

mgr inż. **Iwona CŁAPA**

Wydział Inżynierii Procesowej  
i Ochrony Środowiska  
Politechnika Łódzka

mgr inż. **Rafał POROWSKI**

Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej  
Państwowy Instytut Badawczy

prof. dr hab. inż. **Marek DZIUBIŃSKI**

Wydział Inżynierii Procesowej  
i Ochrony Środowiska  
Politechnika Łódzka

## WYBRANE MODELE OBLICZENIOWE CZASÓW EWAKUACJI

### Selected calculation models for evacuation times

#### Streszczenie

W artykule tym dokonano analizy i krótkiej charakterystyki metodyk obliczeniowych dotyczących szacowania czasu ewakuacji ludzi z budynków i obiektów budowlanych. Dostępne w literaturze modele obliczeniowe podzielić można na trzy zasadnicze grupy, tj. modele szacowania pojedynczych parametrów ewakuacji, modele ruchu oraz tzw. modele behawioralne, czyli oparte o zachowania ludzi podczas ewakuacji. Modele szacowania pojedynczych parametrów ewakuacji zazwyczaj wykorzystywane są do prostych szacunków ruchu. Mogą stanowić proste obliczenia wykonywane ręcznie np. czasu przepływu w oparciu o szerokości wyjścia lub czasu przemieszczania się w oparciu o długość drogi ewakuacyjnej. Modele ruchu oparte są o zasady mechaniki płynów, traktując ewakuujące się osoby jako płyn. Modele tego typu mają tendencję do optymalizacji zachowania użytkowników, wszystkie osoby poruszają się z tą samą prędkością, z doskonałą znajomością geometrii budynku i dróg ewakuacyjnych. Modele behawioralne opierają się natomiast na różnych zmiennych odnoszących się do ruchu oraz zachowania się ludzi podczas pożaru i procesu ewakuacji.

#### Summary

The paper is devoted to present selected models for computational time prediction of evacuation processes, which are the basic elements used in the fire protection engineering. Currently there are three types of evacuation models: models for estimating single parameters of evacuation, traffic models and simulation models of behavior. Models for estimating parameters of a single evacuation are usually used for simple estimates of traffic. Traffic models are based on the principles of flow, treating persons moved in as a liquid. These models tend to optimize the behavior of users, all individuals move at the same

speed, with excellent knowledge of building layout and evacuation routes. Behavior models are based on variables related to the movement and behavior of humans. Users have different characteristics, gender, age, can move at different speeds and interact with the environment. This type of models allow to simulate more realistic situations, but still there is no data available that would allow us to predict human behavior in fire. In this paper some simple models are presented which we can use to calculate evacuation time e.g. Pauls, Kikuji-Togawa, Galbreath, Melinek and Booth, RSET and ASET according to British Standard BS 7974:2001 PD 7974-6, and also the Helbing model.

**Słowa kluczowe:** ewakuacja, modelowanie, modele ewakuacji, czas ewakuacji;

**Keywords:** evacuation, modeling, evacuation models, evacuation times;

### 1. Wstęp

Artykuł poświęcony jest przedstawieniu wybranych metodyk szacowania czasów ewakuacji na podstawie reprezentatywnych modeli obliczeniowych.

W literaturze stosowane są trzy rodzaje modeli ewakuacji tj. modele szacowania pojedynczych parametrów ewakuacji, modele ruchu oraz tzw. modele behawioralne tj. oparte o zachowania ludzi podczas ewakuacji. Modele szacowania pojedynczych parametrów ewakuacji zazwyczaj wykorzystywane są do prostych szacunków ruchu. Mogą stanowić proste obliczenia wykonywane ręcznie np. czasu przepływu w oparciu o szerokości wyjścia lub czasu przemieszczania się w oparciu o długość drogi ewakuacyjnej. Modele ruchu oparte są o zasady mechaniki płynów, traktując ewakuujące się osoby jako płyn. Modele tego typu mają tendencję do optymalizacji zachowania użytkowników, wszystkie osoby poruszają się z tą samą prędkością, z doskonałą znajomością geometrii budynku i dróg ewakuacyjnych. Modele behawioralne opierają się natomiast na różnych zmiennych odnoszących się do ruchu oraz zachowania się ludzi podczas pożaru i procesu ewakuacji. Ewakuowanym osobom przypisywane są wybrane cechy, charakteryzowane płcią, wiekiem, prędkością poruszania się, jak również interakcje ewakuujących się osób z otoczeniem, konstrukcją budynku. Tego typu modele pozwalają na bardziej realistyczną symulację, jednak nadal istnieje brak dostępnych danych doświadczalnych, które pozwoliłyby na przewidywanie ludzkich zachowań podczas pożaru. W celu przybliżenia tych zagadnień przedstawione zostaną w niniejszej pracy następujące modele: model Pauls'a, uproszczony model Kikuji - Togawy, model Galbreath'a, model Melinek i Booth, model wg. Hamanowicza, model ukazany w British Standard BS 7974 PD 7974-6 , a także model Helbinga.

