

mł. kpt. mgr inż. Mateusz FLISZKIEWICZ
mł. kpt. mgr inż. Andrzej KRAUZE
Zakład Informatyki i Łączności
Katedra Techniki Pożarniczej, SGSP
dr hab. inż. Tadeusz MACIAK, profesor SGSP
SGSP, Politechnika Białostocka

Symulacje komputerowe jako metoda szacowania wymaganego czasu ewakuacji

W artykule przedstawione zostały inżynierskie metody wyznaczania wymaganego czasu ewakuacji dla przykładowego budynku opery. W celu oszacowania czasu ewakuacji wykorzystano symulacje komputerowe oraz brytyjski standard [1]. Ponadto, w pracy zamieszczono krótki przegląd aktualnie dostępnego na rynku oprogramowania.

This article describes the engineering methods of estimating the required safe escape time for opera house. Two methods were used: the computer simulations and the British standard [1]. Moreover the article presents a short review of available evacuation software.

Słowa kluczowe: symulacje ewakuacji, ewakuacja, bezpieczeństwo pożarowe, czas ewakuacji.

Keywords: simulation of evacuation, evacuation, fire safety, escape time.

1. Wprowadzenie

Poprawne wykorzystanie nowoczesnej inżynierii bezpieczeństwa pożarowego w ekspertyzach technicznych wiąże się ze zrozumieniem wielu zagadnień związanych z rozwojem pożaru oraz zachowaniem się ludzi w sytuacjach zagrożenia życia. Stałym elementem tego rodzaju opracowań jest wyznaczenie wymaganego czasu ewakuacji. Obecnie, w kontekście polskiego prawa, istnieją możliwości wyznaczania tego czasu za pomocą światowych norm i standardów lub przy użyciu symulacji komputerowych.

W artykule omówione zostały obydwie wspomniane metody wyznaczania wymaganego czasu ewakuacji. W celu ich porównania przygotowano przykładową symulację ewakuacji z budynku opery oraz obliczenia empiryczne w oparciu o brytyjską normę [1]. W artykule zawarto również ogólny przegląd oprogramowania umożliwiającego modelowanie procesu ewakuacji.

2. Inżynierskie metody oceny warunków ewakuacji

Możliwość ewakuacji ludzi z budynków w przypadku pożaru lub innego zagrożenia życia jest jednym z najważniejszych celów, jakie powinny zostać osiągnięte podczas projektowania nowych obiektów. Bardzo często jednak, w przypadku nietypowych rozwiązań architektonicznych, zauważalny jest brak odpowiednich regulacji prawnych, które proponowałyby konkretne propozycje techniczne zapewniające rozwiązanie kwestii ewakuacji. Aby rozwiązać ten problem, bardzo często niezbędne jest wykorzystanie nowoczesnych metod inżynierii bezpieczeństwa pożarowego w celu oszacowania czasu trwania ewakuacji, określenia warunków pożarowych panujących podczas tego procesu oraz doboru odpowiednich zabezpieczeń przeciwpożarowych zapewniających bezpieczną ewakuację [2].

Prawidłowe oszacowanie czasu trwania ewakuacji ludzi z zagrożonego budynku wiąże się ze zrozumieniem wielu czynników wpływających na ich zachowania i reakcje. Liczne badania i eksperymenty wykazały, że jakość i efektywność ewakuacji ludzi uzależniona jest od następujących czynników [3]:

- 1) znajomości budynku,
- 2) edukacji oraz wcześniejszych doświadczeń związanych z procesem ewakuacji,
- 3) zaangażowania w zadania czy sytuacje, w których poszczególne osoby biorą udział (motywacja do działania),
- 4) pozostawania ludzi w grupie,
- 5) więzi osób z innymi członkami grupy (relacje dziecko-matka, pracownik-pracownik),

- 6) roli poszczególnych osób w grupie (przewodnik wycieczki, nauczyciel),
- 7) indywidualnej charakterystyki ewakuujących się osób (wiek, płeć, kondycja fizyczna).

Bez wątplenia, wszystkie wymienione elementy mają znaczący wpływ na długość trwania procesu ewakuacji. Dlatego główną ideą nowoczesnej inżynierii bezpieczeństwa pożarowego jest zapewnienie odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa, który uwzględnia wszystkie czynniki – pomiędzy wymaganym, a dostępnym czasem ewakuacji. Operuje się tutaj następującymi pojęciami [4]:

- 1) wymagany bezpieczny czas ewakuacji – WCE (z ang. *required safe escape time* – RSET) to wyliczony czas dostępny pomiędzy zainicjowaniem pożaru, a czasem, w którym użytkownicy, w określonych przestrzeniach w budynku, są w stanie osiągnąć bezpieczne miejsce,
- 2) dostępny bezpieczny czas ewakuacji – DCE (z ang. *available safe escape time* – ASET) to wyliczony czas dostępny pomiędzy zainicjowaniem pożaru, a czasem, w którym tolerowane, graniczne kryteria bytowe nie są przekroczone na drogach ewakuacyjnych w budynku.

W związku z powyższym łatwo wywnioskować, iż margines bezpieczeństwa jest różnicą między dostępnym, a wymaganym czasem ewakuacji:

$$t_{\text{marg}} = t_{\text{DCE}} - t_{\text{WCE}} \quad (1)$$

gdzie:

- t_{marg} – margines bezpieczeństwa,
- t_{DCE} – dostępny czas ewakuacji,
- t_{WCE} – wymagany czas ewakuacji.

2.1. Metoda empiryczna

Jedną z metod weryfikacji może być wykorzystanie normy brytyjskiej [1]. Obecnie jest ona jednym z częściej wykorzystywanych standardów na świecie umożliwiającym określenie wymaganego czasu ewakuacji. Ponadto jest to norma rekomendowana przez Komendę Główną PSP oraz bardzo często prezentowana i omawiana na różnych konferencjach technicznych z zakresu ochrony przeciwpożarowej. Norma w dużym stopniu upraszcza pewne zjawiska fizyczne oraz zachowania ludzkie, jednakże zawarte w niej informacje opierają się na wielu badaniach i analizach rzeczywistych przypadków, zarówno ewakuacji próbnych, jak również ewakuacji w warunkach pożarowych.

Według normy wymagany czas ewakuacji zależy od czasu detekcji, czasu alarmowania oraz czasu ewakuacji. Czas ewakuacji dzieli się natomiast na dwa etapy:

- 1) etap pierwszych wstępnych reakcji, który obejmuje wszystkie zachowania występujące przed rozpoczęciem poruszania się do wyjść ewakuacyjnych,

- 2) etap przemieszczania – określa czas fizycznego ruchu użytkowników w kierunku wyjść ewakuacyjnych.

Wielokrotnie czas pierwszych wstępnych reakcji może być znacznie dłuższy od samego procesu przemieszczania. Uwarunkowane jest to zróżnicowanym zachowaniem ludzi w przypadku pożaru. Bardzo często reagują oni nieodpowiednio na zaistniałe zagrożenie. Uważają, iż powstała sytuacja nie dotyczy ich bezpośrednio. Dopiero gdy zagrożenie osiągnie rozmiar przewyższający osobistą zdolność do poradzenia sobie z nim, osoby te zaczynają proces przemieszczania. Ponadto, wielokrotnie ludzie przed rozpoczęciem fazy ucieczki z budynku decydują się na wiele czynności niezwiązanych z ewakuacją, np. wyłączenie komputerów czy spakowanie rzeczy osobistych.

