



Politechnika
Śląska

PRACA DOKTORSKA

*Warunki panujące w budynku w czasie ewakuacji osób
z niepełnosprawnościami*

Dyscyplina naukowa: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

Autor: mgr inż. Karolina Szulc

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Małgorzata Król, prof. PŚ

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Cisek

Gliwice, 2025

Streszczenie

Warunki panujące w budynku w czasie ewakuacji osób z niepełnosprawnościami

Zarówno zapewnienie dostępności budynków dla osób z niepełnosprawnościami, jak również zapewnienie tym osobom bezpiecznych warunków do ewakuacji, stanowi wyzwanie, a temat ten jest coraz szerzej podejmowany w codziennym życiu. Przepisy krajowe nakładają na właścicieli budynków obowiązek, aby zapewnić dostępność wszystkim osobom, jednakże wciąż brakuje wskazania odpowiednich rozwiązań dotyczących ewakuacji. Właściciele budynków stoją przed poważnym wyzwaniem, gdyż zapewnienie bezpieczeństwa osób w budynku oraz bezpiecznej ewakuacji jest priorytetem.

Analizując zmieniające się przepisy oraz podejście do tematu ewakuacji z budynków, w ramach niniejszej pracy doktorskiej autorka podjęła się kompleksowej analizy zagadnienia. Począwszy od analizy warunków jakie mogą wystąpić w czasie rozwoju pożaru, wykorzystując w tym celu narzędzia numerycznej mechaniki płynów, poprzez przeprowadzenie badań eksperymentalnych ewakuacji z budynku użyteczności publicznej z uwzględnieniem ewakuacji osoby z niepełnosprawnością. Następnie, sprawdzenie zaproponowanego rozwiązania usprawniającego ewakuację jakim jest krzesło ewakuacyjne, jak również utworzenie symulacji ewakuacji w programie symulacyjnym wraz z zaimplementowaniem rzeczywistych prędkości przemieszczania się wybranych populacji użytkowników.

Numeryczne analizy rozwoju pożaru zostały przeprowadzone w celu sprawdzenia, w jaki sposób mogą rozprzestrzeniać się niebezpieczne produkty pożaru, które bezpośrednio wpływają na stan środowiska w przestrzeniach objętych pożarem oraz w jego otoczeniu. Pogorszenie się warunków wewnątrz budynku wpływa na zmniejszenie poziomu bezpieczeństwa użytkowników. Dzięki analizom wybranych scenariuszy rozwoju pożaru, określono dostępny czas bezpiecznej ewakuacji (DCBE), który ze względu na przekroczenie bezpiecznej granicy krytycznych parametrów wyniósł ok 2 minuty.

Na podstawie badań eksperymentalnych określono wymagany czas bezpiecznej ewakuacji (WCBE), czyli ten który jest potrzebny, aby osoby ewakuujące znalazły się w miejscu bezpiecznym – na zewnątrz budynku. W zależności od populacji czas ten wyniósł od 83 sekund dla populacji osób pełnosprawnych, poprzez 143 sekundy dla osoby transportowanej za pomocą krzesła ewakuacyjnego, po 159 sekundy dla osoby poruszającej się o kulach.

Przeprowadzone badania wskazały jednoznacznie, że zastosowanie krzesła ewakuacyjnego usprawniło proces ewakuacji. Na podstawie średniej prędkości poruszania się po korytarzu oraz po schodach zaobserwowano, że w przypadku poruszania się po korytarzu prędkość przemieszczania osoby z niepełnosprawnością transportowanej za pomocą krzesła ewakuacyjnego jest o ok 42% wyższa, niż prędkość osoby poruszającej się o kulach. W przypadku poruszania się po schodach – w zależności od typu klatki schodowej usprawnienie wyniosło od ok. 17% do nawet 50%.

Prędkości przemieszczania się poszczególnych populacji zostały zaimplementowane w symulacji ewakuacji. Autorka wprowadziła szereg zmian parametrów symulacji utworzonej w programie symulacyjnym, w celu wskazania, że istnieje możliwość zamodelowania populacji osób z niepełnosprawnościami oraz taka zmiana ustawień programu, która umożliwi jak najdokładniejsze odwzorowanie wyników z rzeczywistych prób ewakuacyjnych.

Autorka wykonała symulację, w której model geometryczny budynku został odwzorowany zgodnie z rzeczywistą geometrią budynku oraz odwzorowano rzeczywistych użytkowników. W celu uzyskania jak najdokładniejszych wyników symulacji, zwłaszcza w aspekcie ewakuacji osób z niepełnosprawnościami, autorka zmieniała ustawienia symulacji, dzięki czemu ostatecznie uzyskała zadowalające wyniki. Najlepsze odwzorowanie warunków rzeczywistych dla poszczególnych populacji uzyskano przyjmując następujące założenia:

- rozkład jednostajny dla prędkości na korytarzu oraz minimalną prędkość na schodach, rozkład normalny dla czasu opóźnienia – dla populacji osób w pełni sprawnych,
- rozkład normalny dla prędkości na korytarzu oraz minimalną prędkość na schodach, niezależnie od przyjętego rozkładu dla czasu opóźnienia – dla użytkownika poruszającego się o kulach,
- stałą średnią prędkość na korytarzu oraz prędkość na schodach zależną od nachylenia, zgodnie z danymi SFPE, rozkład normalny dla czasu opóźnienia – dla ekipy pomocniczej oraz osoby transportowanej za pomocą krzesła ewakuacyjnego.

Różnice między czasem ewakuacji (WCBE) poszczególnych populacji względem badań eksperymentalnych wyniosły od 1,2% do 11,5%. Najlepsze odwzorowanie uzyskano dla użytkownika ewakuowanego za pomocą krzesła ewakuacyjnego.

Dzięki zestawieniu DCBE oraz WCBE wraz ze szczegółową analizą wyników uzyskanych z symulacji ewakuacji oraz z modelu rozwoju pożaru wywnioskowano, że wszystkie osoby znajdujące się w obszarze niebezpiecznym zdążą ewakuować się z niego zanim nastąpi pogorszenie warunków uniemożliwiające dalszą ewakuację.

Przeprowadzone analizy pozwoliły wskazać główne wyzwania jakie niesie za sobą obowiązek zapewnienia bezpiecznej ewakuacji wszystkim osobom, niezależnie od stanu fizycznego oraz psychicznego, a także wskazać dostępne rozwiązania, które można uwzględnić w celu docelowego wsparcia procesu ewakuacji.

Autorka pracy głęboko wierzy, że wykonane badania przyczynią się do poprawy sytuacji związanej z opracowaniem rozwiązań gwarantujących osobom ze szczególnymi potrzebami możliwość bezpiecznej ewakuacji, na równi z osobami w pełni sprawnymi.

Słowa kluczowe: warunki na drogach ewakuacyjnych, ewakuacja osób z niepełnosprawnościami, pożar, FDS, Pathfinder

Abstract

Conditions in a building during the evacuation of people with disabilities

Ensuring both accessibility of buildings for people with disabilities and their safe evacuation conditions is a significant challenge, increasingly addressed in daily life. National regulations impose an obligation on building owners to ensure accessibility for everyone. However, there is still a lack of appropriate solutions. Building owners face serious challenges as ensuring the safety of people in the building and their safe evacuation is a priority.

In this doctoral dissertation, the author undertakes a comprehensive analysis of the topic, starting with an assessment of the conditions that can occur during fire development, using computational fluid dynamics tools. This includes experimental studies of evacuation from a public building, considering the evacuation of a person with a disability, testing the proposed solution of an evacuation chair, and creating an evacuation model in a simulation program with the implementation of actual movement speeds of selected user populations. The author introduced several modifications to the model created in a popular simulation program to demonstrate that it is possible to model populations of people with disabilities and to manipulate program settings to most accurately replicate results from real evacuation trials.

The conducted studies allowed for the analysis of conditions on evacuation routes during a fire. Through the analysis of selected scenarios, the available safe egress time (DCBE) was determined, which, due to exceeding critical parameter safety thresholds, was approximately 2 minutes. Experimental studies provided evacuation times from the building for selected populations – fully able-bodied individuals, a temporarily disabled person using crutches, and an individual being evacuated using an evacuation chair. The studies clearly indicated that using an evacuation chair improved the evacuation process. Based on the average speed in the corridor and on stairs, it was observed that the evacuation chair's speed in the corridor was approximately 42% higher than that of a person using crutches. On stairs, depending on the type of staircase, the improvement ranged from approximately 17% to even 50%.

Experimental studies determined the required safe egress time (WCBE), which is the time needed for evacuees to reach a safe location outside the building. Depending on the population, this time ranged from 83 seconds for able-bodied individuals, 143 seconds for a person evacuated using an evacuation chair, to 159 seconds for a person using crutches.

The movement speeds of different populations were implemented into the evacuation model. The author created a model reflecting the actual geometry of the building and its users. To obtain the most accurate simulation results, especially concerning the evacuation of people with disabilities, the author manipulated model settings, ultimately achieving satisfactory results. The best replication of real-world conditions for different populations was achieved with the following assumptions:

- Uniform distribution for corridor speed and minimum stair speed, normal distribution for delay time – for fully able-bodied individuals,
- Normal distribution for corridor speed and minimum stair speed, regardless of the distribution for delay time – for a user using crutches,
- Constant average corridor speed and stair speed depending on slope, according to SFPE data, normal distribution for delay time – for the assisting team and the person transported using an evacuation chair.

The differences between the evacuation times of various populations compared to experimental studies ranged from 1.2% to 11.5%. The best replication was achieved for the user evacuated using the evacuation chair.

By comparing DCBE and WCBE times along with a detailed analysis of simulation and fire development model results, it was concluded that all individuals in the danger zone would evacuate before conditions deteriorate, preventing further evacuation.

The analyses conducted allowed for identifying the main challenges posed by the obligation to ensure safe evacuation for all individuals, regardless of physical or mental condition, as well as available solutions for both final evacuation support and initial considerations.

The author believes that the research conducted will contribute to improving the development of solutions guaranteeing people with special needs the possibility of safe evacuation equal to that of fully able-bodied individuals.

Keywords: conditions on evacuation route, evacuation of people with disabilities, fire, FDS, Pathfinder

Spis treści

Rozdział 1. Wprowadzenie	9
1.1. Cele pracy	10
1.2. Zakres pracy.....	11
1.3. Wkład własny	11
Rozdział 2. Przegląd literatury	13
2.1. Ewakuacja osób z niepełnosprawnościami	13
2.2. Modele ewakuacji.....	22
2.3. Warunki na drogach ewakuacyjnych	29
Rozdział 3. Badania ewakuacji z krzesłem ewakuacyjnym	41
3.1. Charakterystyka obiektu	42
3.1.1. Charakterystyka klatek schodowych	44
3.2. Założenia do badań	45
3.3. Analiza błędów i niepewności	48
3.4. Wyniki badań	49
3.5. Wnioski z przeprowadzonych badań	56
Rozdział 4. Modelowanie rozwoju pożaru.....	57
4.1. Charakterystyka modelu numerycznego.....	59
4.2. Wyniki badań	65
4.2.1. Przypadek 1 – drzwi bez samozamykaczy	65
4.2.2. Przypadek 2 – drzwi z samozamykaczami	89
4.3. Wnioski z przeprowadzonych analiz numerycznych.....	105
Rozdział 5. Modelowanie ewakuacji	109
5.1. Charakterystyka modelu ewakuacji	111
5.2. Wyniki symulacji ewakuacji	116
5.3. Wnioski z przeprowadzonych symulacji ewakuacji	123
Rozdział 6. Wnioski końcowe.....	125
Bibliografia	129

Wykaz ważniejszych skrótów

Symbol	Opis
CFD	Computational Fluid Dynamics (numeryczna mechanika płynów)
DCBE	Dostępny Czas Bezpiecznej Ewakuacji
DNS	Direct Numerical Simulation (bezpośrednia symulacja numeryczna)
FDS	Fire Dynamics Simulator – program komputerowy
FED	Fractional Effective Dose (frakcyjna dawka skuteczna)
K	Osoba poruszająca się o kulach
K1	Boczna klatka schodowa
K2	Główna klatka schodowa
KE	Osoba transportowana za pomocą krzesła ewakuacyjnego
LES	Large Eddy Simulation LES – model turbulencji dużych wirów
NDS	Najwyższe dopuszczalne stężenie
NDSch	Najwyższe dopuszczalne stężenie chwilowe
NDSP	Najwyższe dopuszczalne stężenie pułapowe
NIST	National Institute of Standards and Technology - Narodowy Instytut Standaryzacji i Technologii w Stanach Zjednoczonych
P	Populacja osób w pełni sprawnych
SFPE	Society of Fire Protection Engineers - Stowarzyszenie Inżynierów Ochrony Przeciwpożarowej
WCBE	Wymagany Czas Bezpiecznej Ewakuacji

Rozdział 1. Wprowadzenie

Przebywanie w budynku w bezpiecznych warunkach jest podstawowym prawem każdego człowieka. Sytuacja może się skomplikować w momencie zaistnienia zagrożenia jakim jest pożar. Przepisy [1] jasno określają, że nawet w sytuacji zagrożenia, muszą zostać zapewnione bezpieczne warunki ewakuacji dla wszystkich użytkowników budynku. Wzrost świadomości w zakresie wyzwań jakimi obarczone są osoby z niepełnosprawnościami oraz osoby ze szczególnymi potrzebami wymusił wprowadzenie nowych regulacji [2], które ustandaryzują wymagania w różnego typu budynkach. Przepisy wchodzą w życie stopniowo, wciąż trwają prace nad odpowiednim ich sformułowaniem, aby dostosować się do zapewnienia standardu dostępności.

Jak wskazują statystyki [3], społeczeństwo w Polsce się starzeje, a co za tym idzie istnieje realna szansa, że w ciągu kolejnych lat zwiększy się potrzeba pomocy przy ewakuacji nie tylko osobom z niepełnosprawnościami, ale również osobom starszym, niezależnie od stopnia sprawności.

Zmiany w przepisach, potrzeba wprowadzenia konkretnych rozwiązań oraz wzrost zainteresowania tematyką ewakuacji osób ze specjalnymi potrzebami skłoniły autorkę pracy do wykonania szeregu badań, aby sprawdzić, jaki jest aktualny stan wiedzy oraz czy istnieją rozwiązania, które mogą usprawnić proces ewakuacji.

Każdy z nas musi być świadomym ryzyka jakie niesie za sobą pożar. Tego, jakie warunki środowiska wewnętrznego mogą wystąpić podczas pożaru, z jaką szybkością pożar może rozprzestrzeniać się w budynku oraz jakie mogą być konsekwencje przebywania w środowisku pożaru, w narażeniu na poszczególne czynniki niebezpieczne. Pożar jest zjawiskiem niekontrolowanym, trudno jest przewidzieć jego rzeczywisty przebieg oraz to, jakie będą jego skutki – w odniesieniu do bezpieczeństwa ludzi, wytrzymałości budynku, a także oddziaływania na środowisko. Zgodnie z definicją [4] pożar to *„niekontrolowany proces spalania zachodzący poza miejscem do tego celu przeznaczonym, przynoszący straty materialne. Towarzyszy mu występowanie czynników szkodliwych, takich jak: płomień, wzrost temperatury, dym, wybuchy, iskry, toksyczne produkty spalania, a w konsekwencji np. naruszenie konstrukcji budowlanych i urządzeń technologicznych, zniszczenie upraw lub lasu.*

Do analizy warunków w budynku autorka pracy wykorzystwała narzędzia numerycznej mechaniki płynów oraz symulacje ewakuacji, które zgodnie z powszechną wiedzą są dobrym narzędziem wykorzystywanym zarówno w pracach badawczych, jak również w środowisku inżynierskim.

Temat pracy dotyczy kilku obszarów badawczych – zarówno analizy warunków na drogach ewakuacyjnych, jak również procesu ewakuacji, a w szczególności ewakuacji osób z niepełnosprawnościami. Z powodu złożoności poruszanych problemów praca została podzielona na poszczególne rozdziały.

1.1. Cele pracy

Głównym celem pracy jest sprawdzenie czy istnieje możliwość analizy warunków jakie mogą panować na drodze ewakuacji w czasie rozwoju pożaru w wybranym budynku, wykorzystując w tym celu komercyjne narzędzia komputerowe. Jednocześnie czy dostępny czas bezpiecznej ewakuacji (DCBE) jest wystarczający dla zapewnienia bezpiecznych warunków na drogach ewakuacyjnych w czasie ewakuacji osób mającym trudności z poruszaniem się.

Cele pośrednie pracy:

- Obliczenie, za pomocą narzędzi numerycznej mechaniki płynów, jakie warunki środowiska mogą wystąpić na drogach ewakuacyjnych podczas rozwoju pożaru w budynku.
- Przedstawienie stanu wiedzy na temat ewakuacji osób z niepełnosprawnościami oraz dostępnych rozwiązań wspomagających ten proces.
- Sprawdzenie w jaki sposób może przebiegać ewakuacja osób z udziałem osoby z niepełnosprawnością, czy jej obecność wpływa na proces ewakuacji.
- Sprawdzenie czy zastosowanie krzesła ewakuacyjnego usprawni proces ewakuacji osoby z niepełnosprawnością.
- Zmierzenie prędkości ewakuacji osób, z uwzględnieniem osób z niepełnosprawnościami oraz różnych sposobów przemieszczania się podczas rzeczywistych prób ewakuacyjnych. Implementacja otrzymanych prędkości do programu symulacyjnego.
- Prezentacja sposobów modelowania ewakuacji z budynków w tym ewakuacji osób z niepełnosprawnościami.
- Sprawdzenie czy komercyjne narzędzie symulacyjne daje możliwość wprowadzenia danych uwzględniających różne populacje użytkowników budynku w celu analizy procesu ewakuacji z udziałem osoby z niepełnosprawnością oraz czy otrzymane wyniki są zbieżne z wynikami rzeczywistych prób ewakuacyjnych.
- Przetestowanie kryteriów związanych z oceną bezpieczeństwa osób, również z niepełnosprawnościami, podczas rozwoju pożaru wykorzystując w tym celu narzędzia symulacyjne.

W oparciu o tak sformułowane cele, postawiono następujące hipotezy badawcze:

- Wykorzystując narzędzia numerycznej mechaniki płynów do analizy rozwoju pożaru można dokonać oceny stanu środowiska na drogach ewakuacyjnych.
- Istnieją różnice w narażeniu osób na niebezpieczne warunki w czasie ewakuacji, w zależności od pozycji w jakiej się poruszają.
- Istnieją urządzenia wspomagające proces ewakuacji, które pomagają zapewnić bezpieczną ewakuację osobom z niepełnosprawnościami.
- Istnieje możliwość wprowadzenia danych empirycznych do komercyjnego programu symulacyjnego w celu symulacji ewakuacji osób z niepełnosprawnościami oraz możliwość zmiany ustawień w celu uzyskania wyników na akceptowalnym poziomie zbieżności z wynikami rzeczywistych prób ewakuacji.

1.2. Zakres pracy

Praca została podzielona na rozdziały, w których począwszy od przeglądu literatury autorka nakreśla problem - przegląd literatury został podzielony na poszczególne tematy ze względu na złożoność omawianych problemów. Następnie autorka pracy przedstawia metodykę badań oraz wyniki przeprowadzonych przez siebie badań eksperymentalnych przeprowadzonych w rzeczywistym budynku z udziałem grupy osób, a także badań wykorzystujących narzędzia numeryczne. Na samym końcu autorka przedstawia główne wnioski z przeprowadzonych badań.

1.3. Wkład własny

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy oraz dostępnej literatury stwierdzono, że poszczególne tematy poruszane są w wielu publikacjach, natomiast w odczuciu autorki pracy, wymagają one dalszych analiz oraz brak jest kompleksowego podejścia do tematu bezpieczeństwa ewakuacji z budynku osób z niepełnosprawnościami. Dodatkowo, po przeanalizowaniu krajowych przepisów zauważono brak wskazań dotyczących zastosowania konkretnych rozwiązań, których celem jest zapewnienie bezpiecznych warunków ewakuacji dla osób z ograniczoną zdolnością poruszania się. Wkładem własnym autorki pracy jest zatem:

- Opracowanie metodyki badań rzeczywistej ewakuacji z budynku wybranej grupy osób z udziałem osoby o czasowym ograniczeniu zdolności samodzielnego poruszania się.
- Zaproponowanie zastosowania krzesła ewakuacyjnego do ewakuacji osoby z niepełnosprawnością.

- Przeprowadzenie badań eksperymentalnych ewakuacji z budynku z użyciem krzesła ewakuacyjnego.
- Przygotowanie parametrów oraz modelu do symulacji warunków na drogach ewakuacyjnych w czasie rozwoju pożaru.
- Przeprowadzenie analiz numerycznych rozwoju pożaru dla dwóch wariantów zastosowania konkretnych rozwiązań ppoż.
- Opracowanie modelu ewakuacji w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych.
- Przeprowadzenie komputerowych symulacji ewakuacji dla różnych scenariuszy ewakuacyjnych.
- Wskazanie różnic między wynikami pochodzącymi z programu symulacyjnego, a uzyskanymi w rzeczywistych próbach ewakuacyjnych.
- Oszacowanie bezpieczeństwa osób z niepełnosprawnościami w przypadku konieczności ewakuacji z budynku użyteczności publicznej.

Rozdział 2. Przegląd literatury

2.1. Ewakuacja osób z niepełnosprawnościami

Najważniejszym aspektem bezpieczeństwa osób przebywających w budynku, w przypadku wystąpienia pożaru, jest możliwość bezpiecznej ewakuacji lub uratowania w inny sposób [5]. Bezpieczne warunki ewakuacji muszą być zapewnione każdej osobie, niezależnie od jej cech fizycznych i psychicznych. Współcześnie, osoby z niepełnosprawnościami w naturalny sposób uczestniczą we wspólnym życiu, przez co istnieje prawdopodobieństwo ich obecności w budynku. W związku z tym, konieczna jest prawidłowa analiza ewakuacji z uwzględnieniem osób z niepełnosprawnościami oraz wynikającymi z tego faktu ograniczeniami.

W ostatnich latach nastąpiła pewnego rodzaju rewolucja w przepisach, która wymusza konieczność projektowania obiektów z uwzględnieniem ewakuacji osób ze specjalnymi potrzebami. Obowiązek zapewnienia osobom ze szczególnymi potrzebami możliwości ewakuacji lub uratowania w inny sposób wynika m.in. z