



بررسی تأثیر تراکم جمعیت کاربران ساختمان بر شدت خطر ازدحام در هنگام تخلیه اضطراری به کمک شبیه سازی عامل محور

امید حسینی^۱، مجتبی مغربی^۲، محمود فغفور مغربی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

omid.s.hosseini@gmail.com

خلاصه

پدیده ازدحام در تخلیه اضطراری از مهمترین چالش های دوره بهره برداری است که نه تنها در عملکرد تخلیه تأثیر میگذارد بلکه میتواند منجر به مصدومیت در افراد گردد. در اغلب مدل سازی ها، تعداد جمعیت اولیه فرض شده و پژوهش بر اساس فرض صورت میگیرد، لذا یافتن رابطه ای مابین خطر ازدحام و جمعیت اولیه، مدل سازی ها را به واقعیت نزدیکتر میسازد. در این مقاله بوسیله برنامه نویسی، فرآیند تخلیه با تغییر در تعداد جمعیت اولیه مکرراً شبیه سازی شده و خطر ازدحام ارزیابی گردید؛ تحلیل نتایج نشان داد رابطه ای غیرخطی بین این دو پارامتر حاکم میباشد.

کلمات کلیدی: تخلیه اضطراری، شبیه سازی، خطر ازدحام، تراکم جمعیت، SFM

۱. مقدمه

یکی از چالش های دوره بهره برداری ساختمان های با جمعیت بالا و اماکن تجمع جمعیت، تخلیه اضطراری در هنگام وقوع حوادث میباشد. چراکه حتی چند ثانیه تأخیر در تخلیه و یا مدیریت نامناسب جریان حرکت افراد میتواند منجر به افزایش چشمگیر خسارات جانی گردد. مطالعات نشان میدهد بسیاری از تلفات انسانی ناشی از حوادث نامترقبه، مثل آتشسوزی را میتوان ناشی از ضعف برنامه ریزی و تصمیم گیری راهبردی برای تخلیه افراد دانست (۱).

از مهمترین معیارهای ارزیابی یک تخلیه اضطراری کارآمد و ایمن میتوان به مدت زمان تخلیه کامل و همچنین بازده تخلیه اشاره کرد که اغلب تحت تأثیر میزان ازدحام جمعیت در محل خروجی ها و راهروها قرار دارد (۲-۴). در هنگام رخ دادن حادثه در یک ساختمان و یا محوطه، تمامی افراد شروع به خارج شدن از خروجی های اضطراری و یا عادی میکنند. با توجه به جمعیت بسیار زیاد متقاضی عبور از درب ها و راهروهای خروجی و همچنین ظرفیت محدود گذردهی این معابر، ازدحام قابل ملاحظه ای در محل های مذکور پدیدمی آید و این امر موجب افزایش اصطکاک و تنش بین افراد شده و در نهایت منجر به کاهش بازدهی این خروجی ها میگردد. همچنین فشار و تنش های بسیار زیاد بوجود آمده در این ازدحامات، در برخی مواقع موجب بروز مصدومیت در افراد و مخصوصاً افراد مسن و کودکان میگردد (۵).

پس از رخ دادن مصدومیت های شدید در روند تخلیه اضطراری چند گردهمایی و فستیوال در دهه های ۸۰ و ۹۰ میلادی و همچنین تخلیه یک مدرسه در دهه ۹۰ میلادی، درحالی که هیچیک از مصدومیت ها مستقیماً بر اثر خود حادثه پدیدنیامده بود، توجه پژوهشگران این عرصه هرچه بیشتر به بررسی و مطالعه عمیق تر مسئله ازدحام جمعیت در روند تخلیه اضطراری جلب شد (۶). در نتیجه این مطالعات، مفاهیمی همچون مدیریت ازدحامات، برنامه ریزی تخلیه اضطراری و راهبری توده جمعیت جایگاه مهمی در این عرصه پیدا کردند. در این راستا، تمرکز اصلی این مقاله نیز متوجه مبحث ازدحام در روند تخلیه اضطراری ساختمان ها و اماکن تجمع جمعیت میباشد.

۲. سابقه پژوهشی

پیشینه مطالعات حوزه تخلیه اضطراری به دوران اپراتوری روم بازمیگردد. دغدغه تخلیه ایمن بنای "کولسیوم"، اولین مطالعات در حوزه تخلیه اضطراری را پدید آورد (۷). پژوهش های جدی تر و عمل گرایانه تر متمرکز بر تخلیه اضطراری، در دهه ۷۰ و ۸۰ میلادی آغاز شد و هم اکنون نیز از جمله مهمترین حوزه های مطالعاتی بشمار میرود. این مطالعات، هم مباحث مربوط به تخلیه شهری و هم تخلیه ساختمان ها در هنگام بروز حوادث مختلف را دربرمیگیرد (۸-۱۰).

پژوهش های حوزه تخلیه اضطراری و حرکت توده افراد اغلب به دو صورت تجربی و مدل سازی انجام میپذیرد. از آنجایی که آزمایش های تجربی در شرایط واقعی و مخصوصاً برای تحلیل رفتار و حرکت انبوه افراد، فرآیندی بسیار دشوار و گاه غیرممکن میباشد، پژوهشگران این عرصه بیشتر به سمت مدل سازی حرکت و رفتار توده افراد در شرایط اضطراری روی آورده اند و سعی در شبیه سازی عملکرد انسان در این شرایط پرتنش داشته اند (۱۱-۱۴). به موازات مدل های شبیه سازی، تکنولوژی های تصویری و دیجیتال نیز بکمک محققان آمده اند تا بتوان حرکت و رفتار افراد در شرایط اضطراری را مورد مطالعه و بررسی قرار دهند. از پرکاربردترین این دسته تحقیقات میتوان به آنالیز تصویری حرکت افراد بکمک تصاویر ضبط شده ویدئویی اشاره نمود (۱۵-۱۷).

