بررسی نقش ویژگی‌های کالبدی ساختمان‌های آموزشی در مدت زمان تخلیه اضطراری هنگام حوادث

علی خاکی: استادیار، گروه معماری، دانشگاه فنی و حرفه ای تهران، ایران، Email:Dr.alikhaki@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

چکیده

جمعیت و تراکم زیاد انسانی در ساختمان مدارس سبب شده که اهمیت بررسی این فضاها از نظر تخلیه ایمن و فوری دانش‌آموزان در هنگام حادثه ضروری به نظر رسد. از این‌رو برای کاهش مدت‌زمان تخلیه در این‌گونه فضاها به شبیه‌سازی تخلیه اضطراری نیاز است. بدین منظور، در این مقاله و چارچوب ارائه‌شده در آن به شبیه‌سازی تخلیه انسانی در یک مدرسه (از نقشه‌های تیپ سازمان نوسازی مدارس؛ با ۲ طبقه و با شبیه‌سازی ۳۴۵ نفر کاربر) به هنگام حادثه اقدام شد و بدین منظور از نرم‌افزار پس‌فایندر[1] استفاده شد. مدت‌زمان تخلیه برای مدرسه یادشده ۱۳۱ ثانیه حاصل شد. با توجه به آنکه ویژگی‌های کالبدی به‌عنوان یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر مدت‌زمان تخلیه مطرح است، از این‌رو در این پژوهش ۲ عامل مهم کالبدی شامل ارتفاع و طول ساختمان ارزیابی شد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع ساختمان (۳ طبقه کردن و رسیدن به ۵۱۶ نفر کاربر) مدت‌زمان با افزایش ۶۶ درصدی به ۲۱۷ ثانیه رسیده که ناایمن است و با افزایش ارتفاع به ۴ 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 مدت‌زمان 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 بر خلاف افزایش ارتفاع ساختمان کمتر بر تراکم دانش‌آموزان به‌ویژه در راه‌پله اثر گذاشته، تأثیر به نسبت بیشتری (در مقایسه با گسترش عمودی ساختمان) در کاهش مدت‌زمان تخلیه اضطراری دارد (مدت‌زمان ۱۷۸ ثانیه جهت تخلیه کامل). از این‌رو پیشنهاد می‌شود برای ایجاد ساختمان‌های ایمن در برابر حادثه در صورت امکان گسترش ساختمان از طول و به شکل افقی باشد.

کلمات کلیدی: *کالبد، فضاهای آموزشی، تخلیه ایمن*

Investigating the Role of Physical Properties of Typical Educational Buildings on Emergency Evacuation During Accidents

Ali khaki

Abstract

The overcrowding in the school building make the importance of examining evacuation of students in the accident. To this end, this paper provide a simulation of human evacuation in a school sample (from school organization type maps, with 2 stories – and with 345) at the time of the accident. Pathfinder software was used for this purpose and the evacuation time for the above-mentioned school was 131 seconds. Since physical characteristics are considered as one of the most important factors affecting the duration of evacuation, therefore in this study two important physical factors including height and building length were evaluated.

The results showed that with increasing of height of the building (3 floors and 516 users) the time increased by 66٪ to 217 seconds, which is unsafe and by increasing the height to 4 floors (687 users) this would increase by 135% to 307.8 seconds, which would create a dangerous situation. Installation of a separate emergency stair also reduced this time to just 249.5 seconds, which is not on the safe time. But increasing the length of the building (with 515 users) given that, unlike the height of the building, it has less impact on the density of the students (especially on the staircase) and it has a greater effect on reducing the duration of emergency evacuation (Compared to vertical expansion of the building).

Therefore it is recommended that If possible extend the building from the (horizontal) length was considered.

Keywords: *Physical, educational spaces, safe evacuation*

assistant professor, Technical and vocational university, Tehran, Iran, email: Dr.alikhaki@yahoo.com

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر بسیاری از روش‌های تخلیه مانند مدل‌سازی شبکه[۱]، مدل‌سازی حالت محدود مبتنی بر هزینه[۲][۲]، مدل‌های خودکار سلولی[۳، ۴]، مدل‌های شبکه مشبک گاز[۵، ۶]، کف مدل‌های میدانی[۷، ۸] و مدل‌های گسسته ظریف[۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲] برای بررسی ویژگی‌های تخلیه ساکنان توسعه داده شده است. این مطالعات نقش مهمی در پیش‌بینی رفتار عابر پیاده در هنگام تخلیه و در طراحی امکانات تخلیه ایفا می‌کنند. به‌منظور مطالعه تخلیه اضطراری در هنگام حریق مؤسسه ملی استاندارد و فناوری[۳] شبیه‌سازی را به نام پس‌فایندر (به‌منظور شبیه‌سازی حرکت کارکنان) توسعه داد. نرم‌افزار پس‌فایندر یک شبیه‌ساز تخلیه است که برخلاف مدل‌های مبتنی بر جریان یا سلول مبتنی بر جریان از تکنیک‌های فناوری در صنایع بازی و گرافیک رایانه‌ای استفاده می‌کند. بسیاری از نتایج مهم در بسیاری از پژوهش‌ها با استفاده از شبیه‌سازی پس‌فایندر به‌دست آمده است. پس‌فایندر ابزارهای لازم جهت اتخاذ تصمیمات مطمئن درباره چیدمان ساختمان و طراحی سیستم حفاظت از آتش را فراهم می‌کند[۱۳، ۱۴]. بر اساس نرم‌افزار پس‌فایندر مسئله مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند تخلیه ساکنان در ساختمان‌های عمومی[۱۵] مورد توجه قرارگرفته و نتایج نشان می‌دهد که زمان خروج نسبت به تعداد ساکنان هنگام تخلیه تقریباً با یک عملکرد خطی یکنواخت افزایش می‌یابد. باو فرآیند تخلیه یک سالن ضیافت بزرگ زیرزمینی را با استفاده از نرم‌افزار پس‌فایندر شبیه‌سازی کرده و طبق نتایج شبیه‌سازی توصیه‌های معقولی درباره ایمنی در برابر آتش در سالن ضیافت بزرگ ارائه کرد[۱۶]. فنگ[۴] و همکاران همچنین با استفاده از روش شبیه‌سازی نرم‌افزار پس‌فایندر اثرات طراحی پله‌ها بر تخلیه پلان معماری را ارائه دادند[۱۷]. با توجه به اهمیت مبحث تخلیه به‌ویژه در بناهای عمومی مملو از جمعیت در این پژوهش به شبیه‌سازی رفتار تخلیه دانش‌آموزان در مدارس به‌عنوان یکی از مراکز شلوغ و حساس جمعیتی اقدام شد و هدف شناسایی مؤثرترین اصول کالبدی در کاهش زمان تخلیله دانش‌آموزان است. بدین منظور در مطالعه حاضر سؤال زیر مطرح شد: نقش توسعه عمودی و افقی مدارس در زمان تخلیه دانش‌آموزان چگونه بیان می‌شود و اصول طراحی مبتنی بر آن شامل چه مواردی است؟

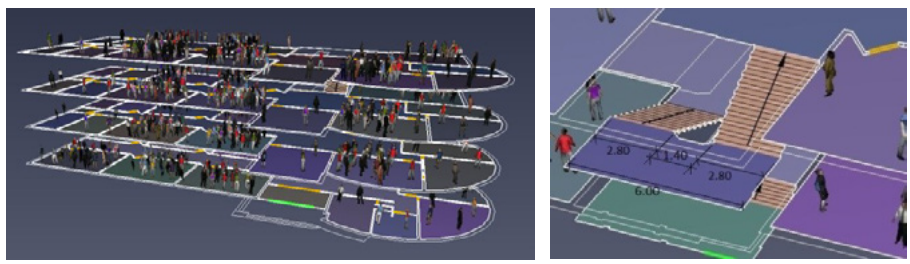
۲- مدل شبیه‌سازی و توضیحات ساختمان

در این پژوهش مجموعه‌ای از سناریوهای تخلیه کامل ساختمان با استفاده از نرم‌افزار پس‌فایندر بر اساس شبیه‌سازی‌های ساختمان مدارس در شهر همدان تجزیه و تحلیل می‌شود(تصویر۱). بدین منظور لازم است تا هم ساختمان و هم کاربران شبیه‌سازی شود که شرح این فرآیند در ادامه ارائه شده است:

۲-۱- شبیه‌سازی معماری ساختمان

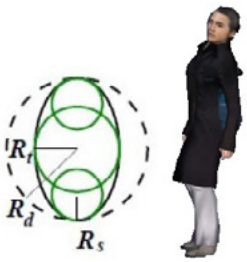
مدل مورد استفاده در این مطالعه ساختمانی ۲ طبقه است که از سقف تا کف آن۳۸۰ سانتی‌متر است و تمام طبقات دارای طرحی مشابه هستند. نقشه این ساختمان به‌عنوان طرحی پایه‌ای و به صورت تیپ در نقاط مختلفی از شهر همدان طراحی و اجرا شده است. در این مدرسه ۲ خروجی وجود دارد که عرض خروجی اصلی آن حدود ۴۰۰ سانتی‌متر در طبقه همکف است (تصویر۲). تنها فضای دسترسی عمودی راه‌پله اصلی بوده که با یک پاگرد و به عرض ۲۸۰ سانتی‌متر ساخته شده است. هر بخش دستگاه پله در مجموع ۱۱ پله با پیشانی ۲۸ سانتی‌متری و ارتفاع ۱۷ سانتی‌متری است (تصویر ۲). تصویر ۲ پلان ساختمان و شبیه‌سازی آن را در نرم‌افزار نشان می‌دهد.

