

## پیش بینی زمان تخلیه افراد از ساختمان با کمک روابط جبری ساده

مصطفی سفیدگر<sup>۱\*</sup>، سعید بختیاری<sup>۲</sup>، مسعود جمالی<sup>۲</sup><sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس، پردیس، ایران<sup>۲</sup> عضو هیئت علمی، بخش مهندسی آتش، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

\*مسئول مکاتبات: msefidgar@pardisiu.ac.ir

## ◀ واژگان کلیدی

تخلیه افراد  
ساختمان بلندمرتبه  
روش تحلیلی  
ظرفیت خروج  
مدل سازی کامپیوتری

## ◀ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۱  
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶

## ◀ چکیده

زمان تخلیه افراد از ساختمان یکی از موضوعات بسیار مهم در طراحی ایمنی حریق است. طراحی شرایط ایمن به دو صورت تجویزی به کمک کدها و استانداردهای ساختمانی و پایه عملکردی بر مبنای محاسبات مهندسی انجام می‌شود. در بسیاری از ساختمان‌های خاص، نظیر ساختمان‌های بلندمرتبه و پیچیده روش پایه عملکردی مورد توجه است. عمده روش‌های مبتنی بر عملکرد، نیازمند مدل‌های کامپیوتری است که این مدل‌ها نیازمند صرف هزینه و زمان است. هدف از این مقاله ارائه یک روش تحلیلی ساده است که امکان بررسی تخلیه را با در نظر گرفتن سرعت حرکت افراد و محدودیت‌های ظرفیت خروج درها فراهم نماید. از مزایای این روش این است که روابط ساده جبری ترافیک در درهای خروج را در نظر می‌گیرد. به منظور بررسی صحت روش، این روش با یک مدل کامپیوتری تأیید شده، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که این روش می‌تواند در طراحی مسیرهای فرار برای طراحی‌های اولیه مورد استفاده قرار گیرد.

## Prediction of evacuation time of occupants from building by using simple analytical method

Mostafa Sefidgar<sup>1</sup>, Saeid Bakhtiari<sup>2</sup>, Masoud Jamali<sup>2</sup><sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Pardis Branch, Pardis, Iran<sup>2</sup> Faculty member, Department of Fire Protection Engineering, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran

## ▶ Abstract

The evacuation time of occupants from the building is one of the most important issues in fire safety design. Fire safety is designed in two ways, prescribed based on building codes and standards, and the performance basis is based on engineering judgment. In many special buildings, such as high-rise and complex buildings, the performance method is more applicable. Most performance-based methods require computer models that require cost and time. The purpose of this paper is to provide a simple analytical method that allows the study of evacuation by considering the speed of movement of occupants and the limitations of the capacity of the exit doors. One of the advantages of this method is that it considers simple algebraic equations of traffic at exit doors. To evaluate the accuracy of the method, this method has been compared with an approved computer model. The results show that this method can be used in designing escape routes for initial designs.

## ▶ Keywords

Evacuation of occupants  
High-rise building  
Analytical method  
Exit capacity  
Computer modeling

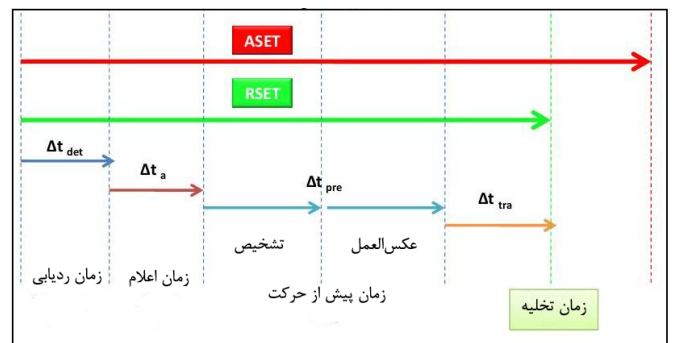
## ▶ Article history

Received: 11 Dec 2020  
Accepted: 06 Mar 2021

## ۱ مقدمه

تخلیه ایمن ساختمان‌های بلندمرتبه به تخلیه ایمن و سریع ساکنین که در معرض خطر آتش و دود قرار می‌گیرند، گفته می‌شود. این تخلیه می‌تواند به بیرون از ساختمان و یا محل‌های امن در داخل ساختمان مانند راه‌پله‌های محافظت‌شده انجام شود [۱].

