

## WYBRANE ASPEKTY ADAPTACYJNEGO SYSTEMU WYZNACZANIA TRAS EWAKUACYJNYCH W BUDYNKACH

### SELECTED ASPECTS OF THE ADAPTIVE ESCAPE ROUTE DESIGNATION SYSTEM FOR BUILDINGS

Cezary Specht<sup>1\*</sup>, Marta Mierzejek<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81–225 Gdynia, Wydział Nawigacyjny,  
Katedra Geodezji i Oceanografii, e-mail: c.specht@wn.am.gdynia.pl

<sup>2</sup> Poldukt Projekt, Gdynia

\* Adres do korespondencji/Corresponding author

**Streszczenie:** W artykule dokonano analizy aspektów prawnych i technicznych związanych z wyznaczaniem tras ewakuacyjnych w budynkach. Zwrócono uwagę, że trasy ewakuacyjne wyznaczone są w nich na stałe i nie uwzględniają zmiennej w czasie (pora doby, dzień tygodnia itp.) liczby osób przebywających w różnych częściach budynków, związanej zasadniczo z ich funkcjami użytkowymi. W związku z powyższym zaproponowano koncepcję adaptacyjnego systemu wyznaczania tras ewakuacyjnych w budynkach, który w czasie rzeczywistym uwzględniałby aktualne rozmieszczenie w nich osób.

**Słowa kluczowe:** trasy ewakuacyjne, system adaptacyjny, optymalizacja.

**Abstract:** The publication analyzes the legal and technical aspects of the designation of escape routes in buildings. It was noted that evacuation routes are fixed in them and do not take into account the variable in time (time of the day, day of the week, etc.) of the number of people staying in various parts of buildings, essentially related to their utility functions. Therefore, the authors proposed the concept of an adaptive escape route designation system in buildings that would in real time take into account the current location of people in them.

**Keywords:** evacuation routes, adaptive system, optimization.

## 1. WSTĘP

Od czasów, kiedy ludzie zaczęli budować budynki, katastrofy zarówno naturalne (pożary, powódzie, trzęsienia ziemi itp.), jak i te wywołane przez czynnik ludzki (zamachy terrorystyczne, zagrożenia chemiczne, wybuchy itp.) nigdy nie przestały mieć miejsca. Ich wystąpienie powoduje konieczność jak najszybszego opuszczenia obiektu [Zlatanova, Pu i Oosterom 2005]. Obecnie budynki są coraz wyższe a ich bryła bardziej złożona, co przekłada się na wielopłaszczyznowość procesu

ewakuacji [Stringfield 2000]. Ewakuację definiuje się jako proces sprawnego i efektywnego opuszczania miejsc zagrożenia [Rodriguez, Quarantelli i Dynes 2007]. Zaliczana jest ona do środków ochrony zbiorowej i polega na zorganizowanym, uporządkowanym działaniu, którego celem jest usunięcie z miejsca/strefy zagrożenia oraz ratowanie w pierwszej kolejności ludzi i zwierząt, a następnie ważnej dokumentacji czy mienia [Wisner, Gaillard i Kelman 2012].

Problematyka ewakuacji, jak wcześniej wspomniano, istnieje od bardzo dawna, jednak jej rola nie od razu była tak ważna. Znaczenie ewakuacji rosło stopniowo od XVIII wieku, by odegrać kluczową rolę w okresie II wojny światowej, podczas której miała miejsce masowa ewakuacja ludności nie tylko z budynków, ale całych zagrożonych obszarów miast [Lam 2000].

Literatura dotycząca rozważanego tematu koncentruje się na trzech zasadniczych zagadnieniach: prawno-projektowym, metodologii wyznaczania tras ewakuacyjnych oraz psychologicznym związanym z zachowaniem ludzi. Problem prawno-projektowy obejmuje ustalenie reguł związanych z projektowaniem oraz użytkowaniem budynku z możliwie jak najszybszym i bezpiecznym jego opuszczeniem [Chao i Henshaw 2001]. Powinno ono uwzględniać aspekt przepustowości zarówno wertykalnej (schody, klatki schodowe, pochylnie), jak i poziomej (korytarze, przejścia, pasáže, hole, galerie) [Buchanan i Abu 2017].

Równie istotny jest aspekt wyznaczania tras ewakuacyjnych. Najważniejszymi czynnikami, które uwzględnia się w celu stworzenia najlepszego planu ewakuacyjnego, są: całkowity czas niezbędny do opuszczenia budynku, czas rozprzestrzeniania się zagrożenia, czas reakcji osób znajdujących się w obiekcie oraz przepustowość dróg [Buchanan i Abu 2017].