W praktyce norma umożliwia uproszczenie założeń związanych z wyliczeniem wymaganego czasu ewakuacji. Wiąże się to z rozważeniem dwóch reprezentatywnych przypadków:

- 1) gdy w budynku znajduje się mała gęstość populacji, tj. mniej niż jedna trzecia projektowanej populacji,
- 2) gdy w budynku znajduje się maksymalna projektowana liczba populacji.

W obydwu sytuacjach zakłada się, iż jedno z dostępnych wyjść ewakuacyjnych w budynku powinno być zablokowane i nieuwzględniane do obliczeń. Dodatkowo, w dużych kompleksach budynków, np. centrach handlowych, hotelach czy lotniskach należy uwzględnić tzw. czas odnajdywania wyjścia ewakuacyjnego. Jest on determinowany brakiem odpowiedniej znajomości dróg i wyjść ewakuacyjnych przez znajdujących się tam użytkowników.

Dla pierwszego przypadku czas ewakuacji zależy od czasu początkowych wstępnych reakcji kilku ostatnich osób, które decydują się na ewakuację oraz czasu niezbędnego do pokonania dystansu do wyjścia ewakuacyjnego. Ponieważ gęstość populacji jest niewielka, prędkość przemieszczania pozostaje niezakłócona. Ponadto w wyjściach ewakuacyjnych nie powstają kolejki utrudniające proces przejścia przez nie. Spowodowane jest to faktem, iż czasy pierwszych wstępnych reakcji dla znajdujących się osób w budynku będą różne dla każdej znajdującej się tam osoby. W związku z tym, czas ewakuacji może zostać obliczony za pomocą następującego równania [1]:

$$t_{\text{ewak}} = t_{\text{p-wr}(99\%)} + t_{\text{pr}(99\%)} \quad (2)$$

gdzie:

$t_{\text{p-wr}(99\%)}$ – czas pierwszych wstępnych reakcji, ostatnich osób rozpoczynających ewakuację,

$t_{\text{pr}(99\%)}$ – czas przejścia niezawierający czasu kolejki w wyjściach ewakuacyjnych.

Dla drugiego przypadku czas ewakuacji zależy od czasu pierwszych wstępnych reakcji kilku pierwszych osób, czasu przemieszczania oraz czasu przejścia przez drzwi, w których utworzyła się najdłuższa kolejka:

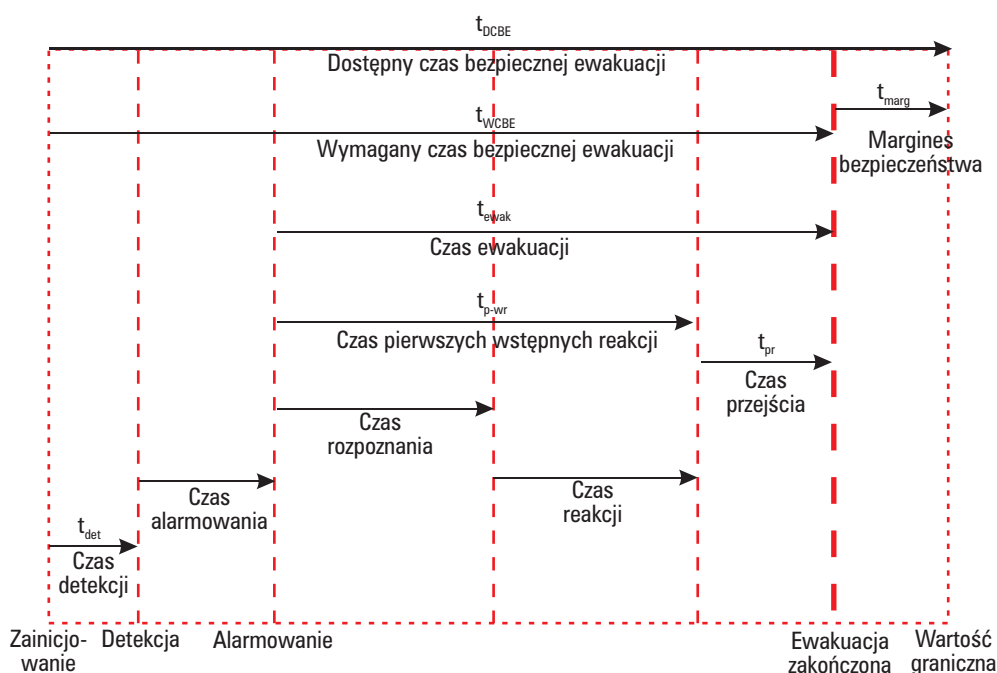
$$t_{\text{ewak}} = t_{\text{p-wr}(1\%)} + t_{\text{pr}(1\%)} \quad (3)$$

gdzie:

$t_{\text{p-wr}(1\%)}$ – czas pierwszych wstępnych reakcji, pierwszych osób rozpoczynających ewakuację,

$t_{\text{pr}(1\%)}$ – czas przejścia zawierający czas kolejki w wyjściach ewakuacyjnych.

Obydwa przypadki należy porównać, a za czas reprezentatywny powinien zostać wybrany czas dłuższy. Uproszczony schemat składowych czasu ewakuacji przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat składowych czasu ewakuacji

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1].

2.2. Symulacje komputerowe

Symulacje komputerowe są znacznie bardziej złożoną metodą wyznaczania warunków ewakuacji. Związane jest to z możliwością wprowadzenia wielu czynników wpływających na proces ewakuacji. Modele komputerowe pozwalają definiować właściwości ewakuowanych jednostek (masę, szybkość przemieszczania, indywidualne strategie ucieczki), wprowadzać dane pożarowe oraz dowolnie modyfikować scenariusze ewakuacji (blokowanie dróg, drzwi ewakuacyjnych). W połączeniu z programami do modelowania pożaru dają kompleksowe spojrzenie na zagrożenia, jakie mogą wystąpić w trakcie ewakuacji. Takie podejście pozwala dokładnie wyznaczyć czas detekcji pożaru, poprzez wprowa-

dzenie do symulacji odpowiednich parametrów czujki dymu lub ciepła. Możliwe jest ustalenie przedziału czasowego pierwszych wstępnych reakcji określonej grupie jednostek (różne funkcje rozkładów), co powoduje, że każda jednostka zaczyna proces przemieszczania w innym czasie. Ponadto, jednostki same mogą zacząć proces ewakuacji w przypadku powstania warunków zagrażających życiu, np. gdy zasięg widzialności spadnie poniżej 5 m lub temperatura wzrośnie do 60°C. Komputerowe modele ewakuacji do wyliczenia czasu przejścia wykorzystują znacznie bardziej złożone równanie ruchu, na które wpływa wiele czynników zakłócających, m.in. oddziaływanie sił społecznych, sił kontaktu fizycznego czy sił grupowych. Ponadto, bardzo dokładnie modelowane jest zjawisko zatłoczenia miejsc kluczowych podczas ewakuacji, co automatycznie przekłada się na możliwość określenia nowych, ulepszonych strategii ewakuacji z budynku.

3. Przegląd oprogramowania

W przypadku gdy projektant lub rzeczoznawca ds. przeciwpożarowych zdecydował się na nowoczesne metody inżynierskie w celu oszacowania wymaganego czasu ewakuacji, staje przed problemem odpowiedniego doboru oprogramowania. Obecnie na rynku dostępnych jest około 40 programów, które wykorzystują różne modele matematyczne oraz indywidualne podejście do zjawiska ewakuacji [5]. Bardzo często końcowy użytkownik nie potrafi określić, czy wybrany program jest odpowiedni do danego typu budynku, czy też zaplanowanego scenariusza ewakuacji. Dlatego przed wcześniejszym użyciem oprogramowania, należy dokładnie przeanalizować model matematyczny oraz dostępne modyfikacje warunków brzegowych symulacji.

