

prof. dr hab. inż. **Stanisław Nawrat**<sup>1</sup>  
dr inż. **Natalia Schmidt-Polończyk**<sup>1</sup>  
mgr inż. **Sebastian Napieraj**<sup>1</sup>

Przyjęty/Accepted/Принята: 29.06.2016;  
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 22.08.2016;  
Opublikowany/Published/Опубликована: 30.09.2016;

## Ocena bezpieczeństwa użytkowników tunelu drogowego z wentylacją wzdłużną w warunkach pożaru przy wykorzystaniu narzędzi modelowania numerycznego<sup>2</sup>

### Safety Assessment of Road Tunnels with Longitudinal Ventilation, During a Fire Incident, Utilizing Numerical modelling Tools

### Оценка безопасности пользователей автомобильного тоннеля с продольной вентиляцией в условиях пожара с использованием инструментов численного моделирования

#### ABSTRAKT

**Cel:** Przedstawienie procesu oceny bezpieczeństwa użytkowników podczas pożaru w tunelu drogowym, wentylowanym wzdłużnym systemem wentylacji, z wykorzystaniem narzędzi modelowania numerycznego.

**Wprowadzenie:** W przypadku pożaru w tunelu drogowym najważniejsze są działania samoratownicze podejmowane przez użytkowników korzystających z tego obiektu. Ich skuteczność zależy od szeregu parametrów, w tym od geometrii tunelu, systemów bezpieczeństwa (np. wentylacji), rodzaju spalanego materiału, strumienia wyzwalanego ciepła HRR (ang. *heat release rate*) podczas pożaru, czy rozmieszczenia wyjść ewakuacyjnych.

Narzędzia modelowania numerycznego są coraz częściej wykorzystywane m.in. do oceny skuteczności systemów bezpieczeństwa oraz bezpieczeństwa użytkowników w trakcie ewakuacji, co z kolei sprawdzane jest zazwyczaj na etapie projektowym danego obiektu. Osoba przeprowadzająca badania numeryczne musi posiadać wiedzę z zakresu wielu dziedzin, znacząco: podstawy modelowania matematycznego, wykorzystywane narzędzia oraz ich ograniczenia, zagadnienia związane z metodą obliczeniowej mechaniki płynów (CFD), specyfikę pożaru oraz potrafić poprawnie dobrać parametry początkowo-brzegowe.

**Metodologia:** W artykule przedstawiono wyniki studium literatury specjalistycznej, w tym wybrane krajowe i międzynarodowe wytyczne projektowe, stanowiące wypadkową dyskusji naukowo-technicznych, badań numerycznych, laboratoryjnych oraz testów w skali rzeczywistej. Ponadto w pracy zaprezentowano wyniki badań własnych autorów artykułu realizowanych w ramach bieżącej działalności Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej.

**Wnioski:** Komputerowe metody numeryczne wykorzystano do kompleksowej oceny bezpieczeństwa użytkowników tunelu drogowego z wentylacją wzdłużną w warunkach pożaru. Oceny tej dokonano przy zastosowaniu kryterium bezpiecznej ewakuacji, której wyznaczenie wymaga określenia czasu pojawienia się w tunelu krytycznych warunków środowiskowych zagrażających zdrowiu lub życiu osób podejmujących działania samoratownicze oraz czasu wyewakuowania się wszystkich użytkowników tunelu w bezpieczne miejsce. W pracy przedstawiono przebieg oceny, istotne założenia i parametry początkowo-brzegowe ze wskazaniem na źródła literatury fachowej oraz wyniki analiz własnych, na podstawie których należy stwierdzić, że w tunelach jednokierunkowych, o długości 1500 m z systemem wentylacji wzdłużnej nie zostanie zapewniony wymagany poziom bezpieczeństwa w warunkach pożaru o mocy 30 MW, w przypadku braku wyjść ewakuacyjnych oraz rozmieszczenia ich co 500 m.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo pożarowe, tunel drogowy, wentylacja pożarowa, wentylacja wzdłużna, ewakuacja

**Typ artykułu:** artykuł przeglądowy

#### ABSTRACT

**Aim:** To identify an evaluation process concerning the safety of road tunnel users during a fire incident. The study focussed on tunnels with longitudinal ventilation systems and examined safety from an evacuation perspective, utilizing numerical modelling tools.

**Introduction:** During a fire outbreak in road tunnels, the behaviour of users is critical, specifically during their individual attempts at rescue

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza / AGH University of Science and Technology; nawstan@agh.edu.pl;

<sup>2</sup> Procentowy wkład merytoryczny w powstanie artykułu / Percentage contribution: S. Nawrat – 30%, N. Schmidt-Polończyk – 50%, S. Napieraj – 20%;

and evacuation. The outcome from such endeavours is dependent on a range of factors, including: tunnel geometry, safety systems in existence, ventilation, makeup of combustible material, heat release rate during burning and location of emergency exits. The use of numerical modelling tools is becoming an accepted norm, which, among others, is used to evaluate the effectiveness of safety systems as well as the safety of users during an evacuation. The latter is usually tested at the facility project design stage. Conduct of such activities require an individual to have detailed knowledge of a range of disciplines, thorough knowledge of mathematical modelling and application tools, awareness of software limitations, issues associated with computational fluid dynamics, specific knowledge concerning the behaviour of fires and appropriate selection of boundary conditions.

**Methodology:** This article reveals outcomes from a literary review of specialist material, including selected national and international project design guidelines derived from science and technology discussions, and numeric research performed in laboratory as well as real life conditions. Additionally, the paper presents original research results produced by the authors in the course of their ongoing activities at the Faculty of Mining and Geoengineering, at the AGH University of Science and Technology.

**Conclusions:** Computer numerical methods were harnessed to perform an assessment of safety in a fire environment, for users of road tunnels with longitudinal ventilated systems. This assessment was performed by applying a safe evacuation criterion, which requires identification of the start time when the critical environmental conditions occur in the tunnel, that is conditions presenting a hazard to the life and health of people who undertake self rescue activities, and duration of users evacuation to a safe location. The study identified essential assumptions, boundary parameters, specialist bibliography and analysis results from the work performed by the authors. Outcome from research indicates that in one-way road tunnels, of 1500 metres in length, without emergency exits or with exits spaced 500 metres apart, and ventilated by longitudinal systems, the required safety level will not be achieved during a fire incident with a heat release rate of 30 MW.

**Keywords:** fire safety, road tunnel, fire ventilation, longitudinal ventilation, evacuation

**Type of article:** review article

## АННОТАЦИЯ

**Цель:** Представление процесса оценки безопасности пользователей автомобильного туннеля, вентилируемого системой продольной вентиляции, в случае появления пожара. В оценке использовались критерий эвакуации и численные методы моделирования.

**Введение:** В случае возникновения пожара в автомобильном туннеле к наиболее важным действиям по самоспасению проводимым его пользователями. Они зависят от целого ряда параметров, среди всего прочего, геометрии туннеля, систем безопасности (например вентиляция), вида сгораемого материала, теплового потока HRR во время пожара (англ. Heat Release Rate), размещения аварийных выходов. Использование численных инструментов моделирования становится все более частой практикой, которая служит, в частности, для оценки эффективности систем безопасности, а также оценки безопасности пользователей объекта во время эвакуации, которая проводится обычно на стадии проектирования данного объекта. Эти мероприятия требуют от персонала, производящего численные исследования, знаний в области многих дисциплин, базового знания математических моделей, используемых инструментов и их ограничений, вопросов, связанных с методом вычислительной гидродинамики (CFD), специфики пожара и правильного выбора начальных и краевых параметров.

**Методология:** В статье представлены результаты обзора специализированной литературы, в том числе отдельных национальных и международных директив по проектированию, которые являются результатом научно-технической дискуссии, численных и лабораторных исследований, а также экспериментов в реальном масштабе. Кроме того, в статье представлены результаты собственных исследований авторов, реализуемых в рамках текущей деятельности факультета горного дела и геоинженерии Академии горного дела и металлургии (AGH).

**Выводы:** Компьютерные численные методы были использованы для полной оценки безопасности пользователей автомобильного туннеля с продольной вентиляцией в условиях пожара. Оценка проведена с использованием критерия безопасной эвакуации, определение которого требует определения времени появления в туннеле критических условий окружающей среды, угрожающих здоровью или жизни людей, принимающих самоспасательные действия, а также времени эвакуации из туннеля всех пользователей в безопасное место. В статье представлен процесс оценки, существенные предположения и первоначальные и краевые параметры с указанием источника литературы, а также результаты собственного анализа. На основе этих результатов следует указать, что в туннелях с односторонним движением длиной 1500 м, в которых присутствует система продольной вентиляции, не обеспечен надлежащий уровень безопасности в случае пожара мощностью 30 МВт, если в этом туннеле нет аварийных выходов, расположенных каждые 500 м.

