تأثیر زمان تخلیه در برنامه‌ریزی مدیریت ایمنی آتش‌سوزی در دو ساختمان بلندمرتبه مسکونی*

علیرضا فلاحی- محمدرضا حافظی***- عاطفه امیدخواه*****

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۱/۲۸
تاریخ پذیرش نهایی: ۹۴/۰۳/۱۶

چکیده

توجه ویژه به مقوله ایمنی در برابر آتش‌سوزی در ساختمان‌های بلندمرتبه که تعداد زیادی جمعیت را در خود جای می‌دهند حائز اهمیت است. به‌دلیل چالش‌های منحصر به چنین ساختمان‌هایی، تأمین ایمنی این بناها نیازمند انجام برنامه‌ریزی و مدیریت ایمنی است. یکی از اصلی‌ترین موضوعات مورد توجه انجام تخلیه اضطراری ایمن و به‌موقع می‌باشد. پژوهش حاضر، به معرفی مفهوم «زمان تخلیه» در قالب دو بازه «زمان تأخیر» و «زمان حرکت» پرداخته است. بدین‌منظور بازه زمانی تأخیر پیش از شروع حرکت به دو روش، و بازه زمانی حرکت به سه روش برای دو ساختمان بلندمرتبه مورد مطالعه محاسبه شده و مقدار بیشینه نتایج به‌دست آمده از هریک، انتخاب و با هم جمع شده و به عنوان زمان کلی تخلیه درنظر گرفته شده است. سپس از طریق ترسیم خط زمان برای هر ساختمان و مراجعه به مؤلفه‌های اثرگذار در روشی که زمان بیشینه را نتیجه داده‌اند، عوامل مؤثر در افزایش زمان تخلیه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد به‌دلیل نبود ساختاری منسجم برای عهده‌دار شدن مسئولیت‌های مرتبط با ایمنی در ساختمان‌های بلند مسکونی، نگهداری نامناسب تجهیزات ایمنی، در هنگام رخداد آتش‌سوزی به‌علت تأخیر زمانی در شروع تخلیه ساکنان میزان زیادی از زمان موجود برای فرار را از دست خواهند داد و علاوه بر آن در هنگام خروج نیز با مسائلی چون حرکت کند جمعیت، مسدود شدن راه‌های خروج به‌دلیل کاهش عرض مفید و ورود دود و گازهای سمی به آن‌ها مواجه خواهند شد. نتیجه‌گیری نشان می‌دهد که تسریع فرآیند تخلیه اضطراری صرفاً به مفهوم حرکت سریع‌تر افراد در خروج نیست، بلکه با به حداقل رساندن زمان تأخیر پیش از تخلیه از طریق آموزش و مانور و انجام واکنشی سریع‌تر از طرف ساکنان و نیز کاربرد آسانسورها می‌توان ایمنی آتش را در تخلیه اضطراری افزایش داد.

واژگان کلیدی: مدیریت ایمنی، آتش‌سوزی، ساختمان بلند مسکونی، تخلیه اضطراری، زمان تخلیه.

* این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده سوم باعنوان «مدیریت ایمنی و کاهش تلفات در برج‌های مسکونی تهران (سانحه آتش‌سوزی)» با راهنمایی نویسنده اول و دوم در گروه پژوهشی بازسازی دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی است.

** استاد گروه پژوهشی بازسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
*** دانشیار گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
**** کارشناسی ارشد بازسازی پس از سانحه، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران (نویسنده مسئول).
Email: atefe_omidkhah@yahoo.com

مقدمه

امروزه در کشور ما به‌دلیل رشد جمعیت و توسعه شهری، سکونت در ساختمان‌های آپارتمانی رواج فراوانی دارد. هرچه این ساختمان‌ها بلندتر باشند، با افزایش تعداد طبقات و تراکم جمعیت و تجهیزات داخل آن‌ها، هنگام رخداد سوانحی مانند آتش‌سوزی چالش‌های بیشتری گریبانگیر ساکنان آنان خواهد بود که خروج ایمن به هنگام آتش‌سوزی یکی از آن‌هاست (Mu, Wang et al., 2013, p. 291). برای افزایش آمادگی رویارویی با چنین شرایطی از یک طرف، آئین‌نامه‌های ساختمانی ضوابطی را برای طرح و اجرای راه‌های خروج بنا وضع نموده و از طرف دیگر نهادهایی چون سازمان آتش‌نشانی به مردم توصیه می‌کنند تا نحوه صحیح خروج را در شرایط بحرانی فراگیرند. در اغلب آئین‌نامه‌ها و راهنماهای مدیریت ایمنی در ساختمان‌های بلند با کاربری مسکونی در کشورهای پیشتاز ایمنی آتش همچون آمریکا و کانادا، برنامه‌ریزی برای انجام تخلیه یک ضرورت است[۱]. با وجود پیشنهاد رویکردهایی چون عدم تخلیه (Kealy, 2008, p. 25) و محافظت در محل (Richardson, 2004, p. 31; Kobes et al., 2008, p. 15) استفاده از طبقات پناه و فضاهای پناهگیری[۲] (Barber & Van Merkestein, 2003, p. 70; O'Connor et al., 2012, p. 83) و به‌کارگیری آسانسورها (Liao et al., 2014, p. 583; Barney, 2003, p. 73)، هنوز تخلیه ساکنان از طریق پله توسط بسیاری به‌عنوان نهایی‌ترین راه تأمین ایمنی برشمرده می‌شود. خارج کردن تمامی افراد از ساختمان این اطمینان را به‌دست می‌دهد که دیگر هیچ فردی در معرض خطر نیست (Lay, 2007, p. 490). مقررات کشور در قالب مبحث سوم مقررات ملی نیز ضوابطی فنی اجزای سیستم خروج را تعیین نموده است. نکته قابل توجه این است که در رویکرد جهانی تأمین ایمنی فرآیند تخلیه، تدابیر به سطحی فراتر از وضع محدودیت‌های ابعاد و مصالح سیستم خروج رفته و زمانی که برای تخلیه در آن‌ها صرف می‌شود مورد توجه است. به‌عنوان مثال آیین‌نامه آمریکایی NFPA101 درنظر گرفتن سناریوهای مختلف آتش‌سوزی و تأثیر آن‌ها بر زمان تصرف‌پذیری ساختمان و زمان موردنیاز برای تخلیه افراد را به‌ویژه در ساختمان‌های بلند ضروری می‌داند (National Fire Protection Association, 2012, p. 41). ایمن بودن شرایط تخلیه در یک ساختمان بلند بدان معناست که پیش از این‌که میزان دود در مجاری ارتباطی و مسیرهای خروج به مقادیر زیان‌آور برسد، متصرفان از ساختمان خارج شده باشند (Richardson, 2004, p. 11). مدت زمان ایمن ماندن مسیرهای خروج و متعاقباً زمان موجود برای انجام تخلیه با توجه به ساختار کالبدی و تجهیزات ایمنی موجود در ساختمان و نیز با توجه به سناریو آتش‌سوزی متفاوت است (NIST, 2011, p. 5). از طرف دیگر زمان واقعی خروج همه ساکنان و انتقال آنان به محل امن به نام زمان کلی تخلیه[۳] به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین موارد ایمنی ساختمان باید محاسبه شود (Conca & Vignolo, 2012, p. 2). امروزه در جهان این بازه‌های زمانی از طریق مدل‌سازی‌های آتش‌سوزی قابل تخمین است. نرم‌افزارهای EvacNet، CFAST[۴] و PathFinder نمونه‌هایی از مدل‌های کامپیوتری هستند که برای شبیه‌سازی تخلیه اضطراری به‌کار می‌روند. افزون بر این‌ها معادلات مختلف با روش‌های گوناگون به تخمین زمان تخلیه می‌پردازند و اغلب نرم‌افزارهای یاد شده نیز از همین فرمول‌ها در کنار بانک‌های اطلاعاتی برای انجام محاسبات و شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌نمایند (Ng & Chow, 2006, p. 9). اگرچه در ایران تلاش‌هایی در جهت ارتقای ایمنی کالبدی مسیرهای تخلیه در آیین‌نامه مبحث ۳ مقررات ملی و در چک‌لیست‌های رتبه‌بندی ایمنی سازمان آتش‌نشانی انجام گرفته است، ولی به تبیین زمان تخلیه کمتر پرداخته شده است. برخلاف رویکردهای متداول کشورهای پیشتاز در مباحث ایمنی، در هیچ‌یک از سازوکارهای موجود در کشور از مفهوم زمان تخلیه به‌منظور ارزیابی ظرفیت خروجی‌های ساختمان و میزان ایمنی فرآیند تخلیه بهره گرفته نمی‌شود. در پژوهش حاضر با معرفی مفهوم تخلیه اضطراری و محاسبه زمان تخلیه برای دو برج مسکونی، کاربرد آن در برنامه‌ریزی‌های مدیریت ایمنی نشان داده شده است.

