بررسی کارآیی راه‌های خروج ساختمان در تخلیه اضطراری آتش به روش تحلیل نرم‌افزاری*

(نمونه موردی: یک مدرسه در تهران)

آزاده شمسی[۱]، لیلا میرسعیدی[۲] (نویسنده مسئول)، کیوان فرخ‌زاد[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۰۶

چکیده

تاخیر چند دقیقه‌ای درتخلیه کاربران در حوادث، به ویژه درساختمانهای آموزشی به دلیل حجم بالای جمعیت اثر قابل توجهی درافزایش خسارت جانی دارد. بدین منظور تعداد و موقعیت راههای خروج این ساختمانها باید متناسب باشد تا امکان تخلیه را درزمان مناسب فراهم کند. هدف از این مقاله بررسی خروجی‌های یک ساختمان آموزشی در تدارک مسیر خروج مناسب می‌باشد. در این پژوهش با دو روش کارآیی ابزارهای فرار در ساختمان های آموزشی بررسی شده است؛ ابتدا زمان‌های خروج اضطراری با مدلسازی رفتاردانش آموزان (به وسیله نرم‌افزار شبیه ساز) تخمین زده می‌شود و با مقایسه نتایج حاصل با زمان مورد نیاز برای تخلیه ساختمان برآوردی از کارآیی ابزارهای خروج به دست می‌آید. در روش دوم کارآیی راههای خروج مدرسه با معیار ضوابط و مقررات ایمنی ساختمان در برابر آتش بررسی می‌گردد. مقایسه نتایج حاصل از دو شیوه یاد شده امکان تایید این فرضیه را فراهم کرده است که رابطه مستقیمی بین تعداد، ابعاد و موقعیت راه‌های خروج با زمان خروج امن کاربران در مواقع بحران وجود دارد. نتایج حاصل شیوه‌ای در ارزیابی عملکرد پلان معماری ارائه داده است که می‌تواند افزایش دقت تصمیمات مدیریتی در وضعیت پاسخگویی بناها در موارد بحران را به همراه آورد. نتایج نشان می‌دهد ارزیابی ویژگی‌های معماری مربوط به ابزارهای فرار ساختمان تنها به وسیله ضوابط و مقررات ملی کافی نیست. در نهایت پیشنهاداتی در زمینه دستیابی به مسیرهای فرار مناسب در مدارس ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی

تخلیه اضطراری، راه‌های خروج، ضوابط و استانداردها، نرم‌افزار پس فایندر، آتش‌سوزی.

۱. کارشناس ارشد معماری، دانش‌آموخته دانشکده هنر و معماری دانشگاه یزد

۲. دکترای معماری، استادیار دانشکده معماری، واحد گنبد کاووس، دانشگاه آزاد اسلامی، گنبد کاووس، ایران

۳. کارشناس ارشد معماری، دانش آموخته دانشکده هنر پردیس اصفهان، دانشگاه هنر

* این مقاله برگرفته از پژوهشی با عنوان "طراحی راه‌های خروج اضطراری برای خروج از ساختمان در طول تخلیه اضطراری آتش (نمونه موردی یک مدرسه دولتی در تهران)" می‌باشد که با حمایت مادی و معنوی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (Iran National Foundation) در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ انجام شده است.

۱. مقدمه

فرار سریع و عملیات نجات در ساختمان هایی با تعداد محدودی نقاط دسترسی به سطح خیابان (از جمله ساختمانهای آموزشی) امری مشکل است. تراکم بالای جمعیت نیز مشکلات کنترل شرایط را در هنگام وقوع بحران دو چندان می‌کند. مکان‌یابی صحیح مسیرهای خروج باید براساس محاسبه دقیق بازه‌های زمان خروج بوده و ابعاد خروجی‌های اضطراری متناسب با حجم تردد استفاده‌کنندگان در زمان بحران پیش‌بینی شود. این در حالی است که اطلاعات مربوط به این حوادث معمولا در دسترس نیست و سناریوهایی که به کاهش خسارت برای ساختمانها می‌انجامد، کمتر پیش‌بینی شده است (محمدی، ۱۳۸۵، ۲). شناسایی رفتاردانش آموزان درمواقع بحران و ینی چگونگی خروج آنها به مکان‌های امن، می‌تواند در مدیریت نجات افراد نقش مهمی ایفا کند. در سالهای اخیر سیاست مسکن کشور ساخت مجتمع‌های مسکونی متعددی را در زمان کوتاه در دستور کار خود قرار داد (مسکن مهر) که تامین مجموعه‌های آموزشی اولیه را نیز در برمی‌گرفت. نمونه موردی پس از بررسی اجمالی تیپهای رایج مدارس درسالهای اخیر از نمونه‌های موفق طراحی مدارس در ایران برگزیده شد که بسیاری از ضوابط و مقررات ملی را در زمینه آتش سوزی رعایت گردیده است. لازم به ذکر است نقشه تیپ مدرسه مورد بررسی در چندین منطقه استان تهران از جمله مدرسه راهنمایی در پروژه مسکن مهرآباد رودهن اجرا شده است. در این نوشتار کارآیی راههای خروج، براساس معیار پاسخگویی به استانداردها و ضوابط آموزشی و همچنین رفتارکاربران (ساماندهی اطلاعات مربوط به آنها دربازه‌های زمانی از جمله زمان‌های صف‌بندی و زمانهای انتظار) مورد توجه بوده است. این امر می‌تواند به ارائه راهکارهایی در جهت اتخاذ تصمیمات موثر در طراحی و تصحیح استانداردها در طراحی پلانهای معماری و در جهت کاهش خطرات ناشی از تراکم جمعیت عبورکننده منجر شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مطالعه درباره تخلیه اضطراری ساختمان در قرن بیستم آغاز شد، هنگامی که تمرکز اصلی بر حرکت مردم در راهروها، پله‌ها و دربها بود. چند محقق، از جمله براکسما، هبیچد، میلینسکی، پردتتشنسکی، فرون، پاولس[1] اطلاعات دقیقی در مورد تراکم ساکنین و سرعت سفر جمع آوری کردند. یافته‌هایشان تاثیر عمده‌ای بر رویکرد فعلی به مقررات ایمنی ساختمان در برابر آتش در سراسر جهان گذاشت. به طور خاص، یافته هایشان به حداقل عرض راه پله تخلیه، حداکثر ظرفیت دبی جریان برای خروجی‌های آتش، تعداد مورد نیاز خروجی‌های آتش، و سایر راه حل‌های خاص معماری منجر شده است. در پایان قرن بیستم، تفسیر ایمنی آتش ساختمان از فن آوری به یک چشم انداز رفتاری تغییر کرده است. به عنوان مثال، سایم (2001) مدل زمان پاسخ فرار[2] افراد را معرفی کرد. این رویکرد جنبه‌های نظری ایمنی ساختمان در آتش (معماری، مهندسی) و رفتار انسان در طول تخلیه (روانشناسی، مدیریت امکانات) را به طور یکپارچه در خود دارد. (Kobes, Helsloot, Post ,Vries, 2010, 2)