زمان تخلیه مورد نیاز از پارامترهای مهم طراحی سیستم‌های ایمنی ساختمان است که به RSET<sup>۱</sup> معروف است. به طور عملی و همچنین تئوری، عوامل اثرگذار بر زمان تخلیه شامل تراکم جمعیت، هندسه مسیر، شرایط مسیره‌های تخلیه، طول مسیر فرار، غلظت و آلودگی دود در طول آتش‌سوزی و مقاومت در برابر آتش مصالح معماری داخل ساختمان است [۲]. به طور کلی هرچه تراکم جمعیت بیشتر باشد، سرعت تخلیه کندتر خواهد بود. دلیل اصلی این موضوع، وجود صف انتظار در محل‌های خروج است. در هندبوک SFPE<sup>۲</sup> سرعت حرکت افراد بدون ناتوانی جسمی بین  $1 - 1/2 \text{ m/s}$  پیشنهاد شده است [۳]. البته این مقدار سرعت برای شرایطی است که تراکم متصرفین کمتر از  $0.54 \text{ pers/m}^2$  باشد؛ با افزایش تراکم مقدار سرعت به صورت خطی کاهش می‌یابد، به طوری‌که وقتی مقدار تراکم به  $3/8 \text{ pers/m}^2$  می‌رسد، مقدار سرعت حرکت متصرفین صفر می‌شود [۴]. در طراحی معماری و ایمنی حریق ساختمان‌ها عمدتاً از دو روش تجویزی و روش پایه عملکردی استفاده می‌شود [۵]. در روش تجویزی، مقادیر و محدودیت‌ها به طور مشخص برای هر فضا و تصرف ارائه می‌شود؛ به عنوان مثال عرض پلکان و راهروها، مسافت پیمایش و سایر پارامترهای طراحی بر اساس بار تصرف محاسبه شده برای هر فضا با کاربری مختلف مشخص شده است. به همین صورت مقدار مقاومت در برابر آتش مصالح و سازه، سیستم‌های مانند کشف و اعلام حریق و کنترل دود بر حسب نوع تصرف‌ها، ابعاد ساختمان و سایر پارامترهای تأثیرگذار تعیین می‌شود. در روش پایه عملکردی هدف اصلی طراحی شرایطی است که مقدار زمان مورد نیاز برای تخلیه (RSET) کمتر از زمان در دسترس تخلیه (ASET<sup>۳</sup>) باشد. در منابع پیشنهاد شده  $3 < ASET/RSET < 1/5$  می‌تواند شرایط ایمنی را برای فرار افراد از ساختمان فراهم نماید (شکل ۱) [۴].



شکل ۱: نمودار ASET و RSET.

آزمایش‌های فیزیکی بر روی مدل‌های مقیاس شده و یا روش‌های شبیه‌سازی کامپیوتری محاسبه می‌شود. چون روش‌های تجربی پرهزینه‌اند و گاهی انجام آنها غیرممکن است روش‌های شبیه‌سازی که مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی است در حال گسترش‌اند. در حال حاضر نرم‌افزارهای مختلفی برای مدل‌سازی آتش وجود دارد که نرم‌افزار FDS<sup>۴</sup> [۶] از جمله آنهاست. در خصوص محاسبه RSET همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد شامل زمان‌های ردیابی، اعلام، زمان پیش حرکت و زمان حرکت است. در خصوص سه زمان اول اشاره شده، معمولاً روش‌های محاسبه به صورت اطلاعات تجربی است که در آزمایش‌ها و یا مشاهدات فیزیکی مختلف به دست آمده است. برای نمونه در مرجع [۷] به اطلاعات بسیار خوب و جامعی در این خصوص اشاره شده است. باید توجه داشت که مجموع این زمان‌ها (به غیر از زمان حرکت) در بیشتر کاربری‌های ساختمان کمتر از ۳ تا ۵ دقیقه است [۷]. قسمت عمده زمان RSET وابسته به زمان حرکت است که در واقع زمان لازم برای شروع حرکت اولین نفر تا خروج آخرین نفر به محل امن است که نیازمند محاسبات دقیق است.

