریوهای اول، دوم و سوم بودیم که باعث کاهش تراکم و ازدحام در برخی مناطق مانند درب‌های خروجی و مسیرهای پله‌ای شد.

در مقایسه با سناریوی چهارم، جابجایی گروه‌های جمعیتی و افزایش تردد در برخی مسیرهای خروجی باعث بهبود سرعت تخلیه و کاهش زمان صرف‌شده برای عبور افراد از نقاط بحرانی ساختمان گردید. به‌ویژه در طبقات همکف و اول، تغییرات در مسیرهای خروجی و نحوه توزیع جمعیت در طول این مسیرها منجر به کاهش تراکم جمعیت در نواحی خاص شده و از ایجاد گره‌های ترافیکی در مناطق حساس جلوگیری کرد.



شکل ۱۸: بالا، مسیرهای تردد و پیمایش جمعیت در طبقه همکف در سناریوی چهارم، پایین، مسیرهای تردد و پیمایش جمعیت در طبقه همکف در سناریوی پنجم

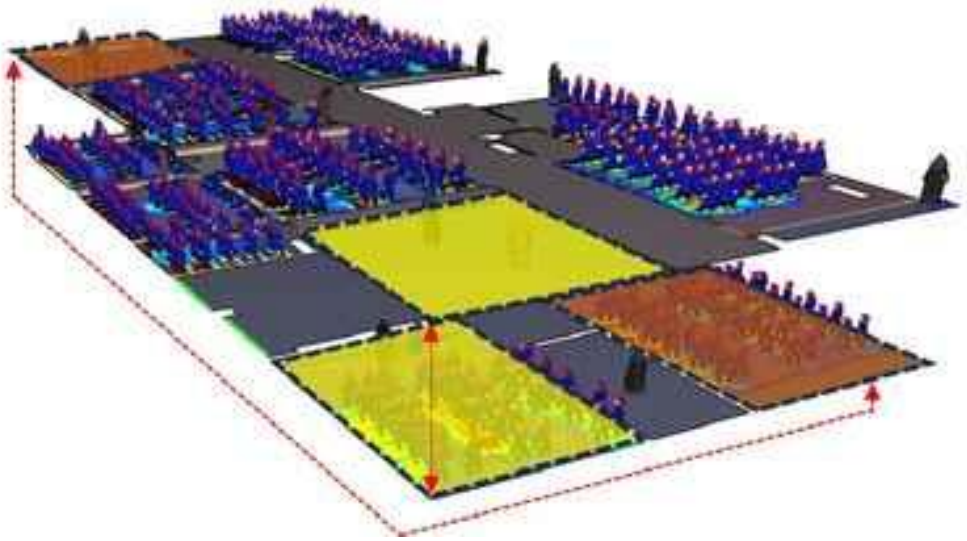
از سوی دیگر، در سناریوی پنجم، که جابجایی کلاس‌ها و اصلاح اجزای غیرسازه‌ای به‌منظور بهبود جریان خروج انجام شده است، مشاهده می‌شود که میزان استفاده از درب‌های خروجی به‌طور یکنواخت‌تری توزیع‌شده است. این اصلاحات نه‌تنها باعث افزایش سرعت خروج افراد از ساختمان گردید، بلکه شرایطی را فراهم کرد تا در هر لحظه از فرآیند تخلیه، افراد در مسیرهای خروجی با حداقل تراکم مواجه شوند. این امر نه‌تنها سرعت تخلیه را افزایش داد بلکه ایمنی افراد در زمان تخلیه را نیز بهبود بخشید.

بر اساس نتایج حاصل از این مقایسه، می‌توان نتیجه گرفت که مدیریت دقیق مسیرهای خروج و جابجایی موانع فیزیکی می‌تواند تأثیر چشمگیری در بهبود کارایی سیستم تخلیه و کاهش خطرات ناشی از ازدحام جمعیت در زمان اضطرار داشته باشد. این نتایج با یافته‌های مشابه در سایر مطالعات نیز همخوانی دارد، که در آن‌ها نشان داده شده است که اصلاح اجزای غیرسازه‌ای و بهینه‌سازی مسیرهای خروجی می‌تواند سرعت و ایمنی تخلیه را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد (تن و همکاران، ۲۰۱۸).