تصویر ۱. مدرسه مورد تحلیل



تصویر ۲. شبیه‌سازی مدرسه در نرم‌افزار پس‌فایندر

جدول ۱. ابعاد و استانداردهای بدن افراد جهت شبیه‌ساز تخلیه در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز تخلیه [۱۸]- سمت چپ: تصویر هندسی بدن انسان (شکل بدن انسان تقریباً ترکیبی از ۳ حلقه همپوشانی شده است[۱۹]).



نوع بدن کاربر	R_d (m)	R_s/R_d (−)	ds/R_d (−)	R_t/R_d (−)	سرعت (m/s)
کودکان	0.210 ± 0.015	0.3333	0.6667	0.5714	0.90 ± 0.30
بزرگسالان	0.255 ± 0.035	0.3725	0.6275	0.5882	1.25 ± 0.30
آقایان	0.270 ± 0.020	0.3704	0.6296	0.5926	1.35 ± 0.20
خانم ها	0.240 ± 0.020	0.3750	0.6250	0.5833	1.15 ± 0.20
سالخوردگان	0.250 ± 0.020	0.3600	0.6400	0.6000	0.80 ± 0.30

۲-۲- شبیه‌سازی ساکنان ساختمان

ساکنان به‌عنوان افراد غیرمرتبط الگوبرداری می‌شوند. بدین منظور می‌بایست جامعه آماری و استفاده‌کنندگان فضا به‌طور دقیق مشخص شده تا در نرم‌افزار شبیه‌سازی شود. جهت شبیه‌سازی کاربران از ویژگی‌های پیش‌فرض جمعیت در پس‌فایندر استفاده می‌شود و شامل افرادی با قابلیت‌های مختلف حرکتی است‌که نشان‌دهنده تنوع سنین، جنس‌ها و توانایی‌های مختلف است (جدول۱). فرض بر این است که همه کاربران و استفاده‌کنندگان از فضا در هنگام حادثه و در ابتدای سناریوی شبیه‌سازی فوراً واکنش نشان می‌دهند. از این‌رو زمان پاسخ به‌عنوان یک پارامتر در تجزیه و تحلیل در نظر گرفته نمی‌شود.

مدرسه مورد مطالعه دارای ۱۲ کلاس درس بوده که دانش‌آموزان پسر را در پایه‌های چهارم، پنجم و ششم (هر کدام ۳ کلاس درس) ابتدایی شامل می‌شود. به‌طور میانگین هر کلاس ۲۷ دانش‌آموز را پوشش داده که حدود ۳۳۲ نفر شده و ۱۳ نفر هم به‌عنوان کادر آموزشی (شامل معلمان، ناظم، معاون و مدیر مدرسه) در نظر گرفته شده است. از این‌رو افراد یادشده در نرم‌افزار به‌عنوان کاربر فضا شبیه‌سازی می‌شوند.

۳- مبانی نظری

۳-۱- تخلیه اضطراری

حوادث طبیعی و غیرطبیعی در بسیاری از مواقع شرایطی را فراهم می‌آورد که اغلب تخلیه سریع یک منطقه را اجتناب‌ناپذیر می‌کند[۲۰]. تخلیه اضطراری حرکت فوری مردم از مکانی خطرناک به دلیل تهدید یا وقوع رویدادی فاجعه‌بار است[۲۱]. به عبارتی دیگر به حرکت شتابان و اضطراری افراد از محل‌های خطرناک که به‌علت تهدید و یا وقوع حادثه‌ای فاجعه‌آمیز مانند آتش‌سوزی، زلزله، بمباران و ... رخ داده، اطلاق می‌شود[۲۲]. در برنامه‌ریزی‌های مدیریت ایمنی در ساختمان بلندمرتبه راهبرد تخلیه یکی از راهکارهای تأمین ایمنی بوده که به ۳ مرحله زمان تشخیص[۵]، زمان واکنش[۶] و زمان خروج[۷] تقسیم‌بندی می‌شود. زمان تخلیه هم به زمان کلی از شروع شرایط اضطراری تا انتقال تمامی ساکنان به مکان امن یا منطقه نجات گفته می‌شود[۲۳].

۳-۲- مراحل آگاه‌سازی و فرار در تخلیه اضطراری

شناخت مراحل فرار در مدل زمان‌سنجی تخلیه مفید واقع می‌شود که در ۲ مرحله و به شرح زیر است:

۳-۲-۱- مرحله هشدار و آگاه‌سازی (زمان تشخیص)

زمان تشخیص بازه زمانی از شروع شرایط اضطراری تا هنگامی است که ساکنان از آن آگاه شوند. این پیغام‌ها برای آگهی مردم درباره شرایط اضطراری و سایر موارد مربوط به تخلیه داده می‌شود. بازخورد افراد نسبت به آژیر خطر هنگام بروز حادثه همگام با صدای آژیر عکس‌العمل‌های گوناگونی می‌تواند شکل گیرد. مطالعات گوناگونی روی بازخورد انسان آژیر خطر و حریق انجام و نشان داده که بیشتر افراد بیشتر بازخورد فوری نسبت به آژیر خطر نشان نمی‌دهند و به جای آن ممکن است برای کسب اطلاعات بیشتر از دیگران بپرسند و یا به دلیل دستپاچگی ارزیابی غلطی از وضعیت کرده و یا حتی آژیر خطر را نادیده بگیرند که این موارد با برنامه‌ریزی و آموزش قابل رفع است. گنجاندن آژیر خطر و شبکه تشخیص حریق در سیستم ایمنی ساختمان به همراه آموزش کمک مهمی به عکس‌العمل سریع ساکنان بوده و آن‌ها را به واکنش جدی تشویق می‌کند[۲۴].

۳-۲-۲- مرحله جابه‌جایی و تخلیه (زمان واکنش و خروج)

مراحل جابه‌جایی و تخلیه (فرار) به ۴ مرحله مشخص تقسیم می‌شود:

الف) مرحله اول: فرار از اتاق یا محل شروع حریق؛

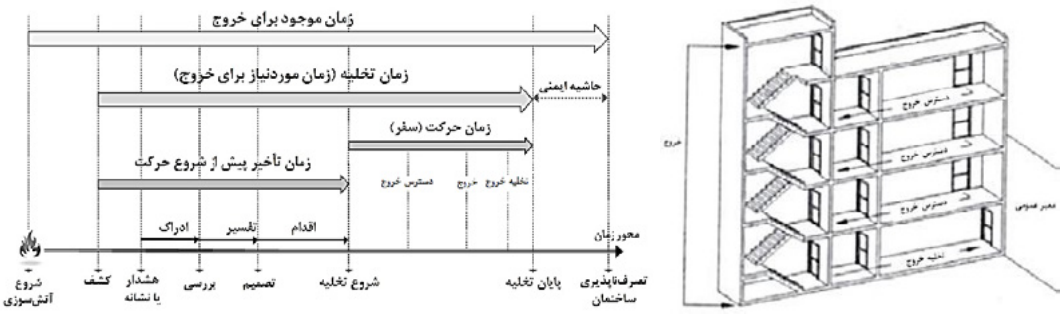
ب) مرحله دوم: فرار از طریق مسیر تردد تا رسیدن به در خروجی نهایی یا راه‌پله نجات و یا اتاقی مجاور به‌عنوان پناهگاه. مرحله دوم تخلیه می‌تواند فقط شامل تخلیه به منطقه‌ای امن (پناهگاه) در همان طبقه باشد؛ (به مرحله اول، دوم و مسیر حاصل از آن دسترس خروج گفته می‌شود.)

ج) مرحله سوم: فرار از طبقه خود به طبقه همکف؛ (به این مرحله که راه‌پله و فضاهای دسترسی عمودی را شامل می‌شود، خروج نامیده می‌شود).

د) مرحله چهارم: فرار نهایی از طبقه همکف (به این مرحله و مسیر حاصل از آن تخلیه خروج گفته می‌شود).

زمان تخلیه باید از زمان لازم برای تخلیه بیشتر باشد[۸]. اختلاف میان این ۲ زمان درجه ایمنی ساختمان را بالا می‌برد. زمان خروج[۹] از مجموع زمان‌های کشف آتش[۱۰]، زمان هشدار[۱۱]، زمان پیش از حرکت[۱۲] و زمان حرکت[۱۳] تشکیل می‌شود. زمان تخلیه[۱۴] به مجموع زمان‌های پیش از حرکت و زمان حرکت اطلاق می‌شود. حاشیه ایمنی هم اختلاف زمان محاسبه‌شده مورد نیاز برای تخلیه و کل زمان موجود برای تخلیه است. (تصویر ۳) [۲۵، ۲۶].

زمان موجود برای تخلیه < زمان خروج (زمان لازم برای تخلیه) = زمان کشف آتش + زمان هشدار + زمان تخلیه (زمان پیش از حرکت و زمان حرکت)



تصویر ۳. زمان لازم برای تخلیه[۲۶].

با توجه به قابلیت سنجش زمان حرکت(سفر) در نرم‌افزار پس‌فایندر در این پژوهش منظور از مدت‌زمان تخلیه که در تحلیل‌ها استفاده‌شده همین زمان است. در اکثر پژوهش‌های انجام‌شده داخلی و خارجی هم صرفاً به بررسی مدت‌زمان حرکت سفر به‌عنوان مدت‌زمان تخلیه پرداخته شده است.

