

mł. kpt. mgr inż. Mariusz BARAŃSKI  
Komenda Powiatowa Państwowej Straży Pożarnej w Oławie  
dr hab. inż. Tadeusz MACIAK, prof. SGSP  
WIBP, Katedra Techniki Pożarniczej, Zakład Informatyki i Łączności SGSP

## Możliwości współczesnego oprogramowania do symulacji procesu ewakuacji ludności z zagrożonych obiektów

Omówienie  
LEAD

W pracy przedstawiono możliwości, jakie daje współczesne oprogramowanie do symulacji ewakuacji. Szczególną uwagę skupiono na oprogramowaniu *Fire Dynamic Simulator* tworzonym przez organizację NIST oraz na rozszerzeniu *Evac* rozwijanym przez VTT Technical Research Centre of Finland. W artykule pokazano, w jaki sposób można szacować czas ewakuacji z zagrożonego obiektu przy wykorzystaniu wspomnianego oprogramowania. Dynamicznie rozwijająca się dziedzina symulacji komputerowych procesu ewakuacji jest ważnym elementem we współczesnej inżynierii bezpieczeństwa pożarowego.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo w budynkach, ewakuacja ludności, szacowanie czasu ewakuacji.

### Wstęp

Ewakuacja jest procesem złożonym, polegającym na uporządkowanym ruchu osób do miejsca bezpiecznego. W przypadku zagrożenia, sprawna i szybka ewakuacja pozwala na uratowanie życia i zdrowia wielu ludzi. Aby droga ewakuacyjna zapewniała jak najlepsze warunki do ewakuacji, musi być zaprojektowana i wykonana zgodnie z przepisami prawa oraz sztuką budowlaną.

Do zweryfikowania skuteczności zastosowanych warunków ewakuacji niezbędne jest oszacowanie jej czasu, a to umożliwiają rozwijane na przestrzeni ostatnich lat modele matematyczne opisujące procesy przemieszczania się osób oraz tworzone na ich bazie oprogramowanie służące do symulacji ewakuacji.

W poprzedniej publikacji [1] autorzy przedstawili krajowe i zagraniczne akty prawne dotyczące procesu ewakuacji ludności z zagrożonych obiektów. Ukazano, w jaki sposób prawodawstwo krajowe oraz zagraniczne (europejskie i brytyjskie) wpływają na poprawę bezpieczeństwa ludności w budynkach. Zaprezen-

towano normy zagraniczne, które są wykorzystywane do szacowania czasu ewakuacji. W kolejnym opracowaniu [2] pokazano dotychczasowe starania w opracowaniu najbardziej właściwej formuły matematycznej definiującej czas ewakuacji.

Obecna – trzecia już z kolei – praca prezentuje możliwości współczesnego oprogramowania służącego do symulacji ewakuacji ludności z zagrożonych obiektów.

## 1. Ogólna charakterystyka oprogramowania służącego do symulacji ewakuacji

Współczesne oprogramowanie służące do przeprowadzania symulacji ewakuacji ogólnie można podzielić na: bezpłatne, z którego użytkownik może korzystać bez żadnych opłat oraz komercyjne, wymagające zakupu licencji. Ma to szczególne znaczenie, gdyż oprogramowanie oferowane przez prywatne firmy jest drogie. W konsekwencji podnosi to koszty analiz, które można z taką samą jakością wykonać przy wykorzystaniu oprogramowania darmowego, rozwijanego przez instytucje rządowe. Kolejnym ważnym parametrem charakteryzującym oprogramowanie jest platforma sprzętowa i systemowa, na jakiej mogą one działać. Można wyróżnić aplikacje działające pod systemem: Windows, Linux, MacOS (rzadziej wykorzystywane). W przypadku systemów Linux i MacOS możliwe jest uruchomienie niektórych aplikacji napisanych dla systemów Windows, dzięki wykorzystaniu emulatorów. Jednakże każdy przypadek należy traktować oddzielnie, gdyż nie każdą aplikację – mimo dużego postępu w emulowaniu systemów Windows – udaje się uruchomić pod systemami Linux.

### 1.1. Oprogramowanie bezpłatne

Do oprogramowania bezpłatnego można zaliczyć szereg aplikacji, takich jak np.: *CFAST*, *ELVAC*, *EVACNET*, *FDS+Evac*, *FPETool*, *MATSim* oraz *PedSim*.

Na uwagę zasługuje tutaj pakiet oprogramowania *FDS+Evac* (*Fire Dynamic Simulator with Evacuation*) [3]. Zaimplementowane w pakiet rozszerzenie *Evac* dokonuje obliczeń związanych z ewakuacją, zgodnie z obliczonymi przez moduł *FDS* parametrami pożaru. Główne cechy oprogramowania to m.in.: wykorzystanie do symulacji algorytmu "Panic" [4], wizualizacja wyników obliczeń w programie *Smokeview* oraz kalkulacja wpływu pożaru na osoby ewakuujące się, przez określanie wskaźnika FED (*Fractional Effective Dose*) (cząstkowej dawki skutecznej). Program ma możliwość wykonywania obliczeń równoległych na oddzielnych procesorach i ich rdzeniach dla odrębnych domen obliczeniowych. Wymaga to odpowiedniego przygotowania pliku wejściowego do symulacji oraz wykorzystania programu z rozszerzeniem MPI (*Message Passing Interface*). Do symulacji większych obiektów i z większą dokładnością, niezbędne są komputery o dużej mocy obliczeniowej oraz z dostatecznie pojemną pamięcią operacyjną.

*Fire Dynamics Simulator* jest aplikacją DOS-ową i wyniki pracy programu wyświetlane są w konsoli systemowej. Natomiast wyniki przeprowadzonej symulacji można wyświetlać w postaci obrazów 3D przy użyciu programu *Smokeview*. Przydatne w tworzeniu symulacji są dostępne również bez opłat narzędzia do importowania geometrii obiektów z plików AutoCADa i Blendera. Narzędzia te pozwalają na skrócenie żmudnego procesu rysowania geometrii budynku. Rozszerzenie *3dsolid2fds* dla AutoCADa pozwala na eksportowanie geometrii stałych elementów budynku, takich jak ściany, drzwi, okna itp., do pliku \*.fds [5]. Natomiast narzędziem pozwalającym na tworzenie geometrii obiektów w darmowej aplikacji Blender jest *BlenderFDS* [6].

## 1.2. Oprogramowanie komercyjne

Jedną z najbardziej znanych aplikacji komercyjnych do symulacji ewakuacji jest *PathFinder* stworzona przez amerykańską firmę *Thunderhead Engineering Consultants* [7]. Oprogramowanie jako silnik obliczeniowy wykorzystuje wcześniej opisany bezpłatny program *FDS+Evac*. Aplikacja jest formą nakładki graficznej na wspomniany program. Zaletą oprogramowania jest interfejs CAD umożliwiający rysowanie projektu obiektu. Pozwala to w stosunkowo łatwy sposób wprowadzić do symulacji geometrię budynku. Dodatkowo możliwe jest importowanie gotowej geometrii budynku z plików przygotowanych w programie AutoCAD. Zastosowanie w aplikacji formularzy do wprowadzania i definiowania parametrów ułatwia wykonanie symulacji. Ponadto zaawansowane środowisko 3D oparte o *Smokeview* pozwala na przejrzyste zobrazowanie wyników symulacji.

Konkurencyjnym produktem dla *PathFindera* jest aplikacja *Simulex* [8], program stworzony przez firmę *Integrated Environmental Solutions*. Oprogramowanie symuluje zachowania ludzi w przypadku ewakuacji z budynku, identyfikuje potencjalne problemy i pomaga znaleźć optymalne rozwiązania. *Simulex* wykorzystuje grafikę 2D do wprowadzania projektu i grafikę 3D do prezentacji wyników obliczeń. Tak jak w przypadku *PathFindera*, posiada interfejs do wprowadzania geometrii budynku. Ponadto możliwe jest importowanie gotowych projektów zapisanych w plikach DXF. Podstawowe cechy aplikacji są następujące:

- możliwość powiększenia dowolnej części obiektu i obserwowanie wyników symulacji,
- rozdzielczość czasowa symulacji co 0,1 s,
- rozdzielczość standardowej siatki obliczeniowej na poziomie 0,2 m,
- generowanie mapy dystansu pomiędzy dowolnym punktem planu a wyjściem ewakuacyjnym,
- możliwość dostosowania parametrów populacji ludzi, tj. rozmiar ciała, szybkość chodzenia, szybkość schodzenia po schodach, szybkość wchodzenia.