۳-۶-تحلیل نتایج سناریو ششم: جابجایی دو کلاس و اعمال رفتار حمایتی کادر آموزشی ارزیابی نتایج تغییرات

در این سناریو، با توجه به تغییرات مثبت و نتایج به دست آمده از سناریوی پنجم که شامل جابجایی یک کلاس به اتاق مدیر مدرسه بود، تلاش شد تا با استفاده از پتانسیل جابجایی یک کلاس دیگر، تغییرات بهینه‌تری در فرآیند تخلیه جمعیت اعمال شود. در این سناریو، کلاس چهارم یک که در طبقه مثبت یک قرار داشت، به اتاق معاونین در طبقه همکف منتقل گردید (شکل۱۹). این جابجایی با هدف بهبود جریان خروج و کاهش ازدحام در نواحی خروجی ساختمان انجام شد.

در سناریوی ششم به عنوان آخرین سناریوی تخلیه بهینه، علاوه بر جابجایی دو کلاس، که یکی از آن‌ها از طبقه مثبت یک به طبقه همکف منتقل شد، رفتار حمایتی کادر آموزشی نیز به طور خاص در نظر گرفته شد. به این معنا که در این سناریو کادر آموزشی، شامل معلمان و برخی از اعضای کادر اجرایی، تا اتمام تخلیه کامل دانش‌آموزان در ساختمان باقی می‌مانند و آن‌ها را در مسیرهای خروجی هدایت می‌کنند.



شکل ۱۹: انتقال و جابجایی کلاس ششم و چهارم یک از طبقه مثبت یک به اتاق مدیر و معاونین مدرسه در طبقه همکف در سناریوی ششم

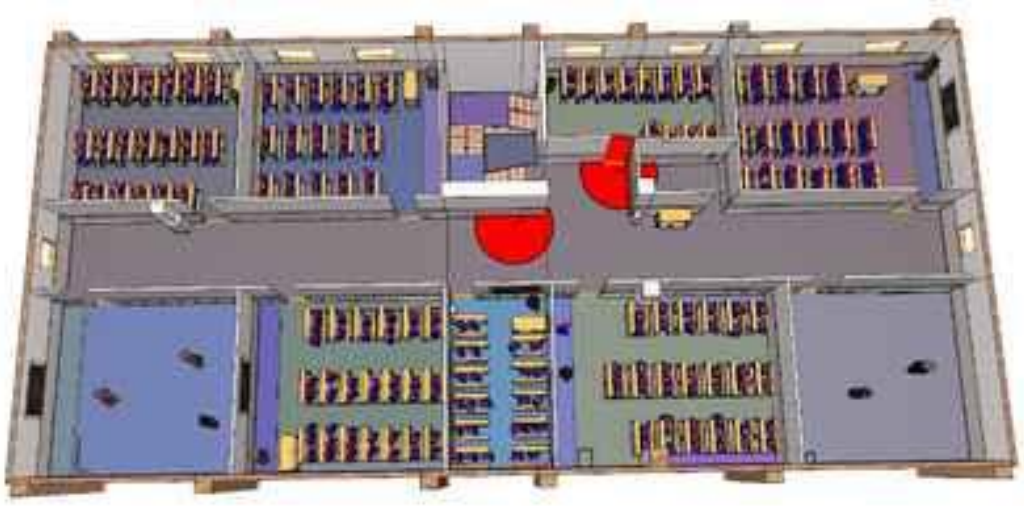
جابجایی کلاس ششم یک و چهارم دو در دو نقطه دور از هم از طبقه مثبت یک به طبقه همکف به همراه اعمال رفتار حمایتی از سوی کادر آموزشی و اجرایی، موجب بهبود شرایط تخلیه و افزایش ایمنی جمعیت در ساختمان شد. کادر آموزشی با حضور

خود در نقاط حساس و هدایت صحیح دانش‌آموزان، از تراکم و ازدحام در مسیرهای خروجی جلوگیری کردند و فرآیند تخلیه را به‌طور مؤثری سرعت بخشیدند.

این تغییرات در مقایسه با سناریوهای قبلی، موجب کاهش زمان تخلیه و بهبود جریان جمعیت در ساختمان شد. حضور کادر آموزشی در نواحی حساس ساختمان و ارائه راهنمایی‌های لازم به دانش‌آموزان، منجر به کاهش ازدحام در ورودی پله‌ها و نواحی خروجی گردید. به علاوه، رفتار حمایتی کادر آموزشی، اطمینان حاصل کرده که هیچ فردی در طول فرآیند تخلیه در موقعیت‌های خطرناک یا آسیب‌زا قرار نگیرد.