امروزه مدل‌های بسیاری برای تخلیه افراد وجود دارد [۸]. اولین مدل‌های تخلیه افراد در اوایل دهه ۷۰ ارائه شد [۹] ولی توسعه اصلی مدل‌هایی که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند در دهه ۸۰ و ۹۰ ارائه شده است [۱۰]. در این روش‌ها فضاها به شبکه‌های ریزی تبدیل شده و به صورت دوبعدی دیده می‌شوند که به کمک المان‌های عمودی مانند پله و رمپ به سایر طبقات ارتباط می‌یابند. دو مدل معروف مبتنی بر این روش مدل استرینگ<sup>۵</sup> [۱۱] و مدل هیدرولیکی SFPE [۳] است. این مدل‌ها از اصول پایه‌ای سیالات و برابری دبی‌های جریان افراد در مسیرهای چندگانه و عبور دبی مشخص با توجه به ظرفیت تخلیه درها برای مدل‌سازی استفاده می‌نمایند. این روش‌ها به دلیل حجم بالای محاسبات، نیاز به کدهای کامپیوتری دارند [۵].

وجود روابط محاسباتی که بتواند مدت زمان تخلیه افراد و همچنین مشکلات آن را بررسی نماید، می‌تواند در طراحی نقشه معماری ساختمان و اصلاح فواصل آن مفید واقع شود. در این مقاله با استناد به مفاهیم مراجع [۱] و [۱۲]، مدلی ساده ارائه شده است که بتواند تخمین بهتری از مدت زمان حرکت افراد بر اساس فرمول‌های ساده جبری ارائه نماید. در این مدل فرض می‌شود که محفظه آتش<sup>۶</sup> دارای چند مسیر فرار است که در نهایت به سمت خروج اصلی یا محل امن هدایت می‌شود. ابتدا مدل ریاضی مربوط شرح داده می‌شود و در ادامه با یک مثال ساده جزئیات روش مورد بررسی قرار می‌گیرد و در انتها به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده از مدل ساده‌شده، همان مثال توسط نرم‌افزار Pathfinder که از دو مدل استرینگ و هیدرولیکی استفاده می‌کند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲ مدل محاسباتی تخلیه

مدل تخلیه ساده شده در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مدل که می‌تواند در یک طبقه از ساختمانی بلندمرتبه باشد فرض می‌شود که افراد حاضر در هر

محاسبه زمان ASET نیازمند بررسی شرایط ساختمان در زمان وقوع آتش یا در نظر گرفتن سناریوهای محتمل است. این زمان از دو طریق، انجام

<sup>۱</sup>required safe egress time <sup>۲</sup>the society of fire protection engineering handbook <sup>۳</sup>available safe egress time <sup>۴</sup>fire dynamics simulation

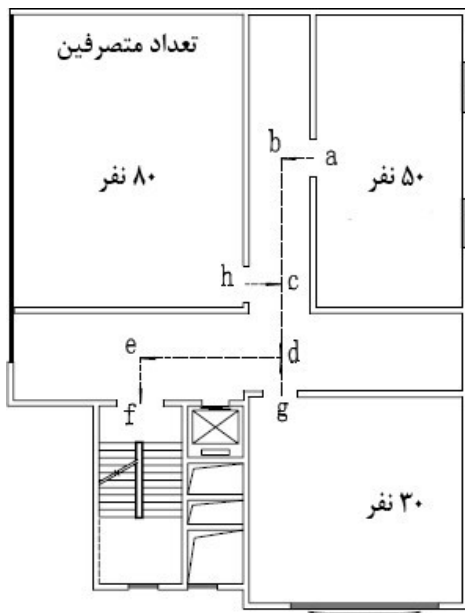
<sup>۵</sup>Steering <sup>۶</sup>fire compartment

عبارت اول در معادله (۲) بیان کننده تعداد افراد خارج شده از راه خروج اصلی به خارج از محفظه آتش در زمان حرکت آزاد ( $t_{free} - 0$ ) است و عبارت دوم بیان کننده تعداد افراد خارج شده از ساختمان بعد از تراکم در خروجی اصلی در زمان جریان انسدادی ( $t_{free} - t_e$ ) است.