Najbardziej znane i wykorzystywane programy umożliwiające modelowanie zjawiska ewakuacji, to: EVACNET [11], PathFinder [7], TIMTEX [12], WAYOUT, STEP's [8], PEDROUTE/PAXPORT [13], EXIT89 [14], Simulex [15], ASERI [16], BFIRE-2, buildingEXODUS [17], EGRESS, EXITT, VEgAS, E-SCAPE, BGRAF, EvacSim, Legion [18], FDS+Evac [6]. Każdy z wymienionych programów charakteryzuje się indywidualnym podejściem do zjawiska ewakuacji, jednakże każdy model ewakuacji można podzielić na dwa główne podmodele. Pierwszy odpowiedzialny jest za proces odnajdywania najlepszej ścieżki ewakuacji. Podejście do tego problemu może być różnorodne. Niektóre programy w prosty sposób wykorzystują dwuwymiarowe pola wektorowe w celu ukierunkowania jednostki ewakuowanej [6], inne natomiast wyznaczają, za pomocą skomplikowanych algorytmów, optymalną ścieżkę ucieczki, np. zmodyfikowany algorytm A* [7]. Istnieją również programy, które posiadają swój unikalny algorytm [8]. Drugi

podmodel, czyli model ruchu, to w większości programów podejście podobne. Najczęściej używane jest zmodyfikowane równanie ruchu oparte o model Helbinga [9].

Wymienione powyżej programy można podzielić na trzy główne kategorie, w zależności od metody modelowania procesu ewakuacji opartej o [5], [10]:

- 1) model ruchu: EVACNET4, PathFinder, TIMTEX, WAYOUT, STEPs,
- 2) model częściowo behawioralny: PEDROUTE/PAXPORT, EXIT89, Simulex, FDS+Evac,
- 3) model behawioralny: ASERI, BFIRE-2, buildingEXODUS, EGRESS, EXITT, VEgAS, E-SCAPE, BGRAF, EvacSim, Legion.

Kategorie te opisują metodę, którą wykorzystują modele do wyliczenia czasu ewakuacji w budynkach. Model ruchu polega na przemieszczaniu jednostek z jednego punktu w budynku do innego, przeważnie do wyjść ewakuacyjnych lub miejsc bezpiecznych. Bardzo dobrze sprawdza się, gdy użytkownikowi zależy na uwidocznieniu miejsc zatłoczonych, kolejek lub miejsc, w których występują różnego rodzaju przewężenia. Model częściowo behawioralny w pierwszej fazie oblicza ścieżkę ewakuacji, jednakże do równania ruchu wprowadza zachowania lub czynniki wpływające na trajektorię przemieszczania. Do tych cech zalicza się czas pierwszych wstępnych reakcji, unikalne właściwości jednostki, wzajemne wyprzedzanie czy też wpływ dymu na ewakuujące się osoby. Model behawioralny uwzględnia do swoich obliczeń czynności wykonywane przez jednostki. Pozwala im na podejmowanie decyzji związanych z wyborem optymalnej ścieżki ewakuacji z uwzględnieniem warunków panujących w budynku.

4. Porównanie symulacji numerycznej z metodą empiryczną na przykładzie budynku opery

4.1. Warunki ewakuacji z rozpatrywanego obiektu

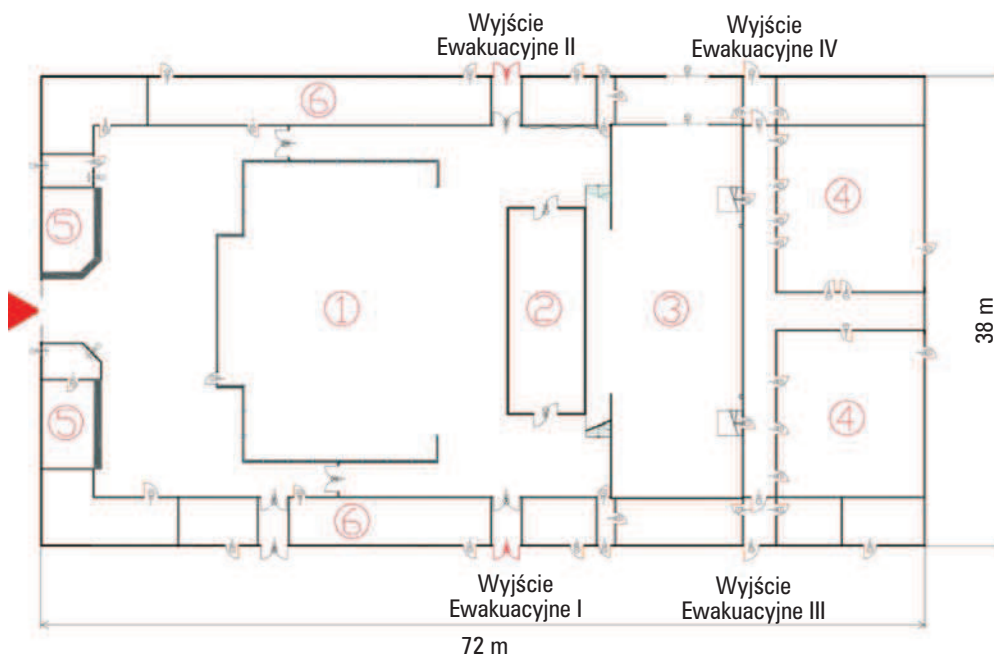
Wymagany czas ewakuacji został oszacowany dla typowego budynku opery, w którego skład wchodzi trybuna widowni, pomieszczenie orkiestry, scena, szatnie dla gości oraz pomieszczenia socjalne i techniczne przewidziane dla aktorów i obsługi opery. Trybuna widowni mieści 745 miejsc siedzących rozmieszczonych w 18 rzędach (rys. 2). Z drogami komunikacji ogólnej połączona jest dwoma zejściami o szerokości 2,5 m. Każdy rząd, poza pierwszym, podzielony został na 3 kolumny, kolejno po 8, 16 i 8 miejsc siedzących. Pomieszczenie orkiestry umożliwia jednoczesny występ zespołu instrumentalnego liczącego 70 osób. W przypadku sceny założono najbardziej niekorzystny przypadek, czyli jednoczesne przebywanie na niej 105 aktorów – zgodnie ze wskaźnikiem zawartym w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury [19].



Rys. 2. Rozmieszczenie miejsc siedzących na trybunie publiczności

Źródło: opracowanie własne.

W rozpatrywanym obiekcie przewidziano 4 wyjścia ewakuacyjne, z czego wyjścia I i II, o szerokości 2,1 m każde, obsługują trybuny publiczności, pomieszczenie orkiestry oraz część aktorów znajdujących się na scenie, natomiast wyjścia ewakuacyjne III, IV, o szerokości 1,2 m każde, służą ewakuacji aktorów znajdujących się na scenie oraz w pomieszczeniach socjalnych i technicznych. Poziome drogi ewakuacyjne mają szerokość min. 2,1 m oraz posiadają poprawne oznakowanie ewakuacyjne, wykonane zgodnie z polską normą [20]. Przyjęto, że osoby znajdujące się w budynku znają główne drogi ewakuacyjne, ponieważ w dużej części pokrywają się one z drogami komunikacji ogólnej. Wyjścia ewakuacyjne rozmieszczone zostały w dobrze widocznych miejscach, w bezpośrednim wyjściu z trybuny widowni, z pomieszczenia orkiestry i ze sceny. Przykładowy rozkład pomieszczeń i wyjść ewakuacyjnych przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Układ pomieszczeń oraz rozmieszczenie wyjść ewakuacyjnych
 1 – trybuna publiczności, 2 – pomieszczenie orkiestry, 3 – scena, 4 – pomieszczenia socjalne aktorów, 5 – szatnie dla gości, 6 – pomieszczenia socjalne i techniczne opery

Źródło: opracowanie własne.