## 2. Wybrane modele obliczeniowe czasów ewakuacji

### 2.1 Tradycyjne obliczenia czasów ewakuacji

W celu zapewnienia bezpieczeństwa osobom przebywającym w budynku podczas pożaru, należy zapewnić im możliwość opuszczenia obiektu w czasie, gdy warunki na drogach ewakuacyjnych nie osiągną wartości krytycznych tj. temperatura nie przekroczy 68 °C, a zasięg widzialności nie spadnie poniżej 10 m [9]. W tym celu powstało kilkanaście modeli obliczeniowych czasów ewakuacji. Jednymi z najprostszych modeli zastosowanych do wyznaczenia czasu potrzebnego do ewakuacji są modele przedstawione w "New Guideline for Building Hazard-Prevention, the explanation of a building's hazard-prevention and evacuation planning" [7]. W celu zapewnienia skutecznej ewakuacji wymagany czas na ewakuację musi być dłuższy od rzeczywistego czasu ewakuacji. W tym celu należy znać czas krytyczny ewakuacji oraz czas opróżnienia stref pomieszczeń, w których przebywają ludzie zgodnie z poniższymi równaniami (1-4) [13]:

Krytyczny czas ewakuacji

$$t_1 = 2\sqrt{A} \quad (1)$$

gdzie:

$t_1$  - czas (s),

$A$  - powierzchnia (m<sup>2</sup>).

Czas opróżnienia każdej strefy ewakuacji

$$t_i = \max(t_{1i}, t_{2i}) \quad (2)$$

$$t_{1i} = \frac{N_i}{1,5 \cdot B_i} \quad (3)$$

$$t_{2i} = \frac{L_{xi} + L_{yi}}{V} \quad (4)$$

gdzie:

$i$  – oznacza numer strefy

$t_i$  – czas (s) na ewakuację ludzi ze strefy (s)

$t_{1i}$  – czas (s) przejścia każdego pieszego przez strefę  $i$ ,

$t_{2i}$  - czas (s) wymagany dla ostatniego pieszego aby dotrzeć do wyjścia ze strefy  $i$ ,

$N_i$  - liczba osób w strefie  $i$ ,

1,5 współczynnik przepływu użytkowników (człowiek/m s),

$B_i$  – efektywna szerokość (m) wyjścia ze strefy  $i$ ,

$L_{xi} + L_{yi}$  - najdłuższa odległość, mierzona na poziomej drodze, aby wyjść ze strefy  $i$ ,

$V$  - prędkość chodzenia (m/s); 1,3 m/s dla biur, szkoły i stadionów; 1,0 m/s dla centrów handlowych i hoteli; 0,5 m/s dla szpitali i sal konferencyjnych o dużej ilości osób.

Następnie, po przeprowadzonych obliczeniach należy wyznaczyć najmniej korzystny wariant opróżniania strefy ewakuacji zgodnie ze wzorem (2) i porównać go z uzyskanym czasem krytycznym.

Z uwagi na uproszczoną formę, model ten nie jest wiarygodnym źródłem informacji i należałoby otrzymane wyniki skonfrontować z innymi obliczeniami. Może on być wykorzystywany tylko w prostych układach komunikacyjnych.

## **2.2 Model Kikuji Togawy do wyliczenia czasu niezbędnego do ewakuacji**

Badaniem ruchu tłumu zajmował się naukowiec japoński Kikuji Togawa [10]. Wprowadził on do metodyki obliczania czasów ewakuacji wiele technicznych spostrzeżeń i danych empirycznych. Zaproponował on ogólne równanie (5) do obliczenia czasu do ewakuacji [10]:

$$Evac.Time = FlowTime + TravelTime \quad (5)$$

Opracowane przez Togawę równanie wyznaczania czasu potrzebnego do ewakuacji po wprowadzeniu danych empirycznych przedstawia się następująco (6):

$$t_e = \frac{1}{N' \cdot B'} \left\{ N_a - \sum_{i=1}^n \int_0^{T_0} N_i(t) B_{i\phi}(t) dt \right\} + T_0 \quad (6)$$

Jeżeli we wzorze (6) najkrótszą odległość od ostatniego wyjścia ewakuacyjnego do czoła przemieszczającego się tłumu opiszemy jako  $k_s$ , a prędkość poruszania się tłumu jako  $v$  [10], wówczas forma uproszczona równania pozwalająca na określenie czasu wymaganego do ewakuacji [4] przedstawia się następująco:

$$t_e = \frac{N_a}{B' \cdot N'} + \frac{k_s}{v} \quad (7)$$

gdzie:

$t_e$  - czas niezbędny do ewakuacji (s),

$N_a$  - całkowita liczba ewakuowanych ludzi,

$N'$  - ilość osób ewakuujących się przez konkretne drzwi (osoby/m),

$B'$  - szerokość drzwi (m),

$v$  - prędkość poruszania się tłumu (m/s),

$k_s$  - odległość od ostatniego wyjścia ewakuacyjnego do czoła przemieszczającego się tłumu (m).

Model ten nie uwzględnia jednak zachowań ludzkich, a odnosi się jedynie do zależności pomiędzy całkowitą ilością osób ewakuujących się oraz prędkości poruszającego się tłumu oraz dystansu, jaki ma on pokonać.

### 2.3 Model Galbreath'a

Galbreath [10] zaproponował równanie opierające się na dwóch czasach składających się na czas całkowitej ewakuacji ludzi z budynku. Są to: czas wymagany do wypełnienia schodów ludźmi oraz czas potrzebny do wyjścia przy użyciu tych schodów. W efekcie, odległość przejścia dzieli się na drobne składowe, które zakładają, że pierwsza osoba rozpoczyna przepływ przez drzwi wejściowe na schody, powodując wzrost szybkości przepływu przez pozostałe osoby. Zaproponowane przez niego równanie (8) dla minimalnego czasu ewakuacji przedstawia się zatem następująco:

$$t = \frac{N + n}{r \cdot u} \quad (8)$$

gdzie:

t - czas potrzebny do całkowitej ewakuacji po schodach (s),

N – liczba osób powyżej pierwszego piętra,

n – liczba osób, które mogą stanąć na schodach na 0,28 m<sup>2</sup> lub ilość osób na podłodze, w zależności od tego która wartość jest mniejsza,

r - prędkość przepływu ludzi przez wyjście (s/m),

u – szerokość drogi ewakuacyjnej (m).