اگر تمام افراد در طبقه آتش گرفته به صورت ایمن تخلیه شده باشند، در جایی که  $y' = P$  ( $P$  تعداد افراد در محفظه مورد بررسی است)، بنابراین زمان تخلیه کلی از ناحیه آتش گرفته بر اساس رابطه (۲) به شکل زیر به دست می آید [۱۴]:

$$t_e = \frac{1}{BN} \left( P - \sum_{i=1}^n \int_0^{t_{free}} N_i(t) B_i dt \right) + t_{free} \quad (3)$$

به منظور روشن تر شدن نحوه محاسبه  $t_e$  و همچنین تخمین زمان تراکم افراد و منحنی مقدار خروجی افراد در طول زمان، مثالی را مورد بررسی قرار می دهیم. شکل ۳ پلان یک طبقه آموزشی را که دارای چند کلاس و یک راه خروج اصلی است به عنوان نمونه برای محاسبات نشان می دهد. در این مثال نیز برای سادگی محاسبات فرض می شود فقط یک در خروج اصلی وجود دارد، اما روش به سادگی قابل تعمیم به درهای بیشتر خروج است.



شکل ۳: پلان استفاده شده در مدل تحلیلی

در شکل عرض بازشوها هر یک از اتاق ها و در اصلی به این صورت است (اندیس های  $a, h, g$  بیان کننده اتاق مربوطه و  $f$  در خروج نهایی است):

$$W_a = W_h = W_g = 1/5 \text{ m}, \quad W_f = 2/0 \text{ m}.$$

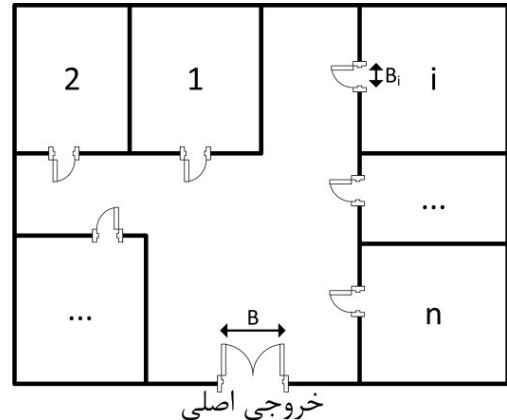
همچنین فاصله بین نقاط نشان داده شده در شکل ۳ به شرح ذیل است:

$$D_{ab} = D_{hc} = 1/3 \text{ m}, \quad D_{bc} = 16/7 \text{ m}, \quad D_{cd} = 2/7 \text{ m},$$

$$D_{gd} = D_{ef} = 1/5 \text{ m}, \quad D_{de} = 6/3 \text{ m}.$$

سرعت راه رفتن پارامتر مهمی است که در مدل های تخلیه استفاده می شود و با عوامل بسیاری مانند شرایط فیزیکی افراد تغییر می کند. سرعت های راه رفتن بر اساس عوامل مؤثر در (جدول ۱) فهرست شده اند. با توجه به شرایط

کدام از محفظه های موجود به سمت راه فرار حرکت می کنند و خود را به سمت خروج اصلی می رسانند.



شکل ۲: مدل ساده شده از یک ساختمان بلندمرتبه

همان طور که شکل ۲ نشان می دهد، در این مدل فرض شده است که در ناحیه مورد بررسی (محفظه آتش)  $n$  راه فرار وجود دارد. در واقع منظور این است که تعداد  $n$  اتاق که هر کدام دری به مسیر فرار دارند وجود دارد. وقتی که آتش سوزی در یک طبقه اتفاق می افتد، افراد مربوط به آن طبقه خاص از طریق این مسیرهای فرار خود را به مسیر فرار اصلی ساختمان که در خارج از محفظه آتش است انتقال می دهند. این خروجی اصلی می تواند راه پله فرار و یا در خروجی از ساختمان باشد. در این مدل فرضی برای شرح بهتر روش یک در خروج اصلی برای خروج افراد در نظر گرفته شده است.

فرض کنیم عرض  $i$  امین خروجی برابر  $B_i$  و جریان عبوری افراد به صورت  $N_i(t)$  (Person/s · m) باشد. در این صورت تعداد افراد جمع شده در خروجی اصلی برابر است با [۱۳]:

$$y = \sum_{i=1}^n \int_0^{t_e} N_i(t) B_i dt \quad (1)$$

که  $t_e$  زمان مورد نیاز برای تخلیه تمام افراد از محفظه آتش به خروجی اصلی است. در تمام مدت فرایند تخلیه در خروجی اصلی، زمان تخلیه (بدون در نظر گرفتن اثرات زمان پیش از حرکت) به دو دوره زمانی تقسیم می شود:

- $t_{free} - 0$ : زمان حرکت آزاد، به بیان دیگر در این حالت تراکم افراد در خروجی اصلی کمتر یا برابر حداکثر قابلیت خروجی از در اصلی است.