4.2. Scenariusz pożarowy

Scenariusz pożarowy zakłada jednoczesną ewakuację 745 osób. Zagrożeniem, które może spowodować taką sytuację, może być wybuch pożaru na scenie, w szatni gości lub w pomieszczeniach socjalnych opery. Ewakuację obiektu może determinować również inne zdarzenie zagrażające życiu znajdujących się w nim osób, np. podejrzenie ataku terrorystycznego. Na potrzeby badania założono najbardziej niekorzystny przypadek, tj. przyjęty scenariusz ma miejsce podczas trwania spektaklu, gdy wszystkie dostępne miejsca są zajęte a obsługa opery znajduje się wewnątrz budynku. Przyjęto następujący przebieg wydarzeń:

- 1) wszyscy użytkownicy obiektu zostają powiadomieni o konieczności ewakuacji przez dźwiękowy system ostrzegawczy i/lub przez służby ochrony obiektu, które będą kierować ewakuacją,
- 2) osoby znajdujące się w obiekcie rozpoczynają ewakuację w kierunku wyjścia na zewnątrz obiektu (do miejsca bezpiecznego),
- 3) główne wyjścia ewakuacyjne I i II nie są zablokowane mechanicznie lub wykluczone przez pożar, ponieważ w bliskim ich sąsiedztwie nie znajdują się żadne materiały palne,

- 4) wyjście ewakuacyjne III zostaje wykluczone przez pożar,
- 5) ewakuacja odbywa się tylko przez wyjścia ewakuacyjne I, II i IV.

4.3. Wyznaczenie wymaganego czasu ewakuacji metodą empiryczną

W tabeli 1 przedstawione zostały obliczenia wymaganego czasu ewakuacji dla omawianego budynku opery. Wykonano je dla dwóch reprezentatywnych przypadków omówionych w rozdziale 2.1.

Tabela 1. Obliczenia wymaganego czasu ewakuacji dla budynku opery

Projektowy scenariusz zachowań i rodzaj użytkowania:	
kategoria	B2
gotowość użytkowników	czuwający
zaznajomienie użytkowników	niezaznajomieni
gęstość użytkowników	wysoka
wydzienienia/złożoność	jedno w skupionym punkcie
Efekt jakości systemu alarmowego na pierwsze wstępne reakcje:	
poziom systemu alarmowego	A1. System sygnalizacji obejmuje całą rozpatrywaną strefę, automatycznie i natychmiast zostaje ogłoszony alarm dla użytkowników znajdujących się w zagrożonej przestrzeni.
Klasyfikacja systemu zarządzania bezpieczeństwem pożarowym i wpływ na czas ewakuacji:	
poziom zarządzania	M1. Personel przeszkolony do wysokiego poziomu zarządzania bezpieczeństwem, praktyka w zabezpieczeniu przeciwpożarowym, właściwy nadzór nad utrzymaniem urządzeń, dobrze opracowana instrukcja bezpieczeństwa pożarowego.
Obliczenie wymaganego czasu ewakuacji:	
czas detekcji pożaru	Dane producentów i normowe: t_d – czas detekcji pożaru: 120 s
czas alarmowania	t_a – czas alarmowania: 0 s Obiekt jest wyposażony w dźwiękowy system ostrzegania, który zostaje uruchomiony po otrzymaniu sygnału z systemu sygnalizacji pożarowej.

czas przejścia przy zablokowanym wyjściu ewakuacyjnym III	prędkość na drodze poziomej – 1,2 m/s prędkość na drodze pionowej – 0,8 m/s długość drogi w poziomie – 24 m długość drogi w pionie – 19 m czas pokonania drogi: $t_{pr(99\%)} = 24 \text{ m} : 1,2 \text{ m/s} + 19 \text{ m} : 0,8 \text{ m/s} = 43,75 \text{ s}$
odnajdywanie wyjścia ewakuacyjnego	$t_{od} = 30 \text{ s}$
Przypadek pierwszy – gęstość populacji mniejsza od jednej trzeciej projektowanej populacji:	
czas pierwszych wstępnych reakcji ostatnich ewakuujących się osób	kategoria scenariuszy i modyfikacje: czuwający, niezaznajomieni – m1 b2 a1 $t_{p-wr(99\%)} = 180 \text{ s}$
czas, po którym zacznie się przemieszczanie ludzi	$t_{det} + t_a + t_{od} + t_{p-wr(99\%)} = 110 \text{ s} + 0 \text{ s} + 30 \text{ s} + 180 \text{ s} = 320 \text{ s}$
$WCE = t_{det} + t_a + t_{od} + t_{p-wr(99\%)} + t_{pr(99\%)} = 110 \text{ s} + 0 \text{ s} + 30 \text{ s} + 180 \text{ s} + 43,8 \text{ s} = 363,8 \text{ s}$	
Przypadek drugi – maksymalna projektowana gęstość populacji:	
czas wstępnych reakcji pierwszych ewakuujących się osób	Kategoria scenariuszy i modyfikacje: czuwający, niezaznajomieni – M1 B2 A1 $t_{p-wr(1\%)} = 60 \text{ s}$
czas, po którym zacznie się przemieszczanie ludzi	$t_{det} + t_a + t_{od} + t_{p-wr(1\%)} = 110 \text{ s} + 0 \text{ s} + 30 \text{ s} + 60 \text{ s} = 200 \text{ s}$
czas kolejki	Zakłada się, że osoby znajdujące się na trybunie widowni oraz w pomieszczeniu orkiestry utworzą dwa równe strumienie, po 330 osób, do wyjść ewakuacyjnych I i II. Ponadto przyjmuje się, że aktorzy znajdujący się na scenie utworzą trzy równe strumienie ewakuacyjne, po 35 osób, do wyjść ewakuacyjnych I, II i IV. Łącznie przez wyjścia I i II ewakuować się będzie 365 osób. Szerokość drzwi wyjściowych I, II: 1,2 m $t_k = 365 \text{ os} : (1,2 \text{ m} \times 1,33 \text{ os/m/s}) = 228,7 \text{ s}$
$WCE = t_{det} + t_a + t_{od} + t_{p-wr(1\%)} + t_{pr(1\%)} + t_k = 110 \text{ s} + 0 \text{ s} + 30 \text{ s} + 60 \text{ s} + 43,8 \text{ s} + 228,7 \text{ s} = 472,5 \text{ s}$	

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z założeniami normy [1] za czas reprezentatywny należy wybrać czas dłuższy. W przypadku omawianego budynku opery, ewakuacja zajmuje więcej czasu, gdy trybuny widowni wypełnione są do ostatniego miejsca. Dlatego wyliczony wymagany czas ewakuacji równy jest 7 minut i 53 sekundy.

Powyższa metoda empiryczna pozwoliła oszacować czas, po którym ludzie opuszczą zagrożoną strefę pożarową. Jednakże, trudno jest jednoznacznie określić, czy ewakuacja zostanie przeprowadzona zgodnie z opisanymi założeniami.