۳-۳-مباحث و مقررات مربوط به حفاظت ساختمان‌ها در برابر حریق و هنگام حادثه

جهت ارتقای سطح ایمنی ساختمان‌ها و پیشگیری از آتش‌سوزی در ایران هم ضوابطی توسط سازمان‌های ذیربط بیان شده است. این ضوابط و مقررات عبارتند از: حفاظت ساختمان‌ها در برابر حریق[۲۷]، راهنمای مبحث سوم حفاظت ساختمان‌ها در برابر حریق[۲۸]، آیین‌نامه محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش[۲۹] و راهنمای آیین‌نامه محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش[۳۰]. جدول ۳ ضوابط و مقررات مربوط به حفاظت مدارس را در برابر حریق نشان می‌دهد. با توجه به نوساز بودن مدرسه مورد مطالعه مستلزم رعایت مبحث ۳ مقررات ملی بوده که موارد زیر و سایر موارد ایمنی در برابر آتش‌سوزی در آن رعایت شده است.

جدول ۲. مقررات مربوط به احداث ساختمان‌های ایمن در برابر آتش‌سوزی

	حداکثر مسیر پیمایش	حداکثر طول بن‌بست	حداکثر مسیر مشترک
طول دسترس خروج بدون شبکه بارنده	۴۶ ۴۶	۶,۱۰ ۱۵	۲۳ ۲۳
طول دسترس خروج با شبکه بارنده	۶۱ ۶۱	۶,۱۰ ۱۵	۳۰ ۳۰
سرانه تصرف در بناهای آموزشی (مترمربع به ازای هر نفر)	کلاس درس ۱/۹ خالص	کارگاه، آزمایشگاه و ... ۴/۶ خالص	

۳-۴- فضای مدرسه و حادثه‌خیزی آن

یکی از مهمترین وظایف در طراحی سیستم‌های حفاظت آتش‌نشانی تخلیه است. این موضوع به‌ویژه برای ساختمان‌های مسکونی و سایر ساختمان‌ها با تعداد بالای سکنه مانند مدارس، بیمارستان‌ها، هتل‌ها و خوابگاه‌ها بیشتر اهمیت دارد[۳۱].

در این بین آتش‌سوزی در مدارس کشور سالانه منجر به مرگ، آسیب جسمی، روانی و اجتماعی بسیاری از دانش‌آموزان می‌شود. در این حوادث تاکنون در کشور ۲۴ دانش‌آموز (۱۳ نفر دختر و ۱۱ نفر پسر) و یک معلم به‌علت آتش‌سوزی جان خود را از دست داده‌اند و علاوه بر این موارد بیش از ۶۰ دانش‌آموز دچار سوختگی شده و یک معلم دچار سوختگی شدید و ناتوانی شده است[۳۲]. بیشتر حوادث در مناطق روستایی رخ‌داده که متاسفانه حدود ۸۰ درصد مدارس حادثه‌دیده روستایی را مدارس ابتدایی تشکیل می‌دهد. بیشترین فراوانی حادثه هم مربوط به استان سیستان و بلوچستان با ۴۲,۸ درصد است. بیشترین علل آتش‌سوزی هم استفاده از وسایل گرمایشی نفتی غیراستاندارد (۷۱,۴درصد) و فرسوده بودن سیستم برق عنوان شده است. نداشتن دانش مقابله با حادثه، نامناسب بودن شرایط فیزیکی ساختمان، نبود پیکربندی مناسب جهت تخلیه، سهل‌انگاری و بی‌احتیاطی هم ازجمله عوامل مهم دیگر بوده که تلفات این گونه حوادث را بالا می‌برند. با توجه به اهمیت موضوع پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده است. از این‌رو تقوایی و خمسه لویی[۳۳] به بررسی مدیریت بحران و تخلیه اضطراری جمعیت در مدارس ناحیه ۲ آموزشی اصفهان پرداخته و نشان دادند که میزان تاب‌آوری مدارس ناحیه ۲ آموزشی اصفهان با توجه به شاخص‌های بنیادین پایین بوده و از طرفی میزان بهره‌مندی مدارس از شاخص‌های مدیریتی ضعیف است. این ضعف مدارس را در بحران‌های احتمالی به‌شدت آسیب‌پذیر و با درنظرگرفتن شاخص‌ها نامناسب، آسیب‌پذیر و بحرانی کرده است. شمسی و همکاران[۳۴] با روش تحلیل نرم‌افزاری به بررسی کارآیی راه‌های خروج ساختمان در تخلیه اضطراری آتش در یکی از مدارس تهران پرداخته و نشان دادند که ارزیابی ویژگی‌های معماری مربوط به ابزارهای فرار ساختمان تنها به‌وسیله ضوابط و مقررات ملی کافی نیست. به همین جهت اقداماتی برای محدودسازی آثار ناگوار مخاطره‌های طبیعی یا غیرطبیعی و کاهش آسیب‌های ناشی از آن انجام می‌شود که به اقدامات سازه‌ای و غیره‌سازه‌ای تقسیم می‌شود[۳۵، ۳۶]. تصاویر

تصویر ۴. نمونه‌ای از مدارس آسیب‌دیده از آتش‌سوزی و زلزله

جدول ۳. سرعت حرکت افراد براساس برخی عوامل مؤثر بر سرعت [۳۹]

سرعت حرکت افراد براساس برخی عوامل مؤثر بر سرعت														
نوع حرکت		شرایط حرکت در راهروها				نوع مکان			نوع افراد					
حرکت آزاد	حرکت خروج	آهسته	بهینه	متوسط	فشار	عمومی	بلندمرتبه	آپارتمان	کودک	زنان	مردان	بزرگسالان	مردان مسن	زنان مسن
۱/۸- ۱/۲	۰/۸- ۱/۵	۱/۴ ۰/۷		۰/۳۹	۰/۱	۱/۰۷	۱/۰۵	۰/۹۵	۱/۰۸	۱/۰۴	۱/۰۵	۱/۰۴	۱/۳	۱/۲۴

زیر (تصویر ۴) مربوط به مدارسی است که در اثر آتش‌سوزی و زلزله دچار آسیب‌های فراوانی شده و جان ساکنان خود را در معرض تهدید قرار داده‌اند.

۳-۵-عوامل مؤثر بر تخلیه اضطراری هنگام حادثه

عواملی که بر مدت‌زمان تخلیه تأثیر می‌گذارد، عبارتند از: ویژگی‌های کاربر و استفاده‌کنندگان از فضا (عوامل انسانی)، ویژگی‌های آتش و ویژگی‌های مربوط به طراحی کالبدی ساختمان (عوامل کالبدی).

۳-۵-۱- عوامل مربوط به استفاده‌کنندگان از فضا

جهت شبیه‌سازی مدل‌های تخلیه لازم است تا ویژگی‌های استفاده‌کنندگان (جنسیت، سن و ...)، اقدامات صورت‌گرفته از آن‌ها در طول تخلیه، تأخیر احتمالی در تخلیه و سرعت عکس‌العمل آن‌ها هنگام تخلیه در پایگاه داده‌های ورودی بررسی و اعمال شود. از جمله این موارد می‌توان به زمان پیش از حرکت[۱۵]، سرعت راه رفتن، ویژگی‌های کاربران فضا (سن، جنس و میزان آشنایی و آگاهی)، اثر انسداد بر مسیر سفر توسط کاربران و تصمیم برای انتخاب خروجی‌ها اشاره کرد [۳۷].

درنظرگرفتن زمان قبل از حرکت در تخلیه امری ضروری است[۳۸]. با توجه به مطالعات انجام‌شده، میانگین زمان‌های قبل از حرکت با توجه به نوع ساختمان بیش از ۱۲۰ ثانیه است. زمان‌های قبل از حرکت در محدوده ۰ تا ۵۴۰ ثانیه بوده که در حوادث مختلف آتش‌سوزی با وجود انواع مختلف افراد حاصل شده است. این متوسط زمان‌های قبل از حرکت در مکان‌های سرگرمی عمومی، دفاتر، مغازه‌ها، مکان‌های تجاری، مدارس، بیمارستان‌ها و خرده‌فروشی‌های بزرگ کاهش می‌یابد [۲۴].

سرعت حرکت عامل مهم دیگری است که در مدل‌های تخلیه به کار گرفته می‌شود و با عوامل بسیاری مانند انواع حرکت، شرایط حرکت، انواع متصرفان و انواع مکان‌ها تغییر می‌کند که در جدول زیر نشان داده شده است.

متغیرهای فیزیکی افراد مانند: عرض شانه، قد، سن و جنسیت هم به‌عنوان یکی دیگر از عوامل مؤثر درنظرگرفته می‌شود که در جدول(۱) به آن اشاره شده است. همچنین میزان آشنایی افراد با مسیرهای تردد هم از عوامل مهم در تشخیص مسیر و فضای خروج بوده که در کاربری‌های آموزشی و بسیاری از کاربری‌های دیگر استفاده‌کنندگان از سطح آگاهی بالایی برخوردار هستند.

۳-۵-۲- عوامل مربوط به ویژگی‌های آتش

این عوامل بیشتر به نوع کاربری فضا و مواد موجود در ساختمان مرتبط هستند که هم مبلمان و مصالح انبارشده در داخل بنا را شامل شده و هم جنس مصالحی که ساختمان با آن بنا شده است. این مواد هم نقش بسزایی در میزان و نوع تولید دود داشته[۱۶] و هم مدت‌زمان حریق و دود حاصل از آن را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند. متاسفانه در بسیاری از مدارس موجود در روستاهای کشور با توجه به وسایل گرمایشی نفتی و غیر استاندارد سالانه شاهد آتش‌سوزی‌های متعددی هستیم که منشأ بسیاری از آن‌ها همان مواد آتش‌زایی است که برای گرمایش بنا استفاده می‌شوند.