نتایج این سناریو نشان می‌دهد که ترکیب جابجایی کلاس‌ها با اعمال رفتار حمایتی کادر آموزشی می‌تواند تأثیر چشم‌گیری در کاهش زمان تخلیه، بهبود فرآیند خروج جمعیت و افزایش ایمنی افراد در مواقع اضطراری داشته باشد. این ترکیب، روشی مؤثر برای مدیریت جمعیت در شرایط اضطراری و کاهش خطرات احتمالی در زمان تخلیه به شمار می‌آید. شکل ۲۰ موقعیت قرارگیری چند تن از کادر آموزشی جهت هدایت دانش آموزان به طبقه همکف و مسیر خروج را نشان می دهد. این افراد پس از خروج از کلاس یا اتاق کاری، به سمت موقعیت مشخص شده در شکل حرکت میکنند و تا پایان عملیات تخلیه در آنجا حضور خواهند داشت و به عنوان آخرین نفرات تخلیه از ساختمان خارج می شوند.

با اعمال تغییرات در سناریو ششم، زمان تخلیه جمعیت از ۱۶۷ ثانیه به ۱۴۹ ثانیه کاهش یافت. این کاهش زمان معادل ۱۰.۷۸ درصد است. این کاهش قابل توجه در زمان تخلیه به دلیل بهینه‌سازی مسیرهای خروج، جابجایی کلاس‌ها و همچنین رفتار حمایتی کادر آموزشی است که باعث تسهیل حرکت و هدایت دانش‌آموزان به سمت درب‌های خروجی می‌شود. با حضور کادر آموزشی تا پایان تخلیه و هدایت جمعیت، ازدحام در نواحی پرترافیک کاهش یافت و این امر نقش مهمی در تسریع تخلیه ایمن ایفا کرد. جدول ۱۲ نرخ خروج کلیه درب های اصلی ساختمان مدرسه را در سناریوی ششم به عنوان آخرین سناریو نمایش می دهد.



شکل ۲۰: موقعیت قرارگیری کادرآموزشی هدایت کننده در سناریوی ششم

جدول ۱۲: زمان خروج و میزان استفاده از درب‌های خروجی اصلی ساختمان در سناریوی ششم

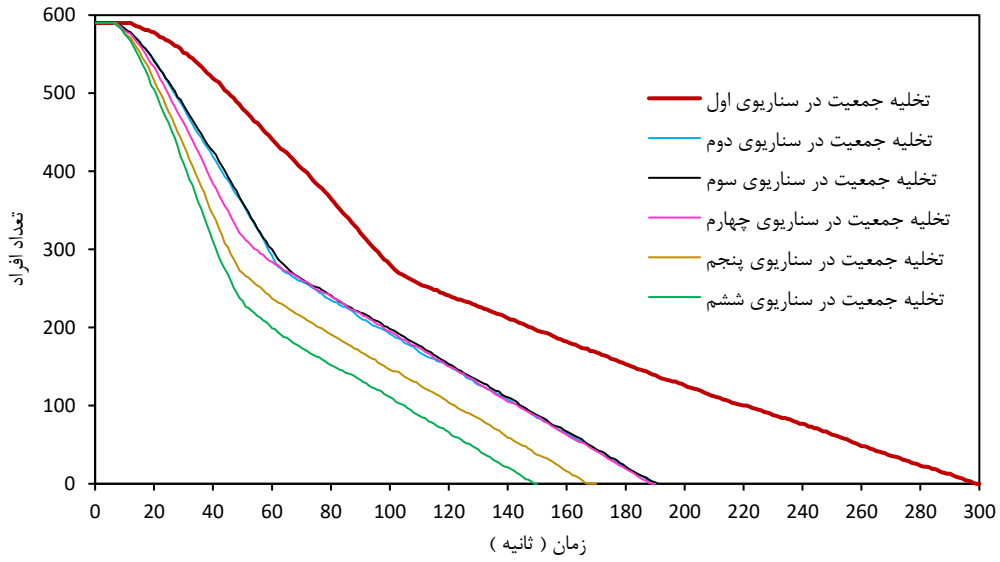
شماره درب خروجی	خروج اولین نفر (به ثانیه)	خروج آخرین نفر (به ثانیه)	تعداد نفرات خارج شده (نفر)	میانگین نرخ جریان خروجی (نفر بر ثانیه)
درب اصلی یک	۷.۶	۴۹.۴	۱۶۲	۲.۹۸
درب اصلی دو	۶.۶	۴۹.۴	۹۱	۲.۱۳
درب فرعی	۶.۵	۱۴۸.۹	۳۳۷	۲.۳۷

۳-۷-مقایسه سناریوها

جدول ۱۳ به مقایسه زمان تخلیه نهایی سناریوهای شش گانه و شکل ۲۱ به مقایسه نحوه تغییراتی زمانی تعداد افراد خارج شده در سناریوهای شش گانه پرداخته است.