- $t_{free} - t_e$ : زمان حرکت متراکم، به بیان دیگر در این حالت تراکم افراد در مسیر اصلی خروج بیشتر از قابلیت خروجی از آن است.

فرض کنید که عرض مسیر خروجی اصلی برابر  $B$  (بر حسب متر) و ماکزیمم جریان عبوری برابر  $N$  (Person/s · m) است در نتیجه تعداد افراد تخلیه شده از فرار اصلی به بیرون ساختمان ( $y'$ ) برابر خواهد شد با [۱۴]:

$$y' = \underbrace{\sum_{i=1}^n \int_0^{t_{free}} N_i(t) B_i dt}_{\text{تعداد نفرات خارج شده قبل از ترافیک در خروج اصلی}} + \underbrace{(t_e - t_{free}) BN}_{\text{تعداد نفرات خارج شده بعد از ترافیک در خروج اصلی}} \quad (2)$$

با برابر قرار دادن این تعداد افراد خارج شده از محفظه آتش با افراد خارج شده از هر کدام از محفظه‌ها در همین مدت تا رسیدن هر کدام به خروجی اصلی، می‌توان زمان حرکت آزاد را به دست آورد:

$$N_a W_a (t_{\text{free}} - 28/5) + N_h W_h (t_{\text{free}} - 11/8) + N_g W_g (t_{\text{free}} - 9/3) = N_f W_f (t_{\text{free}} - t_{\text{min}}) \quad (6)$$

با جایگذاری

$$N_a W_a = N_h W_h = N_g W_g = 2/25, \quad N_f W_f = 3$$

در معادله (۶) داریم:

$$t_{\text{free}} = 21/9 \text{ s}$$

با توجه به نتایج فوق، رابطه بین تعداد افراد تخلیه‌شده  $P$  و زمان تخلیه  $t$  در هر مرحله به شرح ذیل است. لازم به توضیح است که افراد حاضر در محفظه  $A$  امکان تخلیه آزاد را به دلیل اینکه  $t_{\text{free}} \leq t_{af} (28/5 \text{ s})$  است، ندارند. الف) معادله زمان برای حرکت آزاد افراد در محفظه:

$$P = N_h W_h (t - t_{hf}) + N_g W_g (t - t_{gf}) = 2/25(t - 11/8) + 2/25(t - 9/3), \quad (7)$$

$$t_{\text{min}}(9/3) < t \leq t_{\text{free}}(21/9).$$

ب) معادله زمان برای جریان تراکمی و تراکم تمام افراد در محفظه پشت خروجی اصلی:

$$P = 2/25(t - 28/5) + 2/25(t - 11/8) + 2/25(t - 9/3), \quad (8)$$

$$t_{\text{free}}(21/9) < t \leq \max(50/72, 47/36, 22/63).$$

۳) مشخصه جریان خروجی از راه خروج اصلی.

الف) انتظار ایده‌آل برای جریان خروجی در طول این دوره هیچ فردی در خروجی  $f$  وجود ندارد. این موضوع را می‌توان توسط معادلات زیر بیان نمود:

$$P_{e1} = 0, \quad 0 < t < t_{\text{min}} = 9/3. \quad (9)$$

ب) معادله زمان برای خروجی آزاد:

$$P_{e2} = 2/25(t - 11/8) + 2/25(t - 9/3), \quad (10)$$

$$t_{\text{min}} < t < t_{\text{free}}.$$

پ) معادله زمان برای خروجی راه‌بندشده:

$$P_{e3} = N_f B_f (t - t_{\text{free}}) = 3(t - 21/9), \quad (11)$$

$$t_{\text{free}} < t < \max(50/72, 47/36, 22/63).$$

ت) انتظار در خروجی راه‌بندشده: به طور مشخص، وقتی در  $t = \max(50/72, 47/36, 22/63)$  به دلیل محدودیت در توان خروجی از  $f$ ، برخی از افراد در این خروجی منتظر تخلیه باقی می‌مانند. در واقع بعد از این زمان فرد جدیدی به افراد متراکم پشت خروجی اصلی اضافه نخواهد

مثال مورد نظر سرعت حرکت متوسط افراد  $1 \text{ m/s}$  در نظر گرفته شده است [۷].