رفتار کاربر ساختمان به صورت تجربی برای بیش از چهار دهه مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا روش‌های ارزیابی به کاررفته مبتنی بر مشاهده مستقیم، عکس‌ها، و فیلم‌های گذشت زمان بود. پس ازآن مدل‌های شبیه سازی پیشنهاد شدند. با اینکه اکثر مدل‌های عابر پیاده، قبلا فرموله شده اند؛ اولین روش مدل سازی که برای بازتولید الگوهای فضا – زمانی حرکت مناسب به نظر می‌رسد توسط هندرسون پیشنهاد شد. وی حدس زد جمعیت‌های عابر پیاده تا حدودی رفتاری مشابه به گازها و یا مایعات دارند. در نهایت، تحقیقات به طور عمده بر مدل‌های مبتنی بر عامل جمعیت عابر پیاده، تمرکز دارد. (Eng Aik, 2012, 182) مدل‌های تخلیه، شامل محاسبات مهندسی و ابزارهای محاسباتی ست که برای بررسی سطح ایمنی ساختمان در طول تخلیه استفاده می‌شود. انگ در ۲۰۱۲ انواع مدل‌های سودمند را به شرح زیرمطرح می‌کند:

- مدلهای برپایه جریانهای ذرات[3]: دراین روش معادلات مزوسکوپی، دینامیک تراکم عابر پیاده - فضا، را توصیف می‌کنند که می‌تواند به عنوان یک کلیت دو بعدی از فاز چگالی - فضای مورد استفاده در جریان ترافیک فضایی گاز جنبشی در نظر گرفته شود. همرفت، شتاب، و انتقال که شرایط حاکم بر حرکت وجنبش ذرات گازی هستند می‌توانند تاثیر دینامیک افزایش تعداد افراد و تغییر زاویه حرکت به دلیل تعامل عابرین را بازتاب دهد. (Hoogendoorn, Bovy, 2002)
- مدل‌های بر پایه نیروهای اجتماعی: مدل نیروی اجتماعی رفتار جمعیت را به عنوان نتیجه تعامل افراد توصیف می‌کند. در این مدلها شبیه سازی خط حرکت عابر پیاده با توجه به حرکت ردیابی شده از عابرین اطراف، صورت میگیرد؛ می‌توان گفت که آنها یک الگوی بازتاب "هوش جمعی" می‌باشد.

(Helbing, Dirk, Anders Johansson, 2011)

- مدل‌های بر پایه اتوماتای سلولی[۴]: دراین مدل کل منطقه توسط سلولهای شش ضلعی گسسته شده، که هر یک از آنها می‌تواند یک انسان متوسط را در خود جای دهد. در هر مرحله از زمان، هر سلول می‌تواند توسط یک عابر پیاده، یا یک مانع، یا یک مبدا یا یک مقصد اشغال شود. عابرین با توجه به قواعد رفتاری خاص از مبداها به اهداف حرکت میکنند. (Kneidl, Thiemann, Borrmann, Ruzika, Hamacher, 2012)

مدل‌های تخلیه علاوه بر زمان کل تخلیه ساختمان، زمان پاکسازی کف و نقاط ازدحام در سراسر ساختمان را ارائه می‌کنند. با این حال، به دلیل عدم وجود داده‌ها و نظریه‌های رفتار ساکنین ، مدل‌های تخلیه به طور قابل توجهی فرآیند تخلیه را ساده کردند و تمرکز عمدتا براینست که انجام یک نوع عمل چه مدت طول می‌کشد. ژانگ، سانگ وژو[۵] در ۲۰۰۸ به شرح پیشینه مدلسازی رفتارهای عابر پیاده در تخلیه می‌پردازند. کرشنر و همکاران انواع مختلف رفتارهای عابر پیاده را از منظم تا وحشت با استفاده از مدل ماشین سلولی با به کاربردن رویکرد بیونیک، مطالعه کردند. هلبینگ و همکاران نیز در پژوهشی دیگر ویژگی‌های دینامیکی فرار با وحشت را با استفاده از مدل نیروی اجتماعی و با توجه به ویژگی‌های وحشت در فرار (مانند انسداد حرکت عابرین در خروجی ها) مورد مطالعه قرار داده‌اند. (Zhang, Song, Xu, 2008, 5901)

۳. روش و ابزارهای مورد استفاده در پژوهش

مقاله حاضر درتلاش برای شناسایی نقاط ضعف طراحی در ارتباط با مسیرهاوخروجی‌های یک مدرسه است؛ تا امکان تدارک صحیح مسیر خروج درجهت کاهش میزان تلفات فراهم شود. به این منظور چگونگی تامین و کارآیی مقررات ساختمانی کشور و کارکرد احتمالی ساختمان در زمینه تخلیه اضطراری در یک مدرسه راهنمایی بررسی می‌شود. چگونگی کارآیی ابزارهای فرار در نمونه ساختمان آموزشی مورد مطالعه به دو شیوه بررسی شده است. ابتدا شیوه‌ای برگزیده شد که تا حد امکان به واقعیت نزدیک بوده و بتواند با در نظر گرفتن ویژگی‌های دانش آموزان و رفتار آنها؛ تخمینی از مدت زمانی ارائه دهد که طول می‌کشد تا دانش آموزان - پس از شنیدن زنگ و انجام کارهای اولیه برای واکنش (زمان تاخیر) - ساختمان را تخلیه کنند. این کار با مدلسازی رفتار دانش آموزان در مواقع خروج اضطراری به وسیله یک نرم‌افزار شبیه ساز صورت می‌گیرد.