۳-۵-۳- عوامل مربوط به ویژگی‌های کالبدی ساختمان

نتایج بسیاری از پژوهش‌ها حاکی از آن است که معماری ساختمان و ارتباط بین فضاها با دسترسی‌های افقی و عمودی همچنین تعداد، ابعاد و موقعیت راه‌های خروج در معماری ساختمان‌ها به‌ویژه در اماکن عمومی نقش حیاتی در تخلیه اضطراری ایفا می‌کند. از این‌رو برخی از راهکارها هم در کاهش مدت‌زمان تخلیه با توجه به طرح معماری تأثیرگذار است که عبارتند از: شاخص و خوانا بودن مسیر ورودی و خروجی و ایجاد خروجی‌های اضطراری متعدد در طبقات؛ ابعاد راه‌پله‌ها برای تسهیل خروج اضطراری به‌ویژه برای فضاهای پرخطر وسیع‌تر از اندازه استاندارد معمول باشد؛ خروج اضطراری برای طبقات همکف تا دوم از طریق پنجره ممکن باش؛ کف مسیرهای حرکتی لغزنده نباشد؛ درب‌ها به‌سمت خارج باز شوند؛ فضاهای حساس

جدول ۴. عوامل کالبدی مؤثر در تخلیه و پژوهش‌های مرتبط با آن

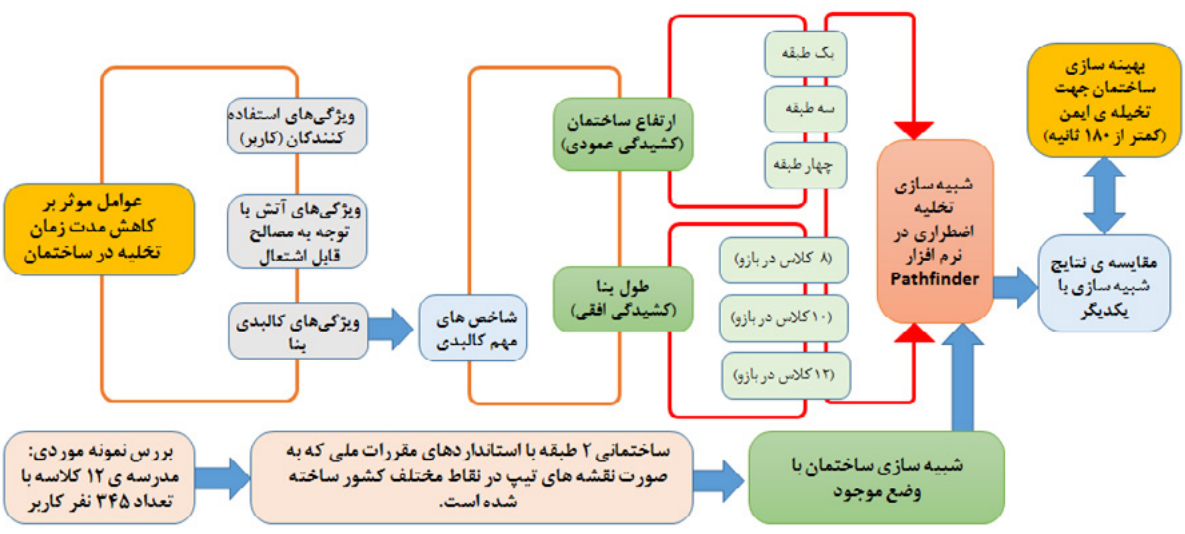
	برخی از عناوین	پژوهش‌های انجام شده
ارتفاع ساختمان	محاسبه زمان تخلیه ساختمان‌های بلند سیستم تخلیه اضطراری ساختمان‌های مرتفع شبیه‌سازی درباره سیستم تخلیه اضطراری عمودی در ساختمان‌های مرتفع تجزیه و تحلیل رفتار تخلیه اضطراری دانش‌آموزان مدرسه مبتنی بر فیلم	- Shi et al., [39] - Zhang et al,. [38] - Kucher et al., [40]. Pauls, J. [41] - Sheeba & Jayaparvathy, [42] - Gu et al., [43]
طول ساختمان	مدل‌سازی عملکرد یک سیستم تخلیه اضطراری هوشمند در ساختمان‌ها بهینه‌سازی طرح با شبیه‌سازی تخلیه اضطراری مدل‌سازی، شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل فرآیند تخلیه در پله‌ها در یک ساختمان	- Ding et al., [44] - Sheeba & Jayaparvathy, [42] - Li et al., [45]

(آزمایشگاه، کتاب‌خانه، تأسیسات) در زیرزمین یا در نهایت سطح همکف بنا شود.

در میان این عوامل ۲ عامل طول و کشیدگی ساختمان و ارتفاع آن از مهمترین عوامل کالبدی بوده که نقش بسزایی در کاهش مدت‌زمان تخلیه دارند. از این‌رو پژوهش‌های فراوانی به این موارد پرداخته که در جدول ۴ به آن اشاره شده و این پژوهش هم به بررسی این ۲ عامل مهم پرداخته است.

۴- روش تحقیق و ابزارها

هنگام وقوع حادثه هر ثانیه از زمان می‌تواند نقشی حیاتی در نجات جان انسان‌ها ایفا کند. اهمیت این موضوع در فضاهایی مانند خوابگاه، بیمارستان و مدارس که تعداد استفاده‌کنندگان از فضا بالاست، بیشتر می‌شود. از این‌رو برای کاهش مدت‌زمان تخلیه در این‌گونه فضاها به شبیه‌سازی تخلیه اضطراری نیاز است. بدین منظور در این مقاله شبیه‌سازی تخلیه انسانی در یک نمونه مدرسه که از نقشه‌های تیپ سازمان‌نوسازی مدارس بوده، صورت گرفته است. جهت دستیابی به مدت‌زمان تخلیه اضطراری در ساختمان مدرسه هم از نرم‌افزار پس‌فایندر استفاده شده که به‌عنوان شبیه‌ساز تخلیه اضطراری مطرح است. مدرسه مورد مطالعه در این پژوهش ۲ طبقه بوده که دارای ۱۲ کلاس درس است. دانش‌آموزان مدرسه را پسران تشکیل داده‌اند که پایه‌های چهارم، پنجم و ششم ابتدایی را شامل می‌شود. به‌طور میانگین هر کلاس ۲۶ تا ۲۹ دانش‌آموز را پوشش داده که مجموع آنها ۳۳۲ نفر می‌شوند. ۱۳ نفر هم به‌عنوان کادر آموزشی (شامل معلمان، ناظم، معاون و مدیر مدرسه) در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های کاربران، ویژگی‌های آتش با توجه به مصالح قابل اشتعال و در نهایت ویژگی‌های کالبدی بنا از جمله عوامل کلیدی بوده که نقش بسزایی را در کاهش مدت‌زمان تخلیه ایفا می‌کنند. از این‌رو با توجه به نقش خاصی که ویژگی‌های کالبدی بنا در کاهش مدت‌زمان خروج ایفا کرده، این پژوهش ۲ شاخص مهم کالبدی شامل ارتفاع ساختمان (کشیدگی عمودی) و طول بنا (کشیدگی افقی) را در نرم‌افزار پس‌فایندر در یک نمونه موردی واقعی سنجیده است. مدت‌زمان تخلیه برای مدرسه یادشده ۱۳۱ ثانیه حاصل شده که این مدت‌زمان در حالت‌های کالبدی گوناگون تدقیق شده و با مدت‌زمان ۱۵۰ ثانیه[۱۷] که مدت‌زمان بهینه برای تخلیه اضطراری بوده، ارزیابی شده و بعد به بهینه‌سازی ساختمان اقدام شده است. تصویر ۵ گام‌های پژوهش را برای بهینه‌سازی ساختمان نشان می‌دهد.



تصویر۵. گام‌های پژوهش

۵- بحث و نتایج

در بخش اول تحلیل‌ها بر حسب افزایش تعداد طبقات صورت می‌گیرد و در بخش دوم هم تحلیل‌ها بر حسب افزایش طول راهرو که افزایش تعداد کلاس‌ها را به همراه دارد، صورت می‌پذیرد.

۵-۱-تحلیل براساس تعداد طبقات

۵-۱-۱- تحلیل مدرسه در وضع موجود (با ۲ طبقه):

وضعیت موجود مدرسه همان ۲ طبقه بوده که در این حالت هم سنجیده شده است. تعداد دانش‌آموزان به همراه کادر آموزشی مدرسه در این وضعیت ۳۴۵ نفر و بیشترین مدت‌زمان تخلیه هم ۱۳۱ ثانیه بوده و همان‌طور که مشخص است، بیشترین تراکم هنگام خروج در راه‌پله اصلی قرار دارد. بیشترین مدت‌زمان تخلیه هم در طبقه اول نسبت به طبقه همکف به‌شدت قابل مشاهده است. گفتنی است که در جدول زیر بیشینه مدت‌زمان خروج هم در طبقه هم‌کف و هم در طبقه اول (ارتفاع ۳٫۸ متر) نشان می‌دهد که مدت‌زمان تخلیه در کلاس‌ها بیشتر از راهروها بوده که این بدان معناست که تعداد زیاد دانش‌آموزان (دانش‌آموزان به همراه معلم) در هنگام خروج از کلاس درس پشت درب خروجی برای تخلیه تجمع می‌کنند و این امر مدت‌زمان تخلیه را به‌شدت بالا می‌برد. از این‌رو به نظر می‌رسد درنظرگرفتن ۲ درب تخلیه برای کلاس تا حد قابل قبولی به تخلیه اضطراری کمک کند. جدول ۵ به بررسی بیشترین مدت خروج و میزان تراکم در مدرسه مورد مطالعه پرداخته است.

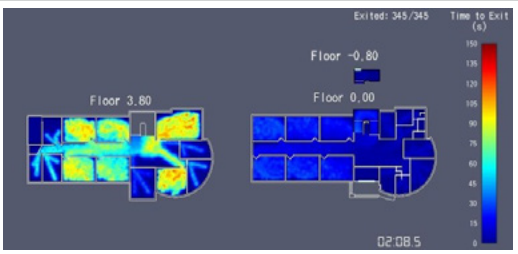
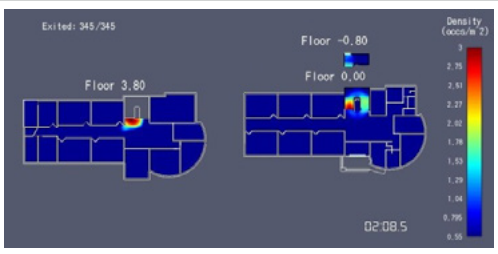
جدول ۶ هم میزان جریان عبوری از درب‌های خروجی و شمار ساکنان خارج‌شده از ساختمان را بر حسب زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، درب اصلی خروجی (با عرض ۴ متری) بیشترین جریان عبوری را داشته (حدود ۱٫۱۵ نفر بر ثانیه) و سپس درب فرعی با جریان عبوری ۰٫۴۶ نفر بر ثانیه است.

۵-۱-۲- تحلیل مدرسه با تعداد طبقات مختلف

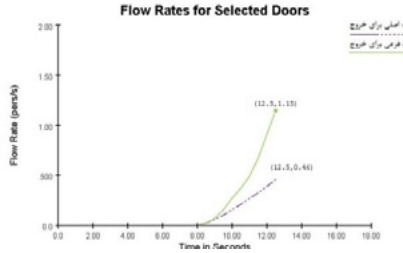
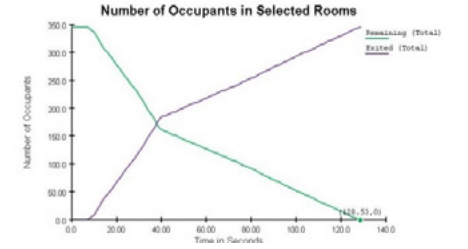
پس از بررسی وضع موجود مدرسه که ۲ طبقه بوده، با توجه به هدف پژوهش لازم است تا مدرسه با طبقات مختلف شبیه‌سازی شود. از این‌رو جدول زیر به بررسی بیشترین مدت‌زمان لازم برای تخلیه اضطراری و تراکم استفاده‌کنندگان در مدرسه مورد مطالعه می‌پردازد. همان‌طور که مشخص است، در حالت ۳ طبقه با توجه به تراکم بسیار بالا (که میانگین تراکم در پله ارتباطی بین طبقه اول و دوم به ۵ نفر در متر مربع هم می‌رسد) سرعت تخلیه به‌شدت کاهش یافته و مدت‌زمان خروج کامل ساختمان به‌شدت افزایش می‌یابد. نتیجه‌ی این اتفاق بدین شکل است که با بررسی بیشترین مدت‌زمان تخلیه در حالت ۳ طبقه هر ۶ کلاس موجود در طبقه سوم بیش از ۱۵۰ ثانیه را برای خروج اضطراری لازم دارد که در ناایمن‌ترین نقطه قرار داشته و مدت‌زمان تخلیه را به ۲۱۷٫۵ ثانیه می‌رساند. در وضعیت ۴ طبقه هم تراکم بسیار بالا در دسترسی عمودی ساختمان (در پله ارتباطی بین طبقه دوم و سوم تراکم ۵٫۲ نفر بر متر مربع و در پله ارتباطی اول و دوم با تراکم ۵٫۴ نفر بر متر مربع) باعث شده تا مدت‌زمان تخلیه به ۳۰۷٫۸ ثانیه افزایش یابد که در طبقه دوم و سوم بالاترین سطح ناامنی را (با توجه به آنکه تمامی فضاها بالای ۱۵۰ ثانیه را جهت تخلیه نیاز دارند) دارد(جدول۷).

تصویر ۶ هم مدت تخلیه ساختمان را با تعداد طبقات متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشهود است، در وضعیت موجود همان ۲ طبقه برای این ساختمان مناسب است و در صورت افزایش تعداد طبقات لازم است تا با راهکارهایی (مانند ایجاد پله

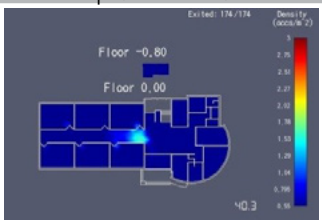
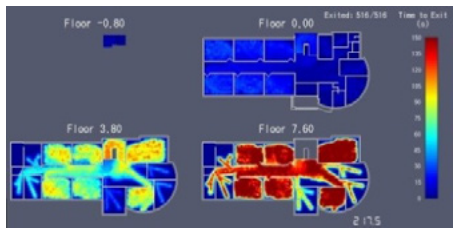
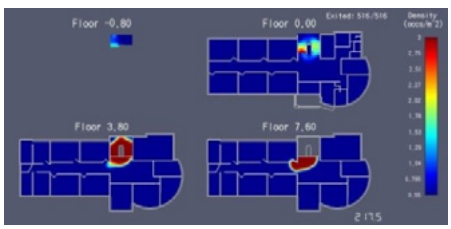
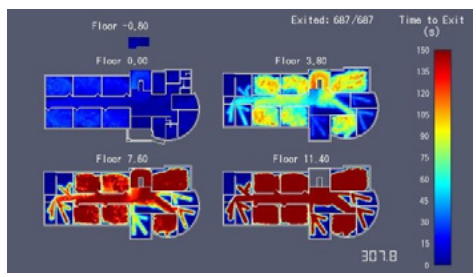
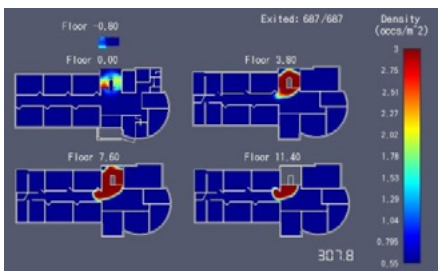
جدول ۵. بررسی بیشترین مدت خروج و میزان تراکم در مدرسه با وضع موجود

	بیشترین مدت‌زمان خروج در مدرسه ۲ طبقه	میزان میانگین تراکم در مدرسه ۲ طبقه
پلان‌های مورد تحلیل		

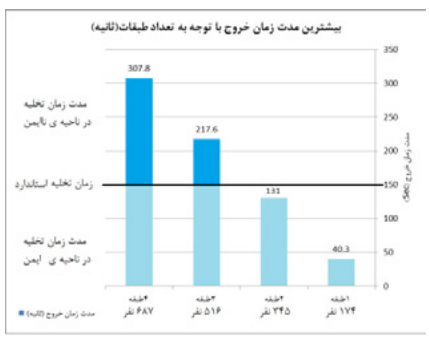
جدول ۶. میزان جریان عبوری از درب‌های خروجی و شمار ساکنان خارج‌شده از ساختمان

میزان جریان عبوری از درب‌های خروجی بر حسب زمان	شمار ساکنان خارج‌شده از ساختمان بر حسب زمان
	

جدول ۷. بیشترین مدت‌زمان خروج و میانگین تراکم در ساختمان مدرسه با تعداد طبقات مختلف

	بیشترین مدت‌زمان خروج	میزان میانگین تراکم
مدرسه تک‌طبقه		
مدرسه ۳ طبقه		
مدرسه ۴ طبقه		

تعداد طبقات	تعداد کاربر (نفر)	مدت زمان خروج (ثانیه)
۱طبقه	174	40.3
۲طبقه	345	131
۳طبقه	516	217.6
۴طبقه	687	307.8

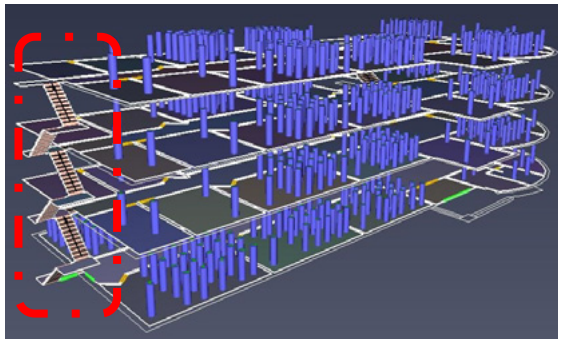


تصویر ۶. مقایسه عددی بین مدت‌زمان‌های تخلیه در حالت‌های مختلف با زمان تخلیه استاندارد

فرار و ...) تراکم افراد در ساختمان را در راه‌پله کاهش داد تا بدین طریق مدت‌زمان تخلیه اضطراری را کاهش داد.

۵-۱-۳- بهینه‌سازی با توجه به افزایش تعداد طبقات

بعد از آنکه مشاهده شد، ساختمان مدرسه در حالت‌های ۲ طبقه و ۳ طبقه مدت‌زمان بالایی را برای تخلیه لازم دارد، به نظر رسید که استفاده از راه‌پله جدا (پله اضطراری) می‌تواند در کاهش مدت‌زمان تخلیه مفید واقع شود. از این‌رو با استفاده از پله اضطراری مدت‌زمان تخلیه را در حالت ۴ طبقه از ۳۰۷٫۸ ثانیه به ۲۴۹٫۵ ثانیه پایین آورده که این مقدار هم در حاشیه امن قرار ندارد. از این‌رو پیشنهاد می‌شود، چنین ارتفاعی برای ساخت مدارس (بدون استفاده از تمهیدات لازم برای تخلیه و راه‌های ارتباطی عمودی مناسب) به‌کارگرفته نشود. در حالت ۳ طبقه هم از ۲۱۷٫۶ ثانیه به مدت ۱۷۴٫۲ ثانیه کاهش یافته که این زمان به‌دلیل نزدیکی به ۱۵۰ ثانیه (توسط ژانگ[۱۸] مدت‌زمان ۱۸۰ ثانیه برای مدارس، خوابگاه‌ها و فضاهای پرجمعیت پیشنهاد شده) قابل چشم‌پوشی است و تا حدود زیادی در حاشیه ایمنی قرار گرفته است. تصویر ۷ نحوه نصب پله اضطراری را برای تخلیه دانش‌آموزان نشان می‌دهد.



تصویر ۷. محل و نحوه نصب پله اضطراری در پلان طبقات مدرسه برای بهینه‌سازی

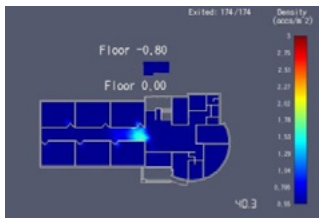
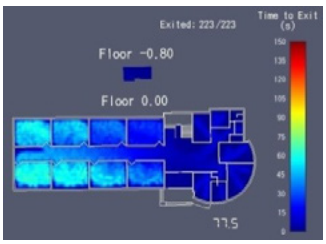
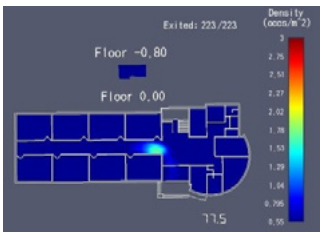
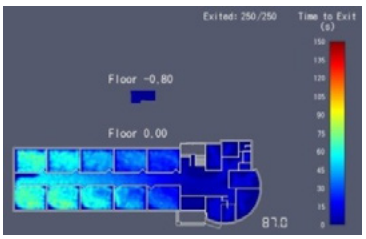
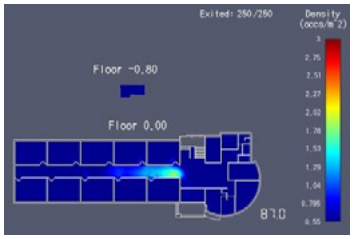
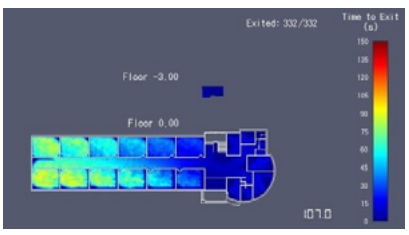
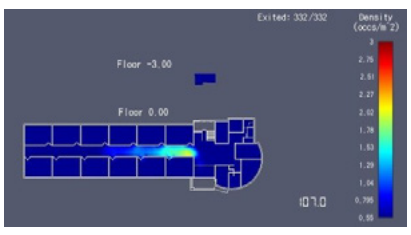
۵-۲- تحلیل براساس افزایش طول ساختمان

در این بخش به جای افزایش ارتفاع به افزایش طول ساختمان پرداخته و مدت‌زمان تخلیه را در ساختمان با طول‌های مختلف می‌سنجیم. در همین راستا ساختمان با وضعیت موجود که در راهروی اصلی خود ۶ کلاس داشته را در ۲ حالت دیگر (یکی با ۸ کلاس در مسیر خود و دیگری با ۱۰ کلاس) ارزیابی می‌کنیم. جدول زیر به بررسی بیشترین مدت‌زمان لازم برای تخلیه اضطراری و تراکم استفاده‌کنندگان در مدرسه مورد مطالعه در وضعیت ۱ طبقه می‌پردازد. با توجه به نتایج حاصل از نرم‌افزار کشیدگی راهروها کمترین تأثیر را در افزایش تراکم نسبی و افزایش مدت‌زمان تخلیه اضطراری در ساختمان به‌ویژه در راهروها داشته؛ به نحوی که در حالت یک طبقه با ۱۰ کلاس در راهروها جمعیت ۲۵۰ نفری در مدت‌زمان ۸۷ ثانیه‌ای تخلیه می‌شود (جدول۸). در حالت یک‌طبقه با ۱۲ کلاس در راهروها هم جمعیت ۳۳۲ نفری در مدت‌زمان ۱۰۷ ثانیه تخلیه می‌شود.

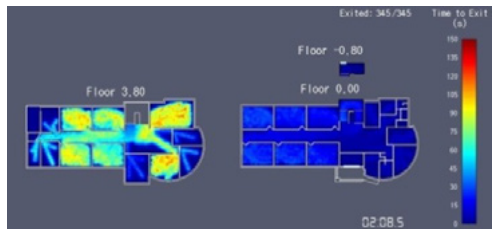
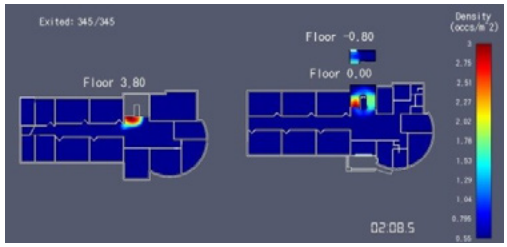
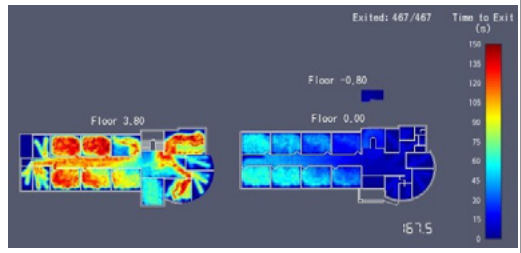
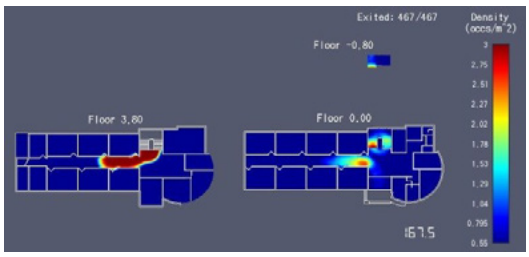
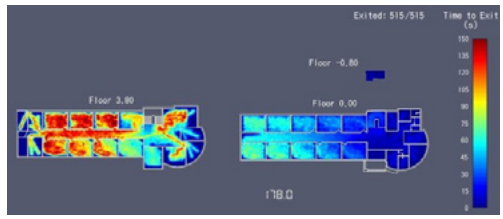
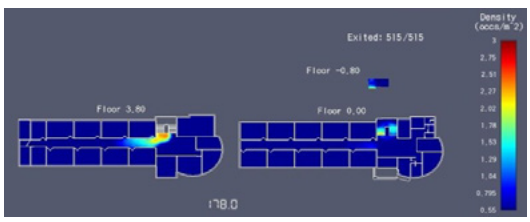
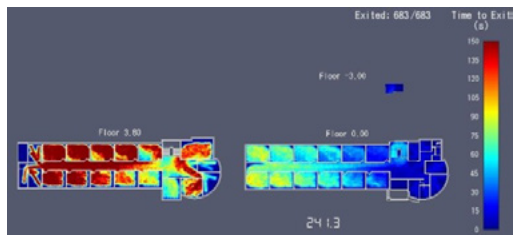
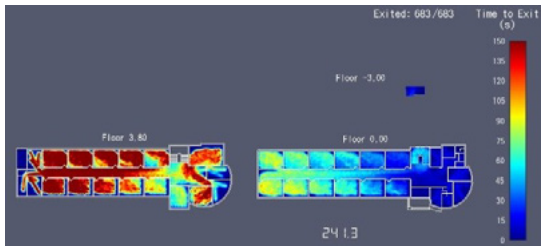
در وضعیت ساختمان با ارتفاع ۲ طبقه هم به افزایش طول راهروها برای سنجش مدت‌زمان لازم برای تخلیه اقدام شد. نتایج مطابق جدول زیر نشان داد، در حالتی که در راهروی اصلی ۸ کلاس وجود دارد، مدت‌زمان لازم برای تخلیه ۴۶۷ نفر کاربر حدود ۱۶۷ ثانیه بوده و در حالتی که ۱۰ کلاس در طول راهرو قرار دارد هم مدت‌زمان لازم برای تخلیه ۵۱۵ نفر کاربر حدود ۱۷۸ ثانیه است.

همان‌طور که مشخص است، افزایش طول راهروها نسبت به افزایش ارتفاع تأثیر اندکی در افزایش تراکم ساختمان به‌ویژه در راه‌پله‌ها داشته و به همین علت مدت‌زمان تخلیه را نسبت به افزایش ارتفاع کمتر تحت‌الشعاع قرار می‌دهد.

جدول ۸. بیشترین مدت‌زمان خروج و میانگین تراکم در ساختمان مدرسه با طول‌های مختلف (یک‌طبقه)

	بیشترین مدت‌زمان خروج	میزان میانگین تراکم
مدرسه یک‌طبقه (۶ کلاس در بازو)		
۴۰/۳ ثانیه لازم است تا همه ۱۷۴ نفر تخلیه شوند.		
مدرسه ۱ طبقه (۸ کلاس در بازو)		
۷۷/۵ ثانیه لازم است تا همه ۲۲۳ نفر تخلیه شوند.		
مدرسه ۱ طبقه (۱۰ کلاس در بازو)		
۸۷ ثانیه لازم است تا همه ۲۵۰ نفر تخلیه شوند.		
مدرسه یک‌طبقه (۱۲ کلاس در بازو)		
۱۰۷ ثانیه لازم است تا همه ۳۳۲ نفر تخلیه شوند.		