پارامتر بعدی که در محاسبات مورد توجه است نرخ جریان عبوری از درهاست. این مقدار به عرض در، سرعت افراد و تراکم افراد وابسته است. مقالات مختلفی به بررسی این پارامتر پرداخته‌اند [۶، ۱۵، ۱۶]. در این مثال مقدار آن برای همه درهای خروجی  $1/5 \text{ Person/m} \cdot \text{s}$  فرض شده است [۱۲].

جدول ۱: سرعت راه رفتن بر اساس عوامل تأثیر.

عوامل تأثیر	سرعت (m/s)	محدوده (m/s)
نوع راه رفتن	حرکت آزاد	۲/۸ - ۱/۱
	حرکت به طرف خروجی	۸/۵ - ۰/۱
نوع جمعیت	بچه‌ها	۱/۰۸
	زنان سالخورده	۱/۰۴
	مردان سالخورده	۱/۰۵
	مسن	۱/۰۴
	زنان بزرگسال	۱/۲۴
	مردان بزرگسال	۱/۳۰
	بزرگسالان	۱/۲۷

۱) میانگین زمان مورد نیاز برای همه افراد در اتاق‌های  $A$ ،  $H$  و  $G$  برای حرکت به سمت خروجی هر اتاق

$$t_a = \frac{P_a}{N_a W_a} = \frac{50}{1/5 \times 1/5} = 22/22 \text{ s},$$

$$t_h = \frac{P_h}{N_h W_h} = \frac{80}{1/5 \times 1/5} = 35/56 \text{ s}, \quad (4)$$

$$t_g = \frac{P_g}{N_g W_g} = \frac{30}{1/5 \times 1/5} = 13/33 \text{ s}.$$

۲) از شروع تخلیه، زمان مورد نیاز برای همه افراد به منظور تخلیه از خروجی هر اتاق به خروجی اصلی  $F$  برابر است با:

$$t_{af} = \frac{D_{ab} + D_{bc} + D_{cd} + D_{de} + D_{ef}}{\bar{v}} = 28/5 \text{ s},$$

$$t_{hf} = \frac{D_{hc} + D_{cd} + D_{de} + D_{ef}}{\bar{v}} = 11/8 \text{ s}, \quad (5)$$

$$t_{gf} = \frac{D_{gd} + D_{de} + D_{ef}}{\bar{v}} = 9/3 \text{ s},$$

که  $\bar{v}$  سرعت متوسط حرکت افراد است.

از محاسبات فوق می‌توان نتیجه گرفت که از زمانی که آتش کشف و اعلان می‌شود:

- در  $t \leq t_{gf} = 9/3 \text{ s}$  و  $t \leq t_{hf} = 11/8 \text{ s}$ ،  $t \leq t_{af} = 28/5 \text{ s}$  هیچ‌کدام از افراد حاضر در هر کدام از محفظه‌ها به خروجی  $f$  نرسیده‌اند.
- وقتی  $t \geq t_h + t_{hf} = 47/36 \text{ s}$ ،  $t \geq t_a + t_{af} = 50/72 \text{ s}$  و  $t \geq t_g + t_{gf} = 22/63 \text{ s}$  تمام افراد حاضر در محفظه‌ها به خروجی  $f$  رسیده‌اند.

از معادله (۵)،  $t_{\text{min}} = \min(t_{af}, t_{hf}, t_{gf}) = 9/3 \text{ s}$  است. این بدان معنی است که اولین فردی که به خروجی اصلی می‌رسد حداقل  $9/3 \text{ s}$  زمان نیاز دارد. تعداد افراد خارج‌شده از خروجی اصلی قبل از انسداد برابر  $N_f W_f (t_{\text{free}} - t_{\text{min}})$  است.

Engineering ارائه شده است [۱۸]. حرکت افراد با استفاده روش مدل هیدرولیکی (SFPE) [۱۹-۲۱] شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد مدت زمان تخلیه بر اساس مدل‌سازی هیدرولیکی مدت زمان ۶۱ ثانیه و روش استرینگ ۶۵ ثانیه را تخمین می‌زند. این موضوع نشان می‌دهد که روش تحلیلی به‌رغم ساده بودن معادلات آن و در نظر گرفتن تراکم فقط در خروجی اصلی تخمین مناسبی را برای تخلیه افراد نشان می‌دهد.