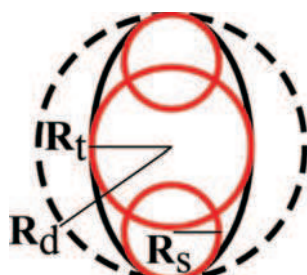
Pomimo dosyć pesymistycznych założeń projektowych może się okazać, że w przypadku wystąpienia paniki ludzie wybiorą tylko część dostępnych wyjść ewakuacyjnych, co automatycznie spowoduje wydłużenie czasu ewakuacji. Ponadto, metoda empiryczna nie pozwala oszacować miejsc potencjalnie niebezpiecznych (lokalne zagęszczenia ludzi, za małą przepustowość wyjść ewakuacyjnych) oraz sprawdzić poprawność zaprojektowanych rozwiązań.

4.4. Omówienie oprogramowania wykorzystanego do symulacji numerycznej

Do przeprowadzenia komputerowej symulacji ewakuacji wykorzystano program FDS+Evac ver. 2.2.1. Został on stworzony przez instytut VTT Technical and Research Center of Finland przy współpracy z amerykańskim instytutem Fire Research Division in the Building and Fire Research Laboratory. Program jest modelem ewakuacji, który umożliwia modelowanie tego procesu w warunkach pożaru, jak również w warunkach próbnej ewakuacji. Zadaniem programu FDS+Evac jest obliczanie pozycji, prędkości oraz dawki toksycznych gazów dla każdej jednostki znajdującej się w domenie obliczeniowej w przeciągu każdej dyskretnej chwili czasu. Wszystkie dane wyjściowe zapisywane są do plików tekstowych CSV (*comma separated values*), natomiast wizualizacje tych danych umożliwia dodatkowe oprogramowanie SmokeView [6].

FDS+Evac traktuje każdą ewakuującą się osobę jako indywidualną jednostkę, której przemieszczenie wywołane jest przez równanie ruchu. Takie podejście pozwala na przypisanie poszczególnej jednostce własnych personalnych cech oraz nadanie jej unikalnej strategii ucieczki. Na wszystkie jednostki oddziałują siły i momenty sił spowodowane kontaktem fizycznym, np. z innymi jednostkami czy napotkanymi przeszkodami, takimi jak meble lub ściany. Co więcej, na jednostkę działają siły psychospołeczne, np. jednostka stara się zachować bezpieczną odległość od poprzedzającej ją jednostki, dzięki czemu unika bezpośredniego kontaktu fizycznego. Równanie ruchu przewiduje również siły motywujące, czyli takie, które zmuszają jednostkę do uzyskania preferowanej prędkości poruszania się. Wynikiem działania wszystkich tych sił jest równanie ruchu dla translacyjnych i rotacyjnych stopni swobody, które są rozwiązywane przy użyciu dyssypatywnej metody dynamiki cząstek. Dzięki temu model wykorzystuje ciągłość czasu i przestrzeni do śledzenia trajektorii poruszania się jednostek [6].

Oprogramowanie pozwala również na modelowanie mocno zatłoczonych budynków, w których przewiduje się, że na głównych drogach ewakuacyjnych będą powstawać lokalne zagęszczenia ludzi. W programie zaimplementowano także interakcje społeczne, np. model grup. Do wyboru odpowiedniej drogi wyjścia program wykorzystuje model funkcji zachowań [6].



Rys. 4. Rozmiar ludzkiego ciała przybliżony do kombinacji trzech nachodzących na siebie okręgów

Źródło: [6].

Prędkości przemieszczania oraz wymiary ciała dla poszczególnych typów jednostek w programie FDS+Evac przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Prędkości przemieszczania oraz wymiary ciała jednostek wprowadzanych do programu FSD+Evac

Typ jednostki	R_d [m]	R_t/R_d [-]	R_s/R_d [-]	D_s/R_d [-]	Prędkość [m/s]
dorosły	$0,255 \pm 0,035$	0,5882	0,3725	0,6275	$1,25 \pm 0,30$
mężczyzna	$0,270 \pm 0,020$	0,5926	0,3704	0,6296	$1,35 \pm 0,20$
kobieta	$0,255 \pm 0,020$	0,5833	0,3750	0,6250	$1,15 \pm 0,20$
dziecko	$0,210 \pm 0,015$	0,5714	0,3333	0,6667	$0,90 \pm 0,30$
osoba starsza	$0,250 \pm 0,020$	0,6000	0,3600	0,6400	$0,80 \pm 0,30$

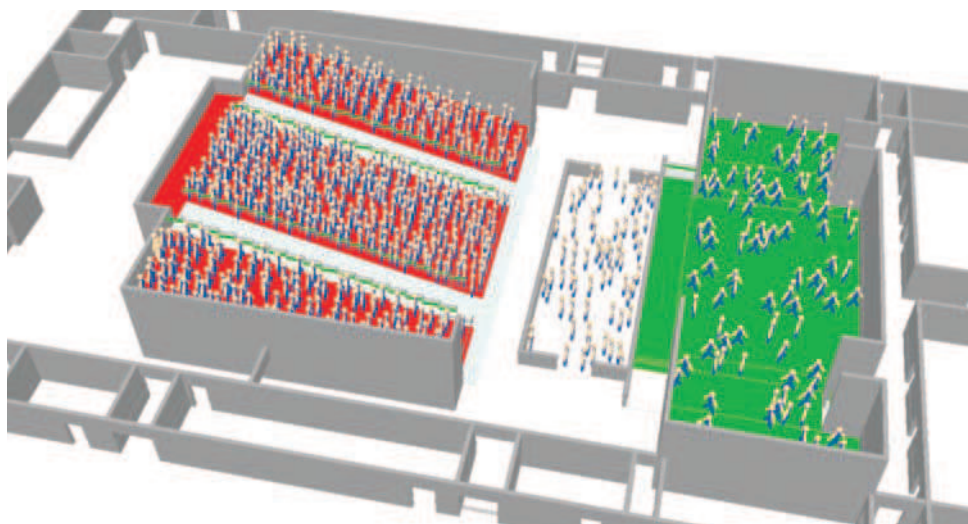
Źródło: [6].

4.5. Główne założenia do symulacji

Ewakuacja z budynku opery prowadzona jest przez trzy wyjścia ewakuacyjne, tj.: I, II i IV. Jednostki wybierają najkrótszą dostępną drogę ewakuacyjną. Fizyczne ich przemieszczanie rozpoczyna się w 170. sekundzie, po uwzględnieniu czasu detekcji – 110 sekund (dane normowe i producentów), czasu alarmowania – 0 sekund (natychmiastowe zadziałanie dźwiękowego systemu ostrzegania po wykryciu pożaru) oraz czasu pierwszych wstępnych reakcji – 60 sekund [1].

Wszystkie jednostki znajdujące się na trybunach widowni zwrócone są w kierunku sceny, natomiast jednostki orkiestry w kierunku widowni. Początkowy kierunek, w którym zwrócone są jednostki znajdujące się na scenie

generowany jest losowo przez program – rys. 5. Cechy fizyczne wszystkich typów jednostek również generowane są losowo, zgodnie z zakresem przedstawionym w tabeli 2. Prędkość przemieszczania po schodach równa jest 0,8 m, zgodnie z [1].



Rys. 5. Rozmieszczenie jednostek w budynku opery

Źródło: opracowanie własne.

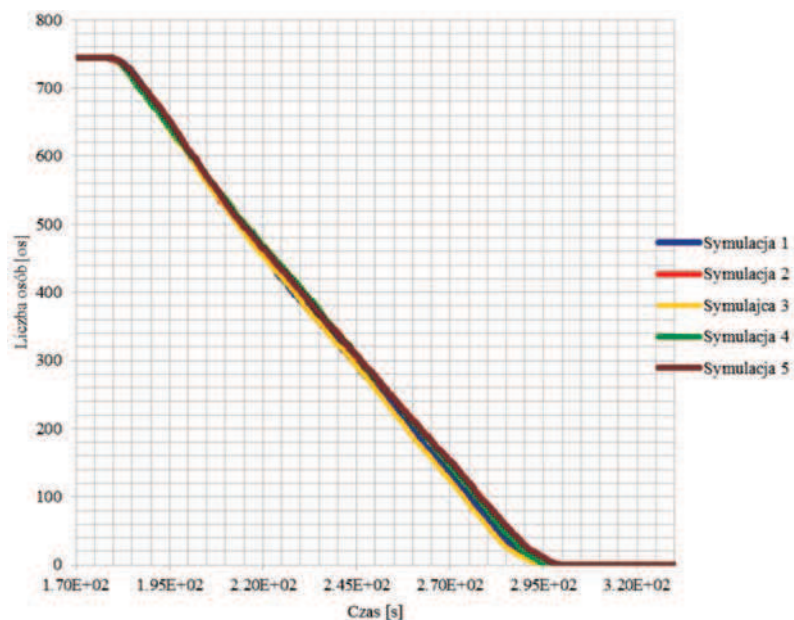
W celu oszacowania najdłuższego wymaganego czasu ewakuacji zbadano trzy przypadki:

- 1) cała populacja posiada cechy fizyczne osób dorosłych,
- 2) połowa populacji posiada cechy fizyczne kobiet, połowa mężczyzn,
- 3) populację stanowi: 25% kobiet, 35% mężczyzn, 15% dzieci oraz 25% osób starszych.

Ponadto, dla każdego przypadku wykonano po pięć symulacji, w celu porównania różnic w danych wyjściowych wynikających z losowego przypisywania parametrów fizycznych oraz rozmieszczenia jednostek w domenie obliczeniowej.

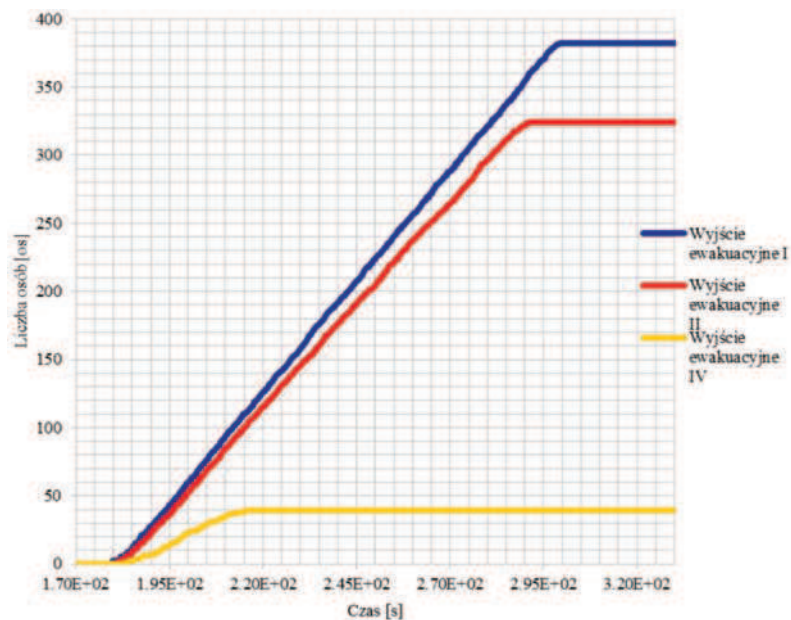
4.6. Wyniki symulacji numerycznej

Otrzymane wyniki symulacji zostały zaprezentowane w formie wykresów, które przedstawiają zależność pomiędzy czasem, a liczbą ewakuowanych jednostek z całej domeny obliczeniowej oraz przez poszczególne wyjścia ewakuacyjne. Ponadto, w formie tabeli, porównane zostały najkrótsze oraz najdłuższe wymagane czasy ewakuacji ze wszystkich wykonanych symulacji dla konkretnego przypadku.

Przypadek 1. Cała populacja posiada cechy fizyczne osób dorosłych

Rys. 6. Zależność liczby ewakuowanych osób od czasu z całej domeny obliczeniowej dla przypadku 1

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 7. Zależność liczby ewakuowanych osób od czasu przez poszczególne wyjścia ewakuacyjne (symulacja 5) dla przypadku 1

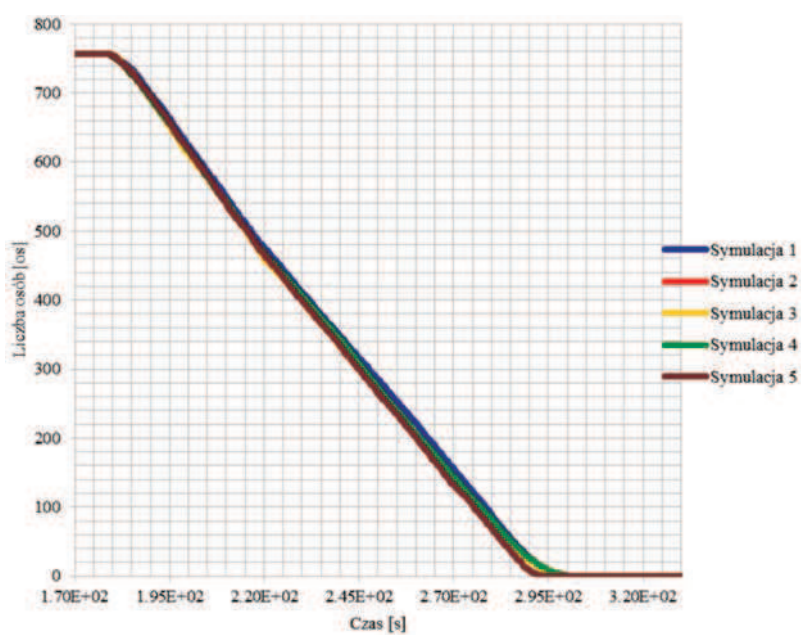
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 3. Porównanie wymaganego czasu ewakuacji pierwszej oraz ostatniej jednostki dla wszystkich symulacji przypadku 1

	Symulacja 1	Symulacja 2	Symulacja 3	Symulacja 4	Symulacja 5
Czas pierwszej ewakuowanej osoby	179 s	178 s	178 s	180 s	180 s
Czas ostatniej ewakuowanej osoby	294 s	295 s	294 s	296 s	299 s

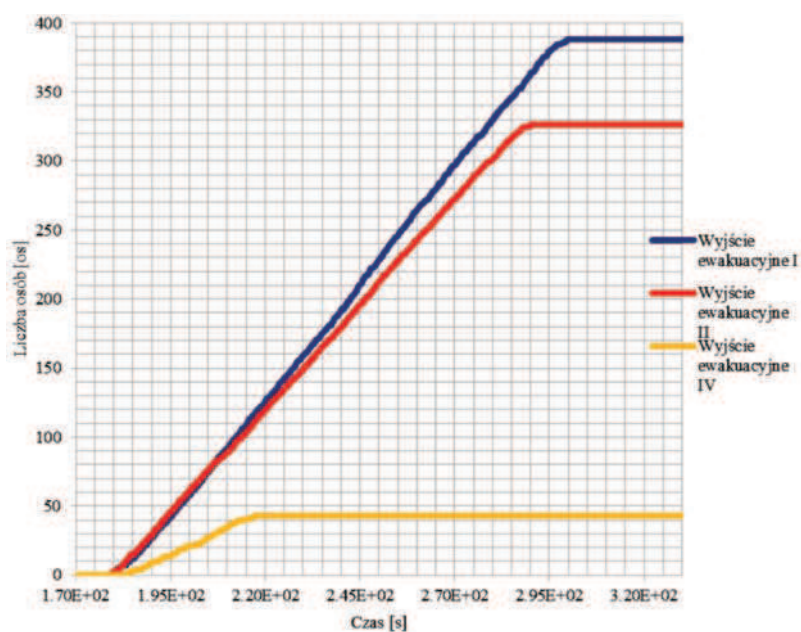
Źródło: opracowanie własne

Przypadek 2. Połowa populacji posiada cechy fizyczne kobiet, połowa mężczyzn



Rys. 8. Zależność liczby ewakuowanych osób od czasu z całej domeny obliczeniowej dla przypadku 2