۱. مبانی نظری

مقصود از «مدیریت ایمنی» به‌کارگیری رویکردی سیستماتیک برای تأمین ایمنی در ساختار سازمانی، سیاست‌ها و فرآیندهای معین است. هدف مدیریت ایمنی جلوگیری از بروز صدمات جانی و مالی است (Mansor, 2012, p. 8). در چرخه بحران، اقدامات مدیریتی در فاز پیش از سانحه تحت عنوان مدیریت پیشگیرانه[۵] با هدف جلوگیری از بروز سانحه و بالابردن سطح دانش متصرفان در برابر آن (Prashant, 2007, p. 28) و در فاز مقابله با عنوان مدیریت واکنش اضطراری[۶] با هدف تمرکز بر راه‌حل مشکلات از پیش مشخص شده و جلوگیری از تصمیم‌گیری آنی است (Tan & Hiew, 2004, p. 15) که موضوع تخلیه اضطراری در این دسته قرار می‌گیرد. در برنامه‌ریزی‌های مدیریت ایمنی آتش برای برج‌های مسکونی غالباً به یک رابطه سه‌جانبه میان کالبد ساختمان و تجهیزات، متصرفان و نیز افراد عهده‌دار مسئولیت‌های نگهداری ساختمان و امدادرسانی به آن توجه می‌شود. در برنامه‌های ایمنی آتش به سه گروه کلیدی باید توجه شود: متصرفان، مدیریت و کارکنان و آتش‌نشانان. نه‌تنها اقدامات افراد در هنگام سانحه آتش‌سوزی مهم است، بلکه ویژگی‌های کالبدی نیز در میزان موفقیت آن‌ها اثرگذار است، هرچه کالبد ساختمان بیشتر واجد شرایط ایمن باشد، ضریب موفقیت اقدامات افراد (چه در سطح مدیریت کنترل شرایط اضطراری و چه در سطح فردی برای نجات جان خود) بیشتر می‌شود. در پژوهش حاضر بررسی کالبد ساختمان با توجه به موضوع ایمنی آتش و زمان تخلیه از این جهت حائز اهمیت است که فضای

معماری موجود همان مسیر فرار است و عوامل تأثیرگذار بر ظرفیت تخلیه، نتایجی را رقم می‌زند که برنامه‌ریزی‌های مدیریت ایمنی در راستای بهبود آن می‌کوشد. در جدول ۱ چالش‌های یک ساختمان بلندمرتبه از دیدگاه مباحث مرتبط با ایمنی آتش آورده شده است. در ساختمان‌های بلندمرتبه علاوه بر بالا بودن ریسک تشدید سانحه آتش‌سوزی، محدودیت‌های تاکتیکی جهت امدادرسانی و کنترل شرایط اضطراری وجود دارد.

جدول ۱: چالش‌های ایمنی آتش منحصر به ساختمان‌های بلند مسکونی

موارد	شرح
راه‌های خروج	- استفاده غالب از آسانسور به جای راه‌پله در ترددهای روزانه - بروز ازدحام به دلیل تعدد طبقات و زیاد نشدن عرض پله‌ها ضمن پایین آمدن - چاه‌پله به‌عنوان مسیر اصلی حرکت عمودی دود در ساختمان - عدم امکان خروج از طریق پله برای همه افراد و نیاز به فضاهای امن پناهگیری
دسترسی آتش‌نشانان	- وجود محدودیت‌های تاکتیکی برای اطفای حریق و امدادرسانی به‌لحاظ ارتفاع - ضرورت انجام اقدامات آتش‌نشانی از طریق دسترسی از داخل - ورود نیروهای آتش‌نشانی به ساختمان در خلاف جهت تخلیه ساکنان
افزایش تراکم متصرفان و بار حریق	- بالا بودن مقادیر اموال منقول و غیرمنقول قابل اشتعال به‌دلیل تعداد طبقات زیاد و وجود سوخت بیشتر - پتانسیل بالاتر ایجاد آتش و بروز صدمات به‌دلیل تجمع افراد در یک مکان - حضور افراد آسیب‌پذیر همانند کودکان و سالخوردگان - عدم هوشیاری و آمادگی دائمی افراد برای واکنش به سانحه به‌علت احتمال خواب بودن - بار حریق سنگین و وجود موانع افقی به‌عنوان عامل گسترش عمودی آتش‌سوزی
نیروهای طبیعی	- اثر دودکشی و باد در انتقال دود و گازهای سمی در ساختمان بلند
تأسیسات و تجهیزات	- شبکه تأسیساتی گسترده با توزیع عمودی و وجود مقادیر زیاد لوله، داکت و کابل - نیاز به تأمین مقادیر بیشتر ذخیره آب برای اطفای آتش - مجاورت ساختمان‌های بلند با مراکز شهری

باتوجه به چالش‌های ویژه ساختمان‌های بلند برای تأمین ایمنی متصرفان در تخلیه توجه به چند مورد ضروری است. اول شناخت ویژگی‌های متصرفان به‌منظور پیشگیری از خطاهای انسانی است که در ساختمان‌های بلند نقشی حیاتی‌تر را نسبت به ساختمان‌های کوتاه دارند (Berkman, 2004, p. 10). از آنجا که آشنایی با ساختمان و تجربه حضور در آن تا حد زیادی بر مسیر تخلیه انتخاب شده توسط فرد تأثیر می‌گذارد، متصرفان غالباً راه‌پله‌ای را که به‌صورت معمول از آن استفاده می‌کنند انتخاب کرده و یا به سمت آسانسور می‌روند (Proulx, 2001, p. 223). محیط درون راه‌پله عامل مهم دوم است چرا که غالباً راه‌پله تنها وسیله خروج در هنگام آتش‌سوزی است (Ferreira & Cutonilli, 2008, p. 734). آتش‌سوزی‌های مرگبار در ساختمان‌های با تعداد طبقات زیاد نشان داده‌اند که احتمال ورود دود و شعله به راه‌پله زیاد است (Ronchi et al., 2011, p. 83). مورد سوم ظرفیت راه‌های خروج[۷] است، زیرا فراهم آوردن تعداد و ظرفیت خروجی‌های متناسب با تعداد متصرفان ساختمان‌های بلند تا حد زیادی در کنترل ترافیک جمعیتی خروج مؤثر خواهد بود (Richardson, 2004, p. 22). مورد چهارم تمامیت و خوانایی مسیر خروج است. تا هنگامی‌که ساکنان وارد یک راه‌پله خروج می‌شوند، بتوانند تا زمان دستیابی به یک مکان امن و یا خروج از ساختمان در آن محافظت شده باشند. نور کافی و علائم راهنمای واضح و قابل رؤیت برای مسیریابی در طول مسیر تخلیه الزامی هستند (Prashant, 2007, p. 45).