تمام مدل‌های تخلیه به اطلاعات در مورد ویژگی‌های ساکنین، اقدامات آنها در طول تخلیه، تاخیری که ممکن است رخ دهد، و سرعت حرکت انواع مختلف ساکنین نیاز دارند. برخی از داده‌های مورد بررسی از این قبیل اند:

- زمان پیش از حرکت: مردم در حال آگاه شدن از یک وضعیت اضطراری فورا واکنش نشان نمی دهند لذا زمان اتلاف بین زمانی که مردم برای اولین بار درباره یک حادثه هشدار داده می‌شوند و زمانی که شروع به ترک محل می‌کنند، شامل زمانی است که افراد برای تخلیه آماده می‌شوند.
- سرعت راه رفتن: تعیین سرعت حرکت افراد بر روی انواع مختلفی از سطوح، بالا و پایین رفتن از پله ها، تحت درجات مختلف ازدحام، و برای افراد با طیف وسیعی از توانایی فیزیکی در نظر گرفته می‌شود.
- ویژگی‌های کاربران فضا: انواع ویژگیهای خاص افرادی که در طول تخلیه درگیر میشوند، زمان ترک ساختمان را تحت تاثیر قرار میدهد که شامل سن، جنس، درجه‌ای از آموزش، آشنایی، و غیره، ست و برای محاسبه تفاوت در واکنشها میان انواع مختلف مردم کاربرد دارد.
- اقدامات در طول تخلیه: مجموعه اقدامات کاربران است و می‌تواند زمان تخلیه افراد از ساختمان را افزایش دهد.
- اثر انسداد در مسیر سفر: عواملی که می‌توانند موجب تاخیر و یا انسداد خروجی شوند.
- تصمیم برای انتخاب خروجی ها: تصمیماتی که مسیرهای سفر را تعیین کرده و زمان سفر را تحت تاثیر قرار می‌دهند. (Fahy, 2005, 63)

در مراحل نخست آتش سوزی ، ساختمان باید امکان سرعت و سهولت در تخلیه و آغاز عملیات مبارزه با حریق را فراهم سازد. بنابراین، مهمترین اقدامی که در این زمینه باید انجام گیرد رعایت ویژگیها و تدابیری است که ایمنی فضاهای داخل بنا را تضمین می کند. ارتقای سطح ایمنی مدارس در ایران بیشتر در زمینه پیشگیری از آتش سوزی است و در این ارتباط ضوابطی توسط سازمان‌های مربوطه وضع شده است. در این پژوهش تعدادی از قوانین و مقررات و ضوابط موجود در خصوص ایمنی ساختمان در برابر آتش‌سوزی که در ایران وجود دارد بررسی شده است. این ضوابط و مقررات شامل حفاظت ساختمان‌ها در برابر حریق (وزارت راه و شهرسازی، دفتر امور مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۰). راهنمای مبحث سوم حفاظت ساختمان‌ها در برابر حریق (وزارت راه و شهرسازی، دفتر امور مقررات ملی ساختمان ۱۳۹۲)، آیین‌نامه محافظت ساختمان‌ها در برابر

آتش (پیشنهادی) (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۹)، راهنمای آیین‌نامه محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش (بختیاری، زمانی، قاسم‌زاده، تسنیمی، ۱۳۸۹)، دستورالعمل ایمنی مدارس (اداره پیشگیری و نظارت کرج) می‌باشند. قابل ذکر است در این مقاله تنها به بررسی ضوابط مربوط به ابعاد و موقعیت ابزارهای فرار و طراحی معماری در این خصوص پرداخته شده و ضوابط دیگر مربوط به مصالح و سازه و ... مورد بررسی قرار نگرفته اند. در نهایت مقایسه نتایج حاصل از دو شیوه به ارزیابی عملکرد طرح موجود مدرسه نمونه در تخلیه اضطراری می‌انجامد و راه حل هایی برای کاهش مشکلات و افزایش کارایی آنها مطرح می‌شود.

۴. ارزیابی کارکرد مدرسه مورد مطالعه در تخلیه اضطراری

بر اساس اهداف چگونگی تامین ایمنی و کارآیی مقررات ساختمانی و کارکرد احتمالی ساختمان در زمینه تخلیه اضطراری در یک مدرسه راهنمایی واقع در مهرآباد رودهن بررسی شده است. این مدرسه دارای ۱۴ کلاس، ۳ کارگاه آموزشی، یک کتابخانه و یک سالن چند منظوره با زیربنای ۲۴۶۰ مترمربع است و توسط سازمان نوسازی مدارس ساخته شده است.

٤-١- محاسبه زمان‌های تخلیه با استفاده از نرم‌افزارشبیه‌سازی تخلیه

مدل‌های تخلیه عملکرد ساختمان را در تخلیه اضطراری تعیین می‌کنند. به منظور انجام این محاسبه، مدل شبیه سازی موضوعاتی را پشتیبانی میکند از جمله اقداماتی که کاربران انجام می‌دهند و مدت زمانی که انجام هر عمل طول میکشد. علاوه بر زمان کل تخلیه ساختمان، مدل‌های تخلیه زمان تخلیه کامل طبقه و محل نقاط ازدحام در سراسر ساختمان را ارائه می‌کنند.

نرم‌افزار مورد استفاده جهت محاسبه زمان لازم تخلیه اضطراری، پس فایندر[۶] است که پیش بینی رفتار عابر پیاده برای هر دو شرایط استاندارد و وحشت را ممکن می‌سازد و در سال (۲۰۰۵-۲۰۰۷) توسط بنیاد ملی علوم ایالات متحده حمایت شده است. در این نرم‌افزار به طور پیش فرض، هر فرد از ترکیبی از پارامترها برای انتخاب مسیر خود برای خروج، استفاده می‌کند. این پارامترها عبارتند از زمان‌های صف بندی افراد برای عبور از هر درب اتاق‌های موجود، زمان برای سفر به هر خروجی، زمان تخمین زده شده از هر درب تا خروج و فاصله‌ای که در حال حاضر در اتاق طی شده است. فرد به طور خودکار به تغییرات صفها، باز یا بسته بودن دربها و تغییرات در محدود کردن سرعت حرکت در اتاق (در شرایط دود و آوار) پاسخ می‌دهد. (Thunderheadeng, 2013, 10).

به طور خلاصه هر شبیه سازی اجرا شده با توجه به طرح زیر انجام می‌شود:

۱. تعریف یک نقطه شروع و محاسبه (موقعیت R، سرعت v، و شتاب a) برای هر عابر پیاده).

۲. اختصاص یک سرعت مورد نظر، V0، به هر عابر پیاده. حداکثر سرعت در طول زمان ردیابی عابر پیاده. (این روند در صورتی به اندازه کافی دقیق است، که تراکم کلی مخصوص عابران پیاده بیش از حد بالا نباشد و سرعت مورد نظر در زمان ثابت در نظر گرفته شود.)

۳. اختصاص یک نقطه هدف مورد نظر برای هر عابر پیاده و نقطه پایان مسیر.

۴. با توجه به حرکت ردیابی شده از عابرین اطراف، شبیه-سازی خط حرکت عابر پیاده در مدت زمان T براساس مدل نیروی اجتماعی و با شروع در محل واقعی R (T) صورت می‌گیرد.(Helbing, Dirk, Anders Johansson, 2009, 6480).

٤-٢- ارزیابی مدرسه براساس آیین نامه محافظت ساختمان در برابر حریق و مبحث سوم مقررات ملی ساختمان

مرحله دوم تحلیل در این پژوهش شامل بررسی مدرسه بر اساس مقررات در زمینه محافظت ساختمان در برابر حریق است. ارگان‌های تصویب کننده طرح‌ها اغلب در بررسی پلان‌های طراحی شده، آیین نامه محافظت ساختمان در برابر حریق و مبحث سوم مقررات ملی ساختمان را به عنوان مرجع اصلی مورد استناد قرارمی‌دهند؛ لذا چگونگی پاسخگویی پلان مدرسه نمونه به ضوابط مبحث سوم مقررات ملی بررسی شده است. ازمیان ضوابط یادشده به مواردی پرداخته شده است که ارتباط مستقیم با مسیرها و گذرگاه‌های خروج داشته و بررسی آن مطابق مدارک موجود امکان پذیربوده است.

۵. بحث و نتایج ارزیابی‌ها

٥-١- یافته‌های حاصل از کاربرد نرم‌افزارهای شبیه سازی تخلیه

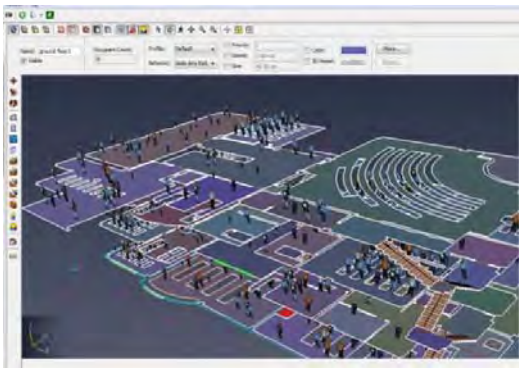
به منظور تخمین مدت زمان لازم جهت تخلیه اضطراری دانش آموزان شبیه سازی رفتار تخلیه در دو وضعیت انجام شده است:

الف- استفاده ازهر دو پله اصلی و اضطراری

ب- با در نظر گرفتن مسدود شدن پله اصلی در اثر آتش و استفاده تمام افراد از پله اضطراری.

یافته‌های الف و ب با زمان موردنیاز برای تخلیه ساختمان، برآوردی ازکارآیی ابزارهای خروج به دست خواهد داد. به منظور به دست آوردن زمان مورد نیاز برای تخلیه ساختمان دو روش وجود دارد، یا باید تحلیل کاملی از تمامی مکان‌های ممکن حریق و انواع حریق نموده و گسترش آنها شبیه سازی شود و یا از اصول اولیه ایمنی حریق کمک گرفته و از احتمال خطر جانی و مدت زمان ممکن فرار یک تخمین مناسب در نظر گرفته شود. اکثر مقررات ساختمانی، مسافت فرار را با استفاده از تجربیات گذشته تعیین می‌کنند. معمول‌ترین عددی که برای زمان فرار بکار گرفته می‌شود ۲/۵ دقیقه است و از این رقم در طراحی استفاده می‌گردد[۷] (Stollard, Abrahams, 1387, 100). همچنین متوسط زمان قبل از حرکت[۸] زمان ۷۳,۷ ثانیه در نظر گرفته شده است که باید به زمان شبیه سازی اضافه شود. (Xie, Cheng, Zhou, Zhang, Shi, 2009, 1725)

از سوی دیگرطیف سرعت حرکت دانش آموزان از ۰/۵۶تا۱/۱۲متربرثانیه درنظرگرفته شده است. (همان، ۷۲۶) متوسط سرعت راه رفتن هر شرکت کننده به عنوان تابعی از ضریب خاموشی[۹] است و ضریب کاهش دید[۱۰] به علت دود براساس مطالعات ۰/۸ در نظر گرفته شده است. (Fridolf, Andrée, Nilsson, Frantzich, 2013).



تصویر ۳. نمایش یک لحظه از نرم‌افزار شبیه ساز تخلیه اضطراری (نگارندگان)

در ادامه در جدول ۱ اطلاعات افراد اشغال کننده در هر اتاق درطول زمان ارائه شده است. جدول ۲ و ۳ نیز به ارائه کمی و کیفی نتایج شبیه سازی تخلیه اضطراری مدرسه می‌پردازند.

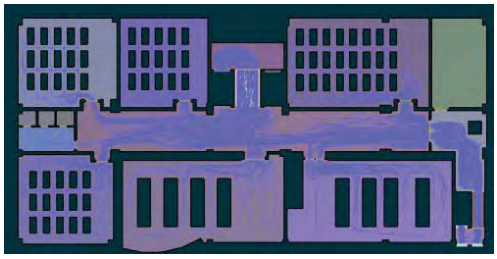
جدول ۱: اطلاعات و نتایج شبیه سازی (نگارندگان)

وضعیت	مجموع متصرفان فضا	زمانهای فرار برحسب ثانیه			تعداد اجزای فضا	زمان آغاز	زمان محاسبه کامپیوتری
		حداقل	حداکثر	متوسط			
الف	۶۵۸	۲,۹	۱۳۳	۶۸,۴	۱۶۸	۵۰,۸	۸۸,۶۵
ب	۵۶۷	۲,۹	۲۶۷,۹	۱۱۱,۲	۱۳۸	۵۱,۴	۱۳۰,۱۵

جدول ۲: نتایج کمی به دست آمده در مدل سازی تعدادی از فضاهای طبقات (نگارندگان)

طبقه	نام فضا	ابعاد فضا	جمعیت	زمان تخلیه	توضیحات
طبقه زیرزمین	راهروی اصلی	۳۰ طول متر	حداکثر ۸۰ نفر	۱۳۰	
	راهرو پله اضطراری		حداکثر ۲۳ نفر	۱۰۰ ثانیه	
طبقه همکف	کلاسهای ۱ و ۴	۵۰ متر مربع	۳۰	۴۰ ثانیه	
	کلاس ۲	۵۰ متر مربع	۳۰	۶۰ ثانیه	
	کلاسهای (۱ و ۳ و ۴)	۵۰ متر مربع	۳۰	۴۰ ثانیه	
طبقه اول	کلاس ۲	۵۰ مترمربع	۳۰	۶۰ ثانیه	توقف حرکت در زمان ۲۵ تا ۴۵ ثانیه به دلیل مسدود شدن مسیر تاخیر زمانی به دلیل چیدمان داخلی
	کلاسهای ۵ و ۶	۵۰ مترمربع	۳۰		
	پله مرکزی		۲۱۶ نفر	۱۲۲,۷	
	پله فرار		۸۲ نفر	۱۰۰,۶	
طبقه دوم	پله اصلی			۹۵ ثانیه	

جدول ۳: نتایج کیفی به دست آمده در مدل سازی تخلیه اضطراری مدرسه(نگارندگان)

نمایش مسیرحرکت دانش آموزان برحسب طبقه در نرم‌افزار پس فایندر	نتایج تحلیل
زیرزمین 	تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در شرایط عادی تخلیه (زمانی که پله‌های اصلی قابل استفاده هستند)؛ حجم زیادی از جمعیت (۲۰۱ نفرکه بیش از۱/۳ست) برای خروج از پله اضطراری استفاده میکنند. این امر ضرورت توجه بر مکان‌یابی و ابعاد پله‌های اضطراری را نشان میدهد. هر دو عرض گذرگاه تخلیه (اصلی و فرار) اگرچه مقدار لازم در مقررات ملی را تامین میکند اما تفاوت زمان تخلیه به دلیل تفاوت ابعاد دو فضا کاملا مشهود است. تمامی افراد ساکن فضاهای نزدیک به پله‌های اصلی و حتی بخشی از ساکنین نزدیک به پله اضطراری، از پله اصلی برای تخلیه استفاده میکنند.
همکف 	تقریبا تمام افراد طبقه همکف به جز ساکنین بخش اقامتی از خروجی اصلی برای تخلیه استفاده میکنند. تمامی فضای خروج در هنگام تخلیه توسط افراد مورد استفاده قرار میگیرد. مجموعا ۴۵۷ نفر در زمان ۱۳۰ ثانیه از کل راهروهای این طبقه تا اولین پیش ورودی پله اضطراری عبور میکند. بیشتر جمعیت طبقه از ورودی اصلی برای تخلیه استفاده میکنند. در صورت مسدود شدن خروجی اصلی توسط آتش تمامی جمعیت وادار میشود مسیری طولانی را برای استفاده از خروجی اضطراری طی کند، در حالیکه برای این وضعیت فضای کافی در پیش ورود پله اضطراری دیده نشده است.
طبقه اول 	– جمعیت استفاده کننده تقریبا به نسبت مساوی ازدو بازوی پله استفاده میکنند. – کل پیش فضای پله اضطراری توسط افراد در حال انتظار پر شده است بنابراین بزرگتر کردن این فضا و عدم محدود شدن مسیر توسط هرشی یاالمان (در اینجا آسانسور) در تسهیل خروج موثر است. – قرار گرفتن درب فضای اداری در خارج از راهروی اولیه مفید بوده و به کاهش گره ترافیکی در ورودی پله کمک میکند.
طبقه دوم 	– تمامی افراد مستقر در خارج از فضای سالن چندمنظوره برای خروج از پله اصلی استفاده میکنند. – مکان یابی پله فرار تنها برای افراد داخل سالن و فضای اداری مجاور آن کاربرد دارد و دسترسی سایر افراد طبقه به پله فرار تنها پس از عبور از سالن ممکن است؛ این امر موجب می‌شود در صورت مسدود شدن دسترسی به پله اصلی افراد برای دسترسی به پله فرار با مشکل زیاد مواجه شده و زمان تخلیه بسیارطولانی شود. این مورد به ویژه هنگام وجود جمعیت در سالن بسیار وخیم است. – تقسیم کردن راهرو اصلی در هنگام سرریز جمعیت سالن به آن مشکل‌ساز بوده و حرکت را کند میکند.

نتایج شبیه سازی فرضیه اصلی را تایید می‌کند، به این صورت که رابطه مستقیمی بین تعداد، ابعاد و موقعیت راه‌های خروج با زمان خروج امن کاربران در مواقع بحران وجود دارد. در وضعیت الف و با احتساب امکان استفاده از هر دو مسیر، تخلیه حداکثر ۱۳۳ ثانیه طول می‌کشد. در وضعیت ب با امکان تخلیه از خروجی اضطراری، تخلیه در زمان ۲۶۸ ثانیه یعنی حدود ۴/۵ دقیقه (پس ازشروع تخلیه) به اتمام می‌رسد. همچنین نتایج کمی و کیفی مطرح شده در جداول ۲ و ۳ نیز تاکید می‌کنند که به دست آوردن زمان تخلیه افراد در هنگام بروز حادثه، موجب سنجش چگونگی کارکرد مجموعه ساختمانی در موارد بحران میشود.

۵-۲- یافته‌های روش دوم: ارزیابی مدرسه براساس آیین‌نامه‌های محافظت ساختمان در برابر حریق

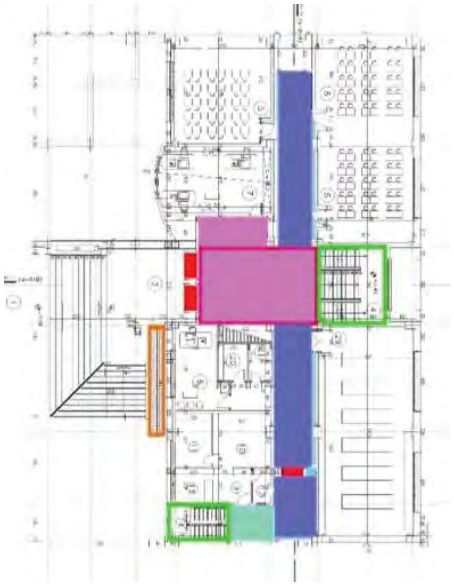
مرحله دوم تحلیل در این مقاله شامل بررسی چگونگی رعایت مقررات ایمنی ساختمان در بخش‌های مختلف مسیر

خروج در مدرسه است. در تصویر ۴ بخش‌های مختلف مسیر خروج ارائه شده است.