Problem z wykorzystaniem równania Galbreath'a polegał na otrzymywaniu zbyt optymistycznych czasów ewakuacji, w porównaniu do bardziej zaawansowanych obliczeń numerycznych w tym zakresie.

### 2.4 Modele przepływu Melinek'a i Booth'a

Podczas modelowania czasu do ewakuacji, przepływ osób na schodach przedstawiony może zostać jako jednolity przepływ tłumy. Jedną z głównych wad modeli przepływu są ich optymistyczne wyniki, gdyż zakładają, że schody nie stają się przepełnione. Natomiast w przypadku istnienia zatorów, prędkość poruszania się, a także szybkość przepływu użytkowników znacząco spada. Zgodnie z wytycznymi Pauls'a w przypadku, gdy gęstość użytkowników wynosi więcej niż 3,8 osoby na metr kwadratowy, prędkość może spaść nawet do zera. W 1975 r. Melinek i Booth opracowali model przepływu ewakuacji zbliżony do modelu Togawy [10], który określał, że proces ewakuacji można podzielić na dwie kategorie. W pierwszym przypadku, powstają zatory na schodach, w drugim zaś użytkownicy mogą swobodnie się poruszać. Czas wyjścia określany jest wówczas przy pomocy dwóch równań (9) i (10) [14]:

$$t_1 = \frac{nN}{F_s W} + t_s \quad (9)$$

$$t_n = \frac{N}{F_s W} + n \cdot t_s \quad (10)$$

gdzie:

$t_1$  – czas wyjścia (zatorów) (s),

$t_n$  - czas wyjścia (ruch swobodny) (s),

$n$  - liczba pięter,

$N$  - liczba osób na piętrze i do wyjścia,

$F_s$  - nominalny przepływ użytkowników na schodach (osoby/m s),

$W$  - szerokość klatki schodowej (m),

$t_s$  - czasu na chodzenie między sąsiednimi piętrami (ruch swobodny) (s).

W celu uzyskania wiarygodnych wyników, zamiast rzeczywistych szerokości schodów należy przyjmować szerokość efektywną w celu uwzględnienia efektu oddziaływania na ściany i poręcze.

## **2.5 Obliczanie czasów ewakuacji przy użyciu modeli Pauls'a**

Warunki techniczno-budowlane [11], a także standardy National Fire Protection Association: NFPA 101 Life Safety Code 2006, proponują proste podejście do obliczania minimalnych szerokości korytarzy i schodów dla niektórych ich użytkowników, tj. wymagane szerokości uzależnione są od całkowitej ilości użytkowników przemieszczających się osób. W 1987 r. Pauls [4] podczas przeprowadzonych badań wykazał, że rzeczywista ewakuacja nie odwzorowuje liniowego modelu, ponieważ nie można dokładnie przewidzieć tempa, w jakim ludzie będą się ewakuować. Model liniowy nie brał pod uwagę, że podczas schodzenia schodami ludzie kołyszają się w przód i w tył oraz starają się nie dotykać ścian i siebie nawzajem. Z tego powodu przepływ stosowany w tradycyjnych modelach był zbyt optymistyczny. Pauls odkrył również, że prędkość poruszających się osób nie zwiększa się, ale jest on liniowo powiązany z szerokością schodów. Co więcej, Pauls wprowadził tzw. efekt krawędzi, w którym założono, że należy odjąć zewnętrzne 15,36 cm po obu stronach schodów od pomiaru szerokości schodów podczas obliczania przepływów w związku z kołysaniem się ludzi podczas ich ruchu w dół po schodach. Pauls na podstawie przeprowadzonych badań [4] i obserwacji określił, że przepływ tłumy w dół schodów i korytarzy można najprościej wyrazić jako funkcję liniową:

$$F = S \cdot D \cdot L \quad (11)$$

gdzie:

S - szybkość , odległość przebyta przez osoby powyżej pewnej jednostce czasu (m/s),

D – gęstość, liczba osób zajmujących pewien obszar, np. 2 osoby na metr kwadratowy (osoby/m<sup>2</sup>),

L - szerokość klatki schodowej lub korytarza (m). (Należy pamiętać, że szerokość w kalkulacjach powinno być nieco mniej niż rzeczywista szerokość mierzona bo ludzie będą się kołysać, gdy chodzą i próbują uniknąć otarcia krawędzi schodów i korytarzy).

Zgodnie ze wzorem (11) należy wyciągnąć wniosek, że prędkość przepływu osób wzrastać będzie proporcjonalnie. Jednakże, w rzeczywistości sytuacja jest bardziej skomplikowana, ponieważ w miarę wzrostu gęstości, ludzie zaczynają na siebie negatywnie oddziaływać, przez co jest zakłócona zdolność do utrzymania normalnego chodu, co z kolei powoduje zwolnienie prędkości poruszania się. Na podstawie obserwacji, Pauls oszacował, że najlepszą efektywność uzyskuje się przy przepływie 1,18 osoby na sekundę na metr szerokości schodów.

Na podstawie danych doświadczalnych [4, 10], Pauls opracował równanie (12) służące do przewidywania całkowitego czasu ewakuacji ludzi z wieżowców, przy założeniu, że liczba ludzi w budynku wynosi nie mniej niż 800:

$$t = 2 + 0,0117p \quad (12)$$

gdzie:

t - minimalny czas, całkowitej , niekontrolowanej ewakuacji po schodach (s),

p – rzeczywista ilość ewakuowanych ludzi na metr efektywnej szerokości schodów.