۱-۱- مفهوم تخلیه

تخلیه، فرآیندی است که در آن ساکنان متوجه آتش‌سوزی شده و به سمت یک محل امن در داخل ساختمان یا خارج از آن انتقال می‌یابند (Purser & Bensilum, 2001, p. 158). در برنامه‌ریزی‌های مدیریت ایمنی ساختمان بلندمرتبه، راهبرد تخلیه یکی از راهکارهای تأمین ایمنی است. وقایع مربوط به تخلیه را می‌توان به سه فاز بخش‌بندی نمود: زمان تشخیص[۸]، زمان واکنش[۹] و زمان خروج[۱۰]. در نهایت به زمان کلی از شروع شرایط اضطراری تا هنگامی‌که تمامی ساکنان در مکان امن یا منطقه نجات[۱۱] باشند، «زمان تخلیه»[۱۲] گفته می‌شود (Conca & Vignolo, 2012, p. 3). زمان موجود برای تخلیه[۱۳] یا Tse باید بیش از زمان مورد نیاز برای تخلیه باشد. اختلاف میان این دو زمان، درجه ایمنی ساختمان را بالا می‌برد. زمان خروج[۱۴] یا Tex از مجموع زمان‌های کشف آتش (Tdet)، زمان هشدار (Ta)، زمان پیش از حرکت

(Tpre)، و زمان حرکت (Ttrav) تشکیل می‌شود. زمان تخلیه (Tev) به مجموع زمان‌های پیش از حرکت و زمان حرکت اطلاق می‌شود. حاشیه ایمنی نیز اختلاف زمان محاسبه شده مورد نیاز برای تخلیه و کل زمان موجود برای تخلیه است (Ng & Chow, 2006, p. 9).

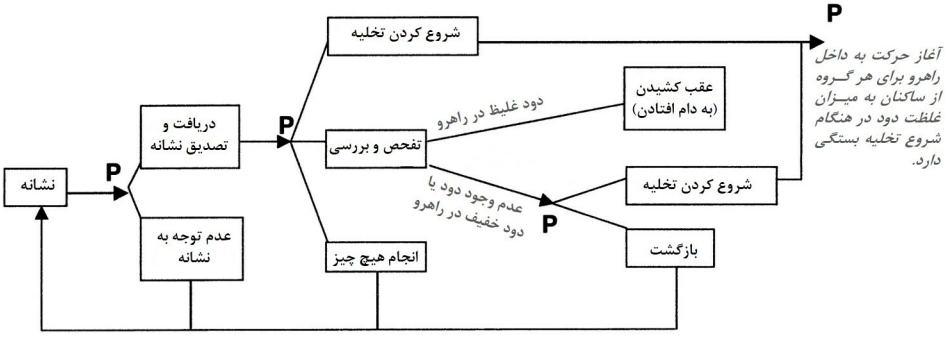
$$Tse > Tex = Tdet + Ta + Tev = Tdet + Ta + Tpre + Ttrav$$

از لحاظ علمی بیان این‌که زمان تخلیه برای ساختمان x به مقدار n ثانیه است، فاقد اعتبار بوده و برای هر سازه/ جمعیت/ سناریو، بازه زمانی محتمل برای تخلیه وجود دارد که پیش‌بینی می‌شود تخلیه در آن بازه زمانی انجام شود (University of Greenwich, 2004, p. 27). با توجه به موارد مطرح شده، به‌منظور پیش‌بینی زمان احتمالی تخلیه در شرایط بحرانی لازم است تا دو بازه زمانی عمده تشکیل‌دهنده آن محاسبه شوند. مطابق شکل ۱ این بازه‌ها عبارت‌اند از: زمان تأخیر پیش از شروع حرکت و زمان حرکت/ سفر (Ko, 2003, p. 18).

شکل ۱: توالی زمانی وقایع در تخلیه

زمان تأخیر را می‌توان به سه روش تعیین نمود: ۱) لحاظ کردن زمان تأخیر حاصل از بررسی نمونه‌های مشابه که الف- با استفاده از بانک‌های اطلاعاتی سازمان آتش‌نشانی[۱۵]؛ ب- با بررسی فیلم‌ها و گزارش‌های ثبت شده از حوادث گذشته یا مانورها در ساختمان‌های با شرایط مشابه[۱۶] انجام می‌شود. میانگین زمان تأخیر در ساختمان‌های مسکونی در تمرینات برابر با دوسوم زمان تأخیر درهنگام رخداد واقعی سانحه آتش‌سوزی است (Proulx & Fahy, 1997, p. 792). ۲) به‌کارگیری احتمالات برای پیش‌بینی زمان واکنش افراد که به بررسی نحوه واکنش ساکنان در زمان پیش از شروع تخلیه می‌پردازد. این مدل از احتمال‌ها و زمان‌های مختلف برای واکنش افراد به علائم دریافتی از خطر با توجه به شرایط آن‌ها استفاده می‌کند. منبع اصلی این محاسبات، داده‌ها و زمان‌های بانک اطلاعاتی است که از نتیجه مصاحبه با افرادی که تجربه یک سانحه آتش‌سوزی داشته‌اند، ساخته شده است (Brennan, 2000, p. 1030). شکل ۲ واکنش‌های اصلی را برای اغلب ساکنان آپارتمان‌ها در موقعیت‌هایی به‌جز محل شروع آتش‌سوزی نشان داده و نمایان می‌کند که احتمال‌ها در کجا به‌کار می‌روند. سپس در جداولی میزان احتمال رخداد هر واکنش و مدت زمانی که برای انجام آن صرف می‌شود، ارائه شده است[۱۷]. ۳) استفاده از اسناد فرادست که باتوجه به طبقه‌بندی‌هایی با لحاظ نمودن چندین ویژگی، زمان تأخیر را ارائه می‌دهند. در روش کنفدراسیون انجمن حفاظت از آتش اروپا (CFPA-E) سناریو رفتاری با چهار عامل کاربری ساختمان، سیستم هشدار، پیچیدگی ساختمان و سیستم مدیریت ایمنی تعریف شده و در نهایت با امتیازدهی به مجموعه عوامل فوق زمان تأخیر را تعیین می‌کند (Europe, 2009, p. 25).

شکل ۲: مدل واکنش اولیه پیش از شروع تخلیه در آپارتمان‌ها



* P بیانگر بکاربردن احتمالات است.