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 9. Zależność liczby ewakuowanych osób od czasu przez poszczególne wyjścia ewakuacyjne (symulacja 2) dla przypadku 2

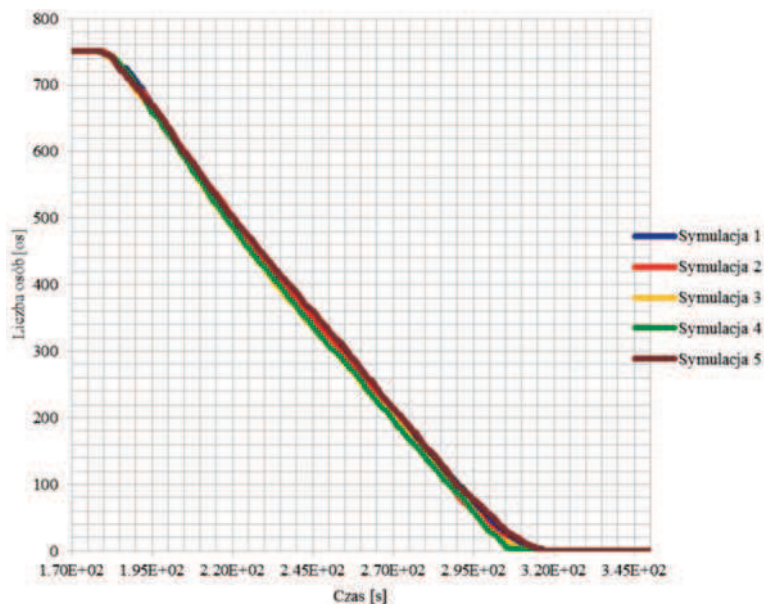
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4. Porównanie wymaganego czasu ewakuacji pierwszej oraz ostatniej jednostki dla wszystkich symulacji przypadku 2

	Symulacja 1	Symulacja 2	Symulacja 3	Symulacja 4	Symulacja 5
Czas pierwszej ewakuowanej osoby	179 s	179 s	180 s	180 s	180 s
Czas ostatniej ewakuowanej osoby	298 s	300 s	297 s	300 s	295 s

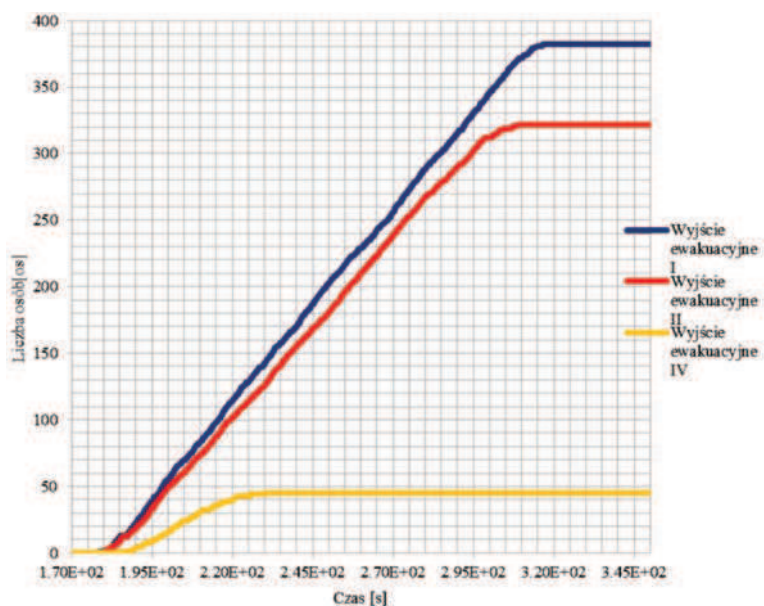
Źródło: opracowanie własne.

Przypadek 3. Populację stanowi 25% kobiet, 35% mężczyzn, 15% dzieci oraz 25% osób strasznych



Rys. 10. Zależność liczby ewakuowanych osób od czasu z całej domeny obliczeniowej dla przypadku 3

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 11. Zależność liczby ewakuowanych osób od czasu przez poszczególne wyjścia ewakuacyjne (symulacja 1) dla przypadku 3

Źródło: opracowanie własne.

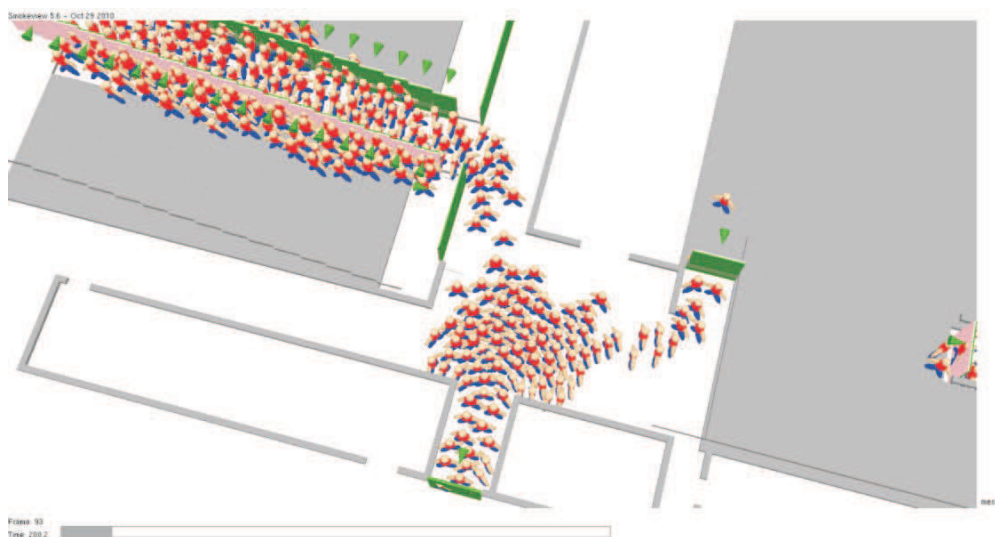
Tabela 5. Porównanie wymaganego czasu ewakuacji pierwszej oraz ostatniej jednostki dla wszystkich symulacji przypadku 3

	Symulacja 1	Symulacja 2	Symulacja 3	Symulacja 4	Symulacja 5
Czas pierwszej ewakuowanej osoby	179 s	180 s	179 s	179 s	180 s
Czas ostatniej ewakuowanej osoby	317 s	312 s	313 s	312 s	317 s

Źródło: opracowanie własne.

4.7. Wnioski

Przeprowadzone symulacje komputerowe pozwoliły oszacować wymagany czas ewakuacji, który wyniósł 317 s. Najdłuższy czas ewakuacji otrzymany został w przypadku symulacji 1 i 5, gdy populacja znajdująca się w domenie obliczeniowej składała się z 25% kobiet, 35% mężczyzn, 15% dzieci oraz 25% osób starszych. Czas ten jest krótszy o 155,5 s od czasu wyliczonego metodą empiryczną (472,5 s) przy użyciu normy brytyjskiej. Wynika to z faktu dodania dodatkowego czasu przeznaczonego na szukanie wyjścia ewakuacyjnego (30 s) oraz uproszczonego podejścia do obliczania czasu kolejki (228,7 s).