جدول ۱۳: شرح و زمان تخلیه نهایی در سناریوهای شش مرحله‌ای شبیه سازی شده در مدرسه حضرت مریم(س)

شماره سناریو	شرح سناریو	زمان نهایی تخلیه (ثانیه)
۱	تخلیه عادی بدون تغییر در شرایط فعلی	۲۹۸.۸
۲	افزایش سرعت حرکت افراد برای شبیه‌سازی شرایط اضطراری	۱۹۰
۳	ایجاد تأخیر در خروج کلاس‌ها برای کاهش ازدحام در خروجی‌ها	۱۸۸.۹
۴	حذف موانع غیرسازه‌ای برای بهبود نرخ خروجی‌ها	۱۸۹.۹
۵	جابجایی یک کلاس از طبقه مثبت یک با اتاق مدیر در همکف	۱۶۷
۶	جابجایی دو کلاس از طبقه مثبت یک با اتاق‌های مدیر و معاونین در همکف	۱۴۸.۹



شکل ۴-۲۴ نمودار مقایسه ای تخلیه جمعیت در شش سناریو

الف- بررسی میانگین نرخ جریان خروجی:

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های بررسی روند تخلیه، نرخ جریان خروجی (تعداد افراد خارج‌شده بر حسب نفر بر ثانیه) از هر درب است. بررسی نرخ خروج در درب های مدرسه مطابق جدول ۱۱ انجام گردید.

درب اصلی یک: در سناریوی اول، میانگین نرخ جریان خروجی ۱.۵۸ نفر بر ثانیه بوده که در سناریوی ششم به ۲.۹۸ نفر بر ثانیه افزایش یافته است. این افزایش نشان می‌دهد که تخلیه از این درب با کارایی بیشتری انجام شده است.

درب اصلی دو: در سناریوی اول این درب بسته بوده و هیچ فردی از آن خارج نشده است. اما در سناریوی ششم، پس از بازگشایی، نرخ خروجی۲.۱۳ نفر بر ثانیه ثبت شده که سهم قابل‌توجهی در بهبود تخلیه داشته است.

درب فرعی: نرخ خروجی از این درب نیز از۱.۵۶ نفر بر ثانیه در سناریوی اول به۲.۳۷ نفر بر ثانیه در سناریوی ششم افزایش یافته است.

ب- بررسی تعداد نفرات خارج‌شده از هر درب:

در درب اصلی یک، تعداد نفرات خارج‌شده از ۱۴۳ نفر در سناریوی اول به ۱۶۲ نفر در سناریوی ششم افزایش یافته است که نشان‌دهنده بهبود کارایی این مسیر خروجی است. در درب اصلی دو، که در سناریوی اول بسته بود، در سناریوی ششم ۹۱ نفر از آن خارج شده‌اند که به توزیع بهتر جمعیت کمک کرده است. همنین در درب فرعی، تعداد نفرات خارج‌شده از ۱۴۴ نفر در سناریوی اول به ۳۳۷ نفر در سناریوی ششم کاهش یافته است .این تغییر نشان‌دهنده آن است که با توزیع بهتر جمعیت و استفاده از درب‌های دیگر، فشار کمتری بر این خروجی وارد شده است.

۴- نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و بهبود فرآیند تخلیه اضطراری در دبستان حضرت مریم (س) مشهد با استفاده از مدل‌سازی عامل‌محور انجام شد. برخلاف رویکردهایی که تخلیه را عمدتاً به‌عنوان مسئله‌ای کالبدی و حرکتی در نظر می‌گیرند، در این پژوهش تلاش شد ویژگی‌های کالبدی، رفتار جمعیت و مداخلات مدیریتی کادر آموزشی به‌صورت همزمان مورد توجه قرار گیرد. یافته اصلی پژوهش آن است که مدیریت تخلیه اضطراری باید فراتر از طراحی مسیرهای خروج و افزایش ظرفیت کالبدی مورد توجه قرار گیرد. نقش کادر آموزشی در هدایت دانش‌آموزان، مدیریت جریان جمعیت، آموزش و تمرین و تعیین مسئولیت‌های کارکنان باید بخشی از برنامه آمادگی و پاسخ اضطراری مدرسه باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که بهینه‌سازی تخلیه اضطراری در مدارس صرفاً از طریق اصلاح ویژگی‌های کالبدی قابل دستیابی نیست و مداخلات مدیریتی و نحوه سازماندهی جمعیت نیز می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای داشته باشد.