پس از تخمین زمان تأخیر، گام دوم محاسبه زمان حرکت افراد پس از شروع حرکت اولین فردی است که اقدام به خروج می‌نماید. برای انجام محاسبات ابتدا باید سرعت حرکت افراد در تخلیه تعیین شود. بدین‌منظور می‌توان به سرعت‌های حرکتی مفروض یا سرعت حرکت برمبنای ویژگی‌های سنی، جنسیتی و نوع مسیر حرکت افراد، استناد نمود. در غیراین‌صورت باید باتوجه به ویژگی‌های فردی (همچون نسبت جنسیتی/ سن/ توانایی‌های حرکتی/ سطح هوشیاری/ میزان مهارت و آمادگی/ آشنایی با مسیر)، ویژگی‌های ساختمان (عرض راهروها و راه‌پله‌ها/ ظرفیت خروج‌ها/ تعداد طبقات) و نوع سناریو، سرعت را براساس جریان تعیین نمود[18]. به‌دلیل این‌که مقادیر جریان[19] و تراکم[20] در طول زمان متغیر هستند، این‌گونه محاسبات قدری پیچیده بوده و غالباً در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استناد به سازوکار محاسبه زمان حرکت در دستورالعمل‌های فنی نرم‌افزارهای تخلیه، مهم‌ترین فرمول‌های ریاضی در جدول ۲ خلاصه شده‌اند. محاسبه زمان حرکت با درنظر گرفتن عوامل رفتاری بسیار پیچیده‌تر خواهد بود که از دامنه پژوهش حاضر خارج است.

جدول ۲: دسته‌بندی روش‌های محاسبه زمان حرکت

نام روش		فرمول	پارامترها
روش‌های تجربی	Pauls	$T = 0.68 + 0.81p^{0.73}$	(T) حداقل زمان تخلیه یکباره از پله‌ها (دقیقه) (p) تعداد جمعیت به ازای هر متر از عرض مؤثر راه‌پله، از طبقه فوقانی سطح تخلیه اندازه‌گیری می‌شود. * عرض مؤثر راه‌پله (w) از طریق کاستن ۳۰۰ میلی‌متر از عرض واقعی آن در نظر گرفته شود.
	Pauls در ساختمان‌های با بیش از ۸۰۰ نفر متصرف	$T = 0.70 + 0.0133p$	(T) حداقل زمان تخلیه یکباره از پله‌ها (دقیقه) (p) تعداد جمعیت به‌ازای هر متر از عرض مؤثر راه‌پله، از طبقه فوقانی سطح تخلیه
ظرفیت مجاری خروج	Hakonen et al.,	$C = 0.83vDW$	(v) سرعت حرکت افراد (غالباً ۰/۶ متر بر ثانیه) (D) تراکم افراد در پله (W) عرض مؤثر پله
	Togawa	$T_e = N_a/(B\times N)+Ks/V$	(T_e) زمان مورد نیاز برای تخلیه (ثانیه) (N_a) تعداد کل افراد تخلیه‌شونده (نفر) (B) عرض باریک‌ترین قسمت مسیر تخلیه (متر) (N) ظرفیت واحد جریان باریک‌ترین قسمت مسیر (نفر بر متر بر ثانیه) (K_s) فاصله میان اولین فرد تخلیه‌شونده تا خروجی (متر) (V) سرعت حرکت جمعیت تخلیه‌شونده (متر بر ثانیه)
فرمول‌های جریان	Russian	$T = t(TR; STAU) + (n-1)\times (l(TR)/v(TR;n-1) + (n-2) \times dt$	(T) زمان تخلیه (t(TR;STAU)) زمان مورد نیاز برای ترک طبقه n -۱ (l(TR)) فاصله حرکت در پله‌های مابین طبقات مجاور (v(TR;n-۱)) سرعت در منطقه متراکم طبقه n -۱ (dt) تأخیر زمانی ناشی از تراکم (n) تعداد طبقات فوقانی در ساختمان
	Melinek & Booth	بیشینه $t_n = N/F_sW + nt_s$ و $t_1 = nN / F_sW + t_s$	(t_1) زمان خروج در حالت ازدحام (t_n) زمان خروج در حالت آزاد (n) تعداد طبقات (N) تعداد افراد در هر طبقه (F_s) جریان اسمی حرکت در پله‌ها (person/m/s) (W) عرض مؤثر راه‌پله (t_s) زمان حرکت دربین طبقات مجاور (تعویض طبقه در حالت آزاد)

فرمول‌های جریان	Galbreath (1)	$t_{fl} = \Sigma Q_j (j = r \dots m) / f \times b$	(t_s) زمان طی کردن طول راه‌پله، اگر ساختمانی i طبقه داشته باشد $i = 1, \dots, r, \dots, m$ (t_{fl}) زمان جریان برای افراد طبقه rام و طبقات بالایی اش برای ورود به راه‌پله (Q_j)تعداد افراد طبقه r و طبقات بالایی آن $j = r, \dots, m$ (f) نرخ جریان به ازای هر واحد خروجی (b) عرض خروجی به متر
رابطه اجزای مسیر تخلیه	Galbreath (2)	$T = N + n / r \times u$	(T) زمان لازم برای تخلیه کامل ساختمان از پله (دقیقه) (N) تعداد افراد حاضر در ساختمان و از طبقه بالای همکف (n) تعداد افرادی که می‌توانند به ازای هر ۳ فوت مربع برای هر نفر در راه‌پله جای شوند. (r) نرخ تخلیه پله/ نفر بر واحد عرض خروجی در هر دقیقه (u) تعداد واحدهای عرض خروجی در پله

(Kisko et al., 1998, p. 28; Shen, 2003, pp. 98-105; Galbreath, 1969, p. 4; Hakonen et al., 2003, p. 226)

دسته‌بندی روش‌های محاسبه زمان حرکت براساس جدول ۲ عبارت‌اند از: ۱) رابطه ریاضی با استفاده از نتایج روش‌های تجربی با درنظر گرفتن تعداد افراد ساکن در ساختمان، ۲) ظرفیت محاسبه شده برای مجاری خروج تعیین‌کننده زمان حرکت در تخلیه، ۳) در نظر گرفتن افراد به‌عنوان سیال‌هایی که در یک مجرا در حرکت هستند و فرمول‌های مرتبط با جریان این سیال و ۴) رابطه بین اجزای مسیر تخلیه یا فرمول‌های استاندارد. در ادامه به شرح مفصل‌تری از روش‌های به‌کارگرفته شده در انجام محاسبات و موارد مرتبط با هرکدام پرداخته شده است.

۲. روش تحقیق

با توجه به چرخه بحران، در فاز آمادگی باید مسیرهای خروج برای تخلیه تجهیز شوند. با دانستن مدت زمان کلی تخلیه (شامل زمان تأخیر و زمان حرکت) می‌توان اقدامات مدیریتی را در راستای کاهش زمان تخلیه هدایت نمود (Columbus Division of Fire, 2010, p. 7). در پژوهش حاضر زمان‌های تأخیر و حرکت برای هریک از ساختمان‌های مورد مطالعه از چند روش محاسبه شده و سپس نتایج حاصل از آن‌ها برای هر ساختمان تحلیل شده و مؤلفه‌هایی که باعث افزایش زمان تخلیه می‌شوند، بررسی شده‌اند تا عوامل اثرگذار بر کاهش زمان شناسایی شوند. روش پژوهش آمیخته با ترکیب داده‌های کیفی و کمی است. بازدید میدانی مطابق چک‌لیست و تهیه نقشه وضع موجود از ساختمان‌ها و مصاحبه‌های عمیق با مدیریت، نگهبانان و متخصصان ایمنی آتش در رابطه با وضعیت ایمنی ساختمان، داده‌های کیفی را برای تحلیل اجزای مسیر خروج جهت محاسبه زمان تخلیه در بنا فراهم نمود. محاسبه زمان تخلیه و تحلیل خط زمان نیز روش کمی برای شناخت وضعیت تخلیه اضطراری بوده است.