Zgodnie z zaleceniami [4, 10] w budynkach, w których liczba osób znacznie przewyższa 800 osób/m<sup>2</sup> szerokości schodów, stosuje się następujące równanie (13):

$$T = 0,7 + 0,0133p \quad (13)$$

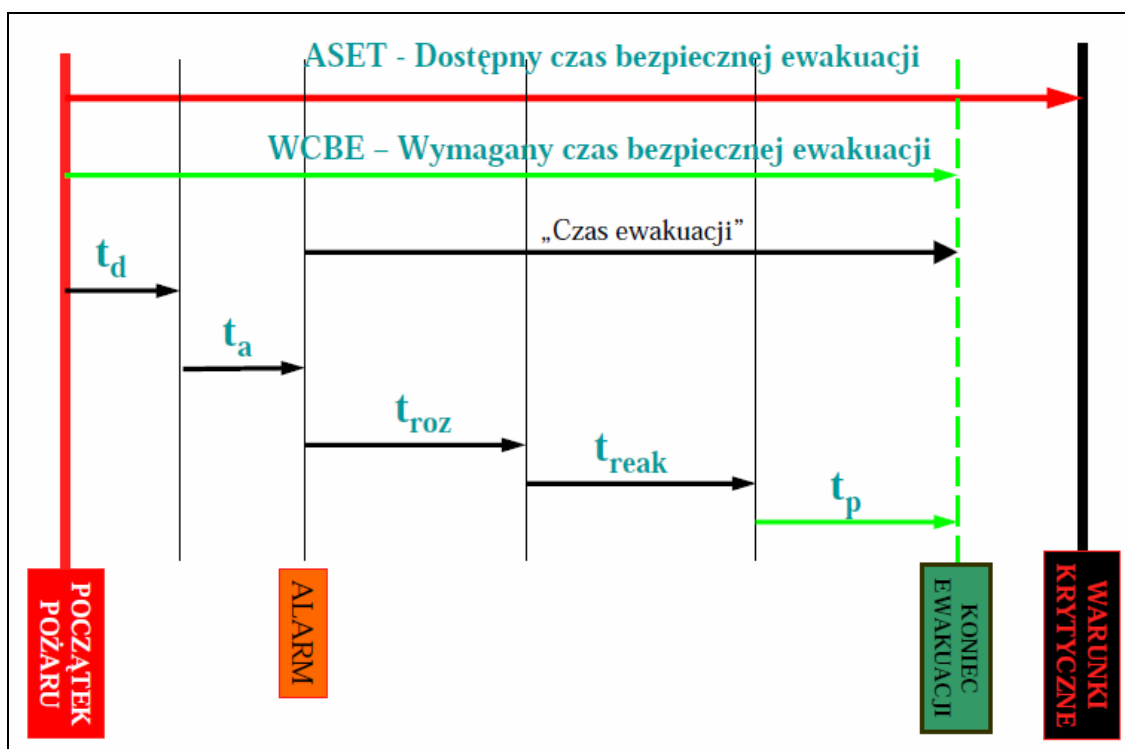
Metoda ta umożliwia oszacowanie czasu ewakuacji ludzi z budynków i tym samym może być stosowana w niezbyt skomplikowanych układach komunikacyjnych, ponieważ nie odnosi się do zachowań ludzkich takich jak np. powrotu po zapomniane rzeczy, czy szukanie zagubionych osób w budynku.

### 2.6 Czasy bezpiecznej ewakuacji wg. standardów BS

Metodyka przedstawiona w standardzie PD 7974-6:2004 [9] oparta jest na zapewnieniu odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa, w celu którego należy wyznaczyć dostępny czas bezpiecznej ewakuacji (ASET- Available Safe Evacuation Time), który musi być większy niż wymagany czas bezpiecznej ewakuacji (RSET- Required Safe Escape Time). Każdy z tych czasów należy ocenić za pomocą odpowiednio przeprowadzonej analizy dla przyjętego scenariusza pożaru [4]. Jedną

z zalet stosowania tego standardu jest możliwość wykorzystania go do różnych wariantów ewakuacji z budynków.

Podczas dokonywania obliczeń, wykorzystując powyższy standard należy przestrzegać kilku zasad [9]. Jedną z nich jest to, że przewidywany czas ASET wymaga oszacowania osiągnięcia stężeń niebezpiecznych toksycznych produktów spalania oraz krytycznej temperatury w warstwie podsufitowej w czasie trwania pożaru. Parametry te należy wyznaczać zgodnie ze wskazaniem zawartymi w dokumentach z serii PD [8, 9]. Jeżeli chodzi o czas RSET, to zależy on głównie od czasu detekcji pożaru, a także czasu alarmowania o zaistniałym niebezpieczeństwie, jak również od zakresu parametrów określających zachowania i poruszanie się użytkowników w czasie ewakuacji, dla różnych płci oraz wieku użytkowników.



**Ryc.1.** Składowe czasu ewakuacji [9].  
**Fig. 1.** Components of evacuation time [9].

Źródło: Opracowanie własne

W celu określenia zachowań ludzkich, standard [9] wprowadza dwie kategorie charakteryzujące zachowania:



- kategorię wstępnych zachowań (tzw. pre-movement behaviours), która obejmuje reakcje powstałe przed rozpoczęciem poruszania się po drogach ewakuacyjnych, ale zachowania te nie są związane z ewakuacją;
- kategorię zachowania w ruchu (tzw. travel behaviour), która obejmuje ruch drogami ewakuacyjnymi.