در مطالعه موردی مدرسه حضرت مریم (س) مشهد، زمان تخلیه در وضعیت موجود و صرفا با تمرکز بر سرعت حرکت افراد و بدون مدیریت تخلیه جمعیت ۲۹۸.۸ ثانیه به دست آمد که همراه با ایجاد گلگوگاه در خروجی ها بود، در حالی که در سناریوی نهایی با ترکیب اصلاحات کالبدی (جابجایی کلاس‌ها) و مداخلات رفتاری (هدایت کادر آموزشی)، زمان تخلیه به ۱۴۸.۹ ثانیه کاهش یافت؛ بنابراین کاهش حدود ۵۰.۱ درصدی در زمان تخلیه حاصل شد. بررسی نتایج نشان داد که کاهش زمان تخلیه صرفاً ناشی از افزایش سرعت حرکت افراد نبوده، بلکه حاصل تعامل عوامل فیزیکی، رفتاری و مدیریتی بوده است. از نظر فیزیکی، کاهش موانع غیرسازه‌ای، اصلاح توزیع فضایی جمعیت و کاهش بار جمعیتی مسیرهای عمودی موجب کاهش تراکم و تداخل جریان در راهروها، ورودی پله‌ها و خروجی‌ها شد. از نظر رفتاری و مدیریتی نیز افزایش سرعت حرکت در شرایط اضطراری، زمان‌بندی مرحله‌ای خروج کلاس‌ها و هدایت جریان جمعیت توسط کادر آموزشی، نحوه ورود افراد به گلوگاه‌ها را کنترل و توزیع جریان خروجی را یکنواخت‌تر کرد. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که کاهش زمان تخلیه زمانی مؤثرتر است که افزایش توان حرکتی افراد با اصلاح شرایط کالبدی و مدیریت جریان جمعیت همراه شود؛ زیرا افزایش سرعت به‌تنهایی در صورت وجود گلوگاه‌های فیزیکی الزاماً به کاهش متناسب زمان تخلیه منجر نخواهد شد.

از منظر مدیریت بحران، اهمیت این نتیجه صرفاً در کاهش زمان تخلیه خلاصه نمی‌شود. شبیه‌سازی نشان داد که نحوه توزیع جمعیت، هدایت دانش‌آموزان توسط کادر آموزشی، حذف موانع و مدیریت جریان خروج می‌تواند بر شکل‌گیری گلوگاه‌ها و تراکم جمعیت تأثیرگذار باشد. بنابراین، خروجی مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیران مدارس در تدوین برنامه‌های اضطراری، تعیین وظایف کادر آموزشی، طراحی مسیرهای خروج، برنامه‌ریزی آموزش و تمرین و مدیریت جریان جمعیت مورد استفاده قرار گیرد. از سوی دیگر، با توجه به ویژگی‌های سنی دانش‌آموزان و وابستگی آنان به هدایت معلمان و کارکنان، پیشنهاد می‌شود برنامه تخلیه اضطراری مدارس صرفاً بر نقشه مسیرهای خروج متمرکز نباشد، بلکه برای هر یک از اعضای کادر آموزشی نقش مشخصی در اطلاع‌رسانی، هدایت دانش‌آموزان، کنترل گلوگاه‌ها، کمک به افراد نیازمند و کنترل تجمع در محل امن تعریف شود. در نهایت، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌سازی عامل‌محور می‌تواند علاوه بر ارزیابی کالبدی ساختمان، به‌عنوان ابزاری برای آزمون و مقایسه سناریوهای مدیریتی پیش از اجرای واقعی آنها مورد استفاده قرار گیرد.