۲-۱- روش محاسبه زمان تخلیه

برای محاسبه زمان تخلیه، ابتدا زمان تخلیه به دو بازه زمان تأخیر پیش از شروع حرکت و زمان حرکت تقسیم شد. به‌منظور محاسبه زمان تأخیر از روش کنفدراسیون انجمن حفاظت از آتش اروپا بهره گرفته شده و ابتدا برای هر ساختمان دسته نوع کاربری، زمان هشدار و صدای زنگ، پیچیدگی ساختمان و سازوکار مدیریتی با توجه به جداول مرجع تعیین شده‌اند (Europe C.F.P.A, 2009, p. 31). سپس با مراجعه به جدول تخمین زمان پیش از تخلیه برای گروه‌های مختلف سناریوهای رفتاری، دو زمان شروع تخلیه اولین فرد و متوسط زمان شروع تخلیه سایرین استخراج شده و زمان تأخیر کلی از طریق محاسبه مجموع این دو مقدار بدست آمده است.

زمان حرکت نیز با روش‌های سه‌گانه ظرفیت پله‌ها، مدل‌های جریان و فرمول‌های استاندارد محاسبه شد. در روش اول از فرمول ظرفیت پله‌های «هاکونن و همکاران»[۲۱] استفاده شد. از آنجا که نوع کاربری ساختمان مسکونی است و گروه‌های مختلف افراد اعم از کودکان، بزرگسالان و سالخوردگان در آن حضور دارند، سرعت حرکتی میانگین باید متناسب با حرکت این افراد باشد. با مقایسه سه نمونه از سرعت‌های حرکتی مفروض[۲۲]، سرعت ۰.۶ متر بر ثانیه در این محاسبات لحاظ شد. در روش دوم از فرمول «ملینک و بوث»[۲۳] برای حالت ازدحام در پله‌ها استفاده شد. اساسی‌ترین ویژگی یک جمعیت در حال حرکت میانگین جریان (F) است که از ضرب دو فاکتور سرعت متوسط (S بر حسب متر بر ثانیه) و

تراکم متوسط (D بر حسب نفر بر مترمربع) طبق رابطه $F = S \times D$ حاصل می‌شود (Shen, 2003, p. 93). اما در عمل اندازه‌گیری جریان عابران از سرعت و تراکم آنان آسان‌تر است (Hurley et al., 2015, p. 880). نتایج تجربی میزان جریان در انواع مختلف راه‌پله‌ها با اندازه‌های متفاوت ارتفاع و کف‌پله وجود دارند. درنتیجه مقادیر بیشینه و کمینه نرخ جریان افراد به‌ازای هر متر از خروجی برای محاسبات شبیه‌سازی ارائه شده‌اند (University of Greenwich, 2004, p. 44). در شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار Building EXODUS مقدار جریان ۱.۳۳ نفر/ متر/ ثانیه به‌عنوان پیش‌فرض در نظر گرفته شده است که در محاسبات این پژوهش نیز به این مقدار استناد شد. روش سوم با فرمول «گلبرث(۲)»[۲۴] بوده که بر مبنای واحد عرض خروجی است. برخی از راه‌پله‌ها مستقیماً افراد را به سمت فضاهای بیرونی تخلیه می‌کنند و برخی دیگر آنان را به لابی طبقه همکف می‌رسانند. در حالت دوم زمان مورد نیاز برای خروج افراد از طبقه همکف به بیرون ساختمان نیز باید محاسبه و افزوده شود.

۳. بررسی نمونه‌ها

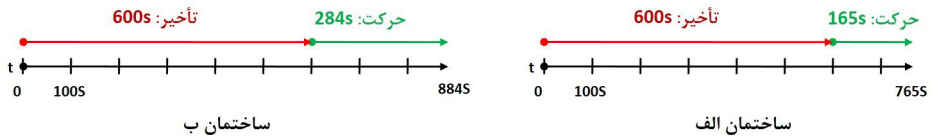
در پژوهش حاضر دو ساختمان به‌صورت موردی بررسی شدند، ساختمان «الف» با ۱۵ طبقه یکی از برج‌های مسکونی سه‌گانه واقع در شهر کرج در استان البرز است. این برج دارای ۵۹ واحد مسکونی و مجموع ۱۴۴ متصرف است. ساختمان دارای یک رشته پله و دو دستگاه آسانسور است. ساختمان «ب» یک برج ۲۰ طبقه در مجموعه‌ای شامل ۱۲ برج مسکونی واقع در منطقه ۲۲ شهر تهران است. این ساختمان ۷۴ واحد مسکونی داشته و تعداد ۲۵۰ نفر در آن ساکن هستند و نیز دارای دو رشته پله و دو دستگاه آسانسور است[۲۵]. نتایج محاسبه زمان‌های تأخیر و حرکت و در نهایت زمان کلی تخلیه این دو ساختمان در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: زمان‌های تأخیر و حرکت و زمان کلی تخلیه

ساختمان	محاسبه زمان تأخیر شروع تخلیه (ثانیه)				محاسبه زمان حرکت/ سفر تخلیه (ثانیه)			زمان کلی تخلیه (مجموع تأخیر و بیشینه حرکت) (ثانیه)
	کلاس CFPA-E	تأخیر اولین فرد	تأخیر مجموع متصرفان	زمان تأخیر کلی	Hakonen et al	Melinek & Booth	Galbreath (2)	
الف	C1A1B2M2	۳۰۰	۳۰۰	۶۰۰	۱۶۱.۲۸	۱۴۲.۲۱	۱۶۴.۴	۷۶۵
ب	C1A1B2M2	۳۰۰	۳۰۰	۶۰۰	۱۲۶.۲۵	۱۱۰	۲۲۳.۸	۸۸۴

شکل ۳ تفکیک بازه‌های زمان تأخیر و زمان حرکت را در محاسبه زمان تخلیه برای هریک از دو ساختمان مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانطور که از مشاهده خط زمان هر دو ساختمان مشهود است، قسمت عمده زمانی که برای تخلیه هر ساختمان محاسبه شده است به زمان تأخیر مربوط می‌شود (در ساختمان الف تقریباً ۷۸ درصد و در ساختمان ب ۶۸ درصد زمان کلی تخلیه را زمان تأخیر دربر می‌گیرد).

شکل ۳: خط زمان تخلیه ساختمان‌های مورد مطالعه



۳-۱- تفسیر و تحلیل نتایج

باتوجه به محاسبات تخمین زمان تخلیه، در هر دو برج دیده می‌شود که زمان تأخیر در بازه برابری برای آن‌ها پیش‌بینی شده و بیشینه زمان تأخیر پیش از شروع تخلیه از روشی حاصل شده است که دارای عوامل نوع سیستم هشدار آتش موجود در ساختمان و نوع سازوکار مدیریتی و یا به تعبیری دیگر وجود یا عدم وجود کارکنان آموزش دیده برای پیشبرد و هدایت فرآیند خروج است. بنابر ادبیات نظری، گام اولیه برنامه‌ریزی‌های مدیریت ایمنی، ایجاد یک تیم مسئول ایمنی و آموزش به کارکنان ساختمان برای ارائه خدمات در هنگام رخداد سانحه است. این تیم مسئولیت رسیدگی به کارکرد تجهیزات و سیستم‌های ایمنی ساختمان و تطبیق و ارتقای آن‌ها را برای کارکرد مطلوب باتوجه به شرایط ساختمان بر عهده دارد. در ساختمان‌های مورد مطالعه، تجهیز ساختمان به یک سیستم حساس و دقیق اعلام هشدار و نصب

بلندگوهای هشدار در تمامی واحدهای آپارتمانی و نه تنها لابی طبقات، اقداماتی از این دست هستند.
بیشینه زمان حرکت نیز برای هر دو ساختمان از فرمولی به‌دست آمد که تأثیر متقابل سه عامل را در خروج افراد از راه‌پله نشان داده است. عامل اول تعداد و تراکم بالای متصرفان در یک برج مسکونی است. به‌هنگام تخلیه اضطراری هر چه از طبقات بالایی ساختمان به سمت پایین رفته شود، بر تعداد افرادی که به مجرای راه‌پله وارد می‌شوند، افزوده می‌شود. ساختمان «ب» با وجود این‌که ۵ طبقه از ساختمان «الف» بلندتر است و تعداد ساکنان در آن تقریباً ۱.۷ برابر ساکنان ساختمان «الف» است، اما به دلیل داشتن دو راه‌پله قادر به توزیع بار جمعیتی به سوی خروجی‌های ساختمان شده است. در صورت بروز شرایط ناایمن در هریک از راه‌پله‌ها نیز تیم مسئول تخلیه اضطراری قادر به هدایت ساکنان به سمت پله دیگر است تا تخلیه متوقف نشود، در صورتی‌که در ساختمان «الف» انجام فرآیند تخلیه اضطراری منوط به عاری از دود ماندن تک راه‌پله ساختمان است و در صورتی‌که شرایط فضای داخل راه‌پله ایمن نباشد، انجام تخلیه اضطراری ممکن نخواهد شد. بنابراین اقدامات مدیریت ایمنی آتش در ساختمان «الف» باید به‌طور سختگیرانه‌ای بر حفظ شرایط ایمن فضای داخل راه‌پله متمرکز شود، یعنی نصب تجهیزات فشار مثبت و درب‌های دودبند ورودی لابی طبقات به راه‌پله ضروری به‌نظر می‌رسد. عامل دوم در فرمول بیشینه زمان تخلیه برای هر دو ساختمان، عرض مؤثر مسیرهای خروج و راه‌پله است. عرض راه‌پله‌ها ۱۲۰ سانتی‌متر بودند که پس از نصب نرده‌های حفاظ و نازک‌کاری‌های نهایی دیوار و نیز فاصله‌ای که افراد در هنگام حرکت از دیوار حفظ می‌کنند، این پله‌ها عرض مفید حرکتی ۱۰۰ سانتی‌متری داشتند. اقدامات مدیریت ایمنی در رابطه با عرض مسیرهای خروج به‌ویژه پله‌ها باید بر حفظ عرض مفید تمرکز داشته باشند، به‌طوری‌که با ممانعت از قراردادن اشیا -همچون کیسه‌های جمع‌آوری زباله یا گلدان‌ها- در راه‌پله گلوگاه‌هایی با اشغال قسمت زیادی از عرض پله ایجاد نشده و انسداد و توقف جریان حرکت تخلیه رخ ندهد. عامل سومی که به‌صورت غیرمستقیم از این فرمول اقتباس می‌شود، سرعت حرکت افراد ضمن تخلیه است. در فرمول، با بالا رفتن تراکم افراد حاضر در مسیر خروج به زمان تخلیه افزوده می‌شود. این امر به‌سبب پایین‌آمدن سرعت حرکت در تراکم‌های بالا است. اقدامات مدیریت ایمنی در رابطه با تخلیه اضطراری باید بر آموزش حرکت صحیح به‌هنگام تخلیه به ساکنان ساختمان‌های بلند مسکونی تأکید کند تا نرخ ورودی متصرفان به مسیرها هماهنگ با نرخ خروج آن‌ها باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در راستای کاهش آسیب‌پذیری، زمان تخلیه نقش مهمی در نجات جان افراد در هنگام آتش‌سوزی دارد و با کاهش دادن این زمان و تسریع فرآیند تخلیه اضطراری از روش‌هایی چون آموزش و آمادگی و حتی کاربرد آسانسورها برای خروج اضطراری می‌توان در مدت زمان کمتری جان افراد بیشتری را نجات داد. تسریع فرآیند تخلیه اضطراری صرفاً به مفهوم حرکت سریع‌تر افراد در خروج نیست، بلکه با به حداقل رساندن زمان تأخیر پیش از شروع تخلیه و انجام واکنشی سریع‌تر از طرف ساکنان در هنگام رخداد حادثه نیز می‌توان به این هدف دست یافت، چرا که بنابر نتایج محاسبات، بخش عمده‌ای از زمان تخلیه در تأخیر زمانی پیش از شروع تخلیه صرف می‌شود. گرچه مشخصاً در آئین‌نامه‌های ساختمانی ذکر نشده است، ولی در واقعیت آنچه که به هنگام شرایط اضطراری آتش‌سوزی در مسیر فرار مهم است، زمان تخلیه است و نه طول مسیر؛ بنابراین توجه به فاکتور زمان در طراحی معماری مسیر خروج، از طریق آیین‌نامه‌های ساختمانی باید الزامی شوند. در فرمول‌های مختلف محاسبه زمان حرکت از عامل‌های متفاوتی بهره برده شده است. از آنجا که تمرکز پژوهش حاضر بر ساختمان‌هایی معطوف بوده که ساخته شده و در حال بهره‌برداری هستند، لذا امکان مداخله اقدامات مدیریت ایمنی بر بسیاری جنبه‌های اثرگذار بر زمان حرکت محدود می‌شود. جدول ۴ نوع تأثیرگذاری و امکان مداخله در هر یک از عوامل را نشان می‌دهد. مثلاً نمی‌توان به‌منظور تسریع تخلیه در تعداد راه‌پله و متصرفان ساختمان تغییر داد، اما با حفظ بیشینه عرض مؤثر راه‌های خروج به‌واسطه نگهداری مناسب ساختمان و افزایش سرعت و جریان حرکتی متصرفان از طریق آموزش و تمرین می‌توان فرآیند تخلیه را بهبود بخشید.

جدول ۴: عوامل اثرگذار بر زمان حرکت تخلیه

عامل اثرگذار بر زمان تخلیه	نوع تأثیر	امکان مداخله و تغییر
تعداد متصرفان در ساختمان و در هر طبقه	- هرچه تعداد متصرفان یک ساختمان کمتر باشد، در اثر کاهش اثر ازدحام زمان تخلیه نیز کاهش می‌یابد. - با کاهش جریان ورودی از هر طبقه به راه‌پله، حرکت برای افراد حاضر در راه‌پله آسانتر شده و زمان کمتری در اثر تلاقی این دو جریان حرکتی تلف می‌شود.	در ساختمان‌های موجود امکان‌پذیر نیست.

تراکم افراد در راه پله	- تراکم اگر از مقدار جریان بیشینه ساختمان تجاوز نماید، باعث کندشدن حرکت و افزایش زمان تخلیه می‌شود.	با آموزش و مانور تخلیه می‌توان از ازدحام در راه‌پله‌ها جلوگیری نمود.
سرعت حرکت افراد	- هرچه افراد توان حرکت با سرعت بیشتری را داشته باشند، زمان تخلیه کاهش می‌یابد. - در صورت عدم وجود چندگونگی در سرعت حرکت افراد، تداخل حرکتی کاهش یافته و زمان کمتری تلف می‌شود.	با آموزش حرکت یکنواخت می‌توان سرعت تخلیه را یکدست نمود تا زمان کمتری در اثر تفاوت‌های حرکتی تلف شود.
تعداد طبقات ساختمان	هرچه تعداد طبقات ساختمان کمتر باشد تعداد متصرفان و اثر خستگی در اثر پایین آمدن از پله‌ها که باعث کندی سرعت و افزایش زمان تخلیه می‌شود، کاهش می‌یابد.	در ساختمان‌های موجود امکان‌پذیر نیست.
تعداد راه‌پله‌های ساختمان	با افزایش تعداد راه‌پله‌های ساختمان، توزیع جمعیت بین راه‌پله‌ها باعث کمتر شدن تراکم در هر راه‌پله و عدم تجاوز تراکم از مقدار جریان بیشینه می‌گردد.	در ساختمان‌های موجود امکان‌پذیر نیست.
عرض مؤثر راه‌پله	هرچه عرض مؤثر پله‌ها بیشتر باشد، افراد بیشتری قادر به عبور بوده و ساختمان در زمان کوتاه‌تری تخلیه می‌شود.	در ساختمان‌های موجود امکان‌پذیر نیست؛ ولی با برطرف نمودن موانع از راه‌پله می‌توان به حداکثر ظرفیت دست یافت.
تعداد واحدهای عرض خروجی	- تعدد واحدهای عرض خروجی به معنی بیشتر بودن عرض مؤثر پله است.	در ساختمان‌های موجود امکان‌پذیر نیست؛ ولی با زدودن موانع از مسیر و انتخاب درهای مناسب می‌توان به حداکثر ظرفیت دست یافت.
جریان اسمی	- افزایش جریان اسمی تا رسیدن به مقدار بیشینه باعث کم‌شدن زمان تخلیه و تجاوز از جریان بیشینه باعث طولانی شدن این زمان می‌شود.	با آموزش تخلیه می‌توان از ایجاد هجوم و ازدحام در راه‌پله و کاهش جریان حرکتی جلوگیری نمود.

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل زمان تخلیه و جدول ۴ می‌توان موارد زیر را به‌عنوان راهکارهای تسریع زمان تخلیه در ساختمان‌های موجود که امکان دخل و تصرف کالبدی در آن‌ها وجود ندارد برشمرد:
- آموزش متصرفان برای به‌حداقل رساندن زمان تأخیر پیش از شروع تخلیه و انجام واکنشی سریع‌تر در هنگام حادثه
- نصب و تقویت سیستم‌های هشداردهنده برای آگاه نمودن افراد جهت خروج
- تعیین یک تیم واکنش اضطراری در ساختمان برای راهنمایی افراد در هنگام آتش‌سوزی و هدایت فرآیند تخلیه
- آموزش متصرفان برای حرکت منظم در فرآیند تخلیه با سه هدف: الف) جلوگیری از هجوم ب) یکدست شدن سرعت حرکت و جلوگیری از تداخل‌های حرکتی ج) حرکت یکنواخت در تمام مسیر و جلوگیری از ایجاد ازدحام
- برگزاری مانور و تمرین در راه‌های خروج به‌منظور آشنایی افراد با مسیر تخلیه و آشکار شدن نقاط ضعف احتمالی
- حذف موانع از راه‌پله و مسیرهای حرکت جهت اطمینان از حصول حداکثر ظرفیت مجاری خروج
- زدودن موانع از مسیر باز و بسته شدن درها و تأمین حداکثر ظرفیت
- بررسی‌های منظم مسیرهای خروج جهت اطمینان از تأمین روشنایی برای حرکت در مواقع اضطراری و وجود علائم راهنمای خروج

از آنجا که پژوهش حاضر تنها به بررسی زمان تخلیه در ساختمان‌های بلند مسکونی پرداخته است، در مطالعات دیگر می‌توان به ساختمان‌هایی با کاربری‌هایی متفاوت همچون ساختمان‌های اداری و تجاری و تصرف‌های اقامتی مانند هتل‌ها براساس درجه اهمیت ساختمان و ارتفاع آن پرداخت. علاوه بر این مطالعه زمان تخلیه با توجه به رویکردهای استفاده از سیستم آسانسور برای تخلیه اضطراری و فضاهای پناهگیری نیز زمینه مناسبی برای پژوهش هستند.

پی‌نوشت

۱. محتوای برنامه‌های مدیریت ایمنی از چهار نمونه مربوط به ایالات متحده آمریکا شامل بلو ایالت واشنگتن، کلمبوس اوهایو و هیوستن تگزاس، نیویورک سیتی نیویورک و نیز ایالت انتاریو کانادا، استخراج شده است.

2. Refuge Area/ Zone

3. Total Evacuation Time (TET)

۴. این مدل توسط واحد پژوهش آتش موسسه ملی استاندارد و تکنولوژی ایالات متحده آمریکا تهیه شده است.

4. Preventive Management

5. Emergency Response Management

۷. مطابق مبحث سوم مقررات ملی هر راه‌پله باید دست‌کم ۱۱۰ سانتی‌متر عرض مفید داشته باشد.

۸. Recognition Time: زمان تشخیص بازه زمانی از شروع شرایط اضطراری تا هنگامی است که ساکنان از آن آگاه شوند.

۹. Reaction Time: زمان واکنش از هنگام آگاهی یافتن از شرایط اضطراری تا زمانی است که تخلیه شروع شود.

۱۰. Egress Time: زمان خروج، بازه زمانی پس از زمان واکنش تا خروج همگی افراد از ساختمان و رسیدن به مکان ایمن است.

11. Rescue Area

12. Evacuation Time

۱۳. زمان موجود برای تخلیه/ فرار Available Safe Egress/Escape Time (ASET) و زمان موردنیاز برای تخلیه/ فرار Required Safe Egress/Escape Time (RSET) دو مفهوم کلیدی در تخلیه هستند.

14. Exodus Time

۱۵. در گزارش‌های سازمان آتش‌نشانی، این زمان برداشت نمی‌شود.

۱۶. منظور از شرایط مشابه نزدیک بودن نوع کاربری ساختمان، تعداد طبقات و تعداد ساکنان آن است.

۱۷. رجوع شود به: Brennan, P. (2000). Modelling cue Recognition and pre Evacuation Response. Fire Safety Science, 6, 1029-1040.

۱۸. همانند روش پردتچنسکی و میلینسکی (Milinskii & Predtechenski) برای محاسبه سرعت حرکت در تخلیه اضطراری.