W celu zapewnienia użytkownikom budynku bezpiecznych warunków ewakuacji, podczas dokonywania analizy czasów ewakuacji należy uwzględnić margines bezpieczeństwa tj. różnicę pomiędzy czasami ASET i RSET. W celu wyznaczenia wymaganych czasów posługujemy się następującym równaniem:

$$RSET = \Delta t_{det} + \Delta t_a + (\Delta t_{pre} + \Delta t_{przej}) \quad (14)$$

gdzie:

$t_{det}$  - czas detekcji czyli czas od zainicjowania pożaru do czasu jego wykrycia przez system sygnalizacji pożarowej lub przez użytkowników (s),

$t_a$  - czas alarmowania czyli czas od momentu detekcji do czasu ogłoszenia alarmu (s),

$t_{pre}$  – czas wstępnych reakcji użytkowników  $t_{reak}$  i rozpoznania  $t_{roz}$  (s),

$t_{przej}$  - czas przejścia również oznaczane jako  $t_p$  użytkowników budynku, składający się z czasu wymaganego do przejścia użytkowników do wyjścia na zabezpieczone drogi ewakuacyjne tzw. „czas przejścia” oraz czas wymaganego na przejście przez wyjścia i drogi ewakuacyjne tzw. „flow” (s).

W celu prawidłowego wyznaczenia czasów ewakuacji należy w pierwszej fazie analizy wyznaczyć scenariusze projektowe zachowań użytkowników, w których określone będą wstępne czasy reakcji oraz czasy przejścia. Zgodnie ze standardem PD [9] są one uzależnione w dużej mierze od zachowań użytkowników. Zależą one głównie od takich czynników jak charakterystyka budynku, sposobów detekcji pożaru, sposobu alarmowania, jak również od systemów zarządzania bezpieczeństwem w budynku. Dodatkowy wpływ będą miały wiek użytkowników, ich kondycja fizyczna, płeć, jak również sytuacja, w jakiej użytkownicy zostali narażeni na zdarzenie.

W standardzie [9] dane dotyczące poszczególnych faz zachowań zostały zebrane w formie tabelarycznej, które powstały dzięki obserwacjom oraz prowadzonym badaniom podczas użytkowania obiektów, a także obserwacji z przebiegów ewakuacji.

Tabela 1.  
**Projektowe scenariusze zachowań i rodzaje użytkowania [9].**

Table 1.

**Design scenarios of human behavior and operational types [9].**

Kategoria	Znajomość użytkowników	Gęstość użytkowników	Wydzielenia	Przykłady obiektów
A	Zaznajomieni	Niska	Jedno lub wiele	Biuro lub obiekty przemysłowe
B1	Niezaznajomieni	Wysoka	Jedno w skupionym punkcie	Sklep lub restauracja
B2	Niezaznajomieni	Wysoka	Jedno w skupionym punkcie	Kino, teatr
C <sub>I</sub>	Zaznajomieni	Niska	Kilka	Mieszkanie bez 24 h nadzoru
C <sub>II</sub>				Nadzorowane mieszkania, hole rezydencji, itd.
C <sub>III</sub>	Niezaznajomieni	Niska	Wiele	Hotel, hostel
D	Niezaznajomieni	Niska	Wiele	Szpital
E	Niezaznajomieni	Wysoka	Wiele	Dworce kolejowe i lotnicze

W przypadku, gdy w budynku występuje kilka możliwych kategorii scenariuszy zachowań, należy wówczas rozpatrywać możliwe wszystkie ich warianty i kombinacje. Na podstawie przyjętej metodyki wskazanej w standardzie [9] kolejnym etapem wyznaczania czasów ewakuacji jest wyznaczenie zmiennych, takich jak jakość systemu sygnalizacji pożaru (poziomy od A1 do A3), złożoności budynku (poziomy od B1 do B3) oraz jakość systemu zarządzania bezpieczeństwem (od M1 do M3).

Zgodnie ze wskazaniem standardu [9], czas ewakuacji jest zależny od czasu pierwszych, wstępnych reakcji ostatnich kilku użytkowników decydujących się na opuszczenie pomieszczeń oraz czasu wymaganego dla przejścia do i przez wyjścia ewakuacyjne. Gdy gęstość użytkowników jest mała, wówczas prędkość poruszania się nie będzie zakłócona, a przy wyjściach nie będą tworzyć się zatory.

Czas ewakuacji przedstawia równanie (15):

$$\Delta t_{ewak} = \Delta t_{pre(99\%)} + \Delta t_{przej} \quad (15)$$

gdzie:

$\Delta t_{pre(99\%)}$  - czas od alarmu do rozpoczęcia ewakuacji ostatnich kilku użytkowników (s),

$\Delta t_{przej}$  - czas przejścia (niezakłócona prędkość poruszania przez średnią odległość do wyjścia (s).

W przypadku, gdy czas ewakuacji zależy od czasu pierwszych, wstępnych reakcji oraz czasu przejścia pierwszych kilku użytkowników oraz czasu przejścia przez

wyjścia ewakuacyjne, wówczas równanie (15) będzie przedstawiało się następująco (równanie 16):

$$\Delta t_{ewak} = \Delta t_{pre(1\%)} + \Delta t_{przej} + \Delta t_{przej.drzwi} \quad (16)$$

gdzie:

$\Delta t_{przej.drzwi}$  - czas przejścia przez wyjścia wszystkich użytkowników budynku (s).

Należy zwrócić szczególną uwagę na możliwość tworzenia się zatorów przy drzwiach ewakuacyjnych, co zasadniczo wpływać będzie na szybkość ewakuacji.