۴-۱- مقایسه یافته‌ها با پژوهش‌های پیشین

یافته‌های این تحقیق مبنی بر تأثیر قابل‌توجه مدیریت رفتاری کادر آموزشی بر کاهش زمان تخلیه، با نتایج پژوهش فلاحی و همکاران، ۲۰۱۵ همسو است که بر اهمیت کاهش زمان تأخیر پیش از حرکت تأکید داشتند. همچنین نتایج مربوط به محدودیت‌های طبقه دوم و اثر عرض پله‌ها بر نرخ جریان، تائیدکننده یافته‌های خاکی، ۲۰۲۱ در خصوص رابطه معکوس افزایش ارتفاع ساختمان با ایمنی تخلیه است. با این حال، نوآوری این پژوهش نسبت به مطالعات وانومو و همکاران، ۲۰۲۰ در این است که نشان داد در مدارس ابتدایی، بازآرایی چیدمان عملکردی فضاها (جابجایی کلاس‌های پرجمعیت به همکف) راهکاری به‌مراتب موثرتر و کم‌هزینه‌تر نسبت به تغییرات سازه‌ای سنگین برای ارتقای نرخ جریان خروجی است.

۴-۲- پیشنهادهای کاربردی

بر اساس خروجی سناریوی برتر (سناریوی ششم)، پیشنهادهای عملیاتی زیر برای مدیریت مدرسه و سازمان نوسازی مدارس ارائه می‌گردد:

۱. بازنگری در چیدمان عملکردی: کلاس‌های مقاطع پایین‌تر یا پرجمعیت بایستی اولویت استقرار در طبقه همکف و در مجاورت خروجی‌های اصلی را داشته باشند.

۲. تدوین پروتکل هدایت متمرکز: آموزش تخصصی به کادر آموزشی جهت ایفای نقش "عامل هدایت‌گر" در زمان بحران، به گونه‌ای که با ایجاد تأخیرهای هدفمند در خروج کلاس‌های دورتر، از تداخل جریان در پله‌ها جلوگیری شود.

۳. رفع موانع غیرسازه‌ای: حذف هرگونه تجهیزات اضافه در راهروها و بازنگری در جهت بازشوی درب‌ها که طبق شبیه‌سازی، نرخ جریان را تا حد زیادی بهبود بخشید.

۴-۳- محدودیت‌های پژوهش

این مطالعه با محدودیت‌هایی روبرو بود؛ از جمله اینکه شبیه‌سازی در نرم‌افزار پسفایندر به‌صورت پیش‌فرض بر اساس رفتارهای منطقی عامل‌ها انجام می‌شود، در حالی که در شرایط واقعی بحران (مانند زلزله یا آتش‌سوزی)، رفتارهای غیرمنطقی و وحشت‌زدگی ممکن است بر زمان تخلیه اثرگذار بوده و منجر به کاهش سرعت های تخلیه نسبت به مقادیر جدول ۳ تحقیق حاضر شود. همچنین، محدودیت در دسترسی به تجهیزات واقعیت مجازی برای سنجش دقیق‌تر عکس‌العمل دانش‌آموزان از دیگر محدودیت‌های این تحقیق بود.

مدل‌سازی Pathfinder نمی‌تواند تمامی ابعاد پیچیده رفتار انسانی در شرایط واقعی بحران، از جمله وحشت‌زدگی، تصمیم‌گیری غیرمنطقی، تغییر مسیر ناگهانی، رفتارهای جمعی و واکنش‌های فردی متفاوت را به‌طور کامل بازنمایی کند. بنابراین، نتایج این مطالعه باید در چارچوب فرضیات تعریف‌شده برای سناریوهای شبیه‌سازی تفسیر شوند.

۴-۴- پیشنهادهای تحقیقات آتی

۱. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده بطور خاص تخلیه اضطراری هنگام حریق و ویژگی های خاص آن مانند انتشار دود و گازهای حاصل از احتراق، کاهش دید، اثرات حرارتی و سایر پیامدهای فیزیکی حریق بر رفتار و قابلیت حرکت افراد که منجر به کاهش سرعت تخلیه (کمتر از مقادیر درج شده در جدول ۳ تحقیق حاضر) در مدل‌سازی لحاظ گردد.

۲. استفاده از الگوریتم های مسیر یابی دیگر مانند Steering و Social Force یکسان و مقایسه آنها با مدل SFPE.