۱۹. در مدل‌سازی‌های ترافیک عابران در راه‌پله‌ها، غالباً از مدل‌های جریان استفاده می‌شود. در این‌گونه مدل‌ها عابران به‌عنوان سیال‌هایی درنظر گرفته می‌شوند که در مسیرهای عبور جریان می‌یابند. شرایطی که در آن تراکم عابران کم است، «جریان آزاد» است که در آن عابران قادرند آزادانه و با سرعت مشخص حرکت نمایند. معادله جریان آزاد مطابق فرمول $F = VD$ است که در آن D معادل تراکم بوده و V سرعت عابران را نشان می‌دهد.

۲۰. به‌منظور محاسبه زمان حرکت در طول یک مسیر، باید به رفتار عابران در حین حرکت توجه نمود، ویژگی‌هایی چون سرعت حرکت و فاصله میان افراد با توجه به تراکم افراد در مسیر متغیر است.

21. Hakonen et al.,

۲۲. ۱) تقسیم‌بندی ترکیب افراد حاضر در ساختمان به سه گروه کودکان، بزرگسالان و سالخوردگان، ۲) روش شبیه‌سازی نرم‌افزار Building EXODUS و تخمین میانگین سرعت‌های حرکت افراد با توجه به درصد جمعیتشان از کل تخلیه‌شوندگان، ۳) مقادیر ارائه شده در مدلسازی‌های پایین آمدن از پله‌ها باتوجه به تعداد طبقات ساختمان و وجود یا نبود جریان حرکتی متقابل آتش‌نشانان (Averill, Mileti et al., 2005, p. 3).

23. Melinek & Booth

24. Galbreath (2)

۲۵. به‌دلیل عدم رضایت مالکین ارائه اطلاعات بیشتر در مورد ساختمان‌ها امکان‌پذیر نیست.

References

- Averill, J.D., Mileti, D.S., Peacock, R.D., Kuligowski, E.D., Groner, N., Proulx, G., Reneke, P.A., & Nelson, H. E. (2005). *Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster Occupant Behavior, Egress, and Emergency Communications*. National Institute of Standards and Technology (NIST NCSTAR 1-7), USA.
- Barber, D., & Van Merkestein, R. (2003). *Will Occupants of Tall Buildings Obey Instructions from Wardens in Staged Evacuations*? The Design Dilemma Post, CIB Report, 61-70.
- Barney, G. (2003). Vertical Transportation in Tall Buildings. *Elevator World*, 51(5), 66-75.
- Berkman, B. (2004). *Developing a High-rise Residential Fire Safety Program, Leading Community Risk Reduction (An Applied Research Project Submitted to the National Fire Academy)*. NewYork City Fire Department: FDNY, USA.
- Brennan, P. (2000). Modelling Cue Recognition and Pre-evacuation Response. *Fire Safety Science*, 6, 1029-1040.
- Columbus Division of Fire. (2010). *Safety Program and Emergency Procedures for High-rise/ High-risk Buildings*. USA.
- Conca, A., & Vignolo, M.G. (2012). *Pedestrian Flow Analysis in Emergency Evacuation*. In of the Euro Working Group on Transportation International Scientific Conference, Paris.
- Europe, C.F.P.A. (2009). Fire Safety Engineering Concerning Evacuation from Buildings. *European Guideline CFPA-E*, 19, 4-46.
- Ferreira, M., & Cutonilli, J. (2008). *Protecting the Stair Enclosure in Tall Buildings Impacted by Stack Effect*. In CTBUH 8th World Congress "Tall and Green: Typology for a Sustainable Urban Future", Dubai, UAE, 732-738.
- Galbreath, M. (1969). *Time of Evacuation by Stairs in High Buildings*. Fire Research, 8, Canada.
- Hakonen, H., Susi, T., & Siikonen, M.L. (2003). Evacuation Simulation of Tall Buildings. *CIB REPORT*, 219-226.
- Hurley, M.J., Gottuk, D.T., Hall Jr, J.R., Harada, K., Kuligowski, E.D., Puchovsky, M., Watts Jr, J.M., & Wieczorek, C.J. (Eds.). (2015). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer.
- Kealy, M. (2008). *Fire Engineering Super- tall: A New Approach to Escape*. CTBUH 8th World Congress Proceedings, Dubai, 20-29.
- Kisko, T.M., Francis, R.L., & Nobel, C.R. (1998). *Evacnet4 User's Guide*. University of Florida, 10.
- Ko, S.Y. (2003). *Comparison of Evacuation Times Using Simulex and Evacuationz based on Trial Evacuations.* Doctoral Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Kobes, M., Post, J., Helsloot, I., & Vries, B. (2008). *Fire Risk of High-rise Buildings based on Human Behavior in Fires*. In Conference Proceedings FSHB, 07-19.
- Lay, S. (2007). Alternative Evacuation Design Solutions for High- rise Buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 16(4), 487-500.
- Liao, Y.J., Liao, G.X., & Lo, S.M. (2014). Influencing Factor Analysis of Ultra-tall Building Elevator Evacuation. *Procedia Engineering*, 71, 583-590.
- Mansor, N. (2012). *Safety Management in High-rise Building; Case study: Petronas Twin Towers & Kuala Lumpur Tower*. Doctoral Dissertation, Universiti Teknologi MARA.
- Mu, H.L., Wang, J.H., Mao, Z.L., Sun, J.H., Lo, S.M., & Wang, Q.S. (2013). Pre-evacuation Human Reactions in Fires: An Attribution Analysis Considering Psychological Process. *Procedia Engineering*, 52, 290-296.
- National Fire Protection Association. (2012). *NFPA101 Life Safety Code Handbook*, USA.
- 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.
- NIST. (2011). *CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport Technical Reference Guide.* Fire Research Division Engineering Laboratory, USA.
- O'Conner, D., Clawson, K., & Cui, E. (2012). *Considerations and Challenges n Refuge Areas in Tall Buildings*. In Proceedings of the 9-th International Conference on CTBUH, Shanghai, 77-81.
- Prashant, T. (2007). *The Essential Aspect of Fire Safety Management in High-rise Buildings*. Doctoral Dissertation, Universiti Teknologi Malaysia (UTM), Faculty of Civil.
- Proulx, G. (2001). *Occupant Behavior and Evacuation*. In Proceedings of the 9th International Fire Protection Symposium, 219-232.
- Proulx, G., & Fahy, R.F. (1997). The Time Delay to Start Evacuation: Review of Five Case Studies. *Fire Safety Science*, 5, 783-794.
- Purser, D.A., & Bensilum, M. (2001). Quantification of Behavior for Engineering Design Standards and Escape Time Calculations. *Safety Science*, 38(2), 157-182.
- Richardson, K. (2004). *Fire Safety in High-rise Apartment Buildings*. Canada Mortgage and Housing Corporation,

Ontario Association of Architects, Canada.

- Ronchi, E., Gwynne, S., & Purser, D.A. (2011). *The Impact of Default Settings on Evacuation Model Results: A Study of Visibility Conditions vs. Occupant Walking Speeds*. In Advanced Research Workshop Evacuation and Human Behavior in Emergency Situations EVAC11, Santander, 81-95.
- Shen, T.S. (2003). *Building Planning Evaluations for Emergency Evacuation*. Doctoral Dissertation, Worcester Polytechnic Institute, USA.
- Tan, C.W., & Hiew, B.K. (2004). Effective Management of Fire Safety in a High-rise Building. *Buletin Ingenieur,* 204, 12-19.
- University of Greenwich. (2004). *Introduction to BuildingEXODUS (BuildingEXODUS Software Guide Book)*. London.