## 2. Wykorzystanie oprogramowania *FDS + Evac* do symulacji ewakuacji

Do pokazania możliwości współczesnego oprogramowania umożliwiającego symulację wybrano popularne oprogramowanie *FDS + Evac*, które zostało zastosowane do symulacji ewakuacji ludności z dużego obiektu handlowo-usługowego.

### 2.1. Charakterystyka analizowanego obiektu

Charakterystyka obiektu została opracowana w oparciu o instrukcję bezpieczeństwa pożarowego dotyczącą części handlowo-usługowej oraz parkingów [9]. Obiekt składa się z trzech budynków łącznie tworzących jedną całość. Znajduje się on w sąsiedztwie kilku innych budynków (zwarta zabudowa miejska). Najbliższej analizowanego obiektu zlokalizowany jest pawilon handlowy w odległości mniejszej niż 16 m. Powierzchnia zabudowy budynku handlowo-usługowego wynosi ponad 15 tys. m. Najwięcej przestrzeni zajmują parkingi, których łączna powierzchnia to ponad 39 tys. m<sup>2</sup>. Drugą co do wielkości jest powierzchnia części handlowej, która zajmuje 23 tys. m<sup>2</sup>. Budynek w części handlowo-usługowej ma wysokość do 25 m i zakwalifikowany jest jako średniowysoki. Wyższa część to budynek kinowy o wysokości do 40 m (zakwalifikowany jako wysoki). Ze względu na przeznaczenie obiektu, części handlowo-usługowa oraz kinowa zakwalifikowane są do kategorii zagrożenia ludzi ZL-I. Część biurową zaliczono do kategorii ZL-III. Budynek został wykonany w klasie odporności pożarowej B i C. Część handlowo-usługowa i garaż podziemny w klasie C, pozostała część w klasie B. W budynku jest dziewięć klatek schodowych i prowadzi z niego łącznie 14 wyjść ewakuacyjnych zlokalizowanych na poziomie parteru. Klatki schodowe wydzielone są przedsionkami o klasie odporności ogniowej EI30. Długość dojścia ewakuacyjnego w części handlowej i usługowej nie przekracza 20 m przy jednym dojściu i 80 m przy dwóch dojściach, natomiast długość przejścia nie przekracza 80 m.

Budynek wyposażono w następujące urządzenia przeciwpożarowe:

- stałe urządzenia gaśnicze wodne tryskaczowe,
- system sygnalizacji pożarowej,
- dźwiękowy system ostrzegawczy,
- instalacje oświetlenia ewakuacyjnego,
- hydranty wewnętrzne,
- zawory hydrantowe,
- przeciwpożarowe klapy odcinające,
- systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła.

### 2.2. Wyznaczenie czasu ewakuacji zgodnie z normą *British Standard*

Budynek w całości zabezpieczony jest systemem sygnalizacji pożarowej. System alarmowania jest dwustopniowy z alarmem drugiego stopnia po zwłóce cza-

sowej wynoszącej pięć minut. Z tego względu na podstawie British Standard obiekt można zaliczyć do poziomu A2 ze względu na zastosowanie sygnalizacji pożaru. Centrum handlowo-usługowe jest kompleksem obiektów ściśle ze sobą połączonych, wydzielonych pożarowo. Na tej podstawie – ze względu na złożoność budynku – klasyfikują się one w kategorii B3. Biorąc pod uwagę stopień zarządzania bezpieczeństwem, należy przyjąć kategorię M2. W budynku przebywają osoby z zewnątrz, które często nie znają dobrze obiektu. Mogą to być klienci, którzy są w budynku po raz pierwszy. Przeszkolenie ich w zakresie bezpieczeństwa i postępowania w przypadku pożaru jest niemożliwe. Natomiast liczba personelu – w stosunku do osób nieznanymi szczegółowo budynku – jest niewielka. W obiekcie występują pomieszczenia, w których znajdują się następujące grupy ludzi [10]:

- kategoria A – użytkownicy pomieszczeń biurowych,
- kategoria B1 – klienci sklepów,
- kategoria B2 – widzowie w salach kinowych.

Zgodnie z tymi kategoriami, w powiązaniu z klasyfikacją obiektu, zostaną przyjęte odpowiednie czasy reakcji ludzi podczas ewakuacji dla poszczególnych scenariuszy.

Elementy składowe czasu ewakuacji osób znajdujących się w pomieszczeniach biurowych sklasyfikowanych jako A (użytkownicy czuwający i znający obiekt) będą przedstawiały się następująco:

- czas wykrycia pożaru 300 s,
- czas alarmu 0 s,
- czas rozpoznania 30 s,
- czas reakcji 60 s,
- czas wyboru drogi ewakuacyjnej 30 s,
- czas przemieszczania 200 s.

Suma poszczególnych składowych daje łączny czas 10 minut i 20 sekund. Następnie należy obliczyć czas ewakuacji klientów sklepów i kin. Składowe czasu ewakuacji dla grupy B (użytkownicy czuwający, ale nie znający szczegółowo obiektu) przedstawiają się następująco:

- czas wykrycia pożaru 300 s,
- czas alarmu 0 s,
- czas rozpoznania 60 s,
- czas reakcji 180 s,
- czas wyboru drogi ewakuacyjnej 60 s,
- czas przemieszczania 200 s.

Łącznie składowe dają wynik 13 minut i 20 sekund. Osoby słabiej znające obiekt będą ewakuowały się znacznie dłużej przy tych samych założeniach co do czasu wykrycia pożaru i ogłoszenia alarmu.

Porównując obydwa scenariusze, należy wybrać wariant najmniej korzystny. W analizowanym przypadku czas ewakuacji z obiektu przy bardzo dobrych wa-

runkach, braku tworzenia się zatorów, spowolnienia ewakuacji na klatkach schodowych, będzie wynosił co najmniej 13 minut i 20 sekund.

### **2.3. Definiowanie parametrów symulacji w programie FDS + Evac**

Do przeprowadzenia symulacji niezbędne jest określenie wszystkich parametrów w pliku \*.fds. Plik rozpoczyna się od znacznika &HEAD, a kończy się na &TAIL. Parametrami znacznika rozpoczynającego jest CHID określający nazwy plików wynikowych symulacji oraz TITLE, oznaczający tytuł symulacji. Następnie w pliku umieszcza się podstawowe parametry domeny obliczeniowej. Definiuje je znacznik &MESH. Parametr XB tego znacznika określa rozmiar domeny. Przykładowo XB = 0.0,51.6,0.0,121.6,23.3,23.5, mówi że domena ma rozmiar od 0.0 do 51.6 m w osi x, od 0.0 do 121.6 m w osi y oraz od 23.3 do 23.5 m w osi z. W celu dokonania podziału domeny na siatkę odpowiedniego rozmiaru, wykorzystuje się znacznik IJK. Dla symulacji ewakuacji w definicji domeny należy ustawić flagę EVACUATION=.TRUE., oznaczającą że domena przeznaczona jest do ewakuacji oraz EVAC\_HUMANS=.TRUE., określającą że domena będzie zawierała ludzi w chwili rozpoczęcia symulacji. Znacznik opisujący domenę musi zawierać również wysokość w osi z, na której będą liczone osoby w symulacji. Domyślnie jest to wartość jednego metra. Ostatnim niezbędnym elementem jest nazwa domeny, która będzie wykorzystywana przy definiowaniu parametrów kolejnych znaczników pliku symulacji. Następnie należy określić parametry dodatkowe, jeśli takie się zakłada. W przypadku omawianej symulacji dla części pomieszczeń określono, że nie będą obliczane parametry pożaru oraz nie będą one pobierane z zewnętrznego pliku. Definicja tego założenia przedstawia się następująco:

```
&MISC EVACUATION_MC_MODE=.FALSE.,  
      EVACUATION_DRILL=.TRUE. /
```

Kolejną część założeń stanowi określenie czasów związanych z symulacją. Czas rozpoczęcia ewakuacji ustawiono na 0 sekund, a czas zakończenia symulacji określany jest indywidualnie dla każdego rozpatrywanego przypadku. Należy również określić rozdzielczość czasową z jaką będą wykonywane obliczenia. Przyjęto rozdzielczość na poziomie 0,1 sekundy.