بطور کلی تر، مطالعات انجام گرفته در زمینه تخلیه اضطراری را میتوان اغلب به دو دسته کلان پژوهش های شبیه سازی محور و بهینه سازی محور تقسیم نمود. پژوهش های شبیه سازی محور اغلب به کاوش در پارامترهای مؤثر در روند تخلیه افراد و یا ارزیابی عملکرد تخلیه و همچنین بررسی سناریوها و استراتژی های مختلف میپردازد (۳، ۸، ۱۸، ۱۹). مدل های شبیه سازی محور، خود به دو شاخه مدل های ماکروسکوپی^۱ و مدل های میکروسکوپی^۲ تقسیم میشوند. در مدل های ماکروسکوپی، چگونگی رفتار توده افراد بصورت یکپارچه مدل میشود و از شاخص ترین آنها میتوان به مدل جریان ترافیک^۳ (۱۴، ۲۰) و مدل مکانیک سیالات^۴ (۲۱، ۲۲) اشاره نمود. از سوی دیگر، مدل های میکروسکوپی، بیشتر به بررسی تعامل افراد با یکدیگر پرداخته و جزئیات رفتار تک تک افراد را در نظر میگیرد. از مهمترین و پرکاربردترین مدل های میکروسکوپی میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

- Social Force Model (SFM) (۲۳)

- Cellular Automata (CA) (۲۴، ۲۵)

- Lattice Gas Model (۲۹-۲۶)

- Agent-Based Model (ABM) (۱۹، ۳۰، ۳۱)

ژنگ^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۹ (۱۲) هفت مدل شبیه سازی حرکت افراد (شامل مدل های مذکور) را مورد مقایسه و بررسی قرار دادند. آنها متوجه شدند در میان مدل های فوق، Social Force Model میتواند شبیه سازی واقعگرایانه تری را ارائه دهد. دانشمندان دیگری نیز این مسئله را تصدیق نموده اند که از جمله آنها میتوان به (۳۲، ۳۳) اشاره نمود. در این مدل که برپایه قوانین نیوتنی بنیان نهاده شده، افراد تحت تأثیر نیروهای جذب کننده به سمت مقصد (تمایل افراد برای حرکت به سمت مقصد) و نیروهای دفع کننده از سمت موانع و سایر افراد (تمایل افراد برای خودداری از برخورد به موانع و یا سایر افراد) حرکت میکنند (۲۳).

دسته دوم از پژوهش های حوزه تخلیه اضطراری مربوط به بهینه کردن فرآیند تخلیه میباشد. این پژوهش ها اغلب تلاش در به حداقل رساندن برخی پارامترها از جمله مدت زمان تخلیه کامل، ریسک جانی و یا شدت ازدحام دارند. از مهمترین مدل های بهینه سازی میتوان به موارد زیر اشاره نمود:

- Staged-Evacuation Optimization Models (۹)

- Route Optimization Models (۱۹)

- Network Optimization Models (۸)

^۱ Macroscopic

^۲ Microscopic

^۳ Traffic flow model

^۴ Fluid mechanic model

^۵ Zheng

از دیگر زمینه های مطالعاتی در تخلیه اضطراری، تحلیل ریسک طی فرآیند تخلیه اضطراری در هنگام وقوع حوادث میباشد. از جمله این مطالعات میتوان به مطالعات یانگ^۶ و همکارانش (۳۴) اشاره نمود که طی ارائه مدل FIRECAM، گسترش آتش و همچنین رفتار افراد در شرایط آتش سوزی را بصورت مدل های احتمالاتی و قطعی مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین شاخصی را برای ارزیابی ریسک تلفات جانی، بر مبنای میزان در معرض دود و حرارت ناشی از حریق بودن تعریف نمودند.

تحلیل ریسک در هنگام رخداد حوادث تنها به ریسک تلفات جانی افراد در معرض منبع تهدیدکننده محدود نمیشود بلکه ریسک خطرات ناشی از ازدحام شدید جمعیت و حضور افراد در شرایط تراکم زیاد جمعیت طی فرآیند تخلیه اضطراری نیز از جمله تهدیدهای قابل توجه میباشد. این مهم تاکنون از جنبه های مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است. از مهمترین این مطالعات میتوان به پژوهش های فرون^۷ در سال ۱۹۷۱ (۳۵) اشاره نمود که در آن، شاخصی برای ارزیابی ایمنی تخلیه و کیفیت گذردهی توده افراد معرفی گردید. این شاخص، مستقیماً به تراکم افراد در یک فضای معین وابسته است. همچنین هلبینگ^۸ و همکارانش در سال ۲۰۰۲ (۵) یک مدل تخلیه توده افراد را ارائه نمودند که در آن، دو سناریو شرایط نرمال و شرایط اضطراری مدل سازی شده و نتایج بدست آمده نشان داد که در ازدحام های شدید و تراکم جمعیت های بالا، ظرفیت گذردهی راهروها و خروجی ها با افت قابل توجهی مواجه میشود. پدیده قفل شدن جریان عبوری در خروجی ها و همچنین رفتارهای خشن مکرراً رخ داده و در نتیجه بازده تخلیه افت چشمگیری پیدامیکند. آنها افزایش چشمگیر اصطکاک در بین افراد را از مهمترین دلایل افت بازده تخلیه عنوان کردند. اصطلاح "Faster is slower effect" برای بیان واضح تر این پدیده بکار گرفته شده است. در همین راستا، از آنجا که رابطه تراکم - سرعت در بحث مدیریت حرکت توده افراد و ازدحامات نقش بسیار پررنگی دارد، مطالعات زیادی در تحلیل این رابطه صورت گرفته است و مطالعات لوواس^۹ در سال ۱۹۹۴ (۱۴) را میتوان جزو مهمترین آنها دانست. این پژوهش، بازده تخلیه را با در نظر گرفتن رابطه تراکم - سرعت مورد واکاوی قرار میدهد. در میان پژوهش های جدیدتر، یانگ^۶ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ (۳۶) حرکت جمعیت متراکم افراد را در راه پله های اضطراری با روش تحلیل ویدئویی و بصورت عملی مورد مطالعه قرار دادند.