**Ключевые слова:** пожарная безопасность, автомобильный туннель, пожарная вентиляция, продольная вентиляция, эвакуация

**Вид статьи:** обзорная статья

## 1. Wprowadzenie

Podczas eksploatacji tuneli drogowych użytkownik narażony jest na wiele zagrożeń niekorzystnie wpływających na jego zdrowie [1]. Najbardziej niebezpiecznym zdarzeniem w tunelach drogowych, w odniesieniu do zdrowia i życia ludzkiego, jest niewątpliwie pożar. Fakt ten potwierdza szereg dramatycznych wskutek pożarów, mających miejsce właśnie w tych obiektach, np. w tunelu pod Mont Blanc, gdzie w 1999 roku zginęło 39 osób [2]. Warto zwrócić uwagę, że ze względu na specyfikę geometryczną tuneli drogowych występujące w nich pożary znacząco zmieniają swoją skalę w porównaniu do otwartej przestrzeni drogowej.

Pożar jest niekontrolowanym w czasie i przestrzeni procesem spalania materiałów [3]. Pożar w tunelu stanowi największe zagrożenie dla użytkowników tuneli drogowych oraz największe wyzwanie dla systemów bezpieczeństwa. Zdarzenia te nie występują bardzo często, jednak ich skutki,

w przestrzeni częściowo zamkniętej, jaką jest tunel, mogą być znacznie poważniejsze w porównaniu z otwartymi ciągami komunikacyjnymi [4]. Pożary w tunelach drogowych w większości przypadków powodowane są przez techniczne usterki pojazdów (zwarcia elektryczne, przegrzania silników lub hamulców), a kolejno również przez zderzenia pojazdów/ów czy też wady techniczne wyposażenia tunelu [5]. Uwzględniając aspekt bezpieczeństwa użytkowników tunelu drogowego, zdarzenie pożaru można podzielić na dwie fazy [6]:

- faza I, czyli okres nieprzekraczający pierwszych 15 minut liczonych od momentu powstania pożaru, gdzie priorytetem są działania samoratownicze. Osoby opuszczające tunel wymagają ochrony przed skutkami zadymienia (m.in. brakiem widzialności, trujących gazami oraz wysoką temperaturą) poprzez zastosowanie odpowiedniego systemu wentylacji oraz środków technicznych,

- faza II, w której istotne są procesy zwalczania pożaru poprzez skuteczne odprowadzanie dymu z przestrzeni komunikacyjnej. Rolą systemów bezpieczeństwa na tym etapie jest umożliwienie pracy ekip ratowniczych poprzez stworzenie warunków dojścia do miejsca pożaru i do podjęcia czynności gaszenia pożaru.

Omawiając aspekt bezpieczeństwa użytkowników tunelu drogowego w warunkach pożaru, prowadzone analizy należy odnieść do najważniejszych podejmowanych czynności, czyli ewakuacji. Proces ten jest zagadnieniem złożonym, a jednym z istotnych czynników wpływających na bezpieczeństwo osób jest czas realizacji ewakuacji.

W niniejszym artykule przedstawiono proces oceny bezpieczeństwa ewakuacji użytkowników tunelu drogowego z wentylacją wzdłużną w warunkach pożaru, przy wykorzystaniu narzędzi modelowania numerycznego.

## 2. Bezpieczeństwo użytkowników tunelu drogowego podczas pożaru

Do oceny bezpieczeństwa ewakuacji z tunelu drogowego wykorzystać można formułę określoną w brytyjskiej normie [7], zwaną również kryterium bezpiecznej ewakuacji, która pojęcie czasu ewakuacji definiuje zależnością:

$$T_{ASET} - T_{RSET} \geq 0 \quad (1)$$

gdzie:

$T_{RSET}$  – wymagany czas ewakuacji (ang. Required Safe Escape Time) [s],

$T_{ASET}$  – dostępny czas ewakuacji (ang. Available Safe Escape Time) [s].

Z punktu widzenia ustawodawstwa bezpieczna ewakuacja zależy od wartości kilku parametrów, których przekroczenie powoduje tzw. krytyczny stan środowiska mający miejsce wtedy, gdy [7], [8]:

- „temperatura powietrza przekracza wartość 60°C na wysokości mniejszej lub równej 1,8 m od poziomu drogi ewakuacyjnej,
- gęstość strumienia promieniowania cieplnego wynosi 2,5 kW/m<sup>2</sup>, przez czas ekspozycji dłuższy niż 30 s,
- temperatura gorących gazów pożarowych przekracza wartość 200°C na wysokości ponad 2,5 m od poziomu drogi ewakuacyjnej,
- zasięg widzialności w tunelu jest mniejszy niż 10 m na wysokości mniejszej lub równej 1,8 m od poziomu drogi ewakuacyjnej,
- zawartość tlenu spada poniżej 15%”.

Wyznaczenie dostępnego czasu ewakuacji  $T_{ASET}$  wymaga oszacowania czasu osiągnięcia krytycznego stanu środowiska, co wiąże się ze sprawdzeniem rozkładów wymienionych wyżej parametrów. Z kolei wymagany czas ewakuacji  $T_{RSET}$  jest czasem trwającym od początku powstania pożaru do momentu, w którym wszystkie osoby w tunelu drogowym zdążają się ewakuować w bezpieczne miejsce [8].  $T_{RSET}$  określony został zależnością [8-9]:

$$T_{RSET} = t_{det} + t_a + t_r + t_{reak} + t_p \quad (2)$$

gdzie:

$T_{RSET}$  – wymagany czas ewakuacji [s],

$t_{det}$  – czas detekcji pożaru [s],

$t_a$  – czas alarmu [s],

$t_r$  – czas rozpoznania alarmu (przed podjęciem decyzji) [s],

$t_{reak}$  – czas reakcji (podjęcie decyzji i wybór drogi ewakuacyjnej) [s],

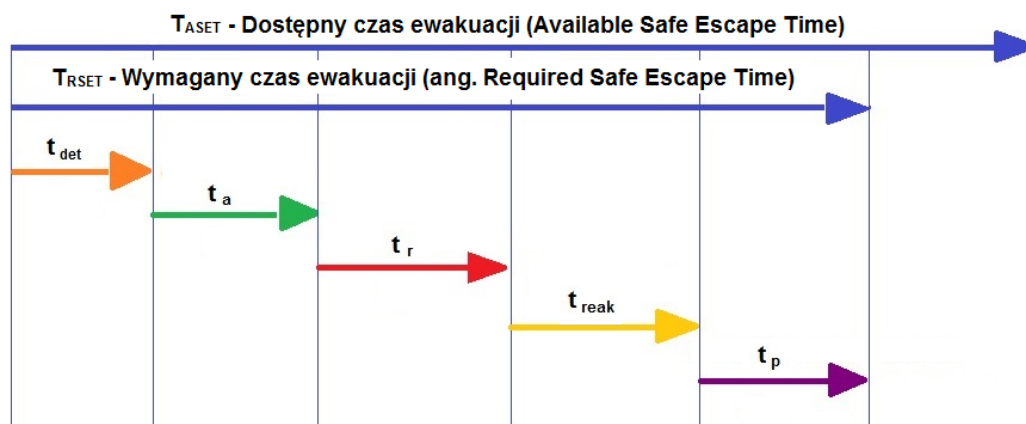
$t_p$  – czas przemieszczenia (przejścia drogą ewakuacyjną do bezpiecznego miejsca) [s].

Przedstawione składowe wymaganego czasu ewakuacji  $T_{RSET}$  oraz ich relacja względem dostępnego czasu ewakuacji  $T_{ASET}$  zobrazowane zostały na ryc. 1.

Niespełnienie kryterium oznacza, że w momencie pojawienia się krytycznych warunków środowiska w tunelu drogowym przebywa pewna liczba osób, które do tego momentu nie zdążyły przemieścić się w bezpieczne miejsce. Osoby te narażone są na utratę zdrowia lub życia.

## 3. Analiza numeryczna bezpieczeństwa użytkowników tunelu drogowego w warunkach pożaru

Rozwój zaawansowanych metod obliczeniowych, wspieranych ciągłym postępem techniki komputerowej, przyczynia się do coraz częstszego wykorzystywania numerycznej mechaniki płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics* – CFD) do celów analizy zagadnień inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Na rynku dostępnych jest wiele narzędzi wspomagających modelowanie przebiegu pożarów w tunelach. Programy te umożliwiają przeprowadzanie skomplikowanych symulacji pożarowych, przy uwzględnieniu wielu parametrów wpływających na poziom bezpieczeństwa ludzi. Narzędzia CFD podzielić można na oprogramowanie ogólnego przeznaczenia i oprogramowanie dedykowane dla inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Programy z pierwszej grupy to m.in. [10]: PHOENICS FLAIR, ANSYS FLUENT, ANSYS CFX, STAR-CD,



Ryc. 1. Składowe czasu  $T_{RSET}$  oraz ich relacja względem  $T_{ASET}$  [9]  
Fig. 1. Time elements  $T_{RSET}$  and their relationship to  $T_{ASET}$  [9]

OPENFOAM. Do oprogramowania CFD dedykowanego dla inżynierii bezpieczeństwa pożarowego zaliczyć można [10]: FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS), JASMINE, SMART-FIRE, KOBRA 3D, KAMELEON, SOFIE.

Proces działań samoratowniczych również coraz częściej prognozowany jest przy wykorzystaniu obliczeń numerycznych, które umożliwiają analizę różnych scenariuszy dla określonych założeń. Istnieje szereg narzędzi do przeprowadzania komputerowych symulacji ewakuacji, z których najczęściej wykorzystywanymi są [11]: EXODUS, FDS+EVAC, LEGION, PATHFINDER, SIMULEX, STEPS, VISSIM.

Ocenę bezpieczeństwa ewakuacji osób z tunelu drogowego przeprowadzono przy wykorzystaniu komputerowych metod numerycznych. Do wyznaczenia dostępnego czasu ewakuacji zastosowano narzędzie PyroSim, które jest interaktywnym graficznym interfejsem programu Fire Dynamics Simulator – FDS, co argumentowane jest kilkoma względami [12]:

- FDS jest dedykowany dla modelowania pożaru w obiektach budowlanych,
- wysoką wiarygodność uzyskanych wyników gwarantuje obszerna weryfikacja oraz walidacja wyników z testami przeprowadzonymi w skali rzeczywistej,
- w wielu przypadkach symulacje pożarów FDS potwierdzające projektowe wartości parametrów wentylacji wymagane są przez rzeczoznawców do spraw zabezpieczeń przeciwpożarowych oraz komendy wojewódzkie Państwowej Straży Pożarnej.

Wymagany czas ewakuacji określono z wykorzystaniem narzędzia Pathfinder, przy wyborze którego pomocne okazały się badania ankietowe przeprowadzone przez [11], na grupie 198 specjalistów posiadających doświadczenie w wykonywaniu symulacji ewakuacji. Głównym celem badań było sprawdzenie przydatności najczęściej wykorzystywanych na rynku symulatorów ewakuacji oraz rozpoznanie potrzeb w tej dziedzinie.

Wyniki sondażu wskazują, że jednym z trzech najlepiej ocenianych (lub najczęściej używanych) przez ankietowanych programów do modelowania ewakuacji jest Pathfinder. W pracy [13] dokonano również przeglądu wybranych narzędzi symulacyjnych przeznaczonych do modelowania procesów ewakuacji, w tym programu Pathfinder. Ponadto potwierdzeniem słuszności wyboru narzędzia Pathfinder jest rzetelnie przeprowadzony przez twórców programu proces weryfikacji zgodny z zaleceniami International Maritime Organization.

### 3.1. Charakterystyka programów obliczeniowych Fire Dynamics Simulator oraz Pathfinder

Fire Dynamics Simulator (FDS) to program przeznaczony do modelowania przebiegu pożarów. Został opracowany i jest wciąż rozwijany przez National Institute of Standards and Technology (NIST) przy współpracy z Technical Research Centre of Finland (VTT) [14]. FDS jest narzędziem przeznaczonym do szczegółowej analizy zagrożeń pożarowych, dynamiki pożaru oraz towarzyszących mu zjawisk fizycznych m.in. transportu ciepła i produktów spalania, wymiany ciepła poprzez promieniowanie i konwekcję. Z programem współpracuje pakiet Smokeview umożliwiający graficzną prezentację wyników. Symulator pozwala na rejestrację wartości parametrów w czasie determinujących bezpieczną ewakuację w obszarze, w którym przebywają ludzie. Wyznaczenie rozkładu danego parametru w badanych przekrojach umożliwia ustalenie czasu, po którym wystąpi krytyczny stan środowiska. Proces obliczeniowy może być realizowany zarówno metodą DNS (ang. Direct Numerical Simulation – DNS), gdzie równania Naviera-Stokesa rozwiązywane są bez uwzględnienia

modelu turbulencji lub metodą LES (ang. Large Eddy Simulation – LES). DNS wymaga ogromnych nakładów obliczeniowych, co wynika z konieczności zastosowania bardzo gęstej siatki obliczeniowej oraz małego kroku czasowego. Metoda ta jest odpowiednia do symulacji przepływów ze spalaniem w małej skali geometrycznej [15]. Z kolei Large Eddy Simulation stanowi kompromis pomiędzy dokładnością wyników obliczeń a wymaganymi mocami obliczeniowymi komputera. Metoda LES polega na odseparowaniu mniejszych wirów, które są modelowane analitycznie. Duże wiry o wielkości porównywalnej lub większej od wielkości komórki obliczeniowej rozwiązywane są numerycznie. Podejście to pozwala na całościową analizę przepływów turbulentnych, przy zachowaniu ich charakteru [16].

Opis pożaru w FDS opiera się na fizycznych modelach zjawisk, m.in. na:

- modelu hydrodynamicznym,
- modelu spalania,
- modelu promieniowania cieplnego.

Model hydrodynamiczny rozwiązuje numerycznie odpowiednią formę równań Naviera-Stokesa. Równania te opierają się na: zasadzie zachowania masy, pędu, energii oraz na równaniu stanu gazu doskonałego [14].

Model spalania oparty na modelu mieszania paliwa z tlenem charakteryzuje się stałym współczynnikiem produkcji poszczególnych składników: dwutlenku węgla, tlenku węgla, sadzy i właściwie przybliża proces spalania dla dobrze wentylowanych pomieszczeń [14].

W modelu promieniowania cieplnego ośrodek w środowisku symulacji jest traktowany jako „gaz szary”. Oznacza to, że proporcje emisji do absorpcji promieniowania przez cząsteczkę ośrodka, niezależne od długości fali promieniowania są takie same.

Szczegółowa charakterystyka programu FDS oraz opis algorytmu obliczeniowego znajduje się w podręczniku technicznym FDS [14].

Proces weryfikacji i walidacji modelu FDS ma istotne znaczenie zarówno w przypadku możliwości jego zastosowania, jak i jego ograniczeń. Ponadto informacja o trafności zastosowanych równań w modelu matematycznym stanowi podstawę do wyboru programu komputerowego w celu przeprowadzenia konkretnych badań [17]. Obszerne badania weryfikacji i walidacji programu FDS zostały przeprowadzone przez NIST. Zgodność wyników symulacji FDS z rzeczywistością jest potwierdzona przez następujące dokumenty:

- dokument weryfikacji NIST [18],
- dokument walidacji NIST [19].

Badania walidacji i weryfikacji modelu, których charakterystykę i wyniki przedstawiono w dwóch pierwszych dokumentach wymienionych powyżej, sporządzono w oparciu o [17]. Weryfikacja modelu polegała na sprawdzeniu poprawności działania m.in. [18]: kodu programu, wrażliwości metody LES, poprawności rozwiązywania równań Naviera-Stokesa, modelu hydrodynamicznego, modelu promieniowania cieplnego, modelu przenikania ciepła przez przegrody, modelu spalania. W efekcie badania te wykazały, że uzyskane rezultaty symulacji FDS dla warunków pożaru mogą odbiegać od wartości rzeczywistych dla [19]:

- wartości przyrostów temperatury w warstwie dymu, które są mniejsze o wielkość nie większą niż 15% od danych rzeczywistych,
- wartości przyrostów temperatury w warstwie podsufitowej, które są mniejsze o wielkość nieprzekraczającą 20% od danych rzeczywistych,
- spadków widoczności, które w rzeczywistości są mniejsze o 30% od tych określonych za pomocą programu FDS.

Przyjęcie wymienionych korekt podczas interpretacji wyników modelowania numerycznego gwarantuje wiarygod-



ność uzyskanych rezultatów [19].

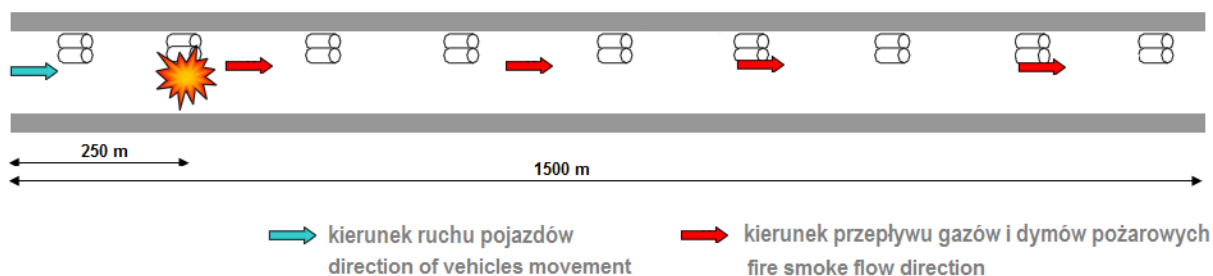
Program Pathfinder, opracowany przez firmę Thunderhead Engineering, daje możliwości prowadzenia symulacji komputerowych w celu wyznaczenia czasów ewakuacji, uwzględnia przy tym geometrię budynków, zmieniając ich powierzchnię za pomocą algorytmu triangulacji na sieć nawigacyjną w postaci nieregularnych trójkątów. Domyślnie program tworzy najmniejszą liczbę możliwie największych trójkątów. W prezentowanej metodzie uwzględnia się wyposażenie obiektu reprezentowane przez wycięcia w sieci nawigacyjnej modelu geometrycznego. Luki stanowią przeszkody dla poruszających się osób, stając się niedostępne dla pieszych i w konsekwencji muszą być przez nich omijane [20]. W programie odpowiednikiem użytkowników danego obiektu są „agenci”, którym zostają nadane indywidualne cechy (m.in. wiek, płeć, szerokość ramion, sprawność fizyczna itp.). Zachowania osób w modelu określane są poprzez funkcje: „profil” oraz „zachowanie”. Profile pozwalają na zarządzanie rozkładem parametrów poruszania się osób oraz na definiowanie prędkości przemieszczania się i wymiarów pieszych. Zachowania determinują sekwencję akcji, m.in. postój, przejście we wskazane miejsce lub wyjście [21]. Rozmieszczenie osób w danym pomieszczeniu może odbywać się w sposób losowy lub uporządkowany, pozwalając na zachowanie wysokiej gęstości osób, ale zarówno w pierwszym, jak i drugim przypadku bez wzajemnego nakładania się pieszych [21]. Droga ewakuacji każdego użytkownika obiektu w programie Pathfinder tworzona jest w trzech etapach: etap I – planowanie drogi ewakuacji, etap II – generowanie drogi ewakuacji oraz etap III – przejście drogą ewakuacji. Podczas procesu planowania narzędzie wyszukuje („planuje”) możliwe drogi ewakuacji, jednak finalnie wytycza „lokalnie najszybszą” spośród wszystkich dostępnych. Precyzując, pojęcie „lokalnie najszybciej” odnosi się konkretnie do wyboru najbliższego lokalnego celu w pomieszczeniu (np. drzwi do drugiego pokoju), gdzie aktualnie przebywa pieszy, który stanowi składową celu finalnego. Po przejściu do kolejnego lokum podejście jest powtarzane aż do osiągnięcia punktu przeznaczenia. Gdy lokalny cel został wytyczony, droga ewakuacji generowana jest na podstawie algorytmu poszukiwania [22] na trójkątnej sieci nawigacyjnej. Powstała ścieżka reprezentowana jest przez linie łączące punkty na krawędziach trójkątów w sieci [20]. Przejście wyznaczoną drogą ewakuacji, czyli ruch pieszych w programie Pathfinder może być symulowany w dwóch trybach: sterowniczym oraz SFPE, czyli według Society of Fire Protection Engineers [23], [24]. W trybie zgodnym z założeniami SFPE drzwi wpływają na przepływ ludzi, a piesi nie mogą omijać się wzajemnie, co prowadzi do zjawiska przenikania. W trybie sterowniczym drzwi nie wpływają na limit przepustowości użytkowników obiektu, ale osoby poruszające się wykorzystują tzw. odwrócony układ sterowania (ang. *inverse steering behaviors*) do utrzymywania odpowiedniej prędkości i dy-

stansu względem siebie. Układ ten pozwala pieszym tak wybierać cząstkowe kierunki poruszania, aby ich indywidualny czas ewakuacji był jak najkrótszy. Tryb ten umożliwia symulację bardziej złożonych zachowań, uwzględniając interakcje pomiędzy osobami oraz ich odpowiedź na zmienne warunki otoczenia, co jest naturalne podczas ewakuacji. Szczegółowa charakterystyka programu Pathfinder oraz opis algorytmu obliczeniowego znajduje się w podręczniku Pathfinder [20].

Firma Thunderhead Engineering wielokrotnie przeprowadzała ocenę adekwatności programu Pathfinder w celu weryfikacji i walidacji modelu. Sposób wykonania analizy został dokładnie opisany w dokumencie wydanym przez International Maritime Organization [25]. We wspomnianym opracowaniu podano również wyniki, do których powinny być zbliżone rezultaty symulacji, by weryfikacja była pozytywna. Testy weryfikujące narzędzie Pathfinder miały na celu zbadanie poprawności działania poszczególnych funkcji i zachowań m.in. [25], [20]: weryfikację funkcji oprogramowania takich jak: utrzymanie zadanej prędkości podczas poruszania się użytkownika, utrzymanie zadanej prędkości podczas wchodzenia po schodach, utrzymanie zadanej prędkości podczas schodzenia ze schodów, natężenie przepływu przez drzwi, zadany czas reakcji (opóźnienia), zaokrąglanie drogi, zachowanie przypisanych (różnych) wartości prędkości poruszania się oraz weryfikację jakościową – walidację: np. ruch „pod prąd”, czułość na dostępne drzwi, przypisane wyjścia, zator. Ponadto wyniki z symulacji poddano walidacji, porównując je do rezultatów badań doświadczalnych ewakuacji przeprowadzonych w skali rzeczywistej.

### 3.2. Scenariusz pożarowy oraz warunki początkowo-brzegowe przyjęte w modelowaniu numerycznym

Scenariusz pożarowy rozważanego przypadku zakłada wybuch pożaru 250 m od portalu wjazdowego w jednej z naw tunelu jednokierunkowego, o długości 1500 m – rycina numer 2, mimo że polskie zalecenia prawne [26] dopuszczają stosowanie wentylacji wzdłużnej: „gdy długość tunelu jest nie większa niż 1000 m”. Przekrój poprzeczny tunelu ma kształt prostokątny, mieści dwa pasy ruchu, a jego wymiary wynoszą: 9,2 m szerokości i 6,8 m wysokości. W tunelu przewidziano system wentylacji mechanicznej wzdłużnej, który pracuje zgodnie z kierunkiem ruchu w tunelu drogowym. W przypadku wybuchu pożaru w tunelu jednokierunkowym, bez zatoru, część pojazdów poruszających się w kierunku przeciwnym do źródła pożaru będzie w stanie bezpiecznie opuścić obiekt. Pojazdy zatrzymane przed źródłem pożaru są chronione przez jednostronne odprowadzanie dymu w kierunku zgodnym z obowiązującym kierunkiem ruchu w tunelu. W przypadku zatoru w tunelach jednokierunkowych po obu stronach pożaru mogą znajdować się samochody, które nie będą w stanie opuścić obiektu. Sytuacja ta stwarza zagrożenie dla użytkowników znajdujących się w zadymionej części tunelu.



Ryc. 2. Lokalizacja pożaru

Fig. 2. Fire location

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Dyrektywa 2004/54/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004 r. w sprawie minimalnych wymagań bezpieczeństwa dla tuneli w transeuropejskiej sieci drogowej wyklucza możliwość stosowania wzdłużnego nachylenia tunelu większego niż 5% [27]. Jedynie ze względów topograficznych istnieje możliwość odstępstwa od tych wymagań. W tunelach o długości przekraczającej 400 m i nachyleniu wzdłużnym większym lub równym 3% poza analizą ryzyka ustala się dodatkowe lub zwiększone środki bezpieczeństwa [6]. Ponadto w tunelach o znacznym nachyleniu wpływ na prędkość przepływu dymów pożarowych w czasie pożaru ma powstający efekt kominowy, spowodowany wzrostem temperatury w tunelu i spadkiem drogi. W zależności od nachylenia i kierunku przepływu powietrza wymuszonego przez wentylację efekt ten może wspomagać pracę wentylatorów strumieniowych podczas pożaru lub wpływać negatywnie, stwarzając dodatkowy opór do pokonania. Oddziaływanie nachylenia tunelu na efektywność systemów wentylacji było przedmiotem wielu badań m.in. [28], [29] czy też [30]. Efektem ich jest wypracowanie wartości prędkości krytycznej w zależności od nachylenia tunelu, która jest nieco większa niż w analogicznym, poziomym tunelu. Spadek tunelu determinuje również obostrzenia (zawarte w zaleceniach projektowych m.in. w [6] w postaci ograniczenia prędkości poruszających się pojazdów. Ponadto może nieznacznie spowolnić prędkość ewakuujących się osób z tunelu, jednak w tunelach o stopniu nachylenia do 4% wpływ ten jest bardzo niewielki [31]. W niniejszym artykule nie uwzględniono nachylenia tunelu.

W analizowanym przypadku założono pożar samochodu ciężarowego [6], co odpowiada wielkości szybkości wydzielania ciepła równej minimum 30 MW. W początkowym stadium pożaru gorąca warstwa dymów pożarowych kumuluje się tuż pod stropem i rozchodzi w obu kierunkach względem źródła pożaru. Pod warstwą dymów zasysane jest świeże powietrze, tworząc jego chłodny strumień płynący w kierunku przeciwnym do kierunku rozchodzenia się gorących dymów pożarowych. Rozdzielenie warstwy gorących dymów i świeżego powietrza nazywane jest stratyfikacją (ryc. 3), ma miejsce przy braku lub niewielkiej prędkości wzdłużnej powietrza oraz jest zjawiskiem przejściowym, bardzo pożądanym w początkowej fazie pożaru.

Kolejną prędkość przepływu powietrza powinna eliminować zjawisko cofania się dymów pożarowych (ang. *backlayering*). Zbyt duża prędkość może spowodować zwiększenie mocy pożaru, a tym samym większą ilość dymów i gazów pożarowych, z drugiej strony zbyt mała jej wartość nie pokona zjawiska cofania się dymu. Dlatego konieczne jest zapewnienie prędkości krytycznej w tunelu, którą obliczyć można za pomocą metody iteracyjnej poprzez równoczesne rozwiązanie wzorów [6], [32], [33]:

$$V_{kryt} = 0,606k_g \left( \frac{gHQ}{\rho c_p A T_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho c_p A V_{kryt}} + T_0 \quad (4)$$

gdzie:

$V_{kryt}$	– prędkość krytyczna [m/s],
$k_g$	– współczynnik nachylenia tunelu,
$g$	– przyspieszenie ziemskie [m/s <sup>2</sup> ],
$H$	– wysokość tunelu [m],
$Q$	– strumień wyzwalanego ciepła [kW],
$\rho$	– gęstość powietrza [kg/m <sup>3</sup> ],
$C_p$	– ciepło właściwe powietrza [kJ/(kg·K)],
$A$	– powierzchnia przekroju tunelu [m <sup>2</sup> ],
$T_f$	– średnia temperatura gazów pożarowych [K],
$T_0$	– temperatura otoczenia [K].

Dla analizowanego przypadku wymagana prędkość krytyczna powietrza wynosi 2,3 m/s [6], [32], [33].

Podczas pożaru w rozważanym tunelu 427 osób podejmie ewakuację. Liczba ta została założona dla stanu zatoru w tunelu. Ponadto przeanalizowano trzy warianty odległości wyjść ewakuacyjnych:

- wariant 1 – brak wyjść,
- wariant 2 – wyjścia rozmieszczone co 500 m względem siebie,
- wariant 3 – wyjścia rozmieszczone co 250 m względem siebie.

W przypadku trzeciego wariantu rozmieszczenia wyjść ewakuacyjnych, przyjęta lokalizacja pożaru spowoduje zablokowanie jednego z wyjść prowadzącego do drugiej nawy tunelu – ryc. 4.

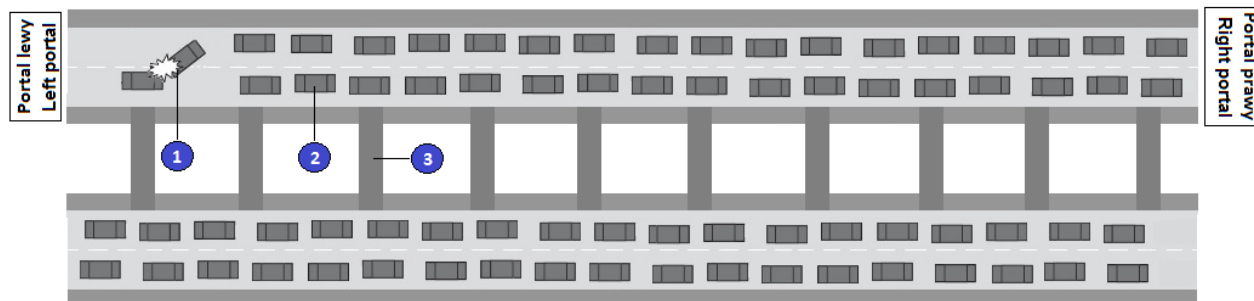
Do celów analizy numerycznej w programie FDS przyjęto następujące warunki początkowe oraz brzegowe:

- temperatura powietrza: +20 [°C],
- wilgotność względna: 40 [%],
- ciśnienie atmosferyczne: 101 325 [Pa],
- przyspieszenie ziemskie: 9,81 [m/s<sup>2</sup>],
- wiatr boczny: nie uwzględnia się,
- nachylenie tunelu: 0 [°].
- Za obudowę tunelu przyjęto ścianę betonową o grubości 0,8 m o właściwościach:
  - gęstość: 2 228 [kg/m<sup>3</sup>],
  - przewodność cieplna: 1,80 [W/m·K],
  - ciepło właściwe: 0,04 [kJ/kg·K],
  - chropowatość: 0,03 [mm].

Badania numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem metody Large Eddy Simulation. System wentylacji został zaprojektowany dla warunków pożaru zgodnie z procedurą obliczeniową zawartą w [33]. Strategia uruchomienia wentylatorów strumieniowych została dobrana w taki sposób, by w początkowej fazie pożaru zapewnić pożądaną stratyfikację gazów i dymów pożarowych, co korzystnie wpłynie na bezpieczeństwo podczas ewakuacji. Wentylatory w trakcie pożaru pracują z mniejszą wydajnością, ze względu na obniżenie gęstości powietrza spowodowane przez gorący dym. Prędkość przepływu dymów pożarowych w tunelach drogowych z wentylacją wzdłużną regulowana jest poprzez załączanie i wyłączanie dostępnych wentylatorów. W celu osiągnięcia wymaganej krytycznej prędkości w tunelach drogowych załączana może być tylko określona liczba wentylatorów strumieniowych, zgodnie z opracowanymi wcześniej proce-



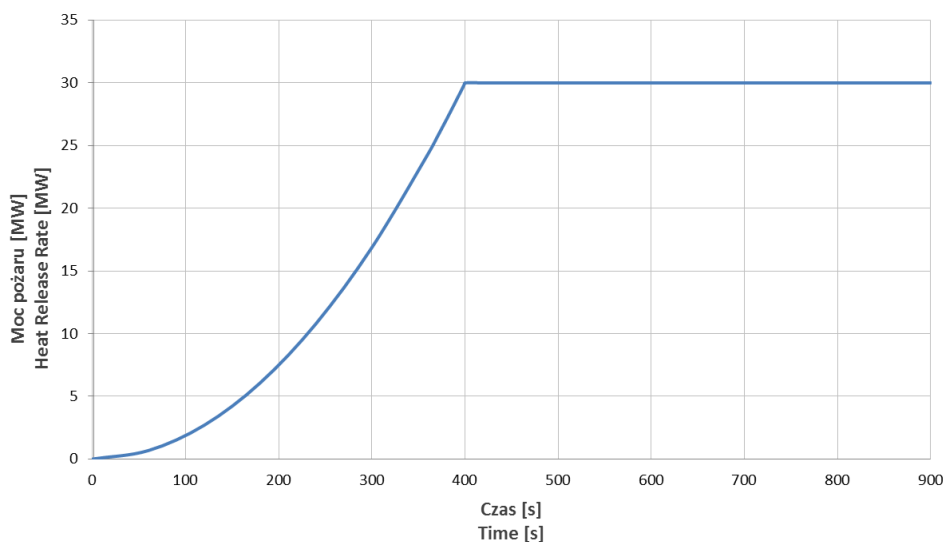
Ryc. 3. Zjawisko stratyfikacji  
Fig. 3. Emergence of stratification  
Źródło: Opracowanie własne.  
Source: Own elaboration.



Ryc. 4. Lokalizacja pożaru przy wyjściu ewakuacyjnym  
 (1) lokalizacja pożaru, (2) pojazdy w tunelu, (3) wyjścia ewakuacyjne  
 Fig. 4. Fire location at an emergency exit  
 (1) fire location, (2) vehicles in the tunnel, (3) emergency exits

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 5. Przebieg przyjętej krzywej mocy pożaru dla 30MW  
 Fig. 5. The course of the assumed fire curve for the value HRR of 30MW

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

durami zarządzania bezpieczeństwem. Pozostałe urządzenia pozostają w spoczynku, z wyłączeniem sytuacji w drugiej fazie pożaru, w której kierujący akcją gaśniczą wyda inną dyspozycję. Założono, że wentylator w najbliższym sąsiedztwie pożaru, poddany działaniu gorących dymów i gazów został wyłączony z analizy ze względu na turbulencje, które może wywoływać. Założenie to jest szczególnie istotne dla zachowania pożądanego w początkowym stadium pożaru zjawiska stratyfikacji dymów. Może się również zdarzyć tak, że wentylator znajdujący się nad źródłem pożaru lub bardzo blisko zostanie uszkodzony, co przyjęte założenie również uwzględnia.

Przebieg i rozwój pożaru jest zjawiskiem bardzo trudnym do przewidzenia. Podejmując badania numeryczne, należy przyjąć pewne założenia. W literaturze fachowej oraz w zagranicznych wytycznych projektowych np. [6], [33] znajdziemy krzywe pożarowe charakteryzujące przebieg i wzrost pożaru, również w tunelu.

W niniejszym badaniu rozwój pożaru założono zgodnie z funkcją kwadratową:

$$Q = \gamma \cdot t^2 \quad (5)$$

gdzie:

$Q$  – strumień wyzwalanego ciepła [kW],

$\gamma$  – współczynnik szybkości rozwoju pożaru [kW/s<sup>2</sup>] – tabela 1.

$t$  – czas osiągnięcia pełnej mocy pożaru od momentu inicjacji [s] [34].

Przyjęta krzywa jest bardzo dobrym przybliżeniem fazy wzrostu pożaru w tunelach. Po osiągnięciu maksymalnej mocy pożaru krzywa zakłada utrzymanie tej mocy do końca trwania pożaru – ryc. 5, co stanowi margines bezpieczeństwa podczas analiz. Przyjęta krzywa rozwoju pożaru została zaproponowana na podstawie wyników testów pożarowych

Tabela 1. Współczynnik szybkości rozwoju pożaru [34-35].

Table 1. Fire growth factor [34-35].

Rozprzestrzenianie się pożaru / Fire propagation	Współczynnik szybkości rozwoju pożaru [kW/s <sup>2</sup> ] / Fire growth factor [kW/s <sup>2</sup> ]
Wolne/Slow	0,00293
Średnie/Medium	0,01172
Szybkie/Fast	0,04689
Bardzo szybkie / Very fast	0,18760

przeprowadzonych w skali rzeczywistej w ramach projektu UPTUN, m.in. w tunelu Runhamar w Norwegii.

Ilość dymów wydzielanych podczas pożaru pojazdu jest kluczowym parametrem wpływającym na zasięg widzialności w tunelu. Wielkość emisji dymów w głównej mierze zależy od spalanego materiału. Największym oddziaływaniem na produkcję dymów spośród elementów samochodu charakteryzują się: gumowe opony, gąbki w fotelach, tapicerka samochodowa, plastikowe lub drewniane elementy deski rozdzielczej, farby i lakiery. Ponadto na wielkość emisji dymów mają wpływ m.in.: rodzaj paliwa, warunki wentylacyjne oraz dostępność tlenu [36]. W modelowaniu procesu spalania samochodu przyjmuje się parametry wysoko dymotwórczych polimerów, stanowiących główny składnik materiałów zastosowanych w pojeździe, stąd do celów analizy przyjęto materiał o współczynniku produkcji dymu „soot yield” wynoszącym  $Y_{SOT} = 0,1$  g/g, współczynniku produkcji tlenku węgla  $Y_{CO} = 0,1$  g/g oraz ciepłe spalania  $Ho = 25$  [MJ/kg] [37].

W rozważaniach pominięto oddziaływanie wiatru na proces oddymiania tunelu, chociaż wpływ warunków atmosferycznych, a w szczególności wiatru, może niekorzystnie oddziaływać na proces skutecznego odprowadzania dymu i ciepła, zwłaszcza w przypadku tuneli krótkich o długości nieprzekraczającej 500 m, wentylowanych naturalnie [38]. W pracy [39] wykazano negatywne oddziaływanie wiatru na proces przewietrzania krótkich tuneli z wentylacją naturalną. W tunelach długich można spodziewać się wpływu wiatru na zjawiska przepływowe zachodzące wewnątrz obiektu, dlatego systemy wentylacji w tunelach drogowych powinny zapewnić odpowiednią siłę ciągu w celu zniwelowania negatywnego oddziaływania. Niewielkiego wpływu wiatru według [31] na procesy wentylacyjne można spodziewać się w sytuacji, gdzie portale tunelu są ulokowane częściowo lub całkowicie pod powierzchnią otaczającego terenu.

Określenie wymaganego czasu ewakuacji wymagało przypisania każdej „ewakuującej się osobie” zestawu indywidualnych parametrów, z których najważniejszymi są: prędkość poruszania się, szerokość ramion oraz czas opóźnienia. Dobór indywidualnych parametrów osób ewakuujących się oparto o wyniki badań eksperymentalnych [40]. Szerokość ramion osób ewakuowanych, prędkość poruszania się i czas opóźnienia zdefiniowano, uwzględniając wartości minimalne i maksymalne, oraz zróżnicowano je ze względu na płeć i wiek – tabela 2 oraz tabela 3.

Kolejny etap obejmował wyznaczenie czasów będących składowymi  $T_{RSET}$ . Pierwszy z nich to czas detekcji pożaru, który określa przedział czasowy liczony od wybuchu pożaru

do jego wykrycia przez systemy detekcji, operatora lub użytkownika tunelu. Następny dotyczy alarmu – jest to czas potrzebny do przetworzenia impulsu o zdarzeniu przez system sygnalizacji oraz finalnie do wyemitowania alarmu pożarowego. Za czas detekcji i alarmu  $T_{d+a}$  przyjęto łączną wartość 120 s, co jest zgodne z aktualnymi praktykami projektowymi. Kolejne składowe związane są z reakcją i zachowaniem osób ewakuujących się. Są to czasy opóźnienia i rozpoznania alarmu, czyli okres pomiędzy zadziałaniem alarmu a rozpoczęciem procesu ewakuacji, który wyrażany jest zależnością [40]:

$$t_0 = t_r + t_{reak} \quad (6)$$

gdzie:

$t_0$  – czas opóźnienia [s],

$t_r$  – czas rozpoznania alarmu [s],

$t_{reak}$  – czas reakcji [s].

Czas opóźnienia zależy w dużej mierze od znajomości budynku przez osoby ewakuujące się. Tunel w swojej konstrukcji i geometrii nie należy do skomplikowanych obiektów budowlanych, jednak jest to obiekt nieznan dla jego użytkowników, dlatego za czas opóźnienia do obliczeń przyjęto przedział od 0 do 120 s [40]. Kolejny czas dotyczy przemieszczania się osób w bezpieczne miejsce i został on wyznaczony za pomocą narzędzia Pathfinder na podstawie przyjętych parametrów początkowo-brzegowych.

W scenariuszu ewakuacji opracowano kilka typów zachowań użytkowników. Różnica w zachowaniach jest wynikiem obecności lub braku wyjść ewakuacyjnych, ich rozmieszczenia oraz lokalizacji źródła ognia, która stanowi przeszkodę dla osób znajdujących się w sąsiedztwie pożaru oraz wpływa na wartość czasu opóźnienia. Dla pierwszego wariantu (bez wyjść ewakuacyjnych) osoby podejmujące działania ratownicze poruszają się w kierunku najbliższego portalu, z tym że użytkownicy, dla których w ciągu najkrótszej drogi ewakuacyjnej zlokalizowany jest pożar, będą zmuszeni podjąć ewakuację drugim, dalszym portalem. Dla tuneli z wyjściami ewakuacyjnymi, osoby po stronie nawietrznej pożaru opuszczają tunel przez lewy portal, natomiast osoby po stronie zawietrznej kierują się do najbliższego wyjścia ewakuacyjnego, do którego również wliczany jest portal tunelu. Na odcinku 200–300 m ze względu na bliskość miejsca pożaru (50 m od źródła pożaru w obie strony) założono zerowy czas opóźnienia dla wszystkich wariantów. Stosunek liczby mężczyzn i kobiet wynosi: 50% – kobiety oraz 50% – mężczyźni.

Tabela 2. Zestawienie minimalnej i maksymalnej szerokości ramion osób ewakuowanych w zależności od płci [40]

Table 2. Comparison of the minimum and maximum arm widths for evacuees by sex [40]

	Minimum [cm] Minimum [cm]	Maksimum [cm] Maximum [cm]
Mężczyźni Men	40,6	49,3
Kobiety Female	36,6	45,0

Tabela 3. Comparison of minimum and maximum mobility speeds for individuals depending on sex and fitness [40]

Table 3. Comparison of minimum and maximum speeds of individuals by age and fitness [40]

	Minimum [m/s] Minimum [m/s]	Maksimum [m/s] Maximum [m/s]
Mężczyźni Male	1,1	1,6
Kobiety Female	1,05	1,45
Niepełnosprawni Disabled	0,71	1,25



### 3.3. Wyniki obliczeń numerycznych

Kryterium bezpiecznej ewakuacji, opisujące nierówność czasu trwającego od początku powstania pożaru do momentu, w którym wszystkie osoby w tunelu drogowym zdołają się ewakuować w bezpieczne miejsce względem czasu osiągnięcia krytycznego stanu środowiska w tunelu, pozwala na przeprowadzenie oceny bezpieczeństwa użytkowników tunelu w warunkach pożaru. Dostępny czas bezpiecznej ewakuacji  $T_{ASET}$  jest czasem, po przekroczeniu którego warunki w tunelu drogowym stają się krytyczne dla jego użytkowników.  $T_{ASET}$  określany jest przez parametr, który pierwszy osiągnie lub przekroczy wartość uznawaną za zagrażającą życiu lub zdrowiu ludzi. Do parametrów tych zgodnie zalicza się: temperaturę powietrza, gęstość strumienia promieniowania cieplnego, temperaturę gorących gazów pożarowych, zasięg widoczności w tunelu oraz zawartość tlenu. Z uzyskanych rezultatów, po uwzględnieniu korekty wynikającej z procesu walidacji [19], wnioskować należy, że pierwsze osiągnięcie krytycznego stanu środowiska spowodowane jest spadkiem poziomu widoczności poniżej wartości 10 m, które nastąpiło po upływie 378 s. Na tej podstawie określono dopuszczalny czas ewakuacji. Wymagany czas ewakuacji skalkulowano, dodając czas detekcji i alarmu do czasu wyewakuowania się z tunelu ostatniej osoby (oszacowanej przy wykorzystaniu Pathfinder), uwzględniając przyjęte czasy opóźnienia użytkowników. Wartość czasu ewakuacji użytkowników do bezpiecznego miejsca z tunelu bez wyjść ewakuacyjnych, czyli dla wariantu I wyniósł 1267 s, dla wariantu II – 408 s, a dla tunelu z wyjściami co 250 m wyniósł 348 s. Zestawione rezultaty wymaganego i dostępnego czasu ewakuacji określono przy wykorzystaniu narzędzi Pathfinder oraz FDS wraz z zestawieniem liczby osób bezpiecznych oraz zagrożonych przedstawia tabela 4.

Niespełnienie kryterium bezpiecznej ewakuacji oznacza, że w momencie pojawienia się krytycznych warunków środowiskowych w tunelu drogowym przebywa pewna liczba osób, która do tego momentu nie zdążyła przemieścić się w bezpieczne miejsce. Osoby te narażone są na utratę zdrowia lub życia.

### 4. Podsumowanie

Analizy numeryczne pozwalają na kompleksową ocenę poziomu bezpieczeństwa w tunelach drogowych oraz innych obiektach budowlanych, zwłaszcza na etapie projektowym. Znaczna część problemów dotyczących systemów bezpieczeństwa i zjawiska pożaru może również zostać rozwiązana na drodze modelowania numerycznego. Ponadto metody te mają użyteczne zastosowanie w wielu dziedzinach techniki.

W artykule przedstawiono najważniejsze aspekty związane z procesem oceny bezpieczeństwa użytkowników tuneli drogowych w warunkach pożaru, za pomocą narzędzi numerycznych. Ocena ta wiąże się m.in. z właściwym wyborem narzędzi modelowania numerycznego w celu wyznaczenia wymaganego i dostępnego czasu ewakuacji oraz przyjęciem poprawnych warunków początkowo-brzegowych. Biorąc pod uwagę cel przeprowadzanych badań numerycznych, należało również przyjąć odpowiednią strategię działania wentylacji wzdłużnej oraz zapewnienia odpowiedniej wartości prędkości przepływu powietrza w tunelach, na co z kolei wpływa liczba i rozmieszczenie urządzeń wentylacyjnych.

Podstawowym ograniczeniem wykorzystanych metod badawczych jest potrzeba ich uwiarygodnienia na drodze eksperymentalnej [41]. Do oceny adekwatności wybranych metod obliczeniowych stosuje się walidację i weryfikację. Weryfikacja dotyczy sprawdzania prawidłowego rozwiązywania równań modelu. Proces ten nie kontroluje poprawności tych równań, ale sposób ich rozwiązywania. Innymi słowy weryfikacja pozwala zbadać zgodność systemu symulacyjnego z jego założeniami. Walidacja z kolei polega na analizie poprawności rozwiązywanych równań modelu matematycznego. Sprawdzana jest zazwyczaj do porównania wyników modelowania z pomiarami eksperymentalnymi. Pozwala więc na sprawdzenie, w jakim stopniu model jest wiernym odzwierciedleniem rzeczywistego stanu, przy takich samych danych wejściowych [15]. Różnice w wynikach, których nie da się uzasadnić jako błędy numeryczne lub wy tłumaczyć przy wykorzystaniu niepewności pomiaru, są przypisywane do założeń modelu jako jego uproszczenia [42].

Liczne badania weryfikacji i walidacji wykorzystanych programów oraz ich wyniki potwierdzają adekwatność wybranych narzędzi symulacyjnych do poruszanej problematyki badawczej oraz stanowią podstawę do przyjęcia uzyskanych wyników modelowania numerycznego jako zbliżonych do rzeczywistości.

### 5. Wnioski

Przedstawiony materiał pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Do oceny bezpieczeństwa użytkowników tunelu drogowego w warunkach pożaru wykorzystać można kryterium bezpiecznej ewakuacji, jednak jego wyznaczenie wymaga określenia czasu pojawienia się w tunelu krytycznych warunków środowiskowych oraz czasu wyewakuowania się wszystkich użytkowników tunelu w bezpieczne miejsce, co zazwyczaj rozwiązywane jest na drodze modelowania numerycznego.

**Tabela 4.** Wyniki obliczeń numerycznych wymaganego oraz dostępnego czasu ewakuacji

**Table 4.** Calculation results for the required and available evacuation time

Tunel jednokierunkowy o długości 1500 m i mocy pożaru 30 MW / One way tunnel, 1500 metres long and heat release rate of 30 MW	$T_{ASET}$ (FDS)	$T_{RSET}$ (Pathfinder)	Kryterium $T_{ASET} \geq T_{RSET}$ Criterion $T_{ASET} \geq T_{RSET}$	Liczba osób w bezpiecznym miejscu / The number of people in a safe area	Liczba osób zagrożonych / The number of endangered people
bez wyjść ewak. / absence of emergency exits	378 s	1267 s	niespełnione / not achieved	127	300
wyjścia co 500 m / emergency exit distance – 500 m	378 s	408 s	niespełnione / not achieved	415	12
wyjścia co 250 m / emergency exit distance – 250 m	378 s	348 s	spełnione / met / not achieved	427	0

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.

2. Wybór narzędzi numerycznych powinien być poprzedzony szczegółową analizą weryfikacji i walidacji wykorzystywanych programów.
3. Na podstawie wyników badań przeprowadzonych dla tunelu jednokierunkowego o długości 1500 m, z systemem wentylacji wzdłużnej, o prostokątnym przekroju poprzecznym i 0° spadku wzdłużnym, w warunkach pożaru o mocy 30 MW stwierdzić można, że nie zostanie zapewniony wymagany poziom bezpieczeństwa podczas ewakuacji, w przypadku braku wyjść ewakuacyjnych oraz rozmieszczenia ich co 500 m dla przyjętego scenariusza pożarowego. W analizowanym przypadku wyjścia ewakuacyjne powinny być rozmieszczone co 250 m.
4. Wyniki badań oraz przyjęta metodologia mogą stanowić podstawę do kontynuacji analiz w celu wyznaczenia granicznych odległości pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi, dla których użytkownicy tunelu zdołają bezpiecznie opuścić obiekt.
5. Wyniki badań wskazują, iż możliwe jest stosowanie systemu wentylacji wzdłużnej w tunelach drogowych o długości powyżej 1000 m, pod warunkiem zastosowania dodatkowych środków technicznych w postaci wyjść ewakuacyjnych, podczas gdy polskie zalecenia prawne dopuszczają stosowanie tego systemu, gdy długość tunelu nie przekracza 1000 m. Wyznaczenie granicznej długości tunelu, dla której istnieje możliwość stosowania wentylacji wzdłużnej, jest ciekawym zagadnieniem i wymaga kontynuacji podjętych badań.

Artykuł opracowano w ramach realizacji pracy statutowej nr 11.11.100.005 wykonywanej na AGH Akademii Górniczo-Hutniczej, na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii, w Katedrze Górnictwa Podziemnego.

## Literatura

- [1] Nawrat S., Schmidt-Polończyk N., Napieraj S., *Selected issues concerning protection of road tunnel structures and ventilation systems in relation to fire hazard*, "AGH Journal of Mining and Geoengineering" 2012, 235-245.
- [2] PIARC: *Lessons Learned From Recent Tunnel Fires*. France: PIARC Committee on Road Tunnels Operation (C3.3), 2006.
- [3] PN-EN ISO 13943: 2002 Bezpieczeństwo pożarowe - terminologia.
- [4] Fera M., Macchiaroli R., *Use of analytic hierarchy process and fire dynamics simulator to assess the fire protection systems in a tunnel on fire*, "International Journal of Risk Assessment and Management" 2010, 14(6), 504-529.
- [5] Høj N. P., *Discussion of the hazards for tunnels in operation - presented in context of risk analysis and in design for safety*, Warsaw 2006.
- [6] RABT: *Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Richtlinien fuer Ausstattung und Betrieb von Strassentunneln*, 2006.
- [7] British Standard PD 7974-6:2004: The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings. Part 6: Human factors: Life safety strategies-Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6).
- [8] *Działanie instalacji przeciwpożarowej wynikającej z założenia scenariusza pożarowego*, [w:] *Podręcznik projektanta systemów sygnalizacji pożaru*, Część I i II. Izba Rzecznawców SITP, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2010.
- [9] PIARC: *Road Tunnels. Operational Strategies for Emergency Ventilation*. France: PIARC Committee on Road Tunnels 2011.
- [10] Fliszkiwicz M., Krauze A., Maciak T., *Możliwości stosowania programów komputerowych w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego*. BiTP Vol. 29 Issue 1, 2013, 47-60.
- [11] Ronchi E., Kinsey M., *Evacuation models of the future: insights from an online survey of user's experiences and needs*, [in:] *Proceedings of the Advanced Research Workshop: "Evacuation and Human Behaviour in Emergency Situations*, J. Capote, D. Alvear (eds.), Universidad de Cantabria, Spain 2011.
- [12] Fliszkiwicz M., Krauze A., *FDS – Wstęp do wentylacji pożarowej – badanie skuteczności projektowanych instalacji wentylacji oddymiającej*, 2015 [dok. elektr.] [http://www.inf.sgsp.edu.pl/symulacje/cwiczenia/materialy/wprowadzenie\\_do\\_cwiczenia5.pdf](http://www.inf.sgsp.edu.pl/symulacje/cwiczenia/materialy/wprowadzenie_do_cwiczenia5.pdf), [dostęp: maj 2015].
- [13] Haron F., Alginahi Y., Kabir M., Mohamed A., *Software Evaluation for Crowd Evacuation – Case Study*, "Al-Masjid An-Nabawi. International Journal of Computer Science Issues" 2012, 128-134.
- [14] McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., Baum H., Rehm R., Mell W. i inni., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model*, NIST Special Publication, Washington 2010.
- [15] Chybowski R., Konecki M., Tuśnio N., *Wykorzystanie programu komputerowego do modelowania pożaru w tunelu kablowym*, „Zeszyty Naukowe SGSP” 2009, 39, 61-79.
- [16] Maciak T., Czajkowski P., (2015): *Modelowanie rozwoju pożaru w pomieszczeniach zamkniętych. Cz. 1. Model Matematyczny*. [dok. elektr.] [http://www.inf.sgsp.edu.pl/symulacje/cwiczenia/materialy/cw4/model\\_matematyczny\\_fds.pdf](http://www.inf.sgsp.edu.pl/symulacje/cwiczenia/materialy/cw4/model_matematyczny_fds.pdf) [dostęp: 7 czerwca 2015].
- [17] ASTM E1355: Standard Guide for Evaluating Predictive Capability of Deterministic Fire Models, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania 2015.
- [18] McDermott R., McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., *Fire Dynamics Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. Volume 2: Verification*. USA: National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [19] McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., *Fire Dynamics Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. Volume 3: Validation*, National Institute of Standards and Technology, USA 2010.
- [20] Thunderhead Engineering: *Pathfinder 2014.2 Verification and Validation*, 2014.
- [21] Thunderhead Engineering, STIGO: *Pathfinder 2011 Instrukcja obsługi*. [dok. elektr.] <http://www.pyrosim.pl/przydatne-linki/> [dostęp: 8 maja 2015].
- [22] Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B., *A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths*. Transactions on Systems Science and Cybernetics (SSCA). SSC-4 (2), 1968, 100-107.
- [23] SFPE: *Engineering Guide - Human Behavior in Fire*. USA: Fire Society of Protection Engineers, 2003.
- [24] Nelson H. E., Mowrer F. W.: *Emergency Movement*. W S. o. Engineers, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, 2002.
- [25] *Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships*. MSC.1/Circ.1238. London: International Maritime Organization, 2007.
- [26] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie. (Dz. U. Nr 63, poz. 735 z póź. zm.).
- [27] Dyrektywa 2004/54/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004 r. w sprawie minimalnych wymagań bezpieczeństwa dla tuneli w transeuropejskiej sieci drogowej.
- [28] Atkinson G., Wub Y., *Smoke control in sloping tunnels*, "Fire Safety Journal" 1996, 27(4), 335-341.
- [29] Wu Y., Bakar M., *Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems – a study of the critical velocity*, "Fire Safety Journal" 2000, 35(4), 363-390.
- [30] Palazzi E., Fabiano B., Pastorino R., Maschio G., *Tunnel ventilation modelling in sloped tunnels*, "Chemical Engineering Transactions" 2009, 17, 349-354.
- [31] PIARC: *Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels*. France: PIARC Committee on Road Tunnels Operation (C3.3), 2007.

- [32] PIARC: Fire and Smoke Control in Road Tunnels. France: PIARC Committee on Road Tunnels (C5), 1999.
- [33] CETU: Dossier Pilote des Tunnels Équipements, section 4.1 Ventilation: Centre d'études des Tunnels, France, 2003.
- [34] British Standard PD 7974-1:2003. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 1: Initiation and development of fire within the enclosure of origin.
- [35] British Standards PD 7974-5:2003. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 5: Fire service intervention.
- [36] Mulholland G., *Smoke Production and Properties*, [in:] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, 1995, 217-227.
- [37] Gehandler J., Ingason H., Lönnemark A., Frantzich H., Strömberg M., *Performance-based design of road tunnel fire safety*, Proposal of new Swedish framework. Fire Safety. Case Studies in Fire Safety, 2014, 18–28.
- [38] BD 78/99 Design Manual for Roads and Bridges. Part 9: Design of Road Tunnels. United Kingdom 1999.
- [39] Sztarbała G., *Oddziaływanie wiatru na przepływ powietrza w tunelu w warunkach pożaru*, Rozprawa doktorska, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2012.
- [40] Smith J., *Agent-Based Simulation of Human Movements During Emergency Evacuations of Facilities*, American Society of Civil Engineers, Canada: American Society of Civil Engineers, 2008, 1-10.
- [41] Jaszczur M., Nowak R., Szmyd J., Branny M., Karch M., Wodziak W., *An application of SPIV technique to experimental validation of the turbulence model for the air flow in the intersection of the mining face with the ventilation gallery*, "Journal of Physics" 2011, 1-6.
- [42] Brzezińska D., *Rozprzestrzenianie się dymu. Poprawność wykonania symulacji komputerowych CFD*, „Ochrona Przeciwpożarowa” 2008, 34-35.

\* \* \*

**prof. dr hab. inż. Stanisław Nawrat** – profesor na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Kierownik Zamiejscowego Ośrodka Dydaktycznego w Jastrzębiu Zdroju.

**dr inż. Natalia Schmidt-Polończyk** – asystentka na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. W 2016 roku obroniła rozprawę doktorską pt. *Ocena możliwości stosowania systemu wentylacji wzdłużnej w długich tunelach drogowych*. Obszarem zainteresowań autorki są zagadnienia wentylacji, bezpieczeństwa pożarowego oraz ewakuacji.

**mgr inż. Sebastian Napieraj** – asystent na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Pracował w międzynarodowych zespołach, między innymi w Norwegii, Ukrainie i Niemczech, zajmuje się zagadnieniami wentylacji i bezpieczeństwa w podziemnych obiektach oraz zwalczaniem zagrożeń naturalnych i wykorzystaniem metanu pokładów węgla w górnictwie.