به منظور مقایسه نتایج حاصل ازدوشیوه ،چگونگی پاسخ گویی پلان به دو شیوه (ضوابط وشبیه سازی) را می‌توان در سه بخش عنوان کرد:

۱. مواردی که پاسخگویی پلان در ضوابط مثبت بوده و نتیجه شبیه سازی نیز کفایت ضابطه در این موارد را تایید می‌کند.
۲. مواردی که پاسخگویی پلان در ضوابط منفی‌ست.
۳. مواردی که پاسخگویی پلان در ضوابط مثبت بوده اما نتایج شبیه سازی نشان‌دهنده کافی نبودن ضابطه جهت تامین زمان تخلیه مناسب است.

در جدول ۴ خلاصه‌ای ازنتایج حاصل از بررسی پاسخگویی پلان در این سه بخش ارائه شده است.



تصویر ۴. بخش‌های مختلف مسیر خروج پلان مدرسه(نگارندگان)

جدول ۴: وضعیت پاسخگویی پلان به شبیه سازی و ضوابط(نگارندگان)

دسته کلی ضابطه	اجزا ضابطه	وضعیت پاسخگویی	توضیحات
ضوابط مربوط به راه خروج	ظرفیت راه خروج	۲و۳	راهروها در طبقات زیرزمین و همکف و اول، عرض مفید ۲۹۰ رادار است. اما در طبقه دوم عرض راهرو در یک قسمت به ۲ متر کاهش یافته و در قسمت ورود به پله اضطراری نیز به دلیل آسانسور این عرض دو متر به ۱۳۵ سانتیمتر رسیده است. ۱- عرض راه خروج در حوزه ورودی پله اضطراری از عوامل افزایش زمان تخلیه است ۲- در طبقه دوم مطابق ضابطه ۳۸۰*۰,۵=۱۹۰ سانتیمتر مورد نیازست در حالیکه در پلان ۱۸۰ تامین شده است.
	محدودیتهای مسافت تردد	۳	
	طول مسیر مشترک راه خروج	۳	
	بن بستها	۲	بن بست به طول ۱۲متر و بیش از ضابطه است.
	عرض کریدور	۱	به دلیل تامین عرض راهروها بیش ازضابطه پروژه پاسخگو بوده.
	پیوستگی کریدورها	۱و۲	در مورد راهروهای اصلی پیوستگی رعایت شده اما در دسترسی به پله فرار در طبقه دوم رعایت نشده است.
	ظرفیت راه خروج افقی		۳۸۰*۰,۵=۱۹۰۰ میلی متر
	استقرار راههای خروج	۱	
	تخلیه خروج	۱	
	حداقل تعداد خروج ها	۳	با وجود تامین دو خروج مطابق ضابطه، در صورت مسدود شدن یکی از خروجها (وضعیت ب شبیه سازی) تخلیه در زمان کافی صورت نخواهد گرفت.
ضوابط مربوط به تخلیه خروج	عرض گذرگاه خروج	۱و۲	راهروها در طبقات زیرزمین، همکف و اول، عرض مفید ۲۹۰ رادار است. اما در طبقه دوم عرض راهرو در یک قسمت به ۲ متر کاهش یافته و در قسمت ورود به پله اضطراری نیز به دلیل آسانسور این عرض دو متر به ۱۳۵ سانتیمتر رسیده است
ضوابط دربها:	اندازه درها، پاگرد در، چرخش در، آرایش استقرار درها، درهای کاربری آموزشی	۱	
ضوابط فضای امن	فضای پناه دهی فضای ایمن	۲	تدارک چنین مکانی در پلان وجود ندارد

دسته کلی ضابطه	اجزا ضابطه	وضعیت پاسخگویی	توضیحات
ضوابط پله‌ها و شیبراهه ها	عرض راه پله	۲و۱	- درموردپله‌های اصلی رعایت شده ۲- با وجود تامین ۱۱۰ نیز شبیه سازیی وضعیت B زمان ۴/۵ دقیقه بعد از شروع واکنش را برای تخلیه نشان می‌دهد که یکی از مهمترین دلایل آن عرض کم پله هاست
	ارتفاع سرگیر	۱	
	اندازه کف و ارتفاع پله	۱	
	حداکثر شیب رمپ	۲	شیب رمپ خروج ۱۷۰/۷۴۵=۲۱درصد و غیرمجاز است.×
	ارتفاع طی شده رمپ	۲	رمپ خروج به صورت یکسره ۱۷۰ سانتی متر و غیرمجاز.
	حداقل ابعاد شیبراه	۱	

۶. جمع بندی یافته‌های پژوهش

شناسایی رفتار دانش آموزان در مواقع بحران و پیشبینی چگونگی خروج آنها به مکان‌های امن می‌تواند نقش مهمی در مدیریت نجات افراد داشته باشد. در بحث طراحی راههای خروج، مهمترین عاملی که نقش حیاتی در نجات افراد دارد ضوابط تعداد، ابعاد و مکان یابی صحیح خروجی هاست. از آنجا که در مهندسی آتش معمولا بدترین وضعیت برای محاسبه خسارات آتش سوزی در نظر گرفته می‌شود؛ ضوابط طراحی راههای خروج امن، باید به صورتی باشد که پلان‌های معماری در بدترین سناریوهای آتش نیز بتوانند امکان خروج افراد را در زمان مناسب (۲/۵ دقیقه) تامین کنند. (Abrahams،Stollard, 1387, 100) نتایج حاصل از شبیه سازی تخلیه دانش آموزان مدرسه حاضر تخمینی از مدت زمان تخلیه اضطراری به دست داده است. این عدد تابع ابعاد و موقعیت راههای خروج بوده و فرضیه اصلی پژوهش را تایید می‌کند. از طرفی یافته‌ها نشان دادند که در صورت تامین ضوابط موجود، همچنان ممکن است خروج افراد در زمان کافی صورت نگیرد. به طورخلاصه عوامل معماری موثر در زمان تخلیه در جدول ۵ آمده است که با تغییر آن‌ها می‌توان شرایط و وضعیت تخلیه اضطراری را بهبود بخشید.