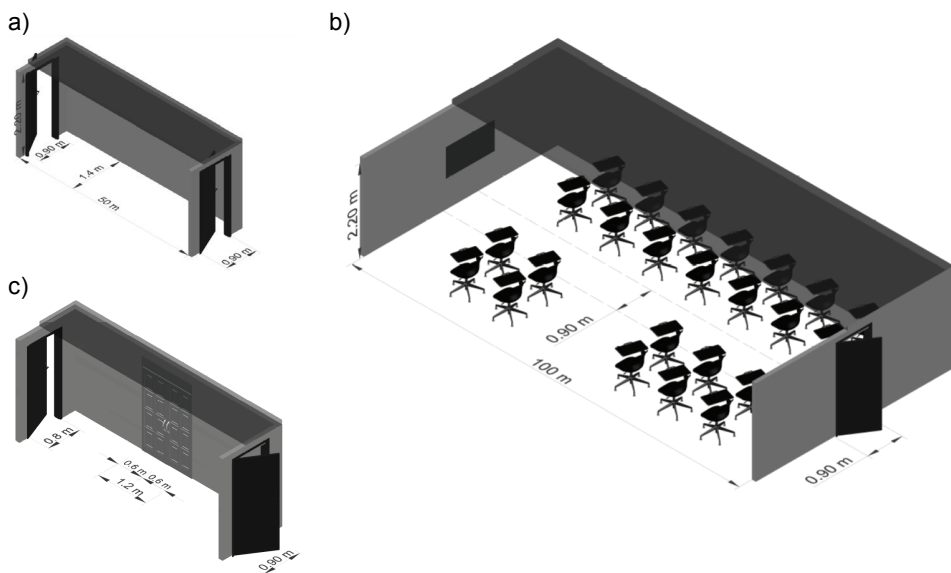
Na podstawie powyższych czynników wyróżniono trzy podstawowe rodzaje modeli: behawioralne uwzględniające zachowania ludzi w czasie ewakuacji, ruchu oraz modele szacowania jednostkowych parametrów wpływających na proces ewakuacji [Cłapa, Porowski i Dziubiński 2011]. Weryfikacją zagadnień prawno-projektowych oraz metodologii wyznaczania tras jest aspekt psychologiczny, czyli reakcja ludzi w sytuacji zagrożenia. Psychologia zachowań tłumu ma ogromny wpływ na przebieg całego procesu ewakuacji ze względu na to, że zachowanie większej zbiorowości ludzi odbiega od zachowania jednostki, która zarzuca swoje własne uczucia i myśl, by kierować się pewnymi nieznanymi jej bodźcami wywołanymi przez tłum [Le Bon 1899]. Istotne jest, aby kłaść duży nacisk na zapoznanie ludzi z zasadami ewakuacji oraz sposobem zachowania się w sytuacji zagrożenia [Proulx i Sime 1991].

## **2. UWARUNKOWANIA PRAWNO-PROJEKTOWE**

Trasy ewakuacyjne stanowią istotny element funkcjonowania budynków, w szczególności obiektów użyteczności publicznej. Kwestie wyznaczania zarówno samych tras, jak i dostosowywania obiektów do wymogów reguluje ponad 21 tysięcy

polskich aktów prawnych oraz kilka europejskich stanowiących ich uzupełnienie. Zagadnienia wyznaczania tras ewakuacyjnych w budynkach regulowane są w przepisach krajowych [Rozporządzenie MI z 12 kwietnia 2002, tj. z 17 lipca 2015; Rozporządzenie RM z 7 stycznia 2013; Wytyczne Szefa Obrony Cywilnej Kraju z 17 października 2008; Ustawa z 24 sierpnia 1991], a także międzynarodowych, które doprecyzowują wymagania techniczne systemów i instalacji mogących znaleźć się w obiekcie [Dyrektywa PEiR z 19 maja 2010] oraz osób w nim przebywających [Dyrektywa Rady z 12 czerwca 1989].

Część z wyżej wymienionych aktów poświęcona jest w całości bądź we fragmentach procesowi ewakuacji. Regulacje prawne stają się coraz bardziej uściśnione, a uregulowaniu poddanych jest coraz więcej aspektów zjawiska ewakuacji, którymi są kwestie techniczne związane z konstrukcją budynku, sposobem wyznaczania tras, sporządzania planów ewakuacyjnych organizacji i przebiegu procesu ewakuacji. Najobszerniej regulowane są kwestie dotyczące elementów, składających się na trasę ewakuacyjną, tj. drogi ewakuacyjne, przejścia ewakuacyjne oraz wyjścia ewakuacyjne.



**Rys. 1.** Wymiary: dróg ewakuacyjnych: a) przeznaczonych dla nie więcej niż 100 osób, b) przejść ewakuacyjnych, c) wyjść ewakuacyjnych

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Rozporządzenie MI z 17 lipca 2015].

**Fig. 1.** Escape routes dimensions: a) intended for no more than 100 people, b) evacuation routes, c) emergency exits

Source: own elaboration based on [RMI 17 July 2015].

Zgodnie z definicją droga ewakuacyjna (rys. 1a) są to poziome i pionowe odcinki, które należy pokonać z dowolnego miejsca w budynku do wyjścia ewakuacyjnego na otwartą przestrzeń lub do bezpiecznej strefy. W normalnych warunkach droga ewakuacyjna stanowi ciąg komunikacji ogólnej w budynku o odporności ogniowej nie mniejszej niż EI 15, do której zalicza się korytarze, hole i klatki schodowe [PN-EN ISO 7010:2012]. Zabrania się stosowania na drogach ewakuacyjnych: schodów ze stopniami zabiegowymi oraz spoczników ze schodami, a wszelkie pochylnie przeznaczone do pokonania różnicy poziomów powinny być należycie oznakowane. Dopuszcza się, aby na drodze ewakuacyjnej występowały nieotwierane naświetla powyżej 2 m od poziomu posadzki z zastrzeżeniem, że jeżeli są pomieszczenia przylegające, ich obciążenie ogniowe nie może być większe niż  $1000 \text{ MJ/m}^2$ .

Główne wymiary charakteryzujące drogę ewakuacyjną obejmują szerokość, wysokość oraz długość (rys. 1). Szerokość dróg ewakuacyjnych powinna być określana proporcjonalnie do maksymalnej liczby osób, mogących jednocześnie przebywać na danym piętrze w budynku, przyjmując 0,6 m na 100 osób, lecz minimalna szerokość powinna wynosić co najmniej 1,4 m w przypadku, gdy na danej kondygnacji przebywa powyżej 20 osób. W sytuacji, gdy dana droga ewakuacyjna będzie przeznaczona do ewakuacji do 20 osób, jej szerokość może być zmniejszona do 1,2 m. Istotne jest, aby szerokość drogi ewakuacji, na której znajdują się wyjścia ewakuacyjne, nie została zmniejszona przez skrzydła drzwi w momencie ich maksymalnego otwarcia. Wysokość minimalna dróg ewakuacyjnych powinna wynosić 2,2 m. Dopuszczane jest miejscowe obniżenie wysokości do 2 m, przy czym długość odcinka z obniżoną wysokością nie może mieć więcej niż 1,5 m. Drogi ewakuacyjne powinny być podzielone na odcinki o długości nieprzekraczającej 50 m oraz zabezpieczone dymoszczelnymi urządzeniami technicznymi. Jeżeli zastosowano inne rozwiązanie techniczno-budowlane, to wtedy konieczność podziału drogi ewakuacyjnej nie obowiązuje.

Przejście ewakuacyjne (rys. 1b) jest to droga w pomieszczeniu lub w kilku połączonych pomieszczeniach od najdalej wysuniętego miejsca, w którym może znajdować się człowiek, do wyjścia ewakuacyjnego, prowadzącego na drogę ewakuacyjną, na zewnątrz budynku bądź do innej strefy pożarowej. Przejście ewakuacyjne w strefie pożarowej o obciążeniu ogniowym powyżej  $500 \text{ MJ/m}^2$  powinno być nie dłuższe niż 75 m, natomiast w strefie o obciążeniu pożarowym poniżej  $500 \text{ MJ/m}^2$  długość przejścia może wynosić do 100 m. Jeżeli dwie wyżej wymienione strefy dodatkowo zagrożone są wybuchem, to długość przejścia nie powinna przekraczać 40 m.

Długości dróg, o których mowa, przy obciążeniu ogniowym mogą być zwiększone odpowiednio o 25 lub 50% w przypadku, gdy wysokość wynosi więcej niż 5 m lub zamontowano samoczynne urządzenia gaśnicze bądź oddymiające. Przejście ewakuacyjne może prowadzić przez maksymalnie trzy pomieszczenia, jednak ich długości podlegają sumowaniu.

Równie istotna w porównaniu z długością przejścia ewakuacyjnego jest jego szerokość w zależności od liczby osób przebywających w pomieszczeniu. Przyjmuje się 0,6 m na każde 100 osób, lecz nie mniej niż 0,9 m, chyba że w pomieszczeniu przebywają maksymalnie trzy osoby, to szerokość może zostać zmniejszona do 0,8 m [Rozporządzenie MI z 17 lipca 2015].

Wyjście ewakuacyjne (rys. 1c) stanowi zaprojektowane na potrzeby ewakuacji wyjście z budynku, umożliwiające jego sprawne opuszczenie w przypadku wystąpienia sytuacji zagrożenia na otwartą przestrzeń bądź do bezpiecznej strefy pożarowej [Chao i Henshaw 2001]. Wyjścia ewakuacyjne, ich liczba oraz wymiary zależą od wielu czynników, takich jak: powierzchnia pomieszczenia, obciążenie ogniowe, maksymalna liczba osób przebywających jednocześnie w pomieszczeniu oraz rodzaj zastosowanych drzwi. Co najmniej dwa wyjścia ewakuacyjne, które są oddalone od siebie o minimum 5 m, powinny posiadać każde pomieszczenia, które spełniają chociażby jeden z następujących warunków: obciążenie ogniowe powyżej  $500 \text{ MJ/m}^2$  i powierzchnia pomieszczenia przekraczająca  $300 \text{ m}^2$ , obciążenie ogniowe do  $500 \text{ MJ/m}^2$  i powierzchnia pomieszczenia przekraczająca  $1000 \text{ m}^2$ , pomieszczenie przeznaczone do jednoczesnego przebywania co najmniej 30 osób, zagrożenie wybuchem i powierzchnia do  $100 \text{ m}^2$ .

Wymiary drzwi ewakuacyjnych ich wysokość oraz wysokość progów są stałe, natomiast szerokość zmienia się w zależności od rodzaju pomieszczenia oraz jego przeznaczenia. Wysokość drzwi ewakuacyjnych powinna wynosić co najmniej 2 m, a wysokość progu nie powinna przekraczać 0,02 m. Szerokość drzwi ewakuacyjnych jednoskrzydłowych w świetle powinna wynosić 0,6 m na każde 100 osób, lecz nie może być mniejsza niż 0,9 m, chyba że w pomieszczeniu przebywa do trzech osób, wtedy rozmiar może być pomniejszony o 0,1 m i wynosić 0,8 m. W przypadku, gdy stosowane są drzwi dwuskrzydłowe, to szerokość skrzydła powinna wynosić minimalnie 0,6 m, a całe drzwi powinny mieć minimalną szerokość 1,2 m w świetle ościeżnicy, przy czym istotne jest, aby skrzydła drzwi były tej samej szerokości. Bardzo istotne jest, aby drzwi ewakuacyjne otwierały się na zewnątrz budynków i były to drzwi skrzydłowe bądź rozsuwane, które nie mają możliwości blokowania. Zabrania się stosowania drzwi obrotowych i podnoszonych do celów ewakuacyjnych [Rozporządzenie MI z 17 lipca 2015].

Przedstawione powyżej elementy tworzą trasę ewakuacyjną (rys. 2). Są one jednymi z wielu składowych, umożliwiających sprawne przeprowadzenie ewakuacji.

Istotnym aspektem jest to, że obiekty będące zabytkami nie podlegają tym szczegółowym wytycznym (w przeciwieństwie do obiektów nowo powstających). Na podkreślenie zasługuje również kwestia pominięcia uregulowań dotyczących szczegółowych wymiarów znaków i możliwych odchyłeń oraz podstawowych kroków tworzenia planów ewakuacyjnych w ustawach i rozporządzeniach. W wymienionych aktach znajdują się jedynie odniesienia do innych dokumentów, jakimi są Polskie Normy.



zachowania ludzkie, takie jak: prędkość poruszania się, czas reakcji, znajomość tras ewakuacyjnych czy geometrii budynku.

Modele szacowania jednostkowych parametrów są najprostszymi modelami, które w swych założeniach uwzględniają jeden wybrany parametr, np. przepustowość drzwi ewakuacyjnych.

Każda z grup modeli opiera się na innych parametrach i dopiero kompleksowa ich analiza pozwala na uzyskanie wiarygodnych wyników, pozwalających na wyznaczenie optymalnej trasy [Kuligowski i Peacock 2005].

Cechą wspólną wszystkich modeli jest próba określenia czasu ewakuacji osób z miejsca początkowego przebywania do całkowitego opuszczenia przez nie budynku oraz wybór najbardziej optymalnych, powstałych w wyniku zastosowania modeli, tras ewakuacyjnych. Niektóre z algorytmów mogą być stosowane we wszystkich rodzajach budynków, inne zaś tylko w obiektach posiadających odpowiednie cechy czy charakterystyki (wysokość, przeznaczenie, rozkład pomieszczeń itp.).

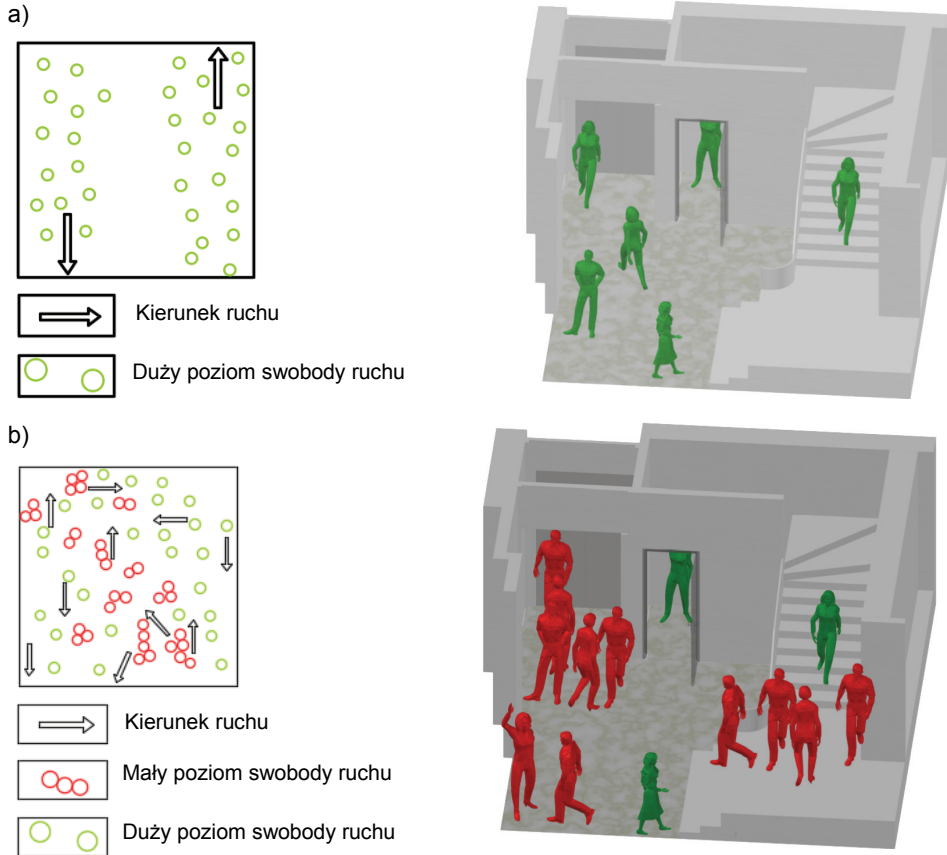
Równie zróżnicowany jest sposób postrzegania osób w budynku oraz uwzględniania sposobu ich zachowania. Model indywidualny zakłada, że każda osoba podejmuje samodzielnie decyzje dotyczące ewakuacji, natomiast w postrzeganiu globalnym grupa dokładnie wie, którą trasą ma opuścić budynek, do którego wyjścia ma się udać oraz dobrze zna geometrię budynku.

Przy uwzględnianiu zachowania ludzi w budynkach bardzo ważny jest sposób, w jaki się przemieszczają. Ruch laminarny charakteryzuje się płynnością oraz brakiem zakłóceń. Tłum porusza się stosunkowo wolno lub z umiarkowaną prędkością nieprzekraczającą 5,4 km/h, jednostki nie zbliżają się do siebie i przeszkód architektonicznych, dążąc bezpośrednio do celu najkrótszą możliwą trasą, unikają stłoczeń, wzajemnego popychania się oraz stosowania siły. Przeciwnostwem ruchu laminarnego jest ruch turbulentny, charakteryzujący się brakiem płynności i licznymi zakłóceniami (rys. 3). Tłum porusza się z maksymalnymi, możliwymi do rozwinięcia w danej sytuacji prędkościami, jednostki zderzają się ze sobą lub z elementami architektonicznymi, pojawiają się elementy przemocy, walki o dostęp do schodów, wind czy drzwi ewakuacyjnych [Kosiński i Grabowski 2013; Le Bon 1899].

Główne modele, na których oparte są tego typu systemy, dają podstawy do wyznaczenia najbardziej optymalnych tras ewakuacyjnych w zdefiniowanych warunkach oraz realizacji opuszczenia obiektu w przypadku wystąpienia zagrożenia. Mimo że modele pozwalają wyznaczyć trasy ewakuacyjne, ich słabością jest niezdolność do zmiany tras w sytuacji gdy pojawią się dodatkowe zakłócenia.

Zachowania ludzi podczas procesu ewakuacji uzależnione są od wielu czynników, m.in. od stopnia znajomości budynku i umiejętności poruszania się po nim, właściwego interpretowania sygnałów ewakuacyjnych oraz liczby osób znajdujących się w obiekcie. W pierwszym etapie od momentu przekazania informacji o konieczności ewakuacji, każda z jednostek z osobna próbuje się dowiedzieć,

co jest przyczyną ewakuacji, co się stało, czy konieczna jest ewakuacja? Próba uzyskania odpowiedzi na powyższe pytania powoduje początkową dezorientację, a w kolejnym etapie może nawet skutkować niepożądaną paniką. Jak pokazują badania, istotne jest precyzyjne informowanie osób przebywających w miejscu zagrożenia. Wtedy osoby ewakuowane stają się bardziej ufne i podatne na sugestie kierującego ewakuacją, przyspieszając tym samym proces opuszczenia obiektu [Benthorn i Frantzych 1999].



**Rys. 3.** Modele ruchu osób podczas ewakuacji: a) niezakłócony, b) zakłócony

Źródło: opracowanie własne.

**Fig. 3.** Movement patterns of people during the evacuation: a) not disturbed, b) disturbed  
Source: own elaboration.

Wszelkie niepożądane zachowania zbiorowości ludzkiej możliwe są do wyeliminowania za pomocą odpowiednich systemów dokładnie informujących o: zagrożeniu oraz jego lokalizacji, adaptacyjnej zmianie trasy ewakuacji, odpo-



wiednim jej oznakowaniu, zastosowaniu właściwych modeli służących do wyznaczenia tras ewakuacyjnych, dokładnie stworzonym planie ewakuacyjnym, licznych ćwiczeniach służących poprawnemu rozumieniu sygnałów informacji oraz wyrobieniu bezpiecznego nawyku, jakim jest bezpośrednie i spokojne opuszczenie pomieszczenia, a następnie całego obiektu. Aby jednostka potrafiła w minimalnym stopniu zapanować nad instynktami, powinno się przeprowadzać ćwiczenia, których celem jest oswojenie ludzi z daną hipotetyczną sytuacją, oraz pokazanie, jak należy się zachować.

Nie tylko ćwiczenia utrwalające schematy zachowań mają wpływ na postępowanie tłumu, równie istotne są słowa, formułki i obrazy, które działają na tłum uspokajająco. Znaki ewakuacyjne powinny być możliwe jak najbardziej proste w swym przekazie oraz nie powinny zawierać symboli wieloznacznych. Podobna zasada dotycząca prostoty przekazu powinna być zachowana przy wszelkiego rodzaju komunikatach. Panikujący tłum nie będzie w stanie zrozumieć sensu długiego, wielokrotnie złożonego zdania, dlatego przy próbie zapanowania nad tłumem i pokierowania nim ważne jest stosowanie krótkich zdań oznajmujących [Le Bon 1899; Proulx i Sime 1991].

Ostatnią z ważnych cech charakteryzujących modele ewakuacji jest sposób rozprzestrzeniania się zagrożenia oraz jego pochodnych. Do czynników definiujących tę cechę należy zaliczyć: odporność ogniową, cieplną, szczelność elementów oraz wytrzymałość konstrukcyjną.

#### **4. WSTĘPNE ZAŁOŻENIA DLA ADAPTACYJNEGO SYSTEMU EWAKUACJI Z BUDYNKU**

Pomimo bardzo rozległej literatury przedmiotu, związanej z normami prawnymi, metodyka wyznaczania tras ewakuacyjnych w budynkach nie uwzględnia problemu zmienności czasowej przebywania osób w różnych częściach obiektu oraz lokalizacji miejsca zagrożenia. Równie istotny jest problem optymalizacji wielokryterialnej wyznaczania dróg opuszczenia obiektu. W przypadku konstrukcji wysmukłych (np. wieżowce) zagadnienie optymalizacyjne nie jest aż tak istotne, natomiast podnoszony problem dotyczy przede wszystkim obiektów wielkopowierzchniowych (centrów handlowych, budynków użyteczności publicznej) o złożonej użyteczności. Z tego względu przywołane wcześniej różne aspekty ewakuacji osób z budynków nie wyczerpują tego niełatwego problemu. Należy zauważyć, iż przedstawione powyżej reguły posiadają następujące główne ograniczenia:

1. Trasy ewakuacyjne w budynkach wyznaczone są na stałe, nie biorąc pod uwagę różnego rodzaju przeznaczenia poszczególnych pomieszczeń.
2. Wyznaczone trasy nie uwzględniają aktualnego rozkładu przebywania osób w obiekcie, jak również zmienności czasowej ich rozmieszczenia.

3. W przypadku zaistnienia zagrożenia wewnątrz budynku rozkład tras ewakuacyjnych nie ulega zmianie, przez co mogą one prowadzić osoby ewakuujące się wprost na zagrożenie występujące w obiekcie (pożar, katastrofa budowlana części obiektu itp.).
4. Metodyka wyznaczania tras opiera się na spełnieniu minimalnych (prawnie akceptowalnych) wskaźników przepustowości związanych z przepisami prawa, nie mając jednocześnie cech procesu o charakterze dynamicznej zmienności.

Biorąc pod uwagę powyższe spostrzeżenia należy uznać, że aktualny sposób ewakuacji ludzi z obiektów jest rozwiązaniem sprawnym (w sensie prawnym), lecz zapewne pozwala na jego istotną optymalizację. Z tego względu zasadne wydaje się rozważenie systemu adaptacyjnego. Jego najistotniejszą cechą byłaby zdolność do zmian kierunków dróg ewakuacyjnych w obiekcie, zarówno w funkcji czasu, jak i lokalizacji ewentualnego zagrożenia wewnątrz budynku. Taki system charakteryzowałby się następującymi cechami:

- 1) Uwzględnienie aktualnego rozmieszczenia osób w obiekcie, co oznacza, że:
  - w przypadku szkoły lub uczelni system brałby pod uwagę tygodniowy rozkład zajęć uczniów (studentów), liczbę osób w poszczególnych grupach dydaktycznych, jak również pojemności sal, w których odbywają się zajęcia,
  - w przypadku wielkogabarytowych obiektów użyteczności publicznej, jak np. galerie handlowe, system powinien uwzględniać rodzaje i lokalizację oferowanych w nim usług (np. część gastronomiczna czy handlowa) oraz liczbę osób przebywających w nich o określonej porze. Powinien uwzględniać, że w godzinach: 13.00–15.00 w części gastronomicznej występuje duże natężenie osób czy też że w godzinach porannych liczba przebywających osób jest mniejsza niż w południowych czy popołudniowych.
- 2) Wzięcie pod uwagę rozmieszczenia osób w obiekcie w zróżnicowaniu na dni robocze, gdzie sposób wykorzystania jest odmienny.
- 3) Umożliwienie operatorowi wprowadzenia lokalizacji miejsca (obszaru) zagrożenia, przez co miałby możliwość redefiniowania tras ewakuacyjnych.
- 4) Wyznaczanie tras w zależności od cech architektonicznych obiektu w sposób optymalny, co oznacza stosowanie różnych matematycznych modeli ewakuacyjnych.

Celem weryfikacji i potwierdzenia tezy, że plany ewakuacyjne tworzone są na podstawie minimalnych wymagań, bardzo często nieoptymalnych nawet dla planów statycznych, przeanalizowano fragment istniejącego planu ewakuacyjnego budynku Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni.

Gmach Wydziału Nawigacyjnego stanowi obiekt o zróżnicowanej bryle, pięciopiętrowy, sześciokondygnacyjny z częściowym podpiwniczeniem. W jego wnętrzach znajdują się pomieszczenia dydaktyczne, audytoryjne, administracyjne oraz oddzielne pomieszczenia, tworzące część basenową. Składa się z dwóch segmentów: gmachu głównego o powierzchni 9571,00 m<sup>2</sup> oraz planetarium

o powierzchni 233,40 m<sup>2</sup>, które razem tworzą budynek o łącznej powierzchni użytkowej 9804,40 m<sup>2</sup> [KOB 2005]. Za tworzenie, nadzorowanie i aktualizowanie planów ewakuacyjnych, a tym samym tras ewakuacyjnych w budynku Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni, odpowiedzialna jest administracja budynku.

Istniejące trasy ewakuacyjne wyznaczone w budynku w większości prowadzą do głównych wyjść z obiektu. Taka sytuacja powoduje znaczne zwiększenie odległości do wyjścia ewakuacyjnego z sal dydaktycznych znajdujących się w głębi budynku, a także powoduje kongestie przy wyjściu, co znacznie wydłuża proces ewakuacji. Uwzględniając inne wejścia/wyjścia do budynku, niebędące wejściami głównymi a spełniające wymogi wyjść ewakuacyjnych, można znacznie skrócić czas ewakuacji oraz zmniejszyć odległość od wyjścia.

Jednym z podstawowych modeli, który m.in. wykorzystano przy analizie planu, jest model Kikuji-Togawy, odnoszący się bezpośrednio do danych technicznych oraz empirycznych. Jest to jednak model pomijający zachowania ludzkie, które mają znaczący wpływ na czas trwania oraz organizację ewakuacji. Pomimo to jest on bardzo przydatny w określeniu przybliżonych, minimalnych czasów trwania ewakuacji [Cłapa, Porowski i Dziubiński 2011]. Wzór na obliczenie niezbędnego czasu ewakuacji według założeń modelu Kikuji-Togawy przyjmuje postać:

$$t_e = \frac{N_a}{B' \cdot N'} + \frac{k_s}{v}$$

gdzie:

$t_e$  – czas niezbędny do ewakuacji [s],

$N_a$  – całkowita liczba ewakuowanych ludzi [os.],

$N'$  – liczba osób ewakuujących się przez konkretne drzwi [os./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].

Na podstawie powyższego wzoru wyznaczono nowe trasy ewakuacyjne w budynku, które w porównaniu z istniejącymi znacznie skracają czas trwania ewakuacji. Wyniki analizy zaprezentowano w tabeli 1.

Do modelowania tras ewakuacyjnych w budynkach zasadne jest zastosowanie modelowania 3D obiektów, gdzie dane pozyskiwane mogą być z wykorzystaniem różnych metod. Są nimi: inwentaryzacja geodezyjna, wykorzystanie dokumentacji technicznej [Specht, Deniziuk i Kamiński 2014] czy fotogrametria lub skaning laserowy [Specht i in. 2016], przy wykorzystaniu wielu dostępnych dziś programów komputerowych [Oszczak i in. 2011].

**Tabela 1.** Zestawienie czasów niezbędnych do ewakuacji w przypadku istniejących oraz koncepcyjnych tras ewakuacyjnych

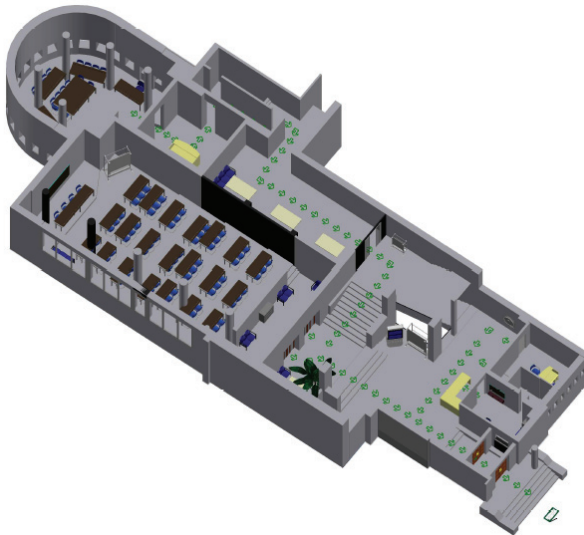
**Table 1.** Summary of the necessary evacuation times for existing and concept evacuation routes

Przypadek	Najdalej oddzielone pomieszczenie	Czas ewakuacji	Odległość od wyjścia ewakuacyjnego [m]	Liczba ewakuowanych osób – drzwi główne [os.]
Istniejące trasy ewakuacyjne	Symulator statecznościowy	48,75	57,03	182
Trasy wytyczone z pomocą modelu Kikuji-Togawy	Sala Rady Wydziału	35,78	40,80	125

Źródło: opracowanie własne.  
Source: own elaboration.

W przypadku analiz, dotyczących budynku Wydziału Nawigacyjnego, posłużono się programem typu CAD. Oprogramowanie tego typu pozwala na tworzenie planów w płaszczyźnie dwuwymiarowej, by w kolejnym etapie móc przekształcić je w modele 3D rzeczywistych oraz planowanych obiektów lub ich elementów [Ju i in. 2005].

Na rysunku 4 zaprezentowano istniejący schemat tras ewakuacyjnych parteru budynku Wydziału wykonany tą metodą.



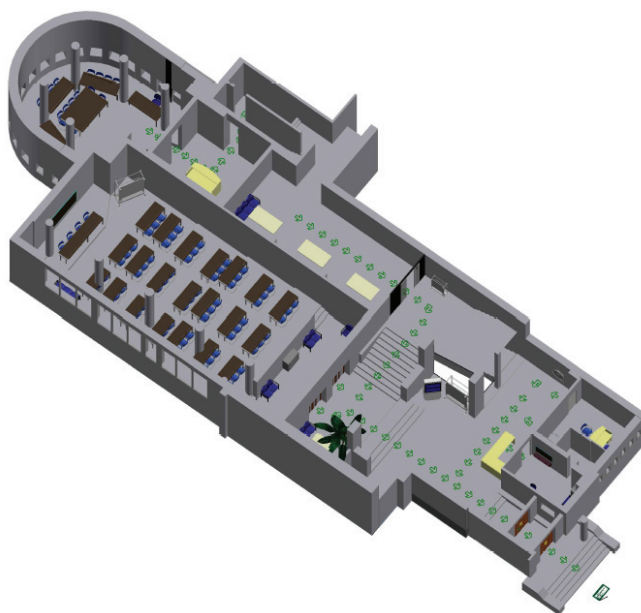
**Rys. 4.** Schemat istniejących tras ewakuacyjnych

Źródło: opracowanie własne.

**Fig. 4.** Scheme of existing escape routes

Source: own elaboration.

Po porównaniu istniejącego planu ewakuacyjnego fragmentu parteru budynku z planem przebiegu tras ewakuacyjnych, wyznaczonych na podstawie modelu Kikuji-Togawy, stwierdzono, że w normalnych warunkach w budynku Wydziału Nawigacyjnego korzystnym rozwiązaniem byłaby zmiana tras ewakuacyjnych, a tym samym odciążenie głównych drzwi prowadzących do/z budynku. Zmiana ta (rys. 5) spowodowałaby skrócenie czasu ewakuacji o ponad 10 sekund. Jest to jednak zmiana nieuwzględniająca zmiennej liczby osób w budynkach, a jedynie oparta na stałej zmianie tras i stworzeniu nowego statycznego planu ewakuacyjnego.



**Rys. 5.** Schemat koncepcyjnych tras ewakuacyjnych, stworzony na podstawie założeń modelu Kikuji-Togawy

*Źródło: opracowanie własne.*

**Fig. 5.** Scheme of concept escape routes based on guidelines of Kikuji-Togawa model  
*Source: own elaboration.*

Kolejnym etapem badań będzie modelowanie matematyczne systemu ewakuacji, które w sposób optymalny redefiniowałoby trasy [Pyuakurel i Ghamala 2015; Lim i in. 2012; Zhou i in. 2010]. Jednakże to zagadnienie poruszone zostanie w kolejnych publikacjach.

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia, regulujące proces ewakuacji ludzi z budynków. Dokonując ich analizy, wskazano na istotne mankamenty aktualnych rozwiązań, którymi są: niezmiennosc tras ewakuacyjnych w obiektach, brak związku pomiędzy przebiegiem tras a aktualnym rozmieszczeniem ludzi w budynku, jak również nieuwzględnienie możliwości pojawienia się w budynku zagrożenia wykluczającego wykorzystanie określonej trasy. Ponadto w publikacji przedstawiono analizę tras ewakuacyjnych na przykładzie budynku Wydziału Nawigacyjnego AM Gdynia oraz zaproponowano wstępne założenia dla systemu wyznaczania tras ewakuacyjnych, mającego zdolności adaptacji do aktualnego rozmieszczenia ludzi w budynku, realizującego ten proces w czasie rzeczywistym, jak również uwzględniającego lokalizację ewentualnego zagrożenia w obiekcie.

## LITERATURA

- Benthorn, L., Frantzych, H., 1999, *Fire Alarm in a Public Building: How do People Evaluate Information and Choose Evacuation Exit?* Fire and Materials, Fire Mater, vol. 23, Lond, s. 311–315.
- Buchanan, A.H, Abu, A.K., 2017, *Structural Design for Fire Safety*, Wiley.
- Cepolina, E., 2005, *A Methodology for Defining Building Evacuation Routes*, Civil Engineering and Environmental Systems, vol. 22, s. 29–47.
- Chao, E.L., Henshaw, J.L., 2001, *How to Plan for Workplace Emergencies and Evacuations*, U.S. Department of Labor Occupational Safety and Health Administration, Washington DC.
- Cłapa, I., Porowski, R., Dziubiński, M., 2011, *Wybrane modele obliczeniowe czasów ewakuacji*, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, 2011, nr 4, Józefów.
- DPEiR, 2010, Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.
- DR, 1989, Dyrektywa Rady 89/391/EWG z dnia 12 czerwca 1989 r. w sprawie wprowadzenia środków w celu poprawy bezpieczeństwa i zdrowia pracowników w miejscu pracy.
- Ju, T., Warren, J., Carson, J., Eichele, G., Thaller, C., Chiu, W., Bello, M., Kakadiaris, I., 2005, *Building 3D Surface Networks from 2D Curve Networks with Application to Anatomical Modeling*, Springer-Verlag.
- KOB, 2005, *Książka obiektu budowlanego założona w 2005*.
- Kosiński, R., Grabowski, A., 2013, *Matematyczne modelowanie i badania symulacyjne zachowania się ludzi podczas ewakuacji z budynków*, Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka, nr 1, s. 20–25.
- Kuligowski, E., Peacock, R., 2005, *A Review of Building Evacuation Models*, Technical Note 1471, U.S., Government Printing Office, Washington.
- Lam, D.M., 2000, *Medical Evacuation, History and Development – the Future in the Multinational Environment*, NATO Research and Technology Organisation in Kiev, Ukraine.
- Le Bon, G., 1899, *Psychologia tłumy*, Księgarnia H. Altenberga, Lwów – Warszawa.

- Lim, G.J., Zangeneh, S., Baharnemati, M.R., Assavapokee, T., 2012, *A Capacitated Network Flow Optimization Approach for Short Notice Evacuation Planning*, European Journal of Operational Research, vol. 223, no. 1, s. 234–245.
- Oszczak, B., Tanajewski, D., Harmaciński, A., Klimczuk, M., 2011, *Modelowanie trójwymiarowe budynków lotniska Dajtki-Olsztyn w aplikacjach AutoCAD Civil 3D i Google SketchUp*, Roczniki Geomatyki, t. IX, nr 4(48), s. 129–137.
- PN-EN ISO 7010:2012, *Symbole graficzne. Barwy bezpieczeństwa i znaki bezpieczeństwa – definicje*.
- Proulx, G., Sime, J.D., 1991, *To Prevent 'Panic' in an Underground Emergency: Why not Tell People the Truth?* Fire Safety Science-Proceedings of the Third International Symposium, Elsevier Applied Science, London.
- Pyuakurel, U., Ghamala, T.N., 2015, *Models and Algorithms on Contraflow Evacuation Planning Network Problems*, International Journal of Operational Research, June.
- Rodriguez, H., Quarantelli, E.L., Dynes, R., 2007, *Handbook of Disaster Research*, Springer-Verlag, New York.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z 12 kwietnia 2002 r. (DzU nr 75, poz. 690), tj. z 17 lipca 2015 r. (DzU 2015, poz. 1422).
- Rozporządzenie Rady Ministrów z 7 stycznia 2013 r. w sprawie systemów wykrywania skażeń i powiadamiania o ich wystąpieniu oraz właściwości organów w tych sprawach (DzU 2013, poz. 96).
- Specht, C., Deniziuk, M., Kamiński, M., 2014, *Wykorzystanie oprogramowania SketchUp jako narzędzia do tworzenia modeli 3D obiektów na potrzeby symulatorów mostka nawigacyjnego*, Prace Wydziału Nawigacyjnego Akademii Morskiej w Gdyni, nr 29, s. 46–54.
- Specht, C., Dąbrowski, P., Dumalski, A., Hejbudzka, K., 2016, *Modeling 3D Objects for Navigation Purposes Using Laser Scanning*, Transnav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, vol. 10, no 2, s. 301–306.
- Stringfield, W.H., 2000, *Emergency Planning and Management: Ensuring Your Company's Survival in the Event of a Disaster*, Md.: Government Institutes, Rockville.
- Ustawa z 24 sierpnia 1991 r. o ochronie przeciwpożarowej (DzU, 1991, nr 81, poz. 351).
- Wisner, B., Gaillard, J.C., Kelman, I., 2012, *Handbook of Hazards and Disaster Risk Reduction*, Routledge.
- Wytyczne Szefa Obrony Cywilnej Kraju z 17 października 2008 r. w sprawie zasad ewakuacji ludności, zwierząt i mienia na wypadek masowego zagrożenia.
- Zlatanova, S., Pu, S., Oosterom, P., 2005, *Geo-information for Disaster Management – Evacuation Route Calculation of Inner Buildings*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg, s. 1143–1161.
- Zhou, X., George, B., Kim, S., Wolff, J.M.R., Lu, Q., Shekhar, S., 2010, *Evacuation Planning: A Spatial Network Database Approach*, Bulletin of the IEEE Computer Society Technical Committee on Data Engineering, s. 1–6.