W pliku symulacji niezbędne jest również określenie materiałów z jakich wykonane są ściany i stałe elementy. W przypadku ewakuacji, szczegółowe parametry materiałów dotyczące m.in. izolacyjności, temperatury początkowej, palności itp., nie są wymagane. Niezbędne jest natomiast ustawienie parametru EVAC\_DEFAULT na wartość TRUE, aby elementy wykonane z tych materiałów miały wpływ na osoby ewakuujące się. Ewakuowani zachowują odpowiedni dystans – w określonych warunkach – od ścian i innych elementów budynku. Kolejną rozbudowaną częścią jest geometria obiektu lub jego części. Informacje o budynku można uzyskać przez wykonanie własnych pomiarów i sporządzenie

szkicu obiektu lub wykorzystać gotowe plany projektowe budynku. Wprowadzanie wymiarów poszczególnych ścian, drzwi, wolnych przestrzeni itp. przy wykorzystaniu edytora tekstu, jest procesem bardzo żmudnym i długotrwałym. Dla przyspieszenia można wykorzystać program *AutoCAD* [11]. Korzystając z oprogramowania można przygotować geometrię obiektu niezbędną do symulacji. Przy czym należy pamiętać o rysowaniu obiektów w trójwymiarze. Podczas tworzenia geometrii powinno się stosować bryły w postaci prostopadłościów, ze względu na to, że FDS interpretuje tylko takie bryły. Niezbędne jest więc wyrysowanie obiektu w pewnym przybliżeniu. Ponadto przy eksportowaniu geometrii do pliku symulacji, rozszerzenie *3dsolid2fds* przyjmuje skalę metrową. Czyli 1 milimetr w programie AutoCAD odpowiada 1 metrowi w symulacji wykonywanej przez FDS. Poszczególne elementy posiadają nazwy takie same jak nazwy warstw w projekcie AutoCAD. Dlatego podczas rysowania należy tworzyć warstwy tematyczne, odpowiednio je nazywając, np.: ściany, meble, pojazdy itp. Przykładowy znacznik opisujący jedną ze ścian zewnętrznych, wyeksportowany przy użyciu rozszerzenia *3dsolid2fds*, wygląda następująco:

```
&OBST XB=100.35,108.05,29.75,29.95,23.3,23.5  
SURF_ID='ściany_zewnetrzne' /.
```

Linia definiuje pojedynczą ścianę zewnętrzną o współrzędnych zdefiniowanych przez flagę XB.

Kolejną część stanowią definicje otworów, drzwi i wyjść ewakuacyjnych. Dla otworów, w których znajdują się drzwi przeznaczone do ewakuacji, należy ustawić parametr EVACUATION na wartość TRUE, aby przez nie ewakuowali się ludzie. Dla wszystkich drzwi oznakowanych znakami ewakuacyjnymi, stosuje się parametr EXIT\_SIGN. W przypadku wyjść ewakuacyjnych na uwagę zasługuje określenie kierunku otwierania ustawionego przy użyciu IOR. Nazwy poszczególnych drzwi i wyjść ewakuacyjnych muszą być unikalne, ze względu na fakt, iż ewentualne przechodzenie przez nie ewakuowanych osób jest odnotowywane w pliku symulacji, co pozwala na późniejszą analizę procesu ewakuacji. Definiowanie drzwi i wyjść ewakuacyjnych jest skomplikowane i pochłania znaczną ilość czasu. Ponadto, podczas tworzenia układu wyjść i przejść, łatwo o pomyłkę, która powoduje generowanie błędnych danych z symulacji. Wszystkie poprzednie elementy pliku są jedynie wstępem, ponieważ najważniejsza część to definicja grup ludzi oraz obszarów w jakich są zlokalizowani przy rozpoczęciu symulacji ewakuacji. Znacznik &PERS definiuje grupę ludzi. Do jego parametrów można zaliczyć:

ID – określający nazwę grupy,

DEFAULT\_PROPERTIES – określający parametry domyślne, zdefiniowane dla pięciu podstawowych grup,

PRE\_EVAC\_DIST – określający rozkład prawdopodobieństwa, z jakim będzie dobierany czas pierwszych reakcji na alarm dla poszczególnych osób,

DET\_EVAC\_DIST – określający rozkład prawdopodobieństwa, z jakim będzie dobierany czas rozpoznania alarmu przez poszczególne osoby,  
PRE\_LOW – określający najkrótszy czas reakcji na alarm,  
PRE\_HIGH – określający najdłuższy czas reakcji na alarm,  
DET\_LOW – określający najkrótszy czas rozpoznania alarmu,  
DET\_HIGH – określający najdłuższy czas rozpoznania alarmu,  
OUTPUT\_SPEED – zapisujący prędkości poszczególnych osób w wynikach symulacji,  
OUTPUT\_DENSITY – zapisujący gęstości rozmieszczenia osób,  
OUTPUT\_TOTAL\_FORCE – zapisujący siły oddziaływania pomiędzy ewakuowanymi osobami.

W polach rozmieszczenia ludzi definiujemy ich liczbę – NUMBER\_INITIAL\_PERSONS, rozmiar zajmowanej przestrzeni – XB, znajomość drzwi i wyjść ewakuacyjnych, prawdopodobieństwo z jakim osoby znają wyjście lub drzwi – KNOWN\_DOOR\_PROBS oraz przynależność do danej grupy – PERS\_ID.

Po przygotowaniu pliku \*.fds, można przystąpić do symulacji. Podczas uruchamiania programu może powstać kilka problemów. Pierwszy z nich dotyczy przepełnienia pamięci operacyjnej i przerwania obliczeń. Do takiej sytuacji dochodzi, gdy założymy zbyt dużą rozdzielczość domeny lub kilku domen. Drugim problemem jest czas obliczeń. W przypadku dużych pomieszczeń, w symulacjach wykonywanych dla potrzeb niniejszej pracy, przekracza on niekiedy 30 minut. Domena obliczeniowa o rozdzielczości 20 cm pojedynczej kondygnacji zajmuje podczas obliczeń ponad 700 MB pamięci operacyjnej i podobną ilość pamięci wirtualnej.

#### **2.4. Szacowanie czasu ewakuacji parkingu**

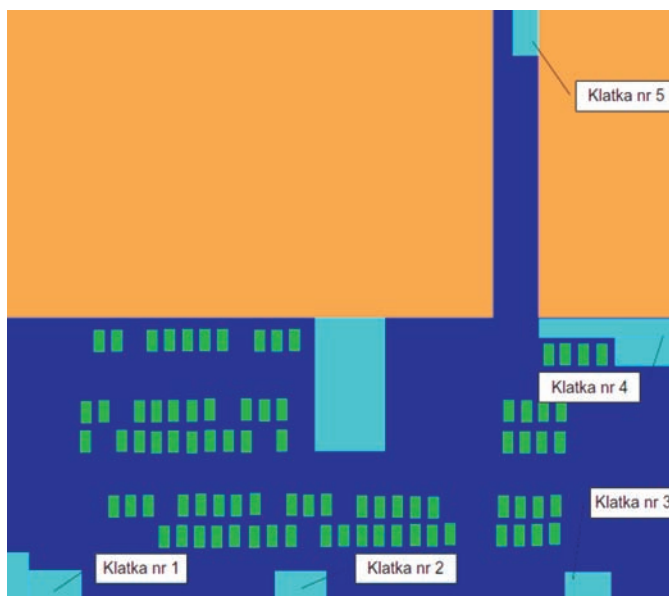
Parking nadziemny przeznaczony dla klientów oraz pracowników zlokalizowany jest na szóstej kondygnacji obiektu. Podstawowe parametry parkingu są następujące:

- szerokość parkingu 50 m,
- długość parkingu 120 m,
- liczba miejsc parkingowych 170,
- liczba klatek schodowych prowadzących bezpośrednio z parkingu 4,
- liczba klatek schodowych ze zjazdu 1,
- poziom zapełnienia parkingu 60%,
- długość zjazdu 56 m,
- szerokość zjazdu 7,5 m,
- szerokość drzwi do klatek schodowych 4, 6, 7, 8 – 1,2 m,
- szerokość drzwi do klatki schodowej 5 – 1,7 m,
- czas rozpoznania alarmu 60 s,
- czas pierwszych reakcji 180 s.