## ۴ جمع‌بندی

در این مقاله یک روش تحلیلی ساده شده برای تخلیه افراد از فضای آتش گرفته ارائه شده است. این روش تحلیلی می‌تواند در مراحل اولیه طراحی به کمک مهندسان معماری آمده تا بتوانند طراحی معماری خود را با توجه به نتایج به دست آمده بهینه نمایند تا امکان تخلیه ایمن و جلوگیری از موارد جمعی در خروجی‌های ساختمان را در طراحی‌های در نظر بگیرند. از مزایای این روش، در نظر گرفتن تراکم افراد در خروجی اصلی در طراحی معماری است که منجر به تخمین دقیق‌تری از تراکم افراد می‌شود. استفاده از روابط جبری ساده در حل، برای تخمین مدت زمان خروج از دیگر مزایای این روش است که انجام آن را بسیار ساده می‌نماید. لازم به توضیح است که این روش برای فراهم‌آوری امکان محاسبات دستی فرضیات ساده‌سازی مانند ثابت بودن ظرفیت خروجی درها در طول محاسبه، یکسان بودن سرعت همه افراد و فرض حرکت آزاد از درهای خروجی هر اتاق در نظر گرفته است. بنابراین این روش در محل‌هایی که تراکم افراد کم است مانند مسکونی و اداری به نتایج واقعی‌تری نسبت به محل‌های پرتراکم مانند مراکز تجاری منجر می‌شود.

## مراجع

- [1] Carrigan, James, Blicher, Brian, and Bennett, Laura. Fire/life safety in high-rise buildings, 2015.
- [2] Proulx, Guylène. Evacuation time and movement in apartment buildings. *Fire Safety Journal*, 24(3):229-246, 1995.
- [3] Hurley, Morgan J, Gottuk, Daniel T, Hall Jr, John R, Harada, Kazunori, Kuligowski, Erica D, Puchovsky, Milosh, Watts Jr, John M, WIECZOREK, CHRISTOPHER J, et al. *SFPE handbook of fire protection engineering*. Springer, 2015.
- [4] Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. property protection, business and mission continuity, and resilience, 2012.
- [5] Fire safety engineering concerning evacuation from buildings, 2009.
- [6] Papinigis, Vytautas, Geda, Edgaras, and Lukošius, Kestutis. Design of people evacuation from rooms and buildings. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16(1):131-139, 2010.
- [7] *Application of fire safety engineering principles to the design of buildings: Part 6: Human factors: Life safety strategies - Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6); 2019 ed.* BSI, London, 2019.

شد. از این زمان مقدار افراد باقی‌مانده در خروجی اصلی با توجه به رابطه (۲) از معادله زیر به دست می‌آید:

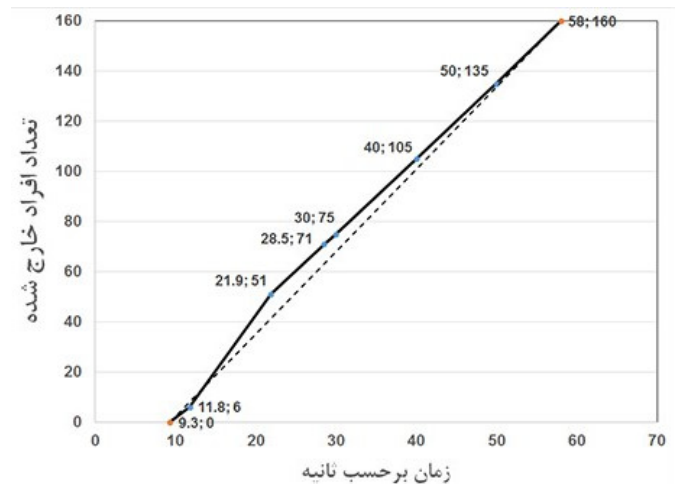
$$\Delta P = P - 3(t_e - 21/9) - P_{e2}(t_{free}),$$

$$\max(50/72, 47/36, 22/63) < t < t_e,$$

که در آن  $P = 160$  تعداد کل افراد  $P_{e2}(t_{free}) = 51$  تعداد افراد خارج شده در زمان حرکت آزاد است.