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

۵- مراجع

Abbasabadi-Arab, M., Ahmadi, S., Khankeh, H., Mohammadi, F., & Haq Roosta, S. (2025). Challenges of implementing the policies for natural disaster risk prevention and mitigation in Iran. *Disaster Prevention and Management Knowledge, 14*(4), 406–423. https://doi.org/10.32598/DMKP.14.4.865.1

Bahmani, H., Ao, Y., Yang, D., Xu, Q., & Zhao, J. (2026). Enhancing evacuation safety in urban primary schools: An agent-based model integrating child development behaviour and health dynamics. *Reliability Engineering & System Safety, 265*, 111591. https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111591

Barth, M. S., Palm, K., Andersson, H., Granberg, T. A., Gullhav, A. N., & Krüger, A. (2024). Emergency exit layout planning using optimization and agent-based simulation. *Computational Management Science, 21*(1), 1. https://doi.org/10.1007/s10287-023-00482-y

Chen, Y., Wang, C., Du, X., Shen, Y., & Hu, B. (2023). An agent-based simulation framework for developing the optimal rescue plan for older adults during emergency evacuation. *Simulation Modelling Practice and Theory, 128*, 102797. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102797

Cotfas, L. A., Delcea, C., Mancini, S., Ponsiglione, C., & Vitiello, L. (2023). An agent-based model for cruise ship evacuation considering smart technologies on board. *Expert Systems with Applications, 213*, 119039. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119124

Dimitriou, K., & Rogers, C. D. F. (2021). Behavioral dynamics and crowd control strategies during evacuation: A review of current methods. *Journal of Safety Research, 74*, 243–251. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.12.006

Fallahi, A., Hafezi, M. R., & Omidkhah, A. (2015). The effect of evacuation time on fire safety management planning in two high-rise residential buildings [In Persian]. *Armanshahr Journal, 8*(25).

Gwynne, S., Galea, E. R., Owen, M., Lawrence, P. J., & Filippidis, L. (1999). A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and Environment, 34*(6), 741–749. https://doi.org/10.1016/S0360-1323(98)00057-2

Gwynne, S., Galea, E. R., Parke, J., & Hickson, J. (2017). The collection and analysis of pre-evacuation times for people with disabilities in emergencies. *Fire Safety Journal, 91*, 615–622. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.053

Gwynne, S., Kuligowski, E. D., & Boyce, K. E. (2019). A review of occupant evacuation models and their potential application in pedestrian traffic and crowd dynamics. *Safety Science, 111*, 445–460. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.09.027

Hasanzadeh, S., Salimi Tari, A., Samadi Foroushani, M., Moradi Rouzbahani, S., & Miresmaeeli, S. S. (2025). Barriers to disaster management exercises in Iran using interpretive structural modeling, and the solutions for improving their quality: Case study of 22 districts in Tehran. *Disaster Prevention and Management Knowledge, 15*(3), 292–319. https://doi.org/10.32598/DMKP.15.3.455.2

Haghani, M., & Sarvi, M. (2018). Simulating emergency evacuation with agent-based modeling approach: Current knowledge and future trends. *Safety Science, 102*, 1–18. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.002

Helbing, D., Farkas, I. J., & Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature, 407*(6803), 487–490. https://doi.org/10.1038/35035023

Thunderhead Engineering. (2024). *Pathfinder user manual*. Thunderhead Engineering.

Khaki, A. (2021). Investigating the role of physical characteristics of educational buildings on emergency evacuation time during disasters [In Persian]. *Journal of Crisis Management, 11*(21), 149–161.

Kuligowski, E. D., Peacock, R. D., & Hoskins, B. L. (2020). A review of building evacuation models: Past, present, and future. *Fire Technology, 56*(4), 1013–1054. https://doi.org/10.1007/s10694-019-00921-6

Kumar, R., Bathina, S. K., & Siddapureddy, S. (2020). Fire and evacuation simulation of Kumbakonam school fire accident. *Proceedings of the 8th International and 47th National Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power (FMFP 2020)*, FMFP2020-135. https://www.researchgate.net/publication/348591464_Fire_and_Evacuation_Simulation_of_Kumbakonam_School_Fire_Accident

Larusdottir, A. R., & Dederichs, A. S. (2011). A step towards including children's evacuation parameters and behavior in fire safe building design. *Fire Safety Science*, 10, 187–198. https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.10-187

Li, H., Lo, J. T. Y., & Lo, S. (2025). The impact of preschool children requiring adult assistance on evacuation efficiency. *Simulation Modelling Practice and Theory, 139*, 103062. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.103062