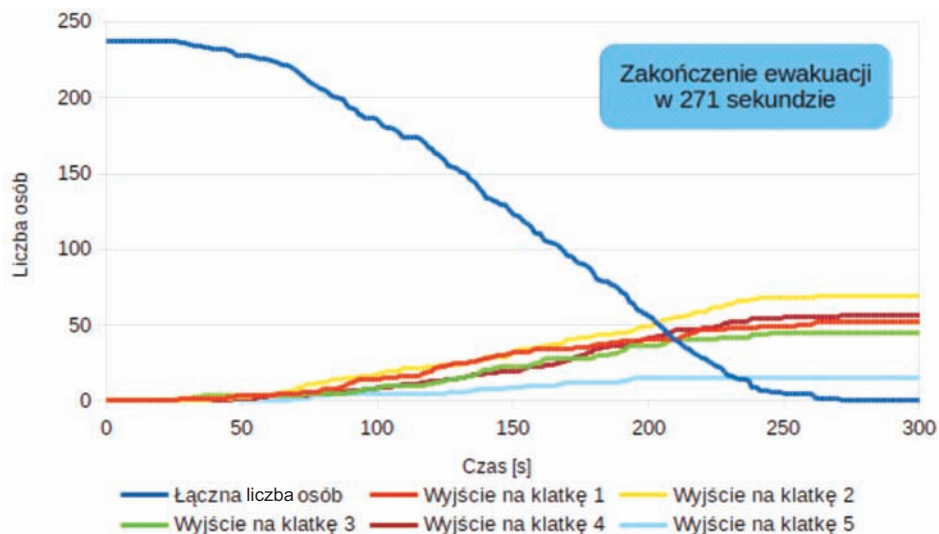
W symulacji omawianej kondygnacji nadziemnej przyjęto powierzchnię  $27,9 \text{ m}^2$  przypadającą na jedną osobę, korzystając z tabeli 7.3.1.2 zawartej w normie *NFPA 101 „Life Safety Code”* [12]. Dla powierzchni parkingu ok.  $6,2 \text{ tys. m}^2$  liczba osób znajdujących się na szóstej kondygnacji powinna wynosić 222 oraz dla zjazdu o powierzchni  $420 \text{ m}^2$  – 15 osób. Łącznie na kondygnacji szóstej do symulacji przyjęto 237 osób.

Do pierwszej symulacji przyjęto, iż będą to osoby zachowujące się racjonalnie, tzn. że ewakuowani będą w równym stopniu wybierali drzwi znane i w zasięgu wzroku. Drogi ewakuacyjne z omawianej kondygnacji prowadzą do pięciu klatek schodowych oznaczonych zgodnie z planem obiektu numerami 1, 2, 3, 4, 5 (rys. 1). W wyniku symulacji otrzymano czas ewakuacji z kondygnacji równy 271 sekund. Pierwsza osoba ewakuowała się w 27 sekundzie do klatki schodowej nr 1. Ostatnia osoba opuszczająca kondygnację wyszła drzwiami prowadzącymi do klatki schodowej nr 4. Łącznie najwięcej osób ewakuowało się przez klatkę schodową nr 2. Wynika to z faktu, że jest ona zlokalizowana w centralnej części dłuższej ściany parkingu i jest dobrze widoczna z każdej strony. Z tego względu ewakuowało się nią aż 69 osób. Najmniejsza liczba osób ewakuowała się klatką schodową nr 5. Powodem takiej sytuacji jest to, że klatka ta znajduje się w części dojazdowej (pochylnia) do garażu nadziemnego, jest znacznie oddalona od głównej części garażu. Dla powierzchni części dojazdowej założono, że będzie się tam znajdowało 15 osób. Połowa spośród wszystkich ewakuowanych opuściła kondygnację szóstą w 154 sekundzie. Liczba osób, które wybrały odpowiednie klatki schodowe oraz średnie przepływy, przedstawiono na rys. 2 i rys. 3.

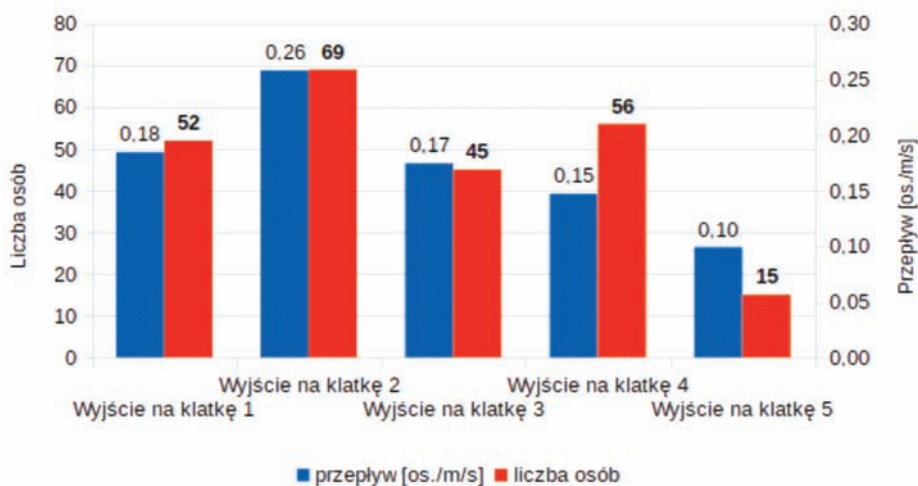


Rys. 1. Rzut poziomy szóstej kondygnacji

Źródło: Opracowanie własne na podstawie dokumentacji obiektu.

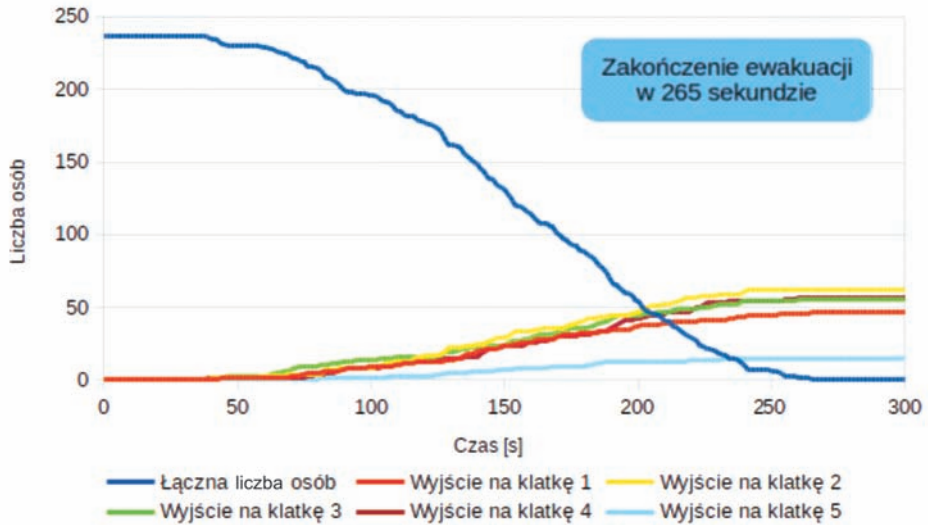


Rys. 2. Przebieg ewakuacji szóstej kondygnacji (przy racjonalnym wyborze drogi ewakuacyjnej, parametr AGENT\_TYPE=1)