۳. هدف پژوهش

در هنگام تخلیه اضطراری، بعلت هجوم توده افراد به سمت خروجی های اضطراری، ازدحام شدیدی در محل این خروجی ها پدید می آید. مطالعات نشان میدهد در برخی از تخلیه های اضطراری، مصدومیت های ناشی از فشارهای بسیار شدید و از دست دادن کنترل در ازدحامات، گاهاً بیشتر است از مصدومیت هایی که مستقیماً در اثر خود حادثه پدید می آید (۵، ۷، ۳۷). به عنوان مثال، ژنگ^{۱۰} و ژو^{۱۱} (۳۷) حادثه رخ داده در یک مجتمع آموزشی در چین و هلبینگ^۸ و همکارانش (۵، ۷) چندین فستیوال را مورد مطالعه قرار دادند و متوجه شدند تمامی مصدومیت ها، در ازدحامات شدید در محل خروجی ها و راهروها اتفاق افتاده اند و هیچ مصدومیتی مستقیماً بر اثر خود حادثه نامترقبه رخ نداده است. همانطور که در فصل قبل مفصلاً شرح داده شد، بحث ریسک خطرات ازدحام در روند تخلیه اضطراری از جنبه های مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است. در اکثر این مطالعات، از یک تعداد جمعیت اولیه بعنوان فرض مسئله استفاده میشود و ادامه روند پژوهش و نهایتاً نتیجه گیری ها بر پایه این فرض انجام می پذیرد. این درحالیست که تاکنون به یافتن رابطه ای مابین این دو پارامتر پرداخته نشده است و حساسیت و وابستگی این دو پارامتر مورد ارزیابی و کنکاش قرار نگرفته است. در نتیجه، وجود یک مدل و رابطه جهت بیان ریاضیاتی وابستگی ریسک خطرات ازدحام به پارامتر اندازه جمعیت اولیه متقاضیان خروج میتواند به نزدیکتر شدن مدل سازی ها به شرایط واقعی و همچنین افزایش بهره وری مطالعات در این زمینه کمک نماید. در این پژوهش قصد داریم به واکاوی چگونگی وابستگی ریسک خطرات ازدحامات در مقابل پارامتر اندازه جمعیت اولیه پردازیم و حساسیت این دو پارامتر را نسبت به یکدیگر ارزیابی نماییم.

Yung^۶

Fruin^۷

Helbing^۸

Løvås^۹

Yang^{۱۰}

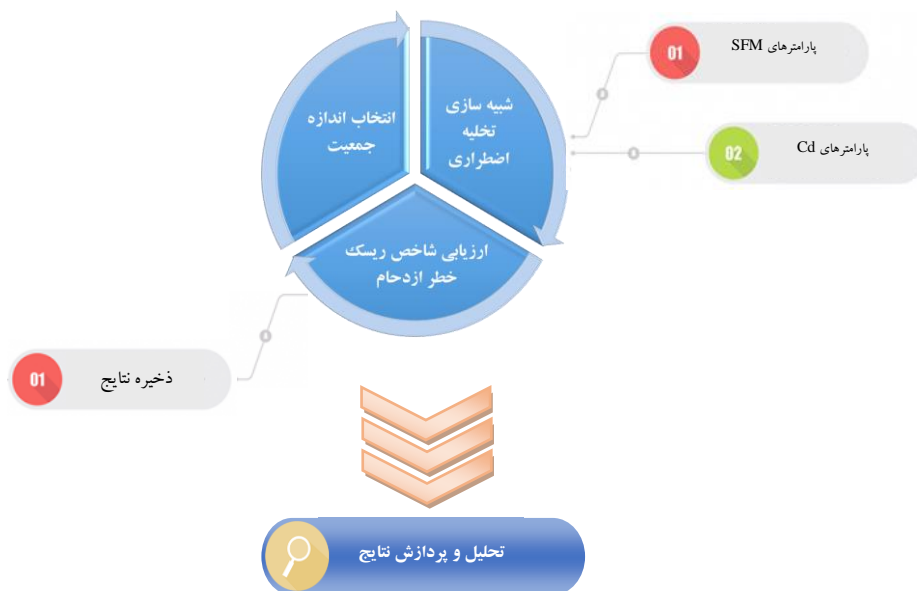
Zhang^{۱۱}

Zhou^{۱۲}

۴. مدل سازی و روش تحقیق

در این پژوهش، یک محوطه با ابعاد 40×25 متر دارای یک خروجی اضطراری به عرض $3/5$ متر، بعنوان منطقه مورد مطالعه تخلیه اضطراری مدل سازی شده است. کلیه افراد، بصورت تخلیه یکپارچه آطلی یک شبیه سازی کامپیوتری میکروسکوپییک شروع به تخلیه محوطه مینمایند. طی پروسه تکراری افزایش اندازه جمعیت و شبیه سازی مجدد تخلیه افراد، شاخص ریسک خطرات ازدحام (که در فصل بعد مفصلاً شرح داده خواهد شد) در هر شبیه سازی ثبت شده و پس از اتمام جمع آوری داده ها و آنالیز آنها، رابطه بین دو پارامتر اندازه جمعیت و ریسک خطرات ازدحام مشخص میگردد. شکل ۱. فرآیند کلی این پژوهش را نشان میدهد.

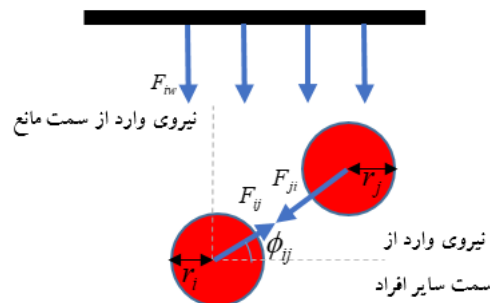
شبیه سازی کامپیوتری حرکت افراد تحت ورژن ۳ زبان برنامه نویسی پایتون و بوسیله کامپیوتر با پردازنده Intel Core i7 7700HQ و رم 16 Gb انجام میگردد. کتابخانه های اصلی مورد استفاده در این برنامه NumPy, Pygame و Scipy میباشد. هسته اصلی شبیه سازی منطق حرکت افراد، الگوریتم SFM میباشد که در فصل پیشین، برتری این مدل در شبیه سازی حرکت توده افراد در شرایط اضطراری مشروح گشت. همچنین برای ارزیابی ریسک خطرات ازدحامات، از مدل Crowd Danger (Cd) (۳۸) استفاده شده است. این مدل نیز جزو جدیدترین مدل های مطالعاتی ازدحامات است که معادلات پایه آن بر تئوری تنش های ناشی از ازدحامات استوار است (۳۸-۴۱). به جهت کاهش تأثیر عدم قطعیت های ناشی از شرایط غیر ثابت و رفتار متفاوت افراد در اجراهای مختلف شبیه سازی، هر شبیه سازی با تعداد مشخص جمعیت، $n=32$ بار اجرا میگردد و میانگین نتایج آنها در محاسبات وارد میشود (بخاطر نوع خاص الگوریتم این شبیه سازی، تعداد اجراهای شبیه سازی باید مضربی از تعداد پردازشگرهای کامپیوتر باشد)، همچنین جهت جلوگیری از تفاوت در الگوی حرکت توده افراد به سمت خروجی، توزیع اولیه افراد در هر مترمربع، بصورت مساوی انجام میپذیرد.