Zgodnie z przyjętą metodyką podczas wyznaczania czasów niezbędnych do ewakuacji, następnym etapem jest określenie narażenia użytkowników budynku na produkty spalania i ciepło generowane przez pożar powstały w budynku, który z kolei znacząco wpływać będzie na wartości ASET i RSET. W przypadku budynków prostych, z dobrze funkcjonującym systemem zarządzania, czas rozpoznania będzie z reguły krótki. Natomiast w przypadku budynków złożonych, gdy użytkownicy znajdują się daleko od źródła pożaru, czas ten będzie znacznie się wydłużył.

Czas ten kończy się, gdy do świadomości użytkowników dotrze konieczność reakcji na alarm o pożarze. Wtedy rozpoczyna się czas reakcji, w którym ludzie reagują, ale jeszcze nie rozpoczynają ewakuacji. Może on trwać od kilku sekund do kilku minut, w zależności od okoliczności w jakich znajduje się użytkownik. W czasie jego trwania użytkownicy przerywają swoje normalne czynności i rozpoczynają działania zależne od rozwoju zagrożenia. Mogą to być zachowania badawcze, zawierające czynności zmierzające do określenia źródła zagrożenia, poszukiwanie innych osób, wracanie się po pozostawione rzeczy, próby gaszenia pożaru, czy też alarmowanie innych osób.

W celu określenia czasów przemieszczania się należy określić szybkość poruszania się na poziomych i pionowych drogach ewakuacyjnych. Zwykle, przy niezakłóconym ruchu pieszych po poziomych drogach ewakuacyjnych przyjmuje się prędkość 1,2 m/s.

W literaturze przedmiotu [9] przedstawia się następujące przykłady:

- 1,25 m/s w budynkach biurowych,
- 1,19 m/s w innych budynkach,
- 1,7 m/s dla mężczyzn i 0,8 m/s dla kobiet.

Według Nelsona i Mowrera [9], w przypadku, gdy gęstość ludzi na drogach ewakuacyjnych jest mniejsza niż 0,54 osób/m<sup>2</sup> to indywidualna prędkość poruszania

się ludzi nie będzie zależna od innych. Zatrzymanie ruchu następuje przy zagęszczeniu ludzi powyżej  $3,8 \text{ osób/m}^2$ , o czym było wspomniane już wcześniej. W celu określenia prędkości poruszania się ludzi po poziomych drogach ewakuacyjnych skorzystać można z równania (17) [2, 4, 12]:

$$S = k - a \cdot k \cdot D \quad (17)$$

gdzie:

S - prędkość przemieszczania się osób wzdłuż osi ruchu (m/s),

D - zagęszczenie (liczba osób/m<sup>2</sup>),

k - współczynnik równy 1.4 przy przemieszczaniu się w poziomie,

a - współczynnik równy 0.266.

Następnie, należy ilość ewakuujących się osób przez wyjście ewakuacyjne, zgodnie z równaniem (18) [4]:

$$F_s = S \cdot D \quad (18)$$

gdzie:

F<sub>s</sub> - to konkretny przepływ (liczba osób/ms)

S - prędkość (m/s),

D - gęstość (liczba osób/m<sup>2</sup>).

Kolejnym krokiem w analizie jest wyznaczenie parametru F<sub>C</sub>, czyli obliczeniowego przepływu według równania (19) [4]:

$$F_C = F_s \cdot W_e \quad (19)$$

gdzie:

F<sub>C</sub> - obliczeniowy przepływ (osoby/s),

F<sub>s</sub> - konkretny przepływ (liczba osób/ms),

W<sub>e</sub> - szerokość (m).

Zgodnie z wytycznymi The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [12], czas przejścia grupy osób do wyjścia ewakuacyjnego T<sub>P</sub>, wyrażony będzie wzorem:

$$t_p = \frac{P}{F_c} \quad (20)$$

gdzie:

F<sub>C</sub> - to obliczeniowy przepływ (osoby/s),

t<sub>p</sub> - czas przejścia (s),

P - liczba osób.

W celu określenia czasu RSET należy zsumować wszystkie składowe tego czasu. Jeżeli spełniony jest warunek opisany nierównością:

$$ASET - RSET \geq 0 \quad (21)$$

to warunki ewakuacji są bezpieczne, a cały proces ewakuacji zostanie zakończony przed osiągnięciem na drogach ewakuacyjnych warunków krytycznych. Natomiast jeżeli różnica ta przyjmować będzie postać:

$$ASET - RSET < 0 \quad (22)$$

wówczas podczas ewakuacji warunki w pomieszczeniach i na drogach ewakuacyjnych mogą powodować zagrożenie dla zdrowia lub życia użytkowników budynku. Należy podjąć wtedy przedsięwzięcia mające na celu poprawę warunków bezpieczeństwa pożarowego w obiekcie. Do najczęściej stosowanych należy zastosowanie technicznych systemów zabezpieczeń przeciwpożarowych np. instalacji tryskaczowej, wentylacji pożarowej, oddzieleń przeciwpożarowych, klap dymowych itp. Zastosowanie takich rozwiązań umożliwia wydłużenie dostępnego czasu ewakuacji ASET oraz zapewnienie odpowiednich warunków ewakuacji.

Model szacowania czasów RSET i ASET umożliwia przeprowadzenie bardzo szczegółowej analizy oraz pozwala określać wymagany czas do przeprowadzenia ewakuacji. Odnosi się on do zachowań, a także do technicznych systemów zabezpieczeń. Może zatem stanowić podstawę do wiarygodnego wyznaczania czasów ewakuacji.

## **2.7 Dynamika tłumu wg. modelu Helbing'a**

Podczas prowadzenia ewakuacji dużej ilości ludzi może dojść do zagrożenia dla życia osób ewakuowanych. Cechą charakterystyczną tłumu jest tworzenie tzw. „wąskiego gardła”, czyli zatorów spowalniających prędkość poruszania się. W takich sytuacjach może dojść do zapychania się wyjść ewakuacyjnych. Dlatego też, zdolność identyfikacji sytuacji, w których mogą wystąpić niebezpieczne zatory, jest jednym z głównych zadań dobrego modelu symulacyjnego. Aby realistycznie symulować zjawiska zatorów, modele symulacyjne powinny uwzględniać siły mechaniki występujące w takich sytuacjach.

Modelem przedstawiającym te zagadnienia jest model Helbing'a [6], będący uogólnionym modelem, zakładającym socjo-psychologiczny i fizyczny wpływ na zachowanie się w tłumie [6]. W modelu tym równanie ruchu pieszych (23) przedstawia się następująco:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{V_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_W f_{iW} + \xi_i \quad (23)$$

gdzie:

$m_i$  – ilość pieszych

$V_i^0(t)$  - prędkość ruchu pieszego

$e_i^0(t)$  - pożądaný kierunek ruchu pieszych

$v_i(t)$  - rzeczywista prędkość ruchu pieszych

$\tau_i$  - charakterystyczna cecha „czasu przyśpieszenia”

$\sum_{j(\neq i)} f_{ij}$  - wzajemne siły pomiędzy pieszymi

$\sum_W f_{iW}$  - wzajemne siły pomiędzy pieszymi a ścianami

$\xi_i$  - zmienna losowa.

Podstawową ideą tego modelu jest traktowanie pieszych jako cząstki ciał stałych. W modelu tym, przyśpieszenie prędkości poruszania się może być spowodowane przez różnicę między żadaną prędkością oraz rzeczywistą prędkością, lub przez siły spowodowane przez ściany albo inne osoby. W równaniu (23) występuje pewna zmienna losowa ze względu na możliwość tworzenia się zatorów. Psychologiczną tendencją pieszych jest trzymanie się z dala od siebie, odległości te są opisane przez siły wzajemnego oddziaływania, zwane potocznie siłami społecznymi.

Główną zaletą tego modelu jest jego oparcie na siłach mechaniki oddziałujących na tłum. W związku z tym, model ten jest w stanie realistycznie symulować efekty zatorów, które powodowane są przez te siły [6]. Jako jeden z najbardziej znanych modeli, model Helbing’a [15] wykorzystywany jest w takim programie kalkulacyjnym jak FDS+EVAC. Pomimo jego zalet, model ten bywa także krytykowany przez międzynarodowych specjalistów w tej dziedzinie. Przykładowo, Still [6] stwierdził, że prawa dynamiki tłumy muszą uwzględniać fakt, że ludzie nie stosują się do praw fizyki i mechaniki, czego nie uwzględnia powyższy model.

## 2.8 Komputerowe modele obliczeniowe

Pierwszy komputerowy model obliczeniowy przepływu osób podczas ewakuacji został opracowany w połowie lat 70-tych XX wieku przez Markova [4]. Model ten oparty był na przepływie osób od czasu alarmu, aż do ich bezpiecznego wyjścia z rejonu objętego pożarem. Technika modelowania, która określała możliwości ucieczki z pomieszczeń budynku w oparciu o podejście deterministyczne, przy

zastosowaniu algorytmu obliczeniowego określającego wpływ wzrostu pożaru i dymu na ruch użytkowników. została opracowana w 1980 r. Przebieg ewakuacji użytkowników był tam symulowany na podstawie oceny skutków, gęstości osób, przeciążenia drzwi lub innych ograniczeń oraz wpływu produktów spalania na ewakuujące się osoby.

Pojęcia krytycznego momentu i czasu reakcji, po raz pierwszy sformułowane zostały przez Caravaty i Havilanda [1]. Zostały one dostosowane do ustalenia dostępnego czasu bezpiecznej ewakuacji (ASET). W roku 1990, rozwój modeli ewakuacji znacznie przyspieszył. Fahy [3] opracowała model napisany w języku FORTRAN 77 o nazwie EXIT89, przeznaczony do obliczania czasów ewakuacji z budynków wysokich. Obliczał on przepływ osób po najkrótszej drodze ewakuacji lub zdefiniowanych przez użytkownika "znanych" drogach ewakuacyjnych. Model ten został udoskonalony w następnej dekadzie o uwzględnienie szeregu rzeczywistych funkcji, takich jak obecność osób niepełnosprawnych, czasy opóźnienia ewakuacji, itp. W ostatnich latach powstały modele ewakuacji w oparciu o technikę obliczeniową CFD<sup>1</sup>. Modele te opisują przestrzeń w postaci siatki i wykorzystują złożone analizy przestrzenne, co pozwala na dokładną lokalizację osób w całej rozpatrywanej przestrzeni [16]. Ten sektor metod obliczeniowych rozwija się obecnie bardzo dynamicznie, a dostępne modele są ciągle udoskonalane.

### 3. Podsumowanie

Obliczeniowe modele ewakuacji, bez wątpienia są ważnymi narzędziami, dzięki którym określić można czas ewakuacji osób z pomieszczeń lub budynków. Dzięki nim możliwe jest zidentyfikowanie kluczowych aspektów, które mają zasadniczy wpływ na skuteczność ewakuacji. Zgodnie ze spostrzeżeniami dokonanymi przez Gwynne [5] modele ewakuacji podzielić można na dwie kategorie: te, które biorą pod uwagę jedynie ruch człowieka oraz te, które uwzględniają ruch i zachowanie się ewakuujących osób.