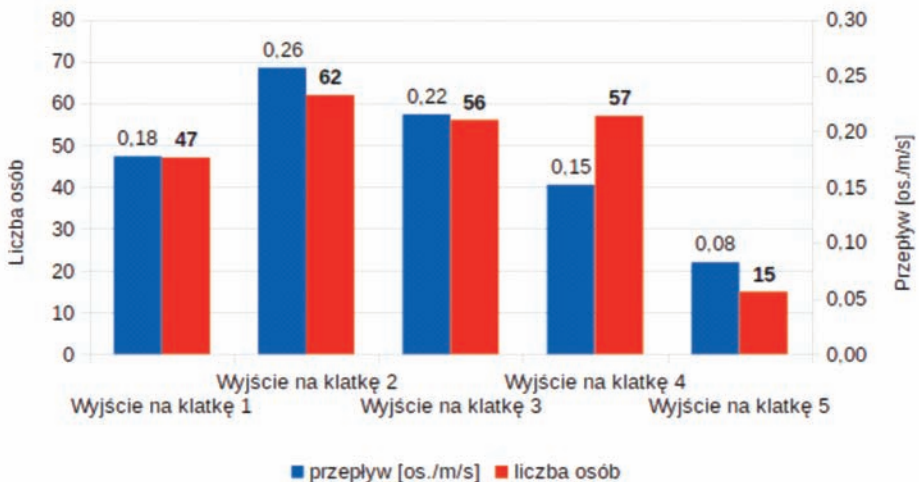


Rys. 3. Liczba osób ewakuujących się poszczególnymi klatkami schodowymi oraz średni przepływ (dla parametru AGENT\_TYPE=1)

Kolejną symulację ewakuacji kondygnacji wykonano przy założeniu, że ewakuowani będą w pierwszej kolejności wybierali drzwi które znają, a jeśli one nie będą dostępne, to te, które są widoczne. Wynikiem symulacji jest czas ewakuacji wynoszący 265 sekund. Pierwsza osoba opuściła kondygnację w 39. sekundzie klatką schodową nr 4. Tak jak w poprzedniej symulacji, najwięcej osób ewakuowało się klatką schodową nr 4. Ostatnia osoba ewakuowała się klatką schodową nr 1.

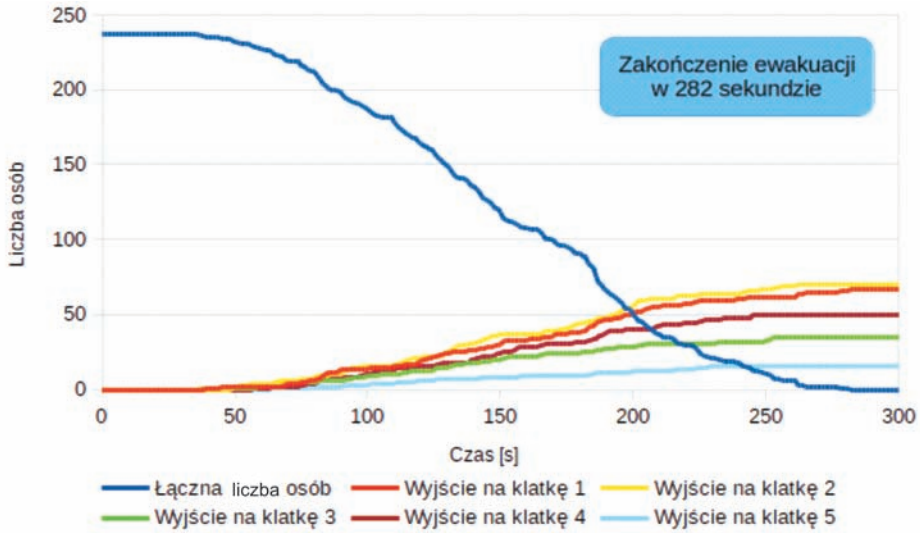


Rys. 4. Przebieg ewakuacji szóstej kondygnacji (przy intuicyjnym wyborze drogi ewakuacyjnej, parametr AGENT\_TYPE=2)

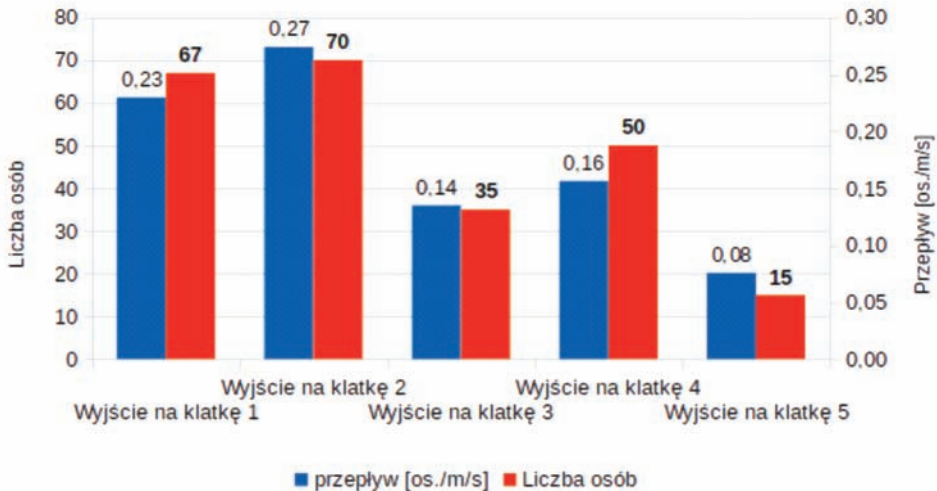


Rys. 5. Liczba osób ewakuujących się poszczególnymi klatkami schodowymi oraz średni przepływ (dla parametru AGENT\_TYPE=2)

Trzecią grupą są osoby zachowujące się spontanicznie, które wybierają drzwi na podstawie wyboru swoich poprzedników. Czas ewakuacji w przypadku takiego założenia jest najdłuższy i wynosi 282 sekundy. Najwięcej, bo aż 70 osób, wybrało klatkę schodową nr 2. Z tą liczbą związany jest przepływ, który wynosi 0,27 os./m/s. Przebieg ewakuacji szóstej kondygnacji budynku (przy spontanicznym wyborze drogi ewakuacyjnej) przedstawiono na rys. 6 i 7.



Rys. 6. Przebieg ewakuacji szóstej kondygnacji (przy spontanicznym wyborze drogi ewakuacyjnej, parametr AGENT\_TYPE=3)



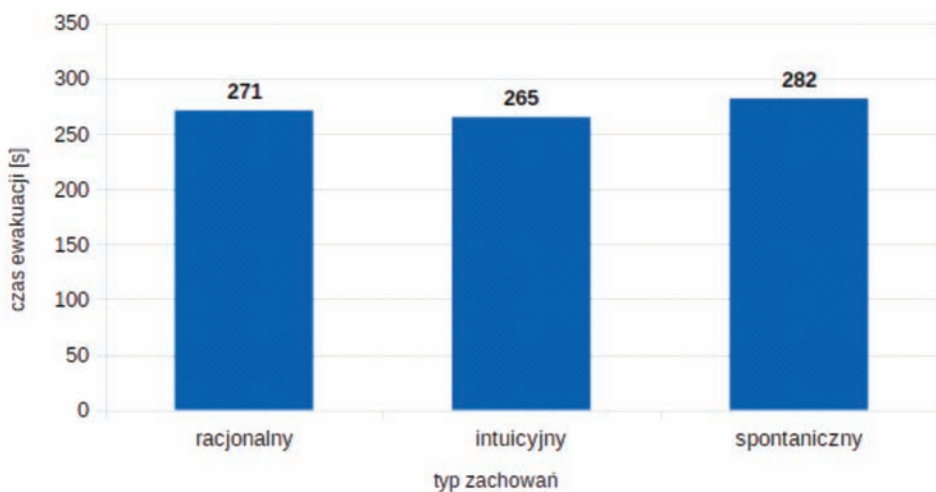
Rys. 7. Liczba osób ewakuujących się poszczególnymi klatkami schodowymi oraz średni przepływ (dla parametru AGENT\_TYPE=3)

Kolejnym parametrem, który może być symulowany przy wykorzystaniu *FDS + Evac*, jest siła oddziaływania pomiędzy ewakuowanymi osobami. Największe znaczenie ma ona w miejscu występowania drzwi i zwężeń drogi ewakuacyjnej. Przy prędkości przemieszczania się powyżej 5 m/s lub ciśnieniu pomiędzy osobami powyżej 1600 N/m zaczyna dochodzić do powstawania urazów związanych z ewakuacją [4]. Przy przekroczeniu wartości tych parametrów pojawiają się

zachowania prowadzące do powstania paniki. Największa siła wzajemnego oddziaływania pomiędzy ewakuującymi się osobami wynosiła 118 N/m (rys. 8). Jest to wielkość znacznie mniejsza od wartości krytycznej.



Rys. 8. Siła oddziaływania pomiędzy poszczególnymi osobami przy wejściu do klatki schodowej nr 2



Rys. 9. Porównanie czasów ewakuacji w zależności od typu zachowań ludzi podczas wyboru drogi ewakuacyjnej

Symulowany czas ewakuacji w zależności od charakteru zachowań ludzi nie różni się znacząco. Można zauważyć, że w przypadku spontanicznego wyboru drogi ewakuacyjnej czas ewakuacji jest najdłuższy i wynosi 282 sekundy. Najkrótszy czas ewakuacji występuje w sytuacji, gdy ewakuujący wybierają drzwi, które znają, a jeśli są one niedostępne, kierują się do najbliższych drzwi widzianych w ich zasięgu. Taki charakter zachowań powoduje, że w symulacji czas ewakuacji wynosi 265 sekund.

### 2.5. Szacowanie czasu ewakuacji klatką schodową

Klatki schodowe to kolejna część kompleksu budynków, które mają ogromne znaczenie podczas ewakuacji. Odpowiednio zaprojektowane, mające wystarczającą szerokość oraz właściwie zabezpieczone, stanowią jedyną drogę ucieczki przed pożarem lub innym zagrożeniem. Liczba osób, które będą podczas ewakuacji wchodziły na klatkę, będzie podobna przy założeniu takich samych warunków, czyli 51 osób dla każdej kondygnacji. Na najniższej kondygnacji nadziemnej znajdują się powierzchnie handlowe. Z tego względu liczba ewakuujących się będzie większa. Na potrzeby symulacji przyjęto 102 osoby. Z parteru oraz kondygnacji podziemnych droga ewakuacyjna prowadzi do oddzielnych drzwi ewakuacyjnych, w związku z tym nie uwzględnia się ich podczas symulacji.

Parametry początkowe dla symulacji czasu ewakuacji klatką schodową są następujące:

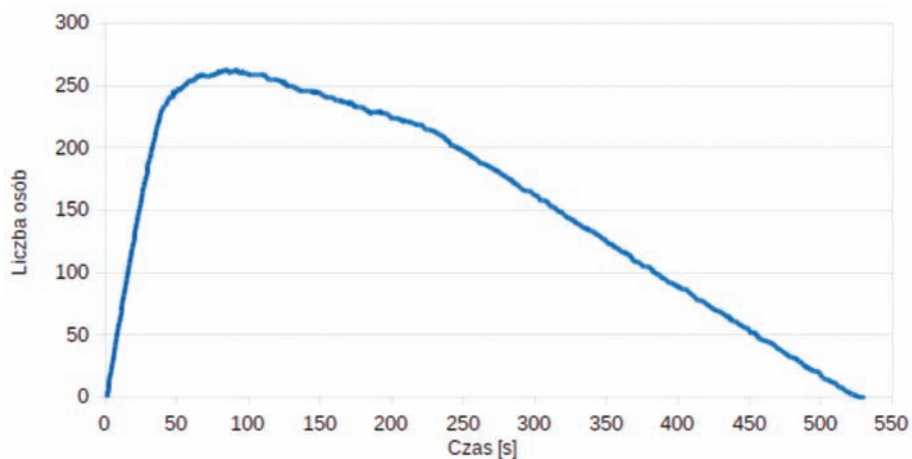
- wymiary klatki schodowej  $2,7 \text{ m} \times 6,1 \text{ m}$ ,
- różnica wysokości pomiędzy spocznikami  $2,8 \text{ m}$ ,
- szerokość spocznika  $2 \text{ m}$ ,
- maksymalna prędkość schodzenia po schodach  $0,5 \text{ m/s}$ ,
- maksymalna prędkość przemieszczania się po powierzchniach poziomych  $1,0 \text{ m/s}$ ,
- szerokość drzwi prowadzących na klatkę  $1,2 \text{ m}$ ,
- szerokość drzwi ewakuacyjnych prowadzących na zewnątrz budynku  $1,4 \text{ m}$ ,
- liczba kondygnacji  $9$ ,
- łączna liczba osób ewakuujących się klatką schodową  $357$ .

Po przeprowadzeniu symulacji czas ewakuacji klatką schodową wynosi  $524 \text{ s}$ . Podczas ewakuacji przy wejściach na klatki tworzą się skupiska ludzi, spowodowane próbą dostania się na zapełnioną klatkę schodową. Jest to zjawisko normalne w przypadku jednorazowej ewakuacji dużej liczby osób przez klatkę schodową o ograniczonej szerokości. Z wyników otrzymanych dzięki symulacji można odczytać, że maksymalnie podczas symulacji na klatce schodowej znajdowały się  $263$  osoby i było to w  $82$  sekundzie od rozpoczęcia ewakuacji. Ponad połowa maksymalnej liczby osób znajdowała się na klatce schodowej przez  $276$  sekund czasu ewakuacji, co stanowi ok.  $52,6\%$  całego czasu ewakuacji. Na rys. 10 pokazano przemieszczanie się osób klatką schodową w oprogramowaniu *Smokeview*, a na rys. 11 liczbę osób znajdujących się w klatce schodowej.

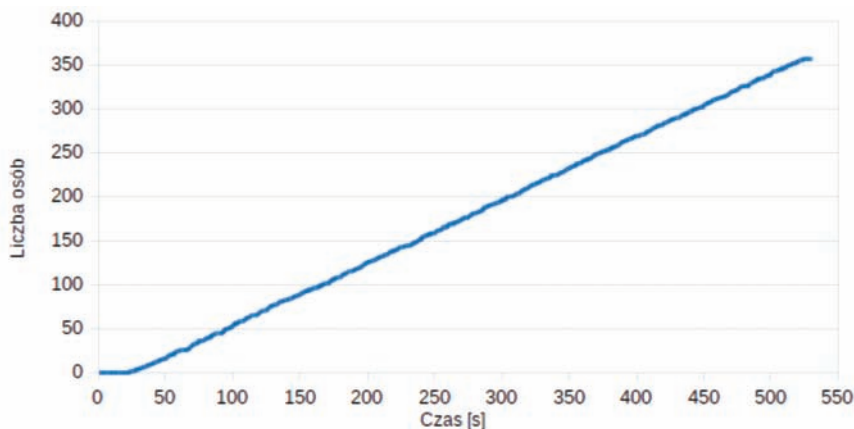
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Rys. 10. Symulacja ewakuacji klatką schodową



Rys. 11. Liczba osób znajdujących się w klatce schodowej podczas ewakuacji



Rys. 12. Liczba osób, które opuściły klatkę schodową przez wyjście ewakuacyjne

Z wyników symulacji możliwe jest również określenie liczby osób opuszczających klatkę schodową w czasie ewakuacji. Informacje te są bardzo cenne, gdyż przy ich użyciu możliwe jest obliczenie przepustowości klatki schodowej. Przepustowość klatki schodowej z kolei można wykorzystać do oszacowania czasu ewakuacji dla dowolnie innej liczby ewakuowanych osób. Na rys. 12 pokazano liczbę osób, które opuściły klatkę schodową przez wyjście ewakuacyjne. Pomiedzy 22, a 524 sekundą ewakuacji liczba osób, które opuściły klatkę schodową, wzrasta liniowo. W ciągu 502 sekund klatkę schodową opuszcza 357 osób. Z tego wynika, że przepustowość klatki schodowej wynosi 0,71 os./s. Uwzględniając efektywną szerokość klatki schodowej [13] równą 1,3 m, przepustowość wynosi ok. 0,55 os./m/s. Tak oszacowana przepustowość może posłużyć do obliczenia czasu ewakuacji innej liczby osób omawianą klatką schodową.

Modelem matematycznym, który uwzględnia powstawanie zatorów i efektu blokowania się ewakuowanych osób, jest model Melinka i Botha [14]. Model uwzględnia liczbę kondygnacji, liczbę osób, przepustowość klatki schodowej oraz jej efektywną szerokość. Pozwala to na dokładniejsze oszacowanie czasu ewakuacji klatką schodową. Różnica pomiędzy czasem ewakuacji z symulacji, a obliczonym, wynosi ok. 80 s.

Tabela 1. Czas ewakuacji z poszczególnych pięter z uwzględnieniem tworzenia się zatorów, liczony wg [14]

Numer kondygnacji	Liczba osób	Czas ewakuacji na niższą kondygnację [s]
6	51	154,46
5	51	131,38
4	51	108,30
3	51	85,23
2	51	62,15
1	102	62,15
Suma		603,67



Znając czas ewakuacji z najwyższej położonej kondygnacji oraz czas ewakuacji klatką schodową, możliwe jest oszacowanie czasu ewakuacji z całego obiektu. Średni czas ewakuacji szóstej kondygnacji wynosi 273 s, a czas ewakuacji klatką schodową – przy założeniu takich samych warunków panujących na każdej kondygnacji – wynosi 524 s. Łącznie czas ewakuacji z budynku wynosi 797 s (13 min 17 s). Dla porównania czas oszacowany przy wykorzystaniu normy *British Standard 7974 PD 7974-6* wynosi 13 min 20 sekund.

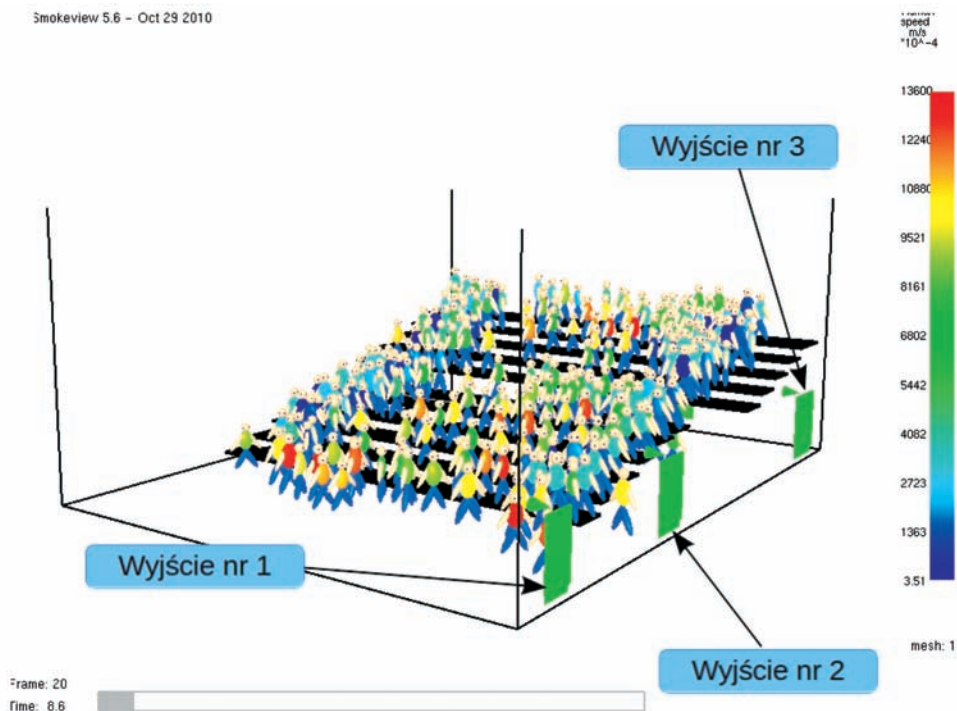
## 2.6. Szacowanie czasu ewakuacji z sali kinowej

W budynku handlowym znajdują się sale kinowe. Zapewnienie odpowiednich warunków ewakuacji jest niezmiernie ważne. W salach kinowych może przebywać bardzo duża liczba osób, co w przypadku powstania zagrożenia i ewakuacji może doprowadzić do powstawania paniki. Do symulacji przyjęto następujące parametry:

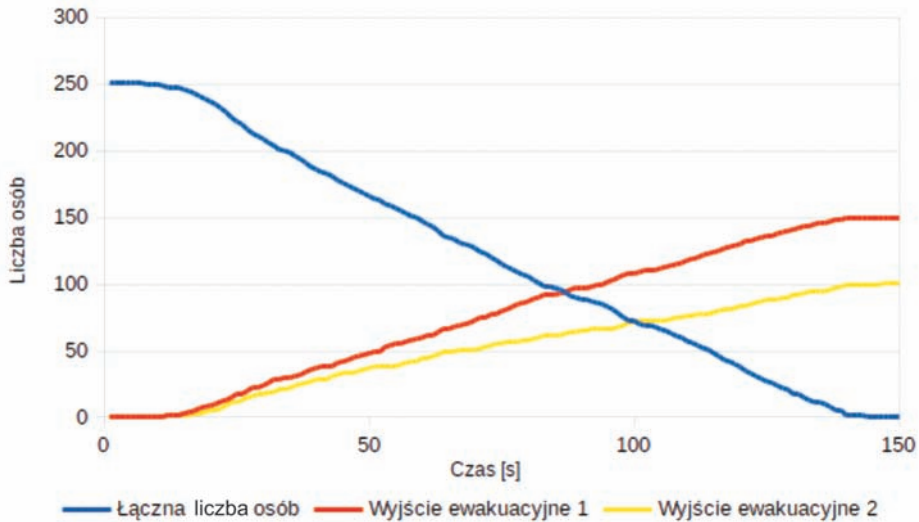
- liczba miejsc 251,
- szerokość sali kinowej 16 m,
- długość 20,20 m,
- szerokość rzędu krzeseł 0,6 m,
- szerokość pomiędzy rzędami 0,6 m,
- liczba rzędów 12,
- liczba rzędów z lewej strony 5,
- szerokość prawego rzędu krzeseł 2,43 m,
- szerokość środkowego rzędu krzeseł 9,07 m,
- szerokość lewego rzędu krzeseł 1,82 m,
- szerokość przejścia między rzędami 1,3 m,
- szerokość przestrzeni przed rzędami 6,35 m,
- odległość pierwszych drzwi od ściany z ekranem 1,35 m,
- odległość drugich drzwi od ściany z ekranem 7,65 m,
- odległość trzecich drzwi od ściany z ekranem 18,35 m,
- szerokość pierwszych drzwi 1,2 m,
- szerokość drugich drzwi 1,2 m,
- szerokość trzecich drzwi 1,6 m,
- różnica wysokości pomiędzy rzędami 0,34 m,
- wysokość pomieszczenia 9,05 m,
- wysokość przejścia do drzwi 3 – 2,25 m.

Symulacja omawianej sali kinowej została wykonana przy założeniu pełnego zapełnienia widowni. Takie założenie daje możliwość sprawdzenia warunków ewakuacji i czasu ewakuacji w sytuacji najbardziej niekorzystnej. Rys. 13 przedstawia zobrazowanie prędkości poruszania się ludzi w pierwszym etapie ewakuacji sali kinowej. Czas ewakuacji sali kinowej obliczony przez *FDS + Evac* wynosi 145 sekund. Pierwsza osoba ewakuowała się w 7 sekundzie od alarmu. Połowa spośród wszystkich osób znajdujących się w sali opuściła pomieszczenie przed

71 sekundą. Najwięcej osób – bo aż 150 – przeszło przez drzwi nr 1, natomiast drzwiami nr 2 salę kinową opuściło 101 osób. Żaden z ewakuujących się nie wybrał trzecich drzwi. Taki rozkład wynika z faktu, że pierwsze drzwi są najbardziej widoczne, drugie znajdują się z lewej strony rzędów, trzecie zaś są znacznie oddalone od zejścia z widowni. Podczas ewakuacji pierwsze i drugie drzwi nie były obłożone na tyle, aby ewakuujący się musieli wybierać trzecie – najbardziej oddalone – drzwi. Z symulacji ewakuacji sali kinowej wynika, że największe opóźnienie ewakuacji spowodowane jest ciągami komunikacyjnymi prowadzącymi w dół widowni. Liczba osób przypadających na metr efektywnej szerokości schodów przekracza 96 os./m. Ponadto można stwierdzić, że liczba wyjść ewakuacyjnych z sali kinowej jest wystarczająca. Potwierdza to brak tworzenia się skupisk ludzi przy drzwiach ewakuacyjnych.