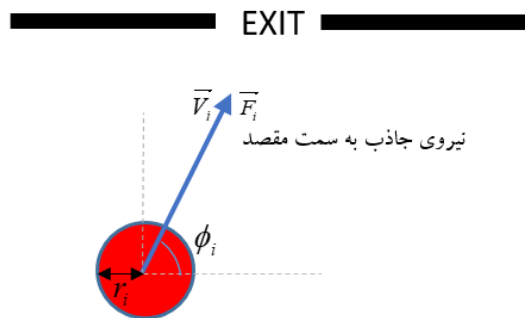
شکل ۱ - فرآیند انجام پژوهش

۴.۱. Social Force Model

این مدل که اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط هلینگ و همکارانش (۲۳) جهت مدل سازی حرکت افراد معرفی شد، تعامل افراد با یکدیگر و همچنین با اجسام و موانع را بکمک قانون دوم نیوتن بصورت معادلات ریاضی مدل میکند. در این معادلات، متناسب با فاصله فرد با موانع و یا سایر افراد، نیروهای فشاری، دافعه و اصطکاکی وجود دارد که مبنای کاهش و یا افزایش سرعت حرکت قرار میگیرد (شکل ۲). به عنوان مثال، وقتی فرد بیش از یک مقدار معین به مانع نزدیک میشود، نیروی دافعه بین او و مانع منجر به کاهش سرعت فرد میگردد. در مدل های ارتقا یافته SFM نیروهای جذب کننده به سمت مقصد بصورت ذهنی، برای افراد تعریف شده که بوسیله آن، متناسب با فاصله افراد تا مقصد (محل درب خروجی)، نیرویی جذب در افراد پدید می آید که مؤلفه سرعت هم راستا با مقصد را در آنها افزایش داده، در نتیجه افراد به سمت مقصد شروع به حرکت میکنند (شکل ۳). روابط (1-3) نیز بیانگر معادلات پایه ای این مدل هستند.



شکل ۲ - نیروهای وارد بر فرد در مدل Social Force



شکل ۳ - راستای نیروهای جاذب به سمت مقصد در مدل Social Force

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t) \vec{e}_i^0 - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \vec{f}_{ij} + \sum_w \vec{f}_{iw} \quad (1)$$

$$f_{iw} = \{A_i \exp[(r_i - d_{iw})/B_i] + kg(r_i - d_{iw})\} \vec{n}_{iw} - kg(r_i - d_{iw})(\vec{v}_i \cdot \vec{t}_{iw}) \vec{t}_{iw} \quad (2)$$

$$f_{ij} = \{A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] + kg(r_{ij} - d_{ij})\} \vec{n}_{ij} + kg(r_{ij} - d_{ij}) v_{ij}^t \vec{t}_{ij} \quad (3)$$

در روابط فوق f_{ij} و f_{iw} معرف نیروهای جاذب و یا دافع بین فرد i و فرد j و یا مانع w میباشد، t_{ij} و t_{iw} و e متغیرهای تعیین کننده راستای جهت گیری فرد و v_i^0 و v_i بترتیب معرف سرعت کنونی و سرعت مورد انتظار افراد است. m_i و r_i متغیرهایی برای توصیف کاراکنر افراد بوده و بترتیب معرف جرم و شعاع بدن افراد میباشد. d_{ij} و d_{iw} بترتیب فاصله بین افراد با یکدیگر و فاصله فرد با مانع میباشد. A_i ، B_i ، k و κ ثابت های مدل بوده و متناسب با شرایط پیاده سازی مدل، تعیین میشوند. مقادیر اختصاص داده شده به پارامترهای مدل، در جدول ۱ آورده شده است.

شکل ۴. تصویری از ثانیه ۱۸۰ شبیه سازی میباشد که بصورت شماتیک، افراد درحال تخلیه از محوطه مدل را نمایش میدهد و ازدحام افراد در محل درب خروجی و همچنین انتهای راهرو به وضوح قابل مشاهده است.

جدول ۱- پارامترهای اصلی مدل SFM و مدل Cd

پارامترهای مدل SFM	مقدار	پارامترهای مدل Cd	مقدار
A_i	2000 N	Cl_{max}	3 m^{-1}
B_i	0.08 m	κ	0.0929 m^2
k	$1.2 \cdot 10^5 \text{ kg s}^{-2}$		
κ	$2.4 \cdot 10^5 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$		
r	0.25 m		
m	80 kg		



شکل ۴- ثانیه ۱۸۰ شبیه سازی با تعداد جمعیت ۸۰ نفر

۴.۲. Crowd Danger

همانطور که در مقدمه گفته شد، پدیده ازدحام در فرآیند تخلیه اضطراری، منجر به پدید آمدن دو پیامد منفی، یعنی کاهش بازده تخلیه و مصدومیت های ناشی از تنش و فشار وارده بر افراد میگردد. از مهمترین مطالعات این حوزه میتوان به پژوهش های سایم^۴ و همکارانش (۴۲) اشاره نمود که تمرکز اصلی مطالعات آنها، رفتارهای تهاجمی و پرخاشگرانه در ازدحامات شدید است. الیوت^۵ و اسمیت^۶ نیز مطالعات گسترده ای را با تمرکز بر مصدومیت و

^۴ Sime

^۵ Elliott



سومین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی شریف - تیر ۱۳۹۸



جراحات رخ داده در ازدحامات ناشی از تخلیه اضطراری به انجام رساندند (۴۳). آنها دو عامل (از دست رفتن کنترل افراد بعثت فشارهای شدید وارده از طرف سایرین) و (دشواری و در برخی موارد غیرممکن بودن بلند شدن افرادی که در ازدحامات زمین میخورند) را مسبب اصلی مصدومیتها عنوان کردند. پاولز^{۱۶} و همچنین هلینگ و همکارانش توجه همگان را به شرایطی بس دشوارتر در مواردی که سالمندان و کودکان نیز جزو تخلیه کنندگان هستند منعطف ساختند (۴۴، ۴۵). مطالعات متمرکز بر کاهش بازده تخلیه در سالهای نزدیکتر و با پژوهش هلینگ و همکارانش در سال ۲۰۰۹ (۳۳) شدت گرفت. آنها سرعت و کیفیت تخلیه را در مقابل شدت های متفاوت ازدحامات، بخصوص در محل خروجی ها و تنگراهها مورد ارزیابی و مقایسه قراردادند.

یکی از قدرتمندترین مدل های ارزیابی ریسک خطر ازدحامات که بر پایه نظریات هلینگ و همکارانش (۳۹) میباشد، مدل Crowd danger است که توسط فلیسیانی (۳۸) توسعه داده شده است. این مدل با در نظر گرفتن تراکم افراد، شاخصی را جهت بیان شدت خطر حضور در یک ازدحام، بصورت غیرخطی ارائه میدهد. توری پایه این مدل بر اساس رابطه (4) میباشد که توسط هلینگ در سال ۲۰۰۰ (۳۹) معرفی شد.

$$Cd = Cl \cdot \rho \quad (4)$$

در این رابطه تراکم افراد ρ در یک محدوده مشخص سنجیده میشود. Cl نیز معرف سطح ازدحام^{۱۷} بوده و بصورت طبقه بندی شده شاخص دهی میگردد و بکمک این دو پارامتر، شاخص خطر ازدحام جمعیت Cd بدست می آید. فلیسیانی (۳۸) با انجام آزمایشات تجربی بسیار، رابطه ای غیرخطی (5) شامل ضرایب ثابت متناسب با شرایط حضور افراد ارائه نمود.

$$Cl(\rho) = Cl_{max}(1 - e^{K\rho}) \quad (5)$$

که در آن Cl_{max} بیشترین سطح ازدحام، بدون در نظر گرفتن میزان تراکم جمعیت میباشد. K نیز ضریب رگرسیون مدل میباشد. با جایگزینی معادله (4) در معادله (5)، رابطه نهایی بصورت رابطه (6) بدست می آید.

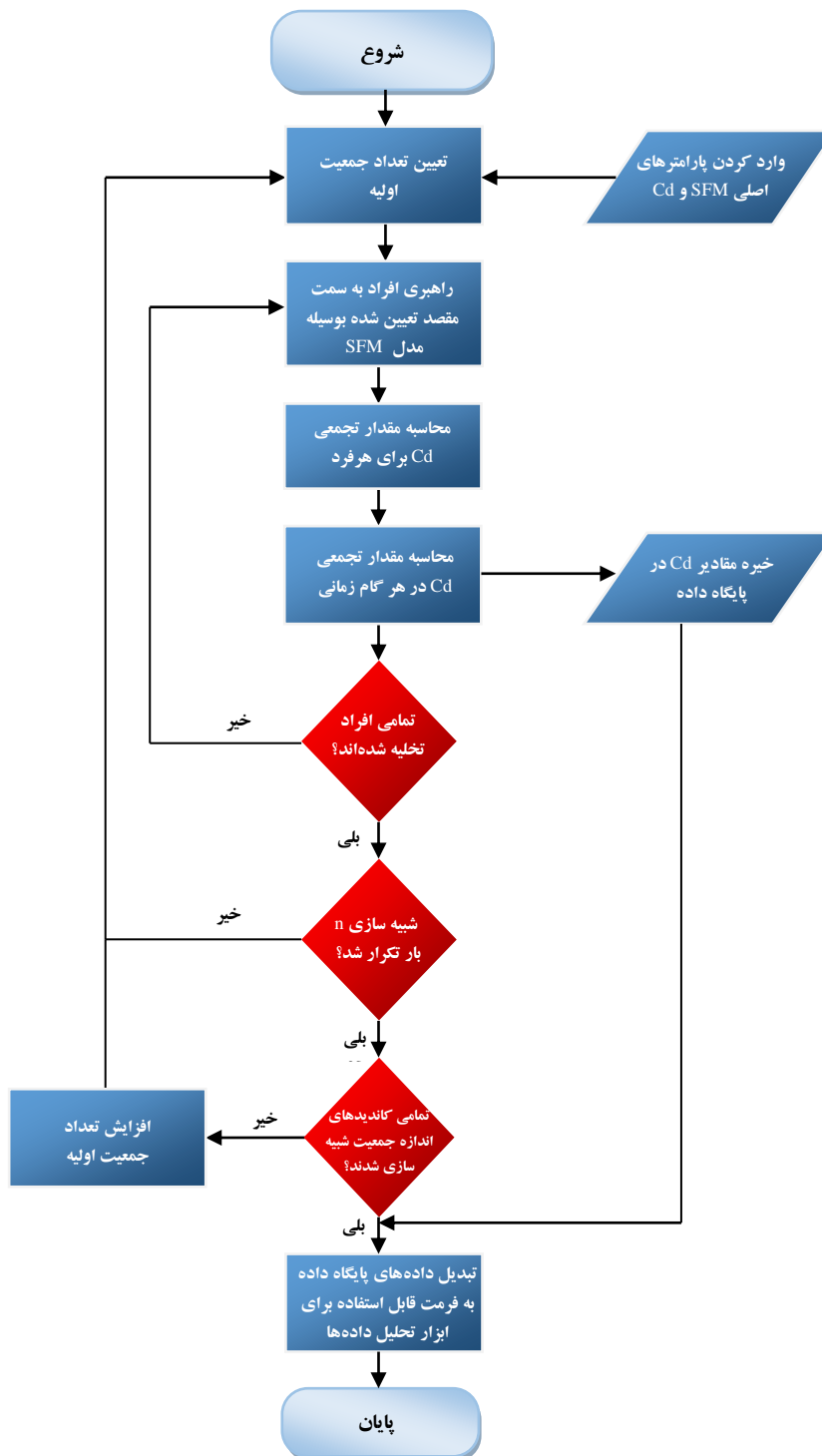
$$Cd(\rho) = \rho \cdot Cl_{max}(1 - e^{K\rho}) \quad (6)$$

ضرایب مدل نیز با توجه به شرایط این پژوهش، بکمک جداول و نمودارهای ارائه شده توسط ارائه دهنده مدل، انتخاب و در جدول 1 آورده شده است. مدل فوق در محیط برنامه نویسی Python کدنویسی شده و بصورت یکپارچه با الگوریتم شبیه سازی تخلیه اضطراری عمل مینماید. شکل 5. فلو چارت الگوریتم یکپارچه شبیه سازی تخلیه اضطراری و ارزیابی شاخص خطر ازدحام را نشان میدهد.

¹⁶ Smith

¹⁷ PAULS

¹⁸ Congestion Level



شکل ۵- فلوچارت الگوریتم ترکیبی شبیه‌سازی تخلیه و ارزیابی شاخص خطر ازدحام

۵. محدودیت ها

در این مدل سازی، وزن، ابعاد بدن و سرعت حداکثر افراد یکسان فرض شده است. این درحالیست که در شرایط واقعی، یک توده جمعیت متقاضی خروج اضطراری، شامل کودکان، بزرگسالان، افراد مسن و افراد کم توان می باشد که در این مدل پوشش داده نشده است. همچنین میدانیم رفتار افراد در روند تخلیه در شرایط اضطراری مختلف مثل آتشسوزی و یا زلزله متفاوت است و میتواند عملکرد تخلیه را تحت تأثیر قرار دهد. این مسئله نیز در این مدل سازی در نظر گرفته نشده و پارامترهایی مثل کاهش دید افراد و یا میزان متغیر اضطراب ناشی از تهدید نیز وارد مدل سازی نشده اند.

۵. تحلیل نتایج

پس از اجرا کردن برنامه شبیه سازی با تعداد جمعیت های اولیه متفاوت، شاخص خطر ازدحامات هر شبیه سازی ثبت گردیده و در شکل ۶. نمایش داده شده است. افزایش جمعیت بصورت پنج تایی و از مقدار کمینه ۵ نفر تا مقدار بیشینه ۱۲۰ نفر صورت گرفت. همچنین نتایج شبیه سازی در جدول ۲ آورده شده است. شکل ۹. نیز نمایانگر منحنی مار بر نقاط داده های بدست آمده از شبیه سازی است و همانطور که مشاهده میشود، با افزایش تعداد جمعیت اولیه متقاضی خروج، شاخص خطر ازدحامات بصورت غیرخطی افزایش میابد. پس از تحلیل داده ها، رابطه حاکم بر نتایج بصورت رابطه (7) بدست می آید. میزان انطباق رابطه بدست آمده با شاخص R^2 ارزیابی و برابر ۰,۹۹۸۱ بدست آمده است که در بازه قابل قبول قرار دارد. ضرایب و ثابت های رابطه بدست آمده میتواند برای مطالعه های موردی مختلف و تحت شرایط مختلف، تغییر کند. در اینجا هدف از بیان این رابطه، چگونگی رفتار پارامتر خطر ازدحام در فرآیند تخلیه اضطراری، در برابر تغییر اندازه جمعیت اولیه متقاضی تخلیه میباشد. برای شرایط مسئله این مقاله، ضرایب و ثابت های رابطه (7) مطابق جدول ۳ میباشد که با جایگذاری در رابطه (7) بصورت رابطه (8) درمی آید.

$$CDI = a_0 + a_1(N - mean) + a_2(N - mean)^2 + a_3(N - mean)^3 \quad (7)$$

جدول ۲- نتایج شبیه سازی تخلیه اضطراری

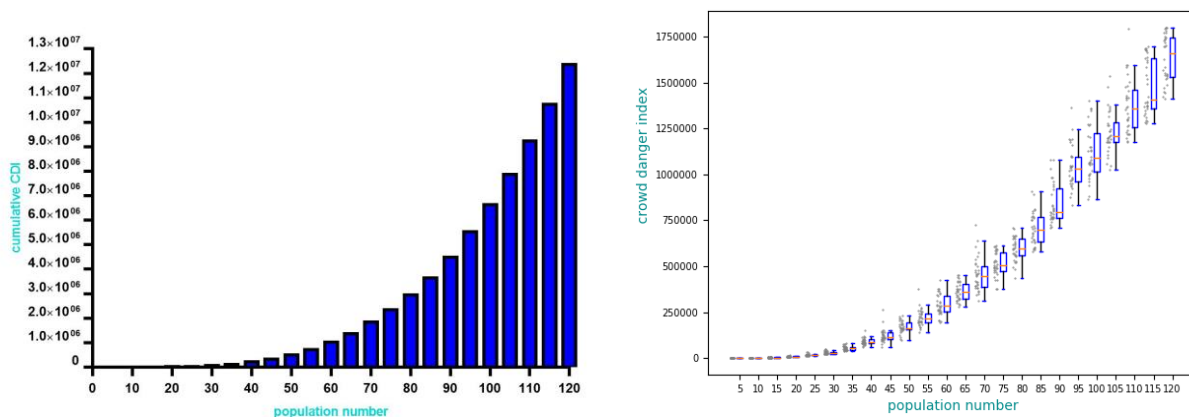
تعداد جمعیت	میانگین CDI	تعداد جمعیت	میانگین CDI	تعداد جمعیت	میانگین CDI
5	128.524	45	123007.058	85	705891.881
10	1096.658	50	170367.792	90	839420.292
15	3782.204	55	220707.504	95	1039647.396
20	8779.854	60	289943.887	100	1121234.920
25	17518.542	65	363614.123	105	1229980.557
30	30590.311	70	455750.702	110	1378741.194
35	54385.044	75	512266.792	115	1478741.194
40	91636.265	80	593591.468	120	1633052.717

جدول ۳- ضرایب و ثابت های رابطه حاکم بر نتایج شبیه سازی

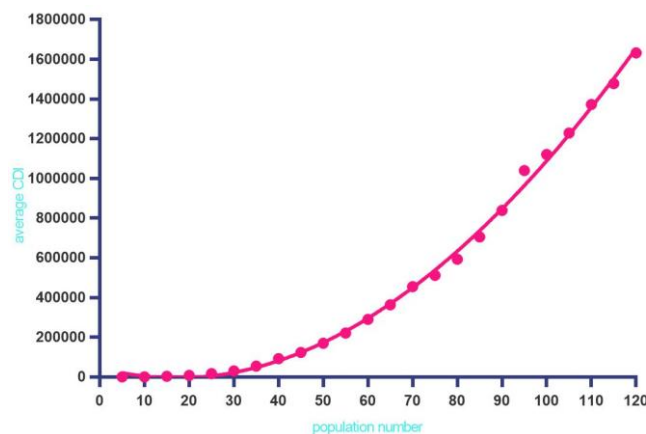
مقدار	ضریب/ثابت
331443	a_0
14614	a_1
153/2	a_2
-0/1237	a_3
62/5	mean

$$CDI = 331443 + 14614(N - 62.5) + 153.2(N - 62.5)^2 - 0.1237(N - 62.5)^3 \quad (8)$$

یکی از دلایل افزایش غیرخطی شاخص ریسک خطرات ازدحام در برابر افزایش جمعیت اولیه را میتوان افزایش تنش ها و فشارهای وارده بر افراد از طرف توده جمعیت و در نتیجه افزایش اصطکاک بین بدن افراد دانست که نهایتاً منجر به کاهش سرعت حرکت و افت بازده تخلیه میگردد. این مسئله توسط هلبینگ و همکارانش تأیید شده نتایج مشابهی بدست آمده است (۴۵). از دیگر علل افزایش غیرخطی این شاخص میتوان به افزایش تعداد رفتارهای رقابت طلبانه و پرخاشگرانه اشاره کرد که بعلاوه افزایش زمان انتظار افراد در صف های خروجی شکل میگیرد و اغلب بخاطر ترس و اضطراب ناشی از احتمال ناتوانی در خارج شدن از تهدید موجود پدید می آید. این مسئله نیز در پژوهش سایم و همکارانش مشاهده گردید و مفصلاً مورد بحث و بررسی قرار گرفت (۴۲).



شکل ۶ - نمودار شمعی (سمت راست) و نمودار تجمعی (سمت چپ) مقادیر شاخص خطر ازدحام



شکل ۷ - برازش مقادیر شاخص خطر ازدحام

همانطور که از شکل ۷. پیداست، با افزایش تعداد جمعیت اولیه تا حدود ۳۰ نفر و تراکم جمعیت $0/3$ نفر در هر مترمربع (با در نظر گرفتن محوطه مدل به مساحت ۱۰۰۰ مترمربع) خطر ازدحام بصورت خطی با شیب بسیار کم افزایش میابد. علت میتواند عدم وجود آمدن صف در محل درب خروجی و عدم وقوع رفتارهای رقابت طلبانه و در نتیجه عدم افت بازده تخلیه باشد. برای تراکم جمعیت حدود $0/3$ تا $0/8$ نفر در هر مترمربع، رشد نمودار به سبب تأثیر همزمان افزایش رفتارهای رقابت طلبانه و افزایش اصطکاک بین افراد، بصورت غیرخطی اتفاق می افتد. برای تراکم جمعیت های بزرگتر از $0/8$ نفر در هر مترمربع، رشد نمودار تقریباً به حالت خطی درمی آید. این مسئله نیز میتواند بدین علت باشد که بیشتر رفتارهای رقابت طلبانه، در نزدیکی محل درب خروجی رخ میدهد (۴۲) و با افزایش جمعیت، علیرغم اینکه صف ها طولانی تر میگردد اما تعداد افراد ابتدای صف (نزدیک ترین افراد به درب خروجی)



سومین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی شریف - تیر ۱۳۹۸



تقریباً ثابت میماند و این درحالیست که رفتارهای رقابت طلبانه در همین ناحیه رخ میدهد. در نتیجه تعداد اینگونه رفتارها تقریباً ثابت میماند. این امر موجب میگردد تا رشد نمودار از حالت غیرخطی خارج گردد. نتایج عددی میتواند برای موارد مطالعاتی مختلف، متفاوت باشد و هدف در اینجا تحلیل رفتار شدت ازدحام در مقیاس های مختلف جمعیت میباشد.

۶. نتیجه گیری

تخلیه اضطراری از جمله مسائلی است که مستقیماً با جان انسانها در ارتباط است. لذا تلاش محققان همواره بر آن بوده تا روند تخلیه را هر چه بیشتر بهبود بخشند. عملکرد تخلیه در برابر پارامترهای زیادی از جمله پارامتر شدت ازدحام تاکنون مورد ارزیابی قرار گرفته است اما در اغلب این مدل سازی ها و مطالعات، تعداد جمعیت یک عدد ثابت فرض شده و مطالعات بر پایه آن انجام پذیرفته است. در این مقاله با شبیه سازی عامل محور، رابطه تعداد جمعیت متقاضی تخلیه در برابر خطر ازدحام مورد بررسی قرار گرفت و بوسیله زبان برنامه نویسی پایتون و با بهره بردن از الگوریتم SFM، یک محوطه با ابعاد مشخص مدل سازی شده و با تکرار فرآیند شبیه سازی تخلیه با تعداد جمعیت های متفاوت و تحلیل نتایج، رابطه ای غیرخطی حاکم بر این دو پارامتر بدست آمد. با تحلیل نتایج مشخص شد که رشد شاخص خطر ازدحام در تراکم جمعیت اولیه بسیار زیاد و همچنین بسیار کم، رفتاری خطی دارد اما در تراکم جمعیت اولیه بین ۰/۳ تا ۰/۸ نفر در هر مترمربع (با در نظر گرفتن شرایط مسئله این مقاله) بصورت غیرخطی افزایش میابد. این رابطه نیز در کنار سایر روابط حاکم بر پارامترهای مدل سازی تخلیه، مثل رابطه تراکم- سرعت، جهت نزدیکتر شدن مدل سازی ها به واقعیت، میتواند مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهش های آتی، با در نظر گرفتن ویژگی های جسمی و روحی مختلف افراد متقاضی خروج، میتوان مدل سازی هر چه منطبق تر بر واقعیت انجام داد.

۱۲. مراجع

1. Xiong Q, et al. (2017) A Dynamic Indoor Field Model for Emergency Evacuation Simulation. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6(4):104.
2. Bohannon J (2005) Directing the herd: Crowds and the science of evacuation. *Science* 310(5746):219-221.
3. Thompson PA & Marchant EW (1995) A computer model for the evacuation of large building populations. *Fire safety journal* 24(2):131-148.
4. Miao G (2011) Building preliminary guideline for earthquake evacuation.
5. Helbing D, Farkas IJ, Molnar P, & Vicsek T (2002) Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestrian and evacuation dynamics* 21(2):21-58.
6. Anonymous (!!! INVALID CITATION !!! (5-7)).
7. Helbing D & Mukerji P (2012) Crowd disasters as systemic failures: analysis of the Love Parade disaster. *EPJ Data Science* 1(1):7.
8. Sheffi Y, Mahmassani H, & Powell WB (1982) A transportation network evacuation model. *Transportation research part A: general* 16(3):209-218.
9. Liu Y, Lai X, & Chang G-L (2006) Cell-based network optimization model for staged evacuation planning under emergencies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (1964):127-135.
10. Wang J-h & Sun J-h (2014) Principal aspects regarding to the emergency evacuation of large-scale crowds: a brief review of literatures until 2010. *Procedia engineering* 71:1-6.
11. Abdelghany A, Abdelghany K, Mahmassani H, & Alhalabi W (2014) Modeling framework for optimal evacuation of large-scale crowded pedestrian facilities. *European Journal of Operational Research* 237(3):1105-1118.
12. 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.
13. Thompson PA & Marchant EW (1994) Simulex; developing new computer modelling techniques for evaluation. *Fire Safety Science* 4:613-624.
14. Løvås GG (1994) Modeling and simulation of pedestrian traffic flow. *Transportation Research Part B: Methodological* 28(6):429-443.
15. Hoogendoorn SP, Daamen W, & Bovy PH (2003) Extracting microscopic pedestrian characteristics from video data. *Transportation Research Board Annual Meeting*, (Citeseer), pp 1-15.



16. Zhan B, Monekosso DN, Remagnino P, Velastin SA, & Xu L-Q (2008) Crowd analysis: a survey. *Machine Vision and Applications* 19(5-6):345-357.
17. Heliövaara S, Kuusinen J-M, Rinne T, Korhonen T, & Ehtamo H (2012) Pedestrian behavior and exit selection in evacuation of a corridor—An experimental study. *Safety science* 50(2):221-227.
18. Cova TJ & Johnson JP (2002) Microsimulation of neighborhood evacuations in the urban-wildland interface. *Environment and Planning A* 34(12):2211-2229.
19. Chen X & Zhan FB (2008) Agent-based modelling and simulation of urban evacuation: relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies. *Journal of the Operational Research Society* 59(1):25-33.
20. Hughes RL (2002) A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research Part B: Methodological* 36(6):507-535.
21. Helbing D (1998) A fluid dynamic model for the movement of pedestrians. *arXiv preprint cond-mat/9805213*.
22. Henderson LF (1974) On the fluid mechanics of human crowd motion. *Transportation research* 8(6):509-515.
23. Helbing D & Molnar P (1995) Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E* 51(5):4282.
24. Blue V & Adler J (1999) Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrian flows. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (1678):135-141.
25. Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, & Zittartz J (2001) Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 295(3-4):507-525.
26. Muramatsu M, Irie T, & Nagatani T (1999) Jamming transition in pedestrian counter flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 267(3-4):487-498.
27. Helbing D, Isobe M, Nagatani T, & Takimoto K (2003) Lattice gas simulation of experimentally studied evacuation dynamics. *Physical review E* 67(6):067101.
28. Guo R & Huang H-J (2008) A mobile lattice gas model for simulating pedestrian evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 387(2-3):580-586.
29. Tajima Y & Nagatani T (2001) Scaling behavior of crowd flow outside a hall. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 292(1-4):545-554.
30. Turner A & Penn A (2002) Encoding natural movement as an agent-based system: an investigation into human pedestrian behaviour in the built environment. *Environment and planning B: Planning and Design* 29(4):473-490.
31. Pelechano N, Allbeck JM, & Badler NI (2007) Controlling individual agents in high-density crowd simulation. *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, (Eurographics Association), pp 99-108.
32. Yu W, Chen R, Dong L, & Dai S (2005) Centrifugal force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E* 72(2):026112.
33. Helbing D & Johansson A (2009) Pedestrian, crowd and evacuation dynamics. *Encyclopedia of complexity and systems science*, (Springer), pp 6476-6495.
34. Yung D, Hadjisophocleous G, & Proulx G (1997) Modelling Concepts For The Risk-cost Assessment Model Firecam. *Fire Safety Science* 5:619-630.
35. Fruin JJ (1971) Pedestrian planning and design.
36. Yang L, Rao P, Zhu K, Liu S, & Zhan X (2012) Observation study of pedestrian flow on staircases with different dimensions under normal and emergency conditions. *Safety science* 50(5):1173-1179.
37. Zhang Y-l & Zhou X-b (2017) The occurrence laws of campus stampede accidents in China and its prevention and control measures. *Natural hazards* 87(2):659-673.
38. Feliciani C & Nishinari K (2018) Measurement of congestion and intrinsic risk in pedestrian crowds. *Transportation research part C: emerging technologies* 91:124-155.
39. Helbing D, Farkas I, & Vicsek T (2000) Simulating dynamical features of escape panic. *Nature* 407(6803):487.
40. Helbing D, Buzna L, Johansson A, & Werner T (2005) Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions. *Transportation science* 39(1):1-24.
41. Helbing D, Johansson A, & Al-Abideen HZ (2007) Dynamics of crowd disasters: An empirical study. *Physical review E* 75(4):046109.
42. Sime JD (1995) Crowd psychology and engineering. *Safety science* 21(1):1-14.
43. Elliott D & Smith D (1993) Football stadia disasters in the United Kingdom: learning from tragedy? *Industrial & Environmental Crisis Quarterly* 7(3):205-229.
44. Pauls J (1984) The movement of people in buildings and design solutions for means of egress. *Fire technology* 20(1):27-47.
45. Helbing D & Johansson A (2009) *Pedestrian, crowd and evacuation dynamics* (Springer).