Li, P., Bao, X., Hong, C., Wang, D., Xie, X., Fan, J., Li, H., & Liao, L. (2024). Evacuation simulation and fire-risk assessment on underground space of Guangzhou International Financial City. *Fire, 7*(9), 307. https://doi.org/10.3390/fire7090307

Lorusso, P., De Iuliis, M., Marasco, S., Domaneschi, M., Cimellaro, G. P., & Villa, V. (2022). Fire emergency evacuation from a school building using an evolutionary virtual reality platform. *Buildings, 12*(2), 223. https://doi.org/10.3390/buildings12020223

Lovreglio, R., Fonzone, A., & Dell'Olio, L. (2019). A review of pedestrian evacuation simulation models: Exploring a research agenda. *Transport Reviews, 39*(5), 569–594. https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1549316

Mls, K., Kořínek, M., Štekerová, K., Tučník, P., Bureš, V., Čech, P., Husáková, M., Mikulecký, P., Nacházel, T., Ponce, D., Zanker, M., Babič, F., & Triantafyllou, I. (2022). Agent-based models of human response to natural hazards: Systematic review of tsunami evacuation. *Natural Hazards, 115*, 1887–1908. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05643-x

Pawlik, M., Takabatake, T., Shiroshita, H., Jayaratne, R., Haddad, H., Kitagawa, K., & Hasegawa, N. (2025). Agent-based modelling for flood evacuation as inclusive disaster risk

reduction: Pilot participatory action research with 11- and 12-year-old children from a Japanese school. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 117*, 105180. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105180

Qiao, Y., Weng, Y., Shi, X., Zhu, Z., Li, C., Zhang, X., & Liu, J. (2023). Fault tree analysis for subway fire evacuation with agent-based modeling. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 4*, 7. https://doi.org/10.1186/s43065-023-00073-w

Ronchi, E., & Nilsson, D. (2018). Fire evacuation in high-rise buildings: A review of human behaviour and modelling research. *Safety Science, 109*, 285–300. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.002

Ronchi, E., & Nilsson, D. (2019). Modelling evacuation in fire scenarios: Factors influencing human behavior. *Fire Safety Journal, 107*, 102–115. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.06.001

Ronchi, E., Nilsson, D., & Peacock, R. D. (2016). Modelling school evacuation and sheltering for fire emergencies. *Fire Technology, 52*(5), 1401–1427. https://doi.org/10.1007/s10694-015-0502-5

Senanayake, G. P. D. P., Kieu, M., Zou, Y., & Dirks, K. (2024). Agent-based simulation for pedestrian evacuation: A systematic literature review. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 111*, 104705. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104705

Shi, C., Zhao, N., Yang, L., & Li, X. (2020). Emergency evacuation and pedestrian dynamics: The effects of route choice and crowd density. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 558*, 124921. https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124921

Snohová, A., & Kucera, P. (2024). Comparative study of SFPE and steering modes in Pathfinder to optimise evacuation routes. *Buildings, 14*(8), 2361. https://doi.org/10.3390/buildings14082361

Vanumu, L. D., Arya, A., Gaddam, H. K., & Rao, K. R. (2020). Modelling emergency evacuation of classroom with different age profiles. *Collective Dynamics, 5*, 374–381. https://doi.org/10.17815/CD.2020.96

Yang, Y., Yin, J., Wang, D., Liu, Y., Lu, Y., Zhang, W., & Xu, S. (2023). ABM-based emergency evacuation modelling during urban pluvial floods: A "7.20" pluvial flood event study in Zhengzhou, Henan Province. *Science China Earth Sciences, 66*(2), 282–291. https://doi.org/10.1007/s11430-022-1015-6

Zarghami, E., & Rismanian, M. (2019). Evaluation of building evacuation models under emergency conditions and comparison of congestion phenomena in fluid dynamics and agent-based models [In Persian]. *Journal of Resilient City, 2*(1), 33–48.

Zarghami, E., & Rismanian, M. (2019). The effect of architectural variables on classroom evacuation time under emergency conditions [In Persian]. *Haft-Hesar Environmental Studies Journal, 8*(30), 59–68.

Zhang, C., Wang, W., Guo, H., & Li, K. (2023). Emergency evacuation simulation study based on improved YOLOv5s and AnyLogic. *Applied Sciences, 13*(9), 5812. https://doi.org/10.3390/app13095812

Zhao, B., Li, Z., & Zhang, H. (2018). Modeling crowd dynamics in public places: A comprehensive review of simulation methods. *Safety Science, 104*, 215–226. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.01.024

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار