

st. kpt. mgr inż. Mariusz Barański¹⁾
 ORCID: 0000-0002-2217-6539
 dr hab. inż. Dorota Brzezińska^{1)*}
 ORCID: 0000-0003-4615-4454
 mgr Agnieszka Haznar-Barańska²⁾
 ORCID: 0000-0001-7648-509X

Wpływ lokalizacji pożaru na kierunki ewakuacji ludzi z budynku

The impact of the fire location on the directions of evacuation of people from the building

DOI: 10.15199/33.2022.07.01

Streszczenie. Wystąpienie zagrożenia pożarem w budynku determinuje konieczność przeprowadzenia szybkiego i bezpiecznego procesu ewakuacji. Rozwój inżynierii bezpieczeństwa pożarowego stopniowo prowadzi do wypracowania rozwiązań służących kierowaniu procesem ewakuacji w zależności od lokalizacji zagrożenia. Artykuł prezentuje nowy model pozwalający określać kierunki ewakuacji ludzi w zależności od lokalizacji zagrożenia. Badania wykazały możliwość wykorzystania modelu do tworzenia matryc sterowania dynamicznym oświetleniem ewakuacyjnym.

Słowa kluczowe: scenariusze ewakuacji; modelowanie procesu ewakuacji; dynamiczne oświetlenie ewakuacyjne.

Abstract. The occurrence of a threat or fire in a building determines the necessity to carry out a quick and safe evacuation process. The development of fire safety engineering gradually leads to the development of solutions for managing the evacuation process depending on the location of the hazard. The article presents a new model that allows to determine the directions of evacuation of people depending on the location of the threat. The research showed the possibility of using the model to create control matrices for dynamic evacuation lighting.

Keywords: evacuation scenarios; evacuation process modeling; dynamic evacuation lighting.

W przypadku pożaru bezpieczeństwo ludzi w budynkach zależy m.in. od jednoznacznego, czytelnego i zrozumiałego oznakowania dróg ewakuacyjnych. Problemy związane z kierowaniem procesem ewakuacji były przedmiotem wielu publikacji [1÷5]. Obecne w wielu krajach na świecie normy prawne regulują jedynie statyczne oznakowanie dróg ewakuacyjnych [6]. Występowanie w budynku co najmniej dwóch kierunków ewakuacji pozwala na odpowiednie, dynamiczne kierowanie jej przebiegiem. Badania nad dynamicznym oświetleniem ewakuacyjnym prowadzone są z wykorzystaniem różnorodnych narzędzi inżynierskich, m.in. wirtualnej rzeczywistości [6], teorii grafów i analizy ryzyka [7, 8]. Dynamiczne systemy oświetlenia ewakuacyjnego są dobrze odbierane przez ludzi [9, 10]. Ponadto kierowanie procesem ewakuacji przy użyciu dynamicznego oświetlenia ewakuacyjnego jest możliwe nawet w trakcie trwania pożaru.

Oznakowanie dynamiczne przekazuje nie tylko informacje o kierunkach ewakuacji, ale także o ich zmianie w czasie, w zależności od rozmieszczenia ludzi i rozwoju zdarzeń podczas procesu ewakuacji [11]. Praktyczne zastosowanie tego typu rozwiązań w obiekcie ograniczone jest jednak przez brak uregulowań formalnoprawnych.

Artykuł prezentuje technikę określania optymalnych kierunków ewakuacji oraz wyznaczania dróg ewakuacyjnych w sytuacji wystąpienia zagrożenia oraz tworzenia matrycy sterowania poszczególnymi elementami adaptacyjnego (dynamicznego) oświetlenia ewakuacyjnego. Wnioski z przeprowadzonych ba-

dań przyczynią się do opracowania scenariuszy ewakuacji minimalizujących narażenie ludzi na oddziaływanie pożaru, co w przyszłości może posłużyć do stworzenia nowych standardów i rozszerzenia obecnych uregulowań prawnych.

Uregulowania formalnoprawne

Ewakuacja ludzi z budynku jest podstawowym działaniem mającym na celu ratowanie ich życia i zdrowia w przypadku zagrożenia wystąpieniem pożaru [12]. Obowiązek zapewnienia bezpieczeństwa i możliwości ewakuacji z budynków uregulowany jest w polskich przepisach prawnych [13, 14, 15].

Podstawowym elementem organizacji ewakuacji z budynków jest **oznakowanie i oświetlenie dróg ewakuacyjnych**. Wyposażenie budynku w znaki ewakuacyjne powinno uwzględniać wymagania obowiązujących Polskich Norm z tej dziedziny. Obecny stan formalnoprawny pozwala na zastosowanie oznakowania przeciwpożarowego i oznakowania ewakuacyjnego zgodnego z normami [16, 17, 18].

Istnieją również wytyczne odzwierciedlające wymagania Polskich Norm dotyczących zarówno oznakowania dróg ewakuacyjnych, jak i ich oświetlenia. Do tych wytycznych należy zaliczyć [19, 20, 21]. Wytyczne CNBOP-PIB W-0005:2019 [19] mają na celu wyłącznie sprecyzowanie i ujednolicenie sposobu znakowania oraz rozmieszczania znaków bezpieczeństwa zgodnych z PN-EN ISO 7010 [18]. Z kolei wytyczne [20] bardzo ogólnie określają wymagania dotyczące awaryjnego dynamicznego sterowania oświetleniem znaków ewakuacyjnych (ADSOZE). Ze względu na możliwość połączenia oświetlenia awaryjnego z oznakowaniem ewakuacyjnym niejednokrotnie stosuje się je łącznie.

¹⁾ Politechnika Łódzka; Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

²⁾ Zarząd Dróg Miejskich i Zieleni w Oławie

* Adres do korespondencji: dorota.brzezińska@p.lodz.pl

Projektując, realizując i oddając do użytkowania obiekt budowlany, należy spełnić wymagania obowiązujących przepisów, w tym zapewnić możliwość ewakuacji ludzi lub ich ratowania w inny sposób [22]. Jednym z elementów jest prawidłowe oznakowanie dróg ewakuacyjnych. **Obowiązek oznakowania dotyczy dróg i wyjść ewakuacyjnych z budynku oraz wyjść ewakuacyjnych z pomieszczeń, w których zgodnie z przepisami techniczno-budowlanymi są wymagane co najmniej 2 wyjścia ewakuacyjne [15].**

Poradnik projektowania przestrzeni w budynkach biurowych [21] ma na celu uporządkowanie zagadnień ochrony przeciwpożarowej, przede wszystkim warunków ewakuacji. W związku z brakiem wymagań formalnoprawnych, **stosowanie dynamicznego oświetlenia ewakuacyjnego w budynku jest dobrowolne**, a urządzenia te muszą przede wszystkim spełniać wymagania obowiązujące w przypadku statycznego oznakowania budynku.

Koncepcja określania optymalnych kierunków ewakuacji

Zaproponowany nowy model matematyczny, służący do optymalizacji kierunków ewakuacji ludzi z budynku, opracowany został z wykorzystaniem elementów automatów komórkowych [23]. Uwzględnia on lokalizację, zasięg zagrożenia i ukierunkowuje przebieg ewakuacji z pominięciem miejsc o największym oddziaływaniu źródła pożaru. Powierzchnię obiektu reprezentuje siatka kartezjańska o wymiarach pojedynczej komórki 0,5 x 0,5 m [24]. W modelu wykorzystuje się trzy siatki (warstwy) [23]. Warstwa bazowa określa lokalizację przeszkód, przestrzeni przeznaczonych do ruchu ludzi oraz wyjść ewakuacyjnych. Na podstawie tak przygotowanej warstwy tworzone są kolejne jej modyfikacje pozwalające na określenie optymalnych kierunków ewakuacji.

Pierwsza warstwa reprezentuje Pole Statyczne długości drogi ewakuacyjnej (PS) i przedstawia ogólny model geometryczny analizowanego budynku. Każda komórka znajdująca się w miejscach przeszkód ma wartość ujemną wynoszącą **-1.0**. Wyjścia ewakuacyjne reprezentowane są wartością **0.0**. Każda komórka siatki reprezentująca przestrzeń dostępną dla użytkowników ma wartość równą odległości od najbliższego wyjścia ewakuacyjnego, np. komórki zlokalizowane w ścisłym sąsiedztwie wyjść ewakuacyjnych prostopadle lub równoległe do wyjścia mają wartość **1.0**, natomiast komórki znajdujące się po przekątnych wartość **1.4** (rysunek 1). Sposób określania odległości poszczególnych komórek prezentowany jest obszernie w [25].

Drugą warstwę tworzy się w celu zobrazowania możliwości rozprzestrzeniania się powstałego zagrożenia w obiekcie. Warstwa ta określana jest w artykule jako **Pole oddziaływania Pożaru (PP)**. Siatka kartezjańska o jednolitej rozdzielczości wynoszącej 0,5 x 0,5 m wypełniona jest wartościami **-1.0** dla odwzorowania przeszkód. Komórka przestrzeni, która odzwierciedla lokalizację powstania pożaru, przyjmuje wartość **0.0** – ognisko pożaru. Każda komórka siatki reprezentująca przestrzeń dostępną dla rozprzestrzeniającego się pożaru ma wartość równą odległości tej komórki od ogniska pożaru (rysunek 2). Następnym krokiem jest odwrócenie wartości

-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
-1.0	4.4	4.8	5.2	5.6	6.6	7.6	7.2	6.8	6.4	-1.0
-1.0	3.4	3.8	4.2	5.2	6.2	6.6	6.2	5.8	5.4	-1.0
-1.0	2.4	2.8	3.8	4.8	5.8	5.6	5.2	4.8	4.4	-1.0
-1.0	1.4	2.4	3.4	4.4	5.4	5.2	4.2	3.8	3.4	-1.0
0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	4.8	3.8	2.8	2.4	-1.0
-1.0	1.4	2.4	3.4	4.4	5.4	4.4	3.4	2.4	1.4	-1.0
-1.0	2.4	2.8	3.8	4.8	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0
-1.0	3.4	3.8	4.2	5.2	5.4	4.4	3.4	2.4	1.4	-1.0
-1.0	4.4	4.8	5.2	5.6	5.8	4.8	3.8	2.8	2.4	-1.0
-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0

Legenda:

0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	5.4	5.8	6.6	7.6	
komórki zlokalizowane najbliżej wyjść ewakuacyjnych					komórki zlokalizowane najdalej od wyjść ewakuacyjnych					
-1.0	przeszkody, ściany									

Rys. 1. Sposób określania wartości Pola Statycznego

Fig. 1. The method of determining the value of a Static Field

-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
-1.0	5.8	5.4	5.0	5.4	5.8	6.2	6.6	7.0	8.0	-1.0
-1.0	4.8	4.4	4.0	4.4	4.8	5.2	5.6	6.6	7.6	-1.0
-1.0	3.8	3.4	3.0	3.4	3.8	4.2	5.2	6.2	7.2	-1.0
-1.0	2.8	2.4	2.0	2.4	2.8	3.8	4.8	5.8	6.8	-1.0
3.4	2.4	1.4	1.0	1.4	2.4	3.4	4.4	5.4	6.4	-1.0
-1.0	2.0	1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	-1.0
-1.0	2.4	1.4	1.0	1.4	2.4	3.4	4.4	5.4	6.4	7.4
-1.0	2.8	2.4	2.0	2.4	2.8	3.8	4.8	5.8	6.8	-1.0
-1.0	3.8	2.4	3.0	3.4	3.8	4.2	5.2	6.2	7.2	-1.0
-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0

Legenda:

0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	5.4	6.0	6.8	7.4	
komórki zlokalizowane najbliżej ogniska pożaru					komórki zlokalizowane najdalej od ogniska pożaru					
-1.0	przeszkody, ściany									

Rys. 2. Wartości Pola oddziaływania Pożaru w pierwszym etapie kalkulacji

Fig. 2. Values of a Fire impact Field in the first stage of calculation

poszczególnych pól siatki z wyłączeniem pól zajmowanych przez przeszkody. Maksymalna wartość przy odwróceniu wartości jest w miejscu ogniska pożaru (wartość 8.0), natomiast wartość minimalna (0.0) w miejscu najdalej oddalonym od ogniska pożaru (rysunek 3).

Trzecią warstwę tworzy się analogicznie do warstwy pierwszej PS z tą zmianą, że w miejscu wyjść ewakuacyjnych wstawia się wartości uzyskane z warstwy PP. Następnie dokonuje się przeliczenia wartości poszczególnych komórek warstwy. Powstaje w ten sposób **Pole Zmodyfikowanej długości drogi ewakuacyjnej (PZ)**. W przypadku konkretnej lokalizacji zagrożenia, pole to odzwierciedla względną odległość od poszczególnych wyjść ewakuacyjnych (rysunek 4). Na podstawie wartości warstwy PZ możliwe jest wskazanie optymalnych kierunków ewakuacji.

Prezentowana koncepcja określania kierunków ewakuacji jest formą eksperymentu polegającego na modyfikacji odległości długości drogi ewakuacyjnej. W metodzie modyfi-

kowano zmienną odległości od wyjść ewakuacyjnych poszczególnych komórek dyskretnej przestrzeni w analizowanym obiekcie.

-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
-1.0	2.2	2.6	3.0	2.6	2.2	1.8	1.4	1.0	0.0	-1.0
-1.0	3.2	3.6	4.0	3.6	3.2	2.8	2.4	1.4	0.4	-1.0
-1.0	4.2	4.6	5.0	4.6	4.2	3.8	2.8	1.8	0.8	-1.0
-1.0	5.2	5.6	6.0	5.6	5.2	4.2	3.2	2.2	1.2	-1.0
4.6	5.6	6.6	7.0	6.6	5.6	4.6	3.6	2.6	1.6	-1.0
-1.0	6.0	7.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	-1.0
-1.0	5.6	6.6	7.0	6.6	5.6	4.6	3.6	2.6	1.6	0.6
-1.0	5.2	5.6	6.0	5.6	5.2	4.2	3.2	2.2	1.2	-1.0
-1.0	4.2	4.6	4.0	4.6	4.2	3.8	2.8	1.8	0.8	-1.0
-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0

Rys. 3. Końcowe wartości Pola oddziaływania Pożaru

Fig. 3. Final values of the Fire impact Field

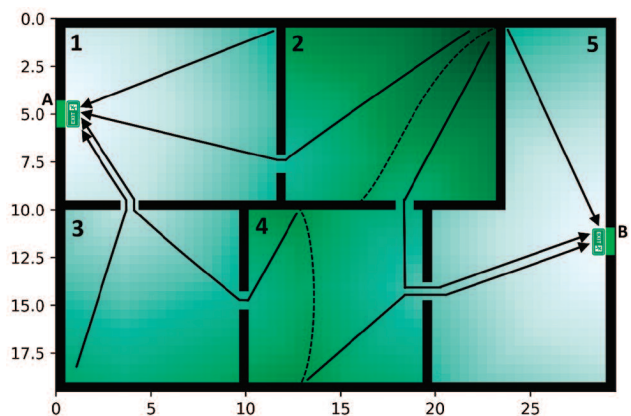
-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
-1.0	9.0	9.4	10.0	9.0	8.6	8.2	7.8	7.4	7.0	-1.0
-1.0	8.0	8.4	9.4	8.6	7.6	7.2	6.8	6.4	6.0	-1.0
-1.0	7.0	7.4	8.4	8.2	7.2	6.2	5.8	5.4	5.0	-1.0
-1.0	6.0	7.0	8.0	7.8	6.8	5.8	4.8	4.4	4.0	-1.0
4.6	5.6	6.6	7.6	7.4	6.4	5.4	4.4	3.4	3.0	-1.0
-1.0	6.0	7.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	-1.0
-1.0	7.0	7.4	7.6	6.6	5.6	4.6	3.6	2.6	1.6	0.6
-1.0	8.0	8.4	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	-1.0
-1.0	9.0	9.4	8.4	7.4	6.4	5.4	4.4	3.4	3.0	-1.0
-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0

Rys. 4. Wartości Pola Zmodyfikowanej długości drogi ewakuacyjnej

Fig. 4. Values of a Modified length of escape route Field

Studium przypadku

Prowadząc badania eksperymentalne, posłużono się dwoma podstawowymi układami komunikacyjnymi, które najczęściej występują w budynkach użyteczności publicznej [26]. Jednym jest układ amfiladowy, a drugim korytarzowy. W przypadku braku zagrożenia ewakuacja prowadzona jest zawsze najkrótszą drogą do najbliższego wyjścia ewakuacyjnego (rysunek 5). Komórki zlokalizowane w takiej samej, maksymalnej odległości od obu wyjść ewakuacyjnych A i B zlokalizowane są na linii rozgraniczającej (linia przerywana). Oddziela ona od siebie obszary, z których ewakuacja prowa-



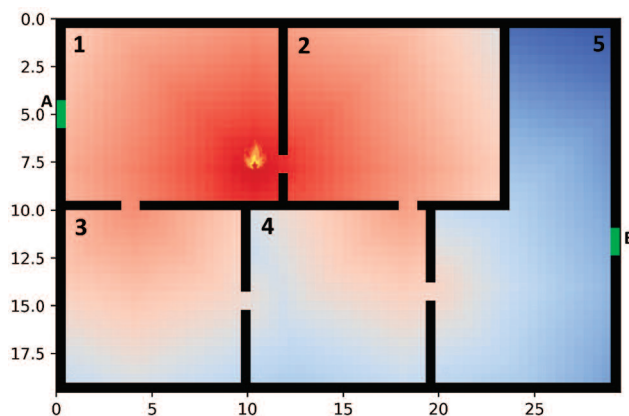
Rys. 5. Warstwa PS w przypadku układu amfiladowego

Fig. 5. Layer of PS for the enfilade layout

dzona jest do odrębnych wyjść ewakuacyjnych i przebiega przez pomieszczenia nr 2 i 4.

Ocena bezpieczeństwa ludzi w obiekcie polega na analizie relacji pomiędzy dostępnym czasem bezpiecznej ewakuacji (DCBE) i wymaganym czasem bezpiecznej ewakuacji (WCBE) [27]. Zmiana lokalizacji zagrożenia ma również wpływ na dostępny czas bezpiecznej ewakuacji z obiektu. Pożar powstały w miejscu najdalej zlokalizowanym od wyjść ewakuacyjnych stanowi potencjalnie najmniejsze zagrożenie. Dotarcie niebezpiecznych produktów spalania do wyjść ewakuacyjnych zajmie w tym przypadku najwięcej czasu w porównaniu z pożarami powstałymi w innych lokalizacjach. Natomiast pożar powstały w sąsiedztwie wyjścia ewakuacyjnego powoduje największe zagrożenie dla osób ewakuujących się w kierunku tego wyjścia. Bezpieczne warunki ewakuacji w przypadku wyjścia ewakuacyjnego, w obrębie którego rozwija się pożar, będą zapewnione w znacznie krótszym czasie niż dla wyjść bardziej oddalonych od ogniska pożaru.

W analizowanym przypadku pożar zlokalizowano w pomieszczeniu nr 1 w sąsiedztwie przejścia łączącego pomieszczenie nr 1 i 2 (rysunek 6). Najmniej zagrożonym pomieszczeniem jest w tym przypadku pomieszczenie nr 5, do którego rozprzestrzeniające się niebezpieczne czynniki pożaru dotrą najpóźniej (kolor niebieski). Zagrożone odcięciem drogi ewakuacyjnej jest bardziej wyjście A (wyższe wartości pola oddziaływania pożaru – kolor pomarańczowy) niż wyjście B (niższe wartości pola oddziaływania pożaru – kolor niebieski).

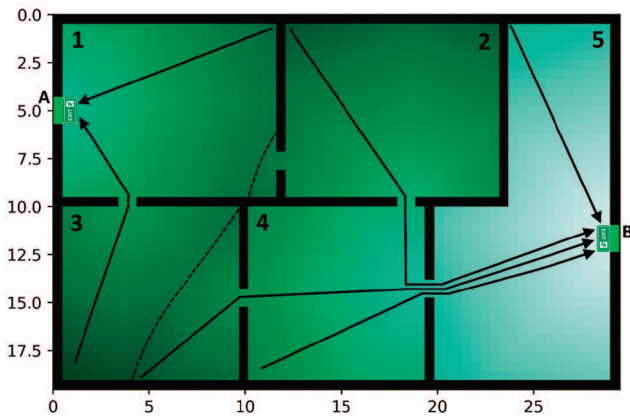


Rys. 6. Warstwa PP w przypadku układu amfiladowego

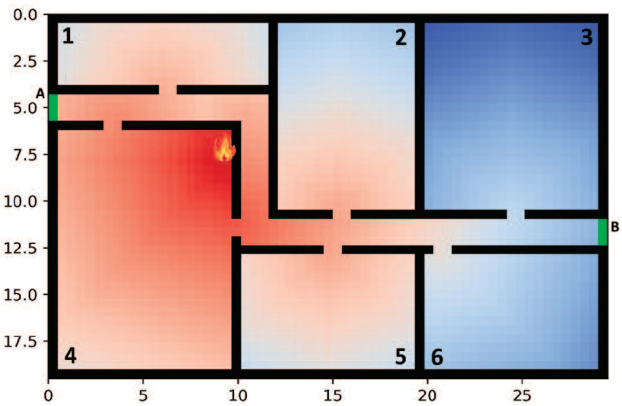
Fig. 6. Layer PP for the enfilade layout

Utworzenie warstwy PZ powoduje przesunięcie linii rozgraniczającej do miejsca powstania zagrożenia (rysunek 7). Kierunki ewakuacji zależą teraz od lokalizacji ogniska pożaru. Droga ewakuacyjna prowadząca do wyjścia B jest znacznie dłuższa niż do wyjścia A, ale w przeciwieństwie do poprzedniej sytuacji, kiedy prowadziła przez obszar o największym oddziaływaniu źródła pożaru – jest bardziej bezpieczna. Do wyjścia ewakuacyjnego A prowadzona jest w tym przypadku ewakuacja tylko z najbliższego otoczenia tego wyjścia obejmującego niemal całe pomieszczenie nr 1 i większą część pomieszczenia nr 3.

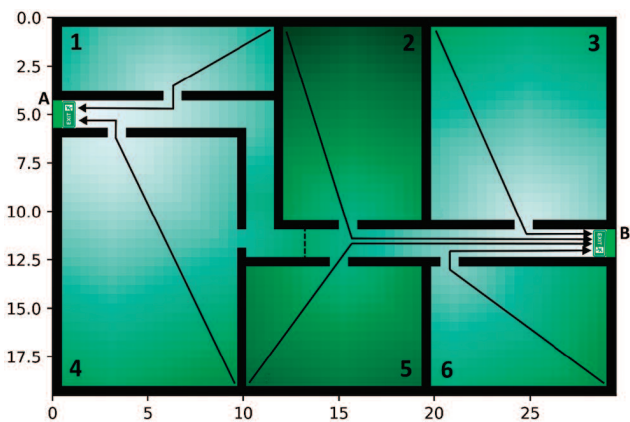
Drugim układem architektonicznym będącym przedmiotem analizy jest **układ korytarzowy**. Linia rozgraniczająca kierunku ewakuacji określona dla warstwy PS zlokalizowana jest w korytarzu pomiędzy pomieszczeniem nr 2 i 5 (rysunek 8). Ozna-



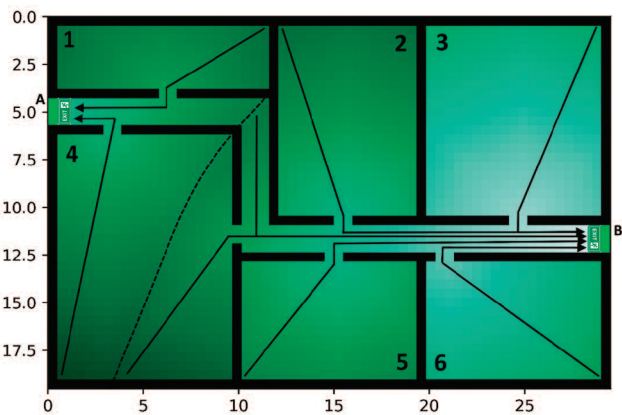
Rys. 7. Warstwa PZ w przypadku układu amfiladowego
Fig. 7. Layer PZ for the enfilade layout



Rys. 9. Warstwa PP w przypadku układu korytarzowego
Fig. 9. Layer PP for the corridor layout



Rys. 8. Warstwa PS w przypadku układu korytarzowego
Fig. 8. Layer PS for the corridor layout



Rys. 10. Warstwa PZ w przypadku układu korytarzowego
Fig. 10. Layer PZ for the corridor layout

kowanie ewakuacyjne w przypadku braku zagrożenia będzie prowadziło ludzi z pomieszczenia nr 1 i 4 do wyjścia ewakuacyjnego A, natomiast w pomieszczeniach nr 2, 3, 5 i 6 do wyjścia ewakuacyjnego B. Określone kierunki ewakuacji wynikają z najmniejszej odległości, jaką muszą pokonać użytkownicy obiektu, aby go opuścić.

W przypadku warstwy PP pożar zlokalizowano w pomieszczeniu nr 4 (rysunek 9). Lokalizacja zagrożenia w niewielkim stopniu wpływa na kierunki ewakuacji. Linia rozgraniczająca te kierunki, określona na podstawie warstwy PZ, przebiega przez pomieszczenie nr 4 oraz korytarz pomiędzy pomieszczeniami nr 2 i 4 (rysunek 10).

Na podstawie omawianego przykładu widać, że zagrożenie zlokalizowane w pomieszczeniu nr 4 determinuje zmianę organizacji ewakuacji. Ewakuacja z tego pomieszczenia pierwotnie prowadziła wyłącznie do wyjścia ewakuacyjnego A. Zminimalizowanie narażenia ludzi na niebezpieczne czynniki pożaru, w przypadku jego wystąpienia w pomieszczeniu nr 4, powoduje konieczność prowadzenia ewakuacji w dwóch kierunkach.

Podobnie jak w przedstawionych przykładach, możliwie jest przeanalizowanie scenariusza wystąpienia pożaru w każdym z pomieszczeń. W tabeli zestawiono pomieszczenia ewakuowane odpowiednio do wyjścia A lub B w zależności od tego, w którym z pomieszczeń wystąpił pożar. **Przedstawione zestawienie kierunków ewakuacji może być podstawą**

Scenariusze ewakuacji w zależności od lokalizacji pożaru w przypadku układu amfiladowego oraz korytarzowego

Evacuation scenarios depending on the location of the fire for the enfilade and corridor layout

Pomieszczenie objęte pożarem	Pomieszczenia ewakuowane do wyjścia:		
	A	B	
Układ amfiladowy	1	1, 3	1, 2, 3, 4, 5
	2	1, 2, 3, 4	2, 4, 5
	3	1, 3	1, 2, 3, 4, 5
	4	1, 2, 3, 4	2, 4, 5
	5	1, 2, 3, 4, 5	5
Układ korytarzowy	1	1, 4	1, 2, 3, 4, 5, 6
	2	1, 2, 4, 5	2, 3, 5, 6
	3	1, 2, 3, 4, 5, 6	3
	4	1, 4	2, 3, 4, 5, 6
	5	1, 4, 5	2, 3, 5, 6
	6	1, 2, 4, 5, 6	3, 6

do utworzenia matrycy sterowania znakami ewakuacyjnymi adaptacyjnego (dynamicznego) oświetlenia ewakuacyjnego.

Wnioski

Oznakowanie statyczne może więc kierować ludzi do wyjść ewakuacyjnych bardziej zagrożonych przez rozwijający się pożar. Scenariusz taki jest szczególnie nie-

bezpieczny w przypadku układu amfiladowego, ze względu na możliwość powstania pożaru w pomieszczeniu, w którym zlokalizowane jest wyjście ewakuacyjne. **Układ korytarzowy**, m.in. ze względu na zakaz składowania materiałów palnych na drogach ewakuacyjnych, **charakteryzuje się większym poziomem bezpieczeństwa niż amfiladowy**. Bezpośrednie otoczenie wyjścia ewakuacyjnego w układzie korytarzowym nie jest zagrożone powstaniem pożaru.

Określanie kierunków ewakuacji na podstawie lokalizacji zagrożenia jest jednym z najprostszych sposobów kierowania ludzi do odpowiednich wyjść ewakuacyjnych. Nie wymaga wprowadzania zaawansowanych urządzeń np. analizujących poziom zagęszczenia ludzi na drogach ewakuacyjnych. Wyznaczona za pomocą proponowanej metody linia rozgraniczająca kierunki ewakuacji wskazuje miejsca w obiekcie, z których dotarcie do wyjść ewakuacyjnych względem rozprzestrzeniającego się pożaru jest obciążone takim samym ryzykiem.

Ewakuacja z obszarów budynku o wartości zmodyfikowanego pola długości drogi ewakuacyjnej większej od wartości tego pola w ognisku pożaru zagrożona jest odcięciem drogi ewakuacyjnej w przypadku, gdy niebezpieczne czynniki pożaru będą rozprzestrzeniały się z prędkością równą lub większą od prędkości przemieszczania się ludzi. Na podstawie zmodyfikowanego pola długości drogi ewakuacyjnej można identyfikować w obiekcie przestrzenie o największym stopniu zagrożenia odcięciem drogi ewakuacyjnej w przypadku pożarów bardzo szybko rozwijających i rozprzestrzeniających się. Zagadnienie to wymaga dokładnej analizy w kontekście przeznaczenia pomieszczeń oraz możliwości powstania i rozwoju pożaru.

Kierowanie procesem ewakuacji zgodnie z proponowaną metodą zapewni wyższy poziom bezpieczeństwa ludzi niż w przypadku ewakuacji, gdy oznakowanie dróg ewakuacyjnych jest statyczne. Dynamiczne oznakowanie ewakuacyjne będzie uwzględniało lokalizację zagrożenia, a tym samym indywidualny wybór drogi ewakuacyjnej w pomieszczeniu objętym pożarem.

Zaproponowany algorytm wyznaczania wartości warstwy PZ może posłużyć do opracowania matrycy sterowania poszczególnymi elementami adaptacyjnego (dynamicznego) oświetlenia ewakuacyjnego współdziałającego z systemem sygnalizacji pożarowej.

Literatura

[1] Mirahadi F, McCabe B, Asce M. EvacuSafe: Building Evacuation Strategy Selection Using Route Risk Index. *J. Comput. Civ. Eng.* 2019; [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000867](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000867).

[2] Chen J. et al. Fire evacuation strategy analysis in long metro tunnels. *Saf. Sci.* 2022; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105603>.

[3] Snopková D. et al. Retracing evacuation strategy: A virtual reality game-based investigation into the influence of building's spatial configuration in an emergency. *Spat. Cogn. & Comp.* 2021; <https://doi.org/10.1080/13875868.2021.1913497>.

[4] Liu Y, Zhang H, Zhan Y, Deng K, Dong L. Evacuation Strategy Considering Path Capacity and Risk Level for Cruise Ship. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022; <https://doi.org/10.3390/JMSE10030398>.

[5] Li M, Xu C, Xu Y, Ma L, Wei Y. Dynamic Sign Guidance Optimization for Crowd Evacuation considering Flow Equilibrium. *J. Adv. Tran.* 2022; <https://doi.org/10.1155/2022/2555350>.

[6] Zhao H. et al. Fire evacuation supported by centralized and decentralized visual guidance systems. *Saf. Sci.* 2022; <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105451>.

[7] Mirahadi F, McCabe BY. EvacuSafe: A real-time model for building evacuation based on Dijkstra's algorithm. *J. Build. Eng.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101687>.

[8] Cisek M, Kapalka M. Evacuation route assessment model for optimization of evacuation in buildings with active dynamic signage system. *Transp. Res. Procedia.* 2014; <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.09.094>.

[9] Filippidis L, Xie H, Galea E.R, Lawrence P.J. Exploring the potential effectiveness of dynamic and static emergency exit signage in complex spaces through simulation. *Fire Saf. J.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103404>.

[10] Xie H, Galea E.R. A survey-based study concerning public comprehension of two-component EXIT/NO-EXIT signage concepts. *Fire and Materials.* 2021; <https://doi.org/10.1002/fam.3035>.

[11] Jiang Q, Zhou Y, Zhang L, Li K, Li H. Influence of pedestrian psychology on evacuation dynamics with the guide of emergency signage. *Europhys. Lett.* 2022; <https://doi.org/10.1209/0295-5075/AC567F>.

[12] Barański M, Haznar-Barańska A. Evacuation and its Types – Revision of the Definition and Classification. *Saf. Fire Technol.*; <https://doi.org/10.12845/SFT.58.2.2021.12>.

[13] Ustawa z 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu19940890414> (accessed Apr. 28, 2022).

[14] Ustawa z 24 sierpnia 1991 r. o ochronie przeciwpożarowej; <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU19910810351> (accessed Apr. 28, 2022).

[15] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów; <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20101090719> (accessed Apr. 28, 2022).

[16] PN-N-01256-01:1992. Znaki bezpieczeństwa – Ochrona przeciwpożarowa. <https://sklep.pkn.pl/pn-n-01256-01-1992p.html> (accessed Apr. 28, 2022).

[17] PN-N-01256-02:1992. Znaki bezpieczeństwa – Ewakuacja. <https://sklep.pkn.pl/pn-n-01256-02-1992p.html> (accessed Apr. 28, 2022).

[18] PN-EN ISO 7010: 2020-07. Symbole graficzne – Barwy bezpieczeństwa i znaki bezpieczeństwa – Zarejestrowane znaki bezpieczeństwa. <https://sklep.pkn.pl/pn-en-iso-7010-2020-07ep.html> (accessed Apr. 28, 2022).

[19] Wytyczne: CNBOP. <https://www.enbop.pl/pl/wydawnictwa/wytyczne> (accessed Apr. 28, 2022).

[20] Wytyczne SITP WP-01:2020: oświetlenie awaryjne: wytyczne planowania, projektowania, instalowania, odbioru, eksploatacji i konserwacji. SITP. 2020.

[21] Bałaga Ł, Cisek T, Łoza H. Poradnik projektowania aranżacji przestrzeni w budynkach biurowych. SITP. 2019; <http://sibp.pl/uploads/docs/poradnik-aranzacja-20190702.pdf> (accessed: Apr. 29, 2022).

[22] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie; <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU-20020750690> (accessed Apr. 28, 2022).

[23] Barański M, Maciak T. Automaty komórkowe w modelowaniu ewakuacji. *Bezpieczeństwo i Tech. Pożarnicza.* 2016; <https://doi.org/10.12845/BITP.43.3.2016.12>.

[24] Fu L, Luo J, Deng M, Kong L, Kuang H. Simulation of Evacuation Processes in a Large Classroom Using an Improved Cellular Automaton Model for Pedestrian Dynamics. *Procedia Eng.* 2012; <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1143>.

[25] Kretz T, Bönnisch C, Vortisch P. Comparison of Various Methods for the Calculation of the Distance Potential Field. *Pedestr. Evacuation Dyn.* 2009; https://doi.org/10.1007/978-3-642-04504-2_29.

[26] Kłopotowski M. Jak ocenić współczesne mieszkanie? Próba zdefiniowania kryteriów wartościujących jakość użytkową współczesnych polskich mieszkań. *Teka Kom. Archit. Urban. i Stud. Kraj.* 2015; <https://doi.org/10.35784/TEKA.571>.

[27] Kita Ł, Krauze A, Boroń S. Modelowanie wpływu warunków środowiska pożarowego na dostępny czas ewakuacji. *Mater. Bud.* 2021; <https://doi.org/10.15199/33.2021.07.05>.

Przyjęto do druku: 13.06.2022 r.