Rys. 13. Zobrazowanie prędkości poruszania się ludzi w pierwszym etapie ewakuacji sali kinowej



Rys. 14. Przebieg ewakuacji sali kinowej

## Podsumowanie

Symulowanie warunków ewakuacji jest zagadnieniem złożonym. Niezbędna jest znajomość wielu zależności, jakie kształtują proces ewakuacji. Podczas ewakuacji występują interakcje pomiędzy ewakuującymi się osobami oraz pomiędzy ewakuującymi się, a elementami pomieszczeń i dróg ewakuacyjnych. Niezbędne jest też określenie cech grup ludzi, którzy będą się ewakuowali. Występowanie zachowań takich jak rozpoznanie rodzaju alarmu czy pierwszych reakcji po rozpoznaniu zagrożenia, powoduje wydłużenie czasu ewakuacji. Niezbędne jest odpowiednie założenie znajomości przez ewakuujące się osoby drzwi i wyjść ewakuacyjnych. Właściwe wprowadzenie wszystkich parametrów dróg ewakuacyjnych ma ogromne znaczenie dla prawidłowości przeprowadzonej symulacji. Bezpośrednie korzystanie z modeli matematycznych nie pozwala na określenie wszystkich zjawisk związanych z ewakuacją. Z tego powodu lepsze rezultaty otrzymuje się przeprowadzając symulacje. Na ich podstawie można przeanalizować jak przebiega ewakuacja oraz gdzie znajdują się interesujące nas przewężenia dróg ewakuacyjnych powodujące spowolnienia w opuszczeniu obiektu. Możliwe jest również wstępne oszacowanie czasu ewakuacji z pomieszczeń lub ciągami komunikacyjnymi. Czas ten, przy wzroście liczby osób, będzie proporcjonalnie większy, gdyż właściwości drogi ewakuacyjnej nie ulegną zmianie.

Ponadto symulacje pozwalają na stwierdzenie czy szerokości dróg ewakuacyjnych są wystarczające przy założeniu określonej liczby osób ewakuujących się nimi. Na podstawie wyników z symulacji możliwe jest na etapie projektowania dokonanie odpowiednich poprawek, np.: poszerzenia dróg ewakuacyjnych lub zaprojektowania dodatkowych wyjść. Natomiast w przypadku gdy budynek jest

już użytkowany, przeprowadzone symulacje mogą posłużyć do wprowadzenia odpowiednich norm organizacyjnych.

Otrzymane wyniki pozwalają na określenie w jakich miejscach występuje największe spowolnienie ewakuacji. W przypadku obiektu poddawanego symulacjom są to klatki schodowe. W salach kinowych są to schody prowadzące w dół widowni. W budynkach wielokondygnacyjnych istotna jest liczba klatek schodowych, ich szerokość oraz usytuowanie. Równomierne rozstawienie klatek zapobiega zjawisku tworzenia się skupisk ludzi przy jednej z nich oraz zbędnemu przemieszczaniu do wolnych klatek schodowych. Czas ewakuacji ostatniej kondygnacji analizowanego budynku z uwzględnieniem czasów reakcji osób na niej przebywających kształtuje się na poziomie ok. 300 sekund. Całkowity czas ewakuacji z obiektu będzie jednak zdeterminowany czasem przemieszczania się ludzi klatką schodową. Czas przemieszczania się klatką schodową o najmniejszej szerokości wynosił ok. 525 sekund. Symulacja zakłada, że wszystkie osoby będą starały się opuścić budynek po alarmie. Rzeczywiste zdarzenia potwierdzają, że wśród ludzi występują niekiedy inne zachowania i – zamiast opuszczać budynek najkrótszą drogą – udają się do miejsca zagrożenia zainteresowani wzbudzoną sensacją. Oszacowany czas ewakuacji może być krótszy, ale jedynie w przypadku mniejszej liczby osób korzystających z klatek schodowych.

W przypadku symulacji ewakuacji z dużych obiektów, niezbędny jest podział na mniejsze fragmenty w celu właściwego przeprowadzenia badań. Im większy obiekt, tym bardziej wzrasta możliwość błędów, a wrażliwość oprogramowania na zmianę parametrów w niewielkim stopniu jest bardzo duża.

## Literatura

- [1] Barański, M., Maciak T.: Przegląd aktów prawnych i norm związanych z zagadnieniem ewakuacji, *Zeszyty Naukowe SGSP* 2013, vol.47, nr 3, s. 100–112.
- [2] Barański, M., Maciak T.: Określanie czasu procesu bezpiecznej ewakuacji ludności z zagrożonych obiektów, *Zeszyty Naukowe SGSP* 2014, vol.49, nr 1, s. 78–97.
- [3] Korhonen T., Hostikka S.: *Fire Dynamics: Simulator with Evacuation: FDS + Evac*, Technical Reference and User's Guide, „VTT 2010”.
- [4] Helbing D., Farkas I., Vicsek T.: Simulating dynamical features of escape panic, *Nature* 2000, nr 407, s. 487–490.
- [5] Dimyadi J.: 3dsolid2fds [online] [dostęp 12 stycznia 2014]. Dostępny w Internecie: <https://sites.google.com/site/jdimyadi/3dsolid2fds>.
- [6] Google Project Hosting: BlenderFDS, an open user interface for the NIST Fire Dynamics Simulator [online] [dostęp 12 stycznia 2014]. Dostępny w Internecie: <http://code.google.com/p/blenderfds>.
- [7] Pathfinder; [online] [dostęp 12 stycznia 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.thunderheadeng.com/pathfinder/>.

- [8] Simulex, Integrated Environmental Solutions; [online] [dostęp 12 stycznia 2014]. Dostępny w Internecie: <http://www.iesve.com/software/ve-pro/analysis-tools/egress/simulex>.
- [9] Instrukcja bezpieczeństwa pożarowego, dotyczy: części handlowo-usługowej oraz parkingów podziemnych i nadziemnych budynku.
- [10] British Standard PD 7974-6:2004 The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings – Human factors: Life safety strategies – Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6).
- [11] Autodesk: AutoCAD 2013 – oprogramowanie do komputerowego projektowania 2D i 3D [online] [dostęp 12 stycznia 2014]. Dostępny w Internecie:<http://www.autodesk.pl/>.
- [12] NFPA 101 Life Safety Code.
- [13] DiNunno P., Drysdale D., Beyler C., Walton D., Custer R., Hall J., Watts J.: SFPE Handbook of fire protection engineering, wyd. 3, Massachusetts 2002.
- [14] Melinek S.J., Booth S.: An analysis of evacuation times and the movement of crowds in buildings, Current paper CP 96/75, Building Research Establishment, Fire Research Station, Borehamwood, UK (1975).

Mariusz BARAŃSKI

Tadeusz MACIAK

## **The Possibilities of Modern Software for Simulation of People Evacuation from Endangered Buildings**

The paper presents the possibilities offered by modern software to simulate evacuation. Particular attention is paid to the Fire Dynamic Simulator software created by the organization NIST, and the extension of Evac developed by VTT Technical Research Centre of Finland. The article shows how you can estimate the time to evacuate the object in danger using such software. Dynamically expanding field of computer simulation of evacuation process is an important element in modern fire safety engineering.

**Keywords:** safety in buildings, people evacuation, estimating the evacuation time.

SUMMARY