Pierwsza kategoria to głównie proste metody obliczeniowe, obciążone znacznymi błędami, z uwagi na to, iż nie uwzględniają wszystkich możliwych zachowań ludzkich podczas procesu ewakuacji. Nie uwzględniają także zjawiska paniki i stresu, które bardzo często towarzyszy sytuacjom powodującym zagrożenie zdrowia i życia ludzi. Zakładają one płynny ruch, bez żadnych zakłóceń, takich jak chociażby

---

<sup>1</sup> Computational Fluid Dynamics – Numeryczna Dynamika Płynów.

tworzenie się zatorów. Niemniej jednak, takie modele ewakuacji mają kilka zalet, przede wszystkim są szybkie i łatwe w konfiguracji, w przypadku mało skomplikowanych scenariuszy okazują się skuteczne [15].

Druga kategoria to modele ewakuacji, które biorą pod uwagę nie tylko cechy fizyczne, ale traktują jednostki ludzkie jako substancje czynne, odpowiadające na bodźce, różnego rodzaju zagrożenia i indywidualne zachowania. Takie modele ewakuacji biorą pod uwagę możliwe interakcje podczas procesów ewakuacji. Ponadto, modele te uwzględniają fizyczne i socjo-psychiczne cechy osób ewakuowanych. Modele te przy właściwym wykorzystaniu mogą dawać realistyczne i dokładne wyniki. Jednakże, posiadają również pewne ograniczenia i dlatego powinny być stale aktualizowane oraz doskonalone w celu uwzględnienia danych z badań doświadczalnych. Podsumowując, można stwierdzić, że pierwszy typ szacowania czasów ewakuacji wykorzystywany jest do szybkich analiz natomiast drugi typ modeli ewakuacji (tj. tych, które stanowią nie tylko ruchy użytkowników, ale także ich zachowania) do stosowania przy dokonywaniu kompleksowej analizy ewakuacji w złożonych geometriach obiektów budowlanych. Należy jednak pamiętać, że nawet karkołomne kalkulacje, a także symulacje komputerowe nie gwarantują nam zapewnienia bezpieczeństwa ludziom, jeśli nie będziemy przestrzegać podstawowych zasad bezpieczeństwa np. zapewnienia zawsze drożnych dróg ewakuacyjnych.

### **Bibliografia:**

1. Caravaty R.D., Haviland D.S., *Life safety from fire: a guide for housing the elderly*, U.S. Dept. of Housing and Urban Development, 1968;
2. Chow W.K., *Waiting time for evacuation in crowded areas*, *Building and Environment*, 42, 2007;
3. Fahy R.F., *EXIT89 – An evacuation model for high-rise buildings: Recent enhancements and example applications*, NFPA, 1995;
4. *Fire Protection Handbook*, National Fire Protection Association, 2008;
5. Gwynne S.M.V., *Improving the Collection and Use of Human Egress Data*, *Fire Technology*, 2011;
6. Heliövaava S., *Computational models for human behavior in fire evacuations*, Helsinki University of Technology, 2007;
7. *New Guideline for Building Hazard-prevention, the explanation of a building's hazard-prevention and evacuation planning*, Japan Building Center, 1995;
8. PD 7974-2, *The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings, Part 2: Spread of smoke and toxic gases within and beyond the enclosure of origin*, BSI, 2002;



9. PD 7974-6, The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings, Part 6: Human factors: Life safety strategies – Occupant evacuation, behavior and condition, BSI, 2004;
10. Pauls J., *Calculating evacuation times for tall buildings*, Fire Safety Journal, 12, 1987;
11. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 75, poz. 690 z późn. zm.);
12. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineers, 2002;
13. Shih N.J., Lin Ch.Y., Yang Ch.H., *A virtual-reality-based feasibility study of evacuation time compared to the traditional calculation method*, Fire Safety Journal 34, 2000;
14. Siikonen M.L., Hakonen H., *Efficient evacuation methods in tall buildings*, Elevator World, 2003;
15. Tavares R.M., *Evacuation processes versus evacuation models: Quo Vadimus?*, Fire Technology, 45, 2009;
16. Yeoh G.H., Yuen K.K., *Computational fluid dynamics in fire engineering: Theory, modeling and practice*, Elsevier, 2009.

**prof. dr hab. inż. Marek Dziubiński**, pracownik naukowy Politechniki Łódzkiej, pełni obecnie funkcję Kierownika Katedry Inżynierii Chemicznej na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. Zainteresowania naukowe to przepływy wielofazowe ze szczególnym uwzględnieniem przepływów dwufazowych ciecz-gaz cieczy newtonowskich i nienewtonowskich, reologia i reometria techniczna, elementy ryzyka i bezpieczeństwa procesowego (wypływy jedno i dwufazowe z rurociągów i zbiorników) oraz utrzymywanie emulsji oraz ich właściwości .

**mgr inż. Iwona Cłapa**, absolwentka Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Obecnie doktorantka na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska. Obszar zainteresowań naukowych to modelowanie numeryczne procesów ewakuacji oraz inżynieria bezpieczeństwa pożarowego.

**mgr inż. Rafał Porowski** w 2002r. ukończył studia w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. W roku 2010 ukończył studia doktoranckie na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Temat przygotowywanej aktualnie rozprawy doktorskiej dotyczy badań doświadczalnych i symulacji numerycznych przejścia do detonacji w mieszaninach gazowych. Obecnie jest kierownikiem Zespołu Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwożarowej PIB w Józefowie.

**Recenzenci**

**prof. dr hab. Mirosław Kosiorek**

**dr hab. Marzena Półka, prof. SGSP**