در زمانی که  $\Delta P = 0$  است زمان نهایی تخلیه ( $t_e$ ) به دست می‌آید. در این حالت  $t_e = 59$  به دست می‌آید. یا به بیان دیگر ۵۹ s طول می‌کشد تا تمام افراد از محفظه آتش مورد نظر خارج شوند.

به کمک معادلات فوق، منحنی تعداد افراد تخلیه شده بر حسب زمان در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۴ خط‌چین بیان‌کننده رابطه بین حداکثر توان تخلیه در  $f$  و زمان است و منحنی خط تیره نشان‌دهنده تعداد افراد تخلیه شده از محفظه آتش است.



شکل ۴: نمودار افراد خارج شده برحسب زمان

وقتی که خط تیره پایین‌تر از خط‌چین است، تراکم افراد کمتر از حداکثر مقدار توان خروجی است. در این دوره، حرکت افراد به صورت آزادانه است و هیچ نوع اختلالی در خروجی وجود ندارد. در این مرحله تخلیه به خوبی انجام می‌شود. این هدفی است که در طراحی معماری باید مورد توجه قرار گیرد [۱۷].

در حالتی که خط تیره بالاتر از خط‌چین است، تراکم افراد بیش از حداکثر مقدار خروجی است.

در این حالت حرکت افراد با انسداد در خروجی مواجه است که می‌تواند مشکلات زیادی از جمله هرج و مرج و وحشت را به همراه آورد. لازم است در طراحی تا حد زیادی از این مسئله جلوگیری نمود.

## ۳ مقایسه نتایج با مدل کامپیوتری

همان‌طور که اشاره شد دو روش مهم در خصوص محاسبه زمان حرکت یعنی روش‌های استرینگ و هیدرولیکی هستند. برای استخراج نتایج این دو روش از یک نرم‌افزار کامپیوتری به نام Pathfinder استفاده شده است. Pathfinder یک نرم‌افزار تجاری است که توسط Thunderhead

- Procedia*, 2:10–18, 2014. The Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014 (PED 2014), 22-24 October 2014, Delft, The Netherlands.
- [16] Li, Guo-Qiang, Zhang, Chao, and Jiang, Jian. A review on fire safety engineering: Key issues for high-rise buildings. *International Journal of High-Rise Buildings*, 7(4):265–285, 12 2018.
- [17] Pauls, Jake. International life safety and egress seminar, maryland, november, 1981: Summary of presentations and discussion. *Fire Safety Journal*, 5(3):213–221, 1983.
- [18] Thunderhead engineering, 2012. Pathfinder 2012.1.10802 Version. Technical Reference.
- [19] Reynolds, Craig W. Steering behaviors for autonomous characters. in *Game developers conference*, vol. 1999, pp. 763–782. Citeseer, 1999.
- [20] Gwynne, S., Galea, E.R., Owen, M., Lawrence, P.J., and Filippidis, L. A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and Environment*, 34(6):741–749, 1999.
- [21] Amor, Heni Ben, Obst, Oliver, and Murray, Jan. Fast, neat and under control: Inverse steering behaviors for physical autonomous agents. *Fachberichte Informatik*, pp. 12–2003, 2003.
- [8] Ronchi, Enrico. Developing and validating evacuation models for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*, p. 103020, 2020.
- [9] Lovreglio, Ruggiero, Ronchi, Enrico, and Kinsey, Michael J. An online survey of pedestrian evacuation model usage and users. *Fire Technology*, 56(3):1133–1153, May 2020.
- [10] Galea, E.R., Galparsoro, J.M.P., and Authority, Great Britain. Civil Aviation. *Exodus: An Evacuation Model for Mass Transport Vehicles*. CAA paper. Civil Aviation Authority, 1993.
- [11] Reynolds, Craig W. Steering behaviors for autonomous characters. in *Game developers conference*, vol. 1999, pp. 763–782. Citeseer, 1999.
- [12] Li, Y. Q. Fire safety design manual, 1998.
- [13] Yoshida, Yoshiyuki. Evaluating building fire safety through egress prediction: A standard application in japan. *Fire Technology*, 31(2):158–174, May 1995.
- [14] Li, Yunjiang and Ye, Juan. Evacuation of highrise buildings and its evaluation method. 5(3):50–53, 2003.
- [15] Jo, Akihide, Sano, Tomonori, Ikehata, Yuka, and Ohmiya, Yoshifumi. Analysis of crowd flow capacity through a door connected to a crowded corridor. *Transportation Research*