Rys. 12. Powstawanie lokalnego zagęszczenia ludzi przy wyjściu ewakuacyjnym I i zejściu z trybuny widowni

Źródło: opracowanie własne.

Najkrótszy czas ewakuacji został otrzymany w symulacji 1 i 3 w pierwszym przypadku (294 s), który zakładał domyślne właściwości fizyczne ewakuowanych jednostek (osoba dorosła).

Przeprowadzone symulacje pozwoliły wskazać miejsca szczególnie niebezpieczne pod kątem ewakuacji, w których powstają lokalne zagęszczenia. Są to głównie wyjścia ewakuacyjne I i II (średnio ewakuowało się przez te drzwi odpowiednio 378 oraz 328 osób) oraz zejścia z trybun widowni – rys. 12.

Rozbieżność wyników dla przeprowadzonych symulacji była relatywnie mała (względem metody empirycznej) i wyniosła około 7%. Spowodowane to było tym, iż wymagany czas ewakuacji determinowany był przepustowością drzwi ewakuacyjnych I i II oraz szerokością zejść z trybun widowni. Dlatego też zmienne właściwości jednostek nie miały znaczącego wpływu na wymagany czas ewakuacji.

5. Podsumowanie

Głównym celem symulacji przedstawionych w artykule było wyznaczenie wymaganego czasu ewakuacji z budynku opery przy użyciu symulacji komputerowych. Czas ten jest głównym czynnikiem warunkującym bezpieczeństwo ludzi w przypadku powstania pożaru. Spowodowane jest to faktem, iż większość instalacji przeciwpożarowych regulowana jest względem tego czasu, np. wydajność instalacji wentylacji oddymiającej, której zadaniem jest utrzymanie bezpiecznych warunków ewakuacji. Na wartość wymaganego czasu ewakuacji wpływa wiele czynników, które powinny być dokładnie wyselekcjonowane oraz przeanalizowane. Chodzi głównie o liczbę wprowadzonych jednostek do symulacji, poprawne zdefiniowanie ich właściwości, odpowiednie odwzorowanie geometrii obiektu, wyznaczenie wszystkich lokalnych uwarunkowań, poprawne rozmieszczenie wyjść ewakuacyjnych itp. Wszystkie te składowe mają znaczący wpływ na wynik końcowy. Trzeba jednak zauważyć, iż dokładne oraz szczegółowe wprowadzenie tych danych umożliwi odwzorowanie realnych warunków procesu ewakuacji oraz pozwoli dokładnie oszacować wymagany czas ewakuacji.

Drugą istotną funkcją obliczeń komputerowych jest możliwość dokładnego wyznaczenia warunków ewakuacji. Przeprowadzone symulacje jednoznacznie wskazały potencjalne miejsca zagrożeń, czyli głównie obszary przeludnień oraz powstawania kolejek do drzwi ewakuacyjnych. Można stwierdzić, iż tworzenie się zjawiska kolejki w przypadku ewakuacji jest nieuniknione. Jednakże w przypadku ewakuacji spowodowanej realnym zagrożeniem życia (pożar, atak terrorystyczny), miejsca te oraz ich niewystarczająca przepustowość mogą być

głównym czynnikiem prowadzącym do powstania niebezpiecznego zjawiska paniki. Zjawisko to jest najgorszą formą przemieszania się kolektynu, powodującą zdeptanie, zmiżdżenie ludzi oraz wielokrotnie skutkujące całkowitym zablokowaniem dróg ewakuacyjnych. Dlatego też istotne jest, aby wszystkie otrzymane wyniki dokładnie przeanalizować oraz wyciągnąć odpowiednie wnioski, które mogą służyć za podstawę do poprawy projektowanych warunków ewakuacji.

Piśmiennictwo

- [1] PD 7974-6:2004. The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings. Part 6: Human factors: Life safety strategies-Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6).
- [2] Janik P.: Rola inżynierskich metod zapewnienia bezpieczeństwa w czasie ewakuacji, konferencja SITP, Warszawa 2009.
- [3] Kobes M., Helsloot I., Vries B., Post J.G.: Building safety and human behaviour in fire: A literature review, *Fire Safety Journal* 2010, nr 45, s. 1–11.
- [4] Małolepszy R.: Wymagany i dostępny czas bezpiecznej ewakuacji – metodyka obliczeniowa. Konferencja SITP, Warszawa 2010.
- [5] Kuligowski E.D., Peacock R.D.: Review of Building Evacuation Models, Report NIST TN 1471, 2005.
- [6] Korhonen T., Hostikka S.: Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac, Technical Reference and User's Guide, 2010.
- [7] Cappuccio J., Pathfinder: A Computer-Based Timed Egress Simulation, *Fire Protection Engineering* 2000, nr 8, s. 11–12.
- [8] MacDonald M.: STEPS Simulation of Transient Evacuation and Pedestrian Movements, User Manual, 2003.
- [9] Helbing D., Farkas I., Vicsek T.: Simulating dynamical features of escape panic, *Nature* 2000, nr 407, s. 487–490.
- [10] Gwynne S., Galea E.R., Lawrence P.J., Owen M., Filippidis L., A Review of the Methodologies used in the Computer Simulation of Evacuation from the Built Environment, *Building and Environment* 1999, nr 34, s. 741–749.
- [11] Kisko T.M., Francis R.L., Nobel C.R., EVACNET4 User's Guide, 1998.
- [12] Harrington S.S., TIMTEX: A Hydraulic Flow Model for Emergency Egress, MS Department of Fire Protection Engineering, 1996.
- [13] PAXPORT and PEDROUTE brochures, <http://www.halcrow.com> [On-line, 03.06.2011].
- [14] Fahy R.F., User's Manual EXIT89 v 1.01, An Evacuation Model for High-Rise Buildings Quincy, 1999.

- [15] IES. Simulex Technical and Evacuation Modeling Software, 2000.
- [16] ASERI – Advance Simulation of Evacuation of Real Individuals, A model to simulate evacuation and egress movement based on individual behavioural response, <http://www.ist-net.de> [On-line, 01.06.2011].
- [17] Gwynne S., Galea E.R., Lawrence P.J., Owen M., Filippidis L., A Systematic Comparison of Model Predictions Produced by the buildingEXODUS Evacuation Model and the Tsukuba Pavilion Evacuation Data, *Applied Fire Science* 2001, nr 3, s. 235–266.
- [18] Legion International, <http://www.legion.com/> [On-line, 03.06.2011].
- [19] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2006 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [20] PN-N-01256-5:1998, Znaki bezpieczeństwa – Zasady umieszczania znaków bezpieczeństwa na drogach ewakuacyjnych i drogach pożarowych.

Summary

Mateusz FLISZKIEWICZ
Andrzej KRAUZE
Tadeusz MACIAK

Computer Simulations as the Method of Estimating the Required Safe Escape Time from Buildings

Proper management of evacuation processes is one of the basic requirements within life safety concepts. Many times it helps to prevent dangerous situations which may occur during the evacuation. The performance based on fire codes allow the use of numerical simulation of evacuation processes to improve the fire safety in buildings. Actually, there are approximately 40 programs for modeling this phenomenon, but each has some limitations, which the potential user should know.

This paper describes two methods of estimating the required safe escape time: the computer simulation and the British standard. Both methods were compared and the required safe escape time was assessed. It was based on the opera house example.