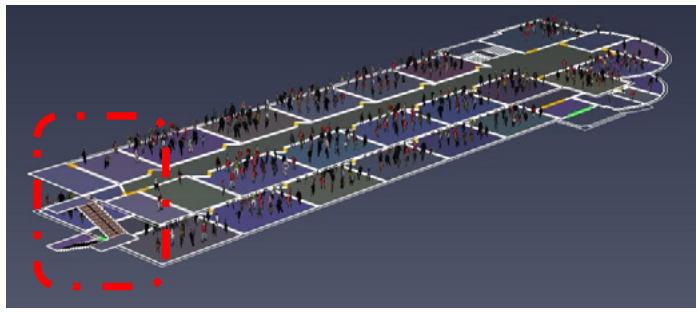
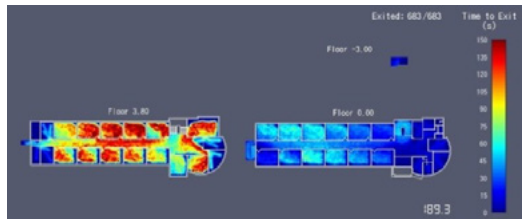
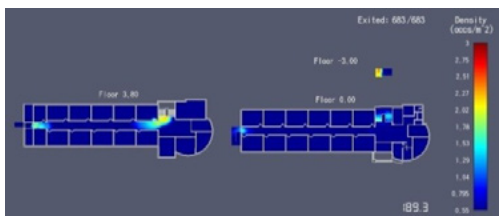
جدول ۹. بیشترین مدت‌زمان خروج و میانگین تراکم در ساختمان مدرسه با طول‌های مختلف (۲ طبقه)

	بیشترین مدت‌زمان خروج	میزان میانگین تراکم
مدرسه ۲ طبقه (۶کلاس در بازو)		
	۱۳۱ ثانیه لازم است تا همه ۳۴۵ نفر تخلیه شوند.	
مدرسه ۲ طبقه (۸کلاس در بازو)		
	۱۶۷/۵ ثانیه لازم است تا همه ۴۶۷ نفر تخلیه شوند.	
مدرسه ۲ طبقه (۱۰کلاس در بازو)		
	۱۷۸ ثانیه لازم است تا همه ۵۱۵ نفر تخلیه شوند.	
مدرسه ۲ طبقه (۱۲کلاس در بازو)		
	۲۴۱،۳ ثانیه لازم است تا همه ۶۸۳ نفر تخلیه شوند.	

۵-۲-۱- بهینه‌سازی با توجه به افزایش طول ساختمان

بعد از بررسی ساختمان مدرسه در حالت ۱۲ کلاس در بازوی اصلی و ثبت زمان بالای ۲۴۱،۳ ثانیه لازم شد تا برای کاهش مدت‌زمان تخلیه به بهینه‌سازی کالبدی ساختمان اقدام شود. از این‌رو با استفاده از پله اضطراری مدت‌زمان تخلیه را در حالت ۱۲ کلاس در بازوی اصلی(که تعداد۶۸۳ کاربر را پوشش می‌دهد) از ۲۴۱،۳ ثانیه به ۱۸۹،۳ ثانیه پایین آورده که این مقدار هم تا حدودی در حاشیه امن قرار دارد (مدت‌زمان ۱۸۰ ثانیه توسط ژانگ برای مدارس، خوابگاه‌ها و فضاهای پرجمعیت پیشنهاد شده است). جدول ۱۰ مدرسه را با بیشترین طول ممکن و در حالت بهینه‌سازی‌شده نشان می‌دهد.

جدول ۱۰.نحوه بهینه‌سازی مدرسه با ایجاد پله اضطراری در انتهای راهرو

قرارگیری راه‌پله در انتهای ساختمان مدت‌زمان تخلیه را از ۲۴۱،۳ ثانیه به ۱۸۹،۳ ثانیه کاهش داده است. (محل راه‌پله با خط چین قرمز نشان داده شده است.)	
	

نتیجه‌گیری

آنچه که مدت‌زمان تخلیه در ساختمان را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد، ۳ عامل ویژگی‌های کاربران، ویژگی‌های آتش با توجه به مصالح قابل اشتعال و در نهایت امر ویژگی‌های کالبدی بناست. از این‌رو با توجه به نقش و اهمیت خاصی که ویژگی‌های کالبدی بنا در کاهش مدت‌زمان خروج ایفا کرده، این پژوهش ۲ شاخص مهم کالبدی، شامل ارتفاع ساختمان (کشیدگی عمودی) و طول بنا (کشیدگی افقی) را در نرم‌افزار پس‌فایندر در نمونه موردی واقعی مورد سنجش قرار داد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در حالتی که طول ساختمان در وضع موجود تغییر نکرده، اما ارتفاع ساختمان از ۲ طبقه (با تعداد ۳۴۵ دانش‌آموز و مدت‌زمان تخلیه ۱۳۱ ثانیه) به ۳ طبقه (با تعداد ۵۱۶ دانش‌آموز) و سپس ۴ طبقه (با تعداد ۶۸۷ دانش‌آموز) افزایش یافته، مدت‌زمان تخلیه را به ترتیب ۲۱۷،۶ ثانیه و ۳۰۷،۸ ثانیه بالا برده که ساختمان را از نظر امنیت خروج در برابر حادثه در شرایط بسیاربحرانی قرار داده است. سپس در گام بعد ارتفاع ساختمان را ثابت نگه داشته و به جای آن اقدام به تغییر طول ساختمان شده است. در همین راستا یک‌بار طول ساختمان با ۱۰ کلاس در طول بازوی اصلی (با تعداد ۵۱۵ دانش‌آموز) و بار دیگر با ۱۲ کلاس در طول راهروی اصلی (با تعداد۶۸۳ دانش‌آموز) سنجیده شد. مدت‌زمان تخلیه هم در حالت ۱۰ کلاس به ۱۷۸ ثانیه (در حالت امن) و در حالت ۱۲ کلاس به ۲۴۱،۳ ثانیه (حالت غیرایمن) افزایش داشته است. طرح‌های بهینه‌سازی‌شده از طریق ایجاد پله دسترسی (پله اضطراری انتهای راهرو) هم نشان داد که مدت‌زمان تخلیه در مدرسه با ۴ طبقه از ۳۰۷،۸ ثانیه به ۲۴۹،۵ ثانیه پایین آمده که این مقدار هم در حاشیه امن قرار ندارد. اما مدرسه با طول ۱۲ کلاس در بازوی اصلی مدت‌زمان تخلیه را از ۲۴۱،۳ ثانیه به ۱۸۹،۳ ثانیه پایین آورده که این مقدار هم تا حدودی در حاشیه امن قرار دارد (مدت‌زمان ۱۸۰ ثانیه توسط ژانگ برای مدارس، خوابگاه‌ها و فضاهای پرجمعیت پیشنهاد شده است).

به‌طور کلی می‌توان چنین برداشت کرد که افزایش طول به میزان قابل توجهی مدت‌زمان تخلیه را نسبت به افزایش ارتفاع ساختمان (معادل همان تعداد کاربر) کاهش داده و پیشنهاد می‌شود، در ساختمان‌هایی که تعداد استفاده‌کنندگان بالا بوده، حتی‌المقدور از افزایش ارتفاع خودداری کرده و در صورت امکان به گسترش افقی ساختمان اقدام کنند. این پژوهش تنها به بررسی نقش ارتفاع و طول ساختمان پرداخته که سایر پژوهش‌ها می‌توانند مؤلفه‌های دیگر را هم تحت سنجش قرار دهند.

پی‌نوشت

1 . Pathfinder
2 . FSA
3 . NIST: National Institute of Standards and Technology
4 . Fang
5 . Recognition Time
6 . Reaction Time
7 . Egress Time

۸ . زمان موجود برای تخلیه یا فرار Available Safe Egress /Escape Time (ASET /TSE)) و زمان موردنیاز برای تخلیه/ فرار Required Safe Egress / Escape Time (RSET) ۲ مفهوم کلیدی در تخلیه هستند.

- زمان موجود برای تخلیه (Tse)- زمان لازم برای تخلیه یا زمان خروج -(Tex) زمان کشف آتش (Tdet) - زمان هشدار (Ta) - زمان پیش از حرکت (Tpre) -زمان حرکت (Ttrav).
- زمان تخلیه (Tev) = زمان‌های پیش از حرکت (Tpre) و زمان حرکت (Ng & Chow) (Ttrav, ۲۰۰۶). رابطه زیر بین زمان‌های گفته‌شده برقرار است:

Tse > Tex = Tdet + Ta + Tev = Tdet + Ta + Tpre + Ttrav

9 . Tex

10 . Tdet

11 . Ta

12 . Tpre

13 . Ttrav

14 . Tev

۱۵ . مردم هنگام آگاه شدن از وضعیت اضطراری واکنش سریع از خود نشان نمی‌دهند. بنابراین زمان اتلاف میان زمانی که به مردم برای نخستین بار درباره یک حادثه هشدار داده می‌شود و زمانی که آنها شروع به ترک محل می‌کنند، شامل زمانی است که افراد برای تخلیه آماده می‌شوند (میر سعیدی و شمس، ۱۳۹۷).

۱۶ . بیش از ۸۸ درصد از مرگ و میرهای حاصل از آتش‌سوزی به علت خفگی حاصل از دود است.

۱۷ . این مقدار در فضاهای پر تراکم توسط ژانگ ۱۸۰ ثانیه هم پیشنهاد شده است.