جدول ۵: عوامل معماری موثردرزمان تخلیه(نگارندگان)

عوامل معماری موثردرزمان تخلیه	
ابعاد فضاها	بلندترین طول هر فضایی که احتمال دارد فردی را در خود جای دهد.
	عرض تمامی راهروها به ویژه راهروهای دسترسی به پله فرار
	توجه به عدم مسدودشدن هر قسمت از مسیر دسترسی به پله‌های خروج اصلی و اضطراری
	عرض دربها وگذرگاههای تخلیه که می‌تواند موجب ایجاد تنگنا شود.
	عرض پله‌های اصلی و فرعی
موقعیت فضاها	موقعیت خروجی‌ها نسبت به یکدیگر شامل (فاصله مکانی و زاویه قرارگیری خروجی ها)
	موقعیت خروجی‌ها نسبت به سایر فضاها
	موقعیت قرارگیری درب خروج کلاسها نسبت به راهروهای دسترسی

بر این اساس یافته‌های پژوهش حاضر را می‌توان به صورت پیشنهاداتی برای بهبود وضعیت تخلیه اضطراری در فضاهای آموزشی موجود تعمیم داد.برخی ازضوابطی که بیشترین تاثیررا درزمان تخلیه دارند به شرح زیرند:

۱- ضابطه تعداد و عرض پله: در تعیین تعداد و عرض پله، ضابطه تاثیرکاهش پله (در اثر مسدود شدن) را در نظر نگرفته است: عرض پله‌ها درضابطه به اندازه‌ای در نظر گرفته شده که بار جمعیت براساس تعداد پله‌ها تقسیم شود (وزارت راه و شهرسازی، دفتر امور مقررات ملی ساختمان، ۲۳، ۱۳۸۰). بنابراین در زمانی که خروج پله اصلی در اثر آتش سوزی مسدود شده باشد کل جمعیتی که باید از دو پله خروج کند تنها ازیک پله می‌تواند استفاده کند که در بهترین حالت ضابطه تامین نیمی از جمعیت را توسط پله اضطراری ضروری دانسته که مسلما زمان تخلیه را بسیار افزایش می‌دهد. (چنانچه وضعیت ب شبیه سازی تایید این مطلب است). پیشنهاد مقاله در این مورد تعیین تعداد و عرض پله‌های مورد نیاز با در نظر گرفتن احتمال انسداد هر یک از پله هاست.

۲- استقرار راههای خروج: اگرچه در مورد مکان خروجی‌ها نسبت به یکدیگر ضابطه حداقل فاصله نصف قطر را مقرر کرده است (وزارت راه و شهرسازی، دفتر امور مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۰، ۲۳)؛ اشاره‌ای به زاویه دستیابی فضاها به خروجی‌ها ندارد. چنانچه ممکن است فاصله استقرار در پلان رعایت شده باشد اما به دلیل مکان‌یابی نامناسب راههای خروج امکان دسترسی فضاها به راههای خروج اضطراری فراهم نباشد. به این ترتیب به نظر می‌رسد تدقیق ضوابط در مورد موقعیت مسیرهای فرار جایگزین مورد ضروری‌ست.

۳- ضابطه بن‌بست: گرچه در شرایط خاصی جهت تک فرار (بن بست) می‌تواند به عنوان ارائه ایمنی معقول پذیرفته شود، این شرایط به خطر آتش سوزی، میزان بن‌بست و تعداد افراد جایگزین در بن بست بستگی دارد. (بیمه حوادث مدارس انگلستان)، ضابطه بن بست در مقررات ملی بدون هرگونه استثنایی ۶ متر را برای بن بست مجاز دانسته است. (وزارت راه و شهرسازی، دفتر امور مقررات ملی ساختمان، ۴۶، ۱۳۸۰). درحالی که درحوادث آتش سوزی همیشه این احتمال وجود دارد که یکی ازمسیرهای فرار توسط آتش، دود و یا بخار صعب العبور شود؛ مردم باید قادر باشند هر جا که آتش رخ دهد به آن پشت کنند و به دور از آن به سمت خروجی نهایی و یا مسیر فرار محافظت شده - که منجر به یک محل امن باشد - حرکت کنند. (Education Funding Agency, 2014, 11) اگر جمعیتی مانند افراد یک یا دو کلاس در شرایط بن بست باشند (مانند نمونه مدرسه مورد مطالعه) درصورتی که محل آتش دسترسی به پله را مسدود کند جمعیت عملا در پشت آتش حبس شده و امکان فرار نخواهند داشت. به این منظور مکان یابی فضاهای آموزشی در مکانهای بن بست می‌بایست غیرمجاز شمرده شود تا امکان چنین حبس شدنی به وجود نیاید.

۴- آرایش استقراردرهای خروج فضاها: درحالی که موقعیت قرارگیری درب فضاهای با جمعیت بالا نقش موثری در عدم تشکیل تنگنا و کندشدن سرعت تردد دارد (مثلا موقعیت درب خروجی کلاسها نسبت به راهروهای دسترسی) با این وجود در این خصوص ضابطه طراحی ارائه نشده است. نتایج حاضر ضرورت توجه مقررات به مکان یابی را یادآوری میکند.

۵- حداقل تعداد خروج ها: حداقل تعداد و ابعاد خروج هر طبقه تنها با توجه به جمعیت همان طبقه در نظر گرفته شده و در ساختمان هایی که هر طبقه زیر ۵۰۰ نفر جمعیت دارد تنها دو خروج کافی دانسته شده است. (وزارت راه و شهرسازی، دفترامور مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۰، ۲۹) با در نظر گرفتن ضوابطی که حداقل عرض خروج راتعیین می‌کند (وزارت راه و شهرسازی، دفتر امور مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۰، ۲۸) و نتایج کمی مقاله مشخص می‌شود که در صورت مسدود شدن یکی از خروج‌ها سرعت تخلیه بسیار کمتر از حد مطلوب خواهد بود. لذا بازبینی در تعداد خروج‌ها برای چنین جمعیتی تاثیر به سزا در کاهش زمان تخلیه ساختمان دارد.

۷. نتیجه‌گیری

ضوابط موجود در زمینه ایمنی ساختمانها در برابر آتش اگرچه رهنمودی مناسب برای معماران در جهت طراحی ایمن است؛ کنکاش در پیشینه موضوع پروژه (با در نظر گرفتن استفاده کاربر) جای خالی بررسی هایی در ضوابط ایمنی را نشان می‌دهد. تاکنون به این مساله که آیا کاربران بناها باویژگی‌های جسمی و رفتاری متفاوت می‌توانند در زمان مناسب ساختمان را ترک کرده و به محل امن بروند، کمتر پرداخته شده است. ازسوی دیگر، در این پژوهش بدون توجه به برآورد کارآیی مصالح در مدت زمان تخلیه و با در نظر گرفتن یک عدد رایج اقدام به شبیه سازی رفتارکاربر شده است؛ درحالی که برآورد زمانی دقیق زمان تخلیه کافی می‌تواند براساس هر پروژه برحسب نوع مصالح و ویژگی‌های معماری ساختمان متفاوت باشدکه با نرم‌افزارهای دقیق شبیه سازی آتش (مانند FDS) امکان‌پذیر بوده و شایسته است در پژوهش‌های آینده به آن پرداخته شود. شبیه سازی نرم‌افزاری پلان و رفتارکاربر مواردی رانشان می‌دهد که با وجود پاسخگویی پلان به مقررات ملی (به طورمثال عرض و تعداد پله‌های مورد نیاز) در صورت مسدود شدن مسیر تخلیه عمودی اصلی، استفاده از مسیر فرعی مستلزم صرف زمان بیش از حد برای تخلیه امن افراد از ساختمان است. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش ارزیابی ویژگی‌های معماری مربوط به ابزارهای فرار ساختمان به ویژه در ساختمان‌های با خطرپذیری بالا تنها به وسیله ضوابط و مقررات ملی – که روش مرسوم در بررسی خطرپذیری ساختمانها درمواقع بحران است - کافی نمی باشد.

پی‌نوشت

1. Pauls & Fruin, Predtetschenski, Milinski, Habicht, Braaksma
2. Orset

3. Models based on particle flow
4. Automata celular
5. Zhang, Song, Xu
6. Pathfinder

۷. رقم اولیه ۶۰ متر، یک برآورد محافظه کارانه از مسافتی است که یک فرد سالم می‌تواند یک راهرو بدون مانع را در عرض یک دقیقه طی نماید. در انتخاب مسافت قابل طی در عرض یک دقیقه، در واقع تاکید بر این است که در حالت مطلوب فرار بین مرحله 1و 2 به وسیله ساکنان باید در مدت یک دقیقه پس از دیدن حریق و یا شنیدن زنگ خطر کامل گردد.

۸. Pre-movement time: مدت زمانی که از زمان آگاهی افراد ازخطر تا اقدام برای تخلیه فضا طول میکشد .

9. Extinction coefficient

فهرست منابع

- استولارد، پاول؛ آبرامز، جان (۱۳۸۷). اصول ایمنی حریق در ساختمان‌ها، ترجمه عبدالصمد زری نژلم و سعید بختیاری، تهران: انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شمارهٔ ۲۵۴، چاپ چهارم.
- بختیاری، سعید؛ زمانی، مجید؛ قاسم زاده، سهیل؛ تسنیمی، مسعود (۱۳۸۹). راهنمای آیین‌نامه محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش، تهران: انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره گ-۴۴۵، چاپ دوم.
- بختیاری، سعید؛ جمالی آشتیانی، مسعود؛ تقی اکبری، لیلا؛ درودیانی، زهرا؛ عسکری مقدم، الهام (۱۳۹). بررسی پارامترهای آتش برای ده مصالح ساختمانی و تحلیل خطر حریق با نرم‌افزارهای شبیه سازی آتش، تهران، انتشارات مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، نشریه شماره گ-۶۸۰.
- عباسی، محمد (۱۳۸۵). اصول و مبانی پیشگیری و کاهش خسارت: جزوه آموزشی. شورای برنامه ریزی آموزش، سازمان آتش نشانی و خدمات ایمنی شهرداری تهران.
- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۹). آیین‌نامه محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش (پیشنهادی)، تهران: انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ض-۴۴۴، چاپ سوم.
- نوذری، شعله؛ رفیع زاده، ندا؛ قاسم زاده، مسعود (۱۳۹۱). رهنمودهای طراحی معماری برای ایمن سازی حرکت در مدارس، انتشارات مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، نشریه شماره گ-۶۲۴.
- 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 امور مقررات ملی ساختمان.
- 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 امور مقررات ملی ساختمان.
- British Insurers. School Arson: Education Under Threat: An Arson Prevention, Bureau publication. Available online at www.arsonpreventionbureau.org.uk.
- Chooramun Nitish, Peter J. Lawrence, Edwin R. Galea (2012). An agent based evacuation model utilising hybrid space discretisation, Safety Science, Issue 8, Vol. 50, pp. 1685-1694.
- Education Funding Agency (2014). Baseline designs for schools: guidance. UK: Education Funding Agency, Available online at www.gov.uk/government/collections/school-building-design-and-maintenance.
- Aik LE (2012). Microscopic dynamics of a large-scale pedestrian evacuation model, International Journals of the Physical Science, Vol. 7, No. 2, pp. 182-190.
- 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, pp. 62-67.
- Karl F, Andrée K, Nilsson D, Frantzich H (2013). The impact of smoke on walking speed, Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com).
- Dirk H, Johansson A, Crowd P (2009). Evacuation Dynamics, Robert A. Meyers, Encyclopedia of Complexity and Systems Science, pp. 6476-6495.
- Serge H, Bovy P (2000). Gas-kinetic and simiulation of pedestrian flows, Transportation Research Record, Vol. 1710, pp. 28-36.
- Kneidl A, Thiemann M, Borrmann A, Ruzika S, Hamacher HW, Köster G, Rank E (2010). Bidirectional Coupling of Macroscopic and Microscopic Approaches for Pedestrian Behavior Prediction, In: Proceedings of the 5th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, Gaithersburg, MD USA, 2010.
- Kobes Margrethe, Ira Helsloot, Jos G. Post, Bauke de Vries (2010). Building safety and human behaviour in fire, A literature review, Fire Safety Journal, Vol. 45, Issue 1, 2010, pp. 1–11.
- Kuligowski Erica D, Bryan L. Hoskins (2011). Occupant behavior in a high-rise office building fire, Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2011, pp. 685-697.
- Shi Long, Qiyuan Xie, Xudong Cheng, Long Chen, Yong Zhou, Ruifang Zhang (2009). Developing a database for emergency evacuation model, Building and Environment, Vol. 44, Issue 8, pp. 1724-1729.
- Thunderheadeng (2013). Technical Reference, online on ww.thunderheadeng.com.
- Zhang Jun, Weiguo Song, Xuan Xu (2008). Experiment and multi grid modeling of evacuation from a class room, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol. 387, Issue 23, 1 October 2008, pp. 5901–5909.