18 . ZHANG

منابع:

1. Spearpoint, M. J. (2012). Network modeling of The Station Nightclub fire evacuation. *Journal of fire protection engineering*, *22*(3), 157-181.
2. Joo, J., Kim, N., Wysk, R. A., Rothrock, L., Son, Y. J., Oh, Y. G., & Lee, S. (2013). Agent-based simulation of affordance-based human behaviors in emergency evacuation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *32*, 99-115.
3. Alizadeh, R. (2011). A dynamic cellular automaton model for evacuation process with obstacles. *Safety Science*, *49*(2), 315-323.
4. Ma, J., Lo, S. M., & Song, W. G. (2012). Cellular automaton modeling approach for optimum ultra high-rise building evacuation design. *Fire Safety Journal*, *54*, 57-66.
5. Wei, Y. F., Shi, W., & Song, T. (2012). Approach to effect of obstacle on pedestrian evacuation with a small-grid lattice gas model. *Procedia Engineering*, *31*, 1077-1082.
6. Guo, X., Chen, J., You, S., & Wei, J. (2013). Modeling of pedestrian evacuation under fire emergency based on an extended heterogeneous lattice gas model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *392*(9), 1994-2006.
7. Ezaki, T., Yanagisawa, D., Ohtsuka, K., & Nishinari, K. (2012). Simulation of space acquisition process of pedestrians using proxemic floor field model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *391*(1-2), 291-299.
8. Xie, D. F., Gao, Z. Y., Zhao, X. M., & Wang, D. Z. W. (2012). Agitated behavior and elastic characteristics of pedestrians in an alternative floor field model for pedestrian dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *391*(7), 2390-2400.
9. Zheng, X., Zhong, T., & Liu, M. (2009). Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment*, *44*(3), 437-445.
10. Fang, Z. M., Song, W. G., Zhang, J., & Wu, H. (2012). A multi-grid model for evacuation coupling with the effects of fire products. *Fire Technology*, *48*(1), 91-104.
11. Weng, W. G., Pan, L. L., Shen, S. F., & Yuan, H. Y. (2007). Small-grid analysis of discrete model for evacuation from a hall. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *374*(2), 821-826.
12. Zheng, Y., Jia, B., Li, X. G., & Zhu, N. (2011). Evacuation dynamics with fire spreading based on cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *390*(18-19), 3147-3156.
13. Thunderhead Engineering, (2012). Technical Reference of Pathfinder.
14. Thunderhead Engineering,(2011). User Manual of Pathfinder.
15. Ding, Y., & Yang, L. (2013). Occupant evacuation process study of public buildings based on computer modeling and simulation. *Journal of applied fire science*, *23*(3), 365-380.
16. Bao, Y. Q. (2011). Study on fire prevention performance-based design of a large underground banquet hall. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 94, pp. 2065-2069). Trans Tech Publications Ltd.
17. Fang, T., Yu, J., & Wang, J. (2012). Study of staircase design effects on evacuation in architectural plane design. *Journal of applied fire science*, *22*(1), 69-80.
18. Lei, W., Li, A., Gao, R., & Wang, X. (2012). Influences of exit and stair conditions on human evacuation in a dormitory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *391*(24), 6279-6286.
19. Korhonen, T. (2018). Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac, *Technical Reference and User's Guide (FDS 6.1.0, Evac 2.5.0, draft), VTT Technical Research Centre of Finland*,.

۲۰. طارقیان، حامدرضا (۱۳۸۳). مدل‌سازی تخلیه اضطراری با رویکرد شبیه‌سازی موازی، *مجله دانش و توسعه*، (۱۵)، صص ۲۵-۴۶.

21. Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99, 7280–7287.
22. Ebrahimi, Samira. (2009). The role of navvab express way in the evacuation of view of passive defense, thesis in the field of civil engineering (Supervisor: Dr. Seyed Behshid Husseini), University of Arts, School of Architecture and Urban Planning.
23. Conca, A., & Vignolo, M. G. (2012). Pedestrian flow analysis in emergency evacuation. In *of the Euro Working Group on Transportation International Scientific Conference*.

۲۴. میرسعیدی, لیلا و شمس، آزاده (۱۳۹۶). تبیین عوامل مؤثر بر تخلیه اضطراری ساختمان در آتش‌وزی، *فصل‌نامه دانش پیشگیری و مدیریت بحران*، ۸ (۱)، دورهٔ هشتم، شمارهٔ اوّل، صص ۴۳-۵۳.

25. Ng, C.M., & Chow, W.K. (2006). A Brief Review on the Time Line Concept in Evacuation. *International Journal on Architectural Science*, 7(1), 1-13
26. Ko, S.Y. (2003). *Comparison of Evacuation Times Using Simulex and Evacuationz based on Trial Evacuations.*
27. Doctoral Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

۲۸. وزارت راه و شهرسازی، دفتر امور مقررات ملی ساختمان، (۱۳۸۰). *حفاظت*

ساختمان‌ها در برابر حریق: مبحث سوم مقررات ملی ساختمان، تهران: انتشارات وزارت راه و شهرسازی، دفتر مقررات ملی ساختمان.

۲۹. وزارت راه و شهرسازی، دفتر امور مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲). *راهنمای مبحث سوم حفاظت ساختمان‌ها در برابر حریق*، تهران، انتشارات وزارت راه و شهرسازی- دفتر مقررات ملی ساختمان.

۳۰. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، (۱۳۸۹). آیین نامه محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش(پیشنهادی)، تهران، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (نشریه شماره ض۴۴۴ ، چاپ سوم).

۳۱. بختیاری، سعید، مجیدزمانی، سهیل، قاسم زاده، قاسم‌زاده، مسعود و تسنیمی، عباسعلی. (۱۳۸۹). راهنمای آیین‌نامه محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش، تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

32. Jevtić, R. B. [2015]. The simulation of sanitary objects evacuation: An example of hotel 'Radon' in Niška Banja. *Tehnika*, 70(3), 545-550.

۳۳. رضابیگی داورانی, عصمت، کیارسی، مریم و دانشی، سلمان (۱۳۹۸). علل و پیامدهای حوادث آتش‌سوزی در مدارس ایران طی مهروموم‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۷، *نهمین کنگره بین‌المللی سلامت در حوادث و بلایا*، تهران، وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی.

۳۴. تقوایی، مسعود و جوزی خمسلویی، علی (۱۳۸۹). مدیریت بحران شهری و تخلیه اضطراری جمعیت در مدارس ناحیه ۲ آموزشی کلانشهر اصفهان، *مطالعات مدیریت شهری*، دوره۱۰ , شماره ۳۴ #۰۰۶۳۸g۲۷-۴۴ .

۳۵. شمسی، آزاده، میر سعیدی، لیلا و فرخ زاد، کیوان. (۱۳۹۵). بررسی کارآیی راه‌های خروج ساختمان در تخلیه اضطراری آتش به روش تحلیل نرم‌افزاری (نمونه موردی: یک مدرسه در تهران)، نشریه معماری و شهرسازی ایران، شماره ۱۲، ۵-۱۴.

۳۶. بشیری، مهسا و خواجه‌ای، سایما (۱۳۹۲). کاهش آسیب‌پذیری زلزله و خطر آتش‌سوزی در خوابگاه‌های دانشجویی مطالعه‌ی موردی: خوابگاه متأهلان دانشگاه شهید بهشتی، *دوفصل‌نامه علمی و پژوهشی مدیریت بحران*، شماره سوم، صص ۱۵-۲۵.

۳۷. فلاحی، علیرضا (۱۳۹۳). کاهش آسیب‌پذیری خوابگاه‌های دانشجویی دانشگاه شهید بهشتی در برابر آتش‌سوزی و زلزله، *صفه*، دوره ۲۴، شماره ۶۷ ; صص ۷۷-۱۰۰.

38. Fahy, R. (2005). available data and input in to models , MD, Peacock, R. D. Kuligowski, E. D., Workshop on Building Occupant Movement During Fire Emergencies, NIST SP 1032, Gaithersburg, pages 62-67. fire.nist.gov/bfrlpubs/fire05/PDF/ f05023.pdf.

39. Zhang, J., Song, W., & Xu, X. (2008). Experiment and multi-grid modeling of evacuation from a classroom. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *387*(23), 5901-5909.

40. Shi, L., Xie, Q., Cheng, X., & Zhang, R.(2009). Developing a data base for emergency evacuation model, *Building and Environment*,44(8), Pages 1724-1729.

41. Kucher, A., Krasnov, I., & Bromberg, Y. (1987). *U.S. Patent No. 4,640,384*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

42. Pauls, J. (1987). Calculating evacuation times for tall buildings. *Fire Safety Journal*, 12(3), 213-236.

43. Sheeba, A. A., & Jayaparvathy, R. (2019). Performance modeling of an intelligent emergency evacuation system in buildings on accidental fire occurrence, *Safety science*, 112, 196-205.

44. Gu, Z., Liu, Z., Shiwakoti, N., & Yang, M. (2016). Video-based analysis of school students' emergency evacuation behavior in earthquakes, *International journal of disaster risk reduction*, 18, 1-11.

45. Ding, N., Zhang, H., & Chen, T. (2017). Simulation-based optimization of emergency evacuation strategy in ultra-high-rise buildings. *Natural hazards*, *89*(3), 1167-1184.

46. Li, W., Li, Y., Yu, P., Gong, J., Shen, S., Huang, L., & Liang, J. (2017). Modeling, simulation and analysis of the evacuation process on stairs in a multi-floor classroom building of a primary school. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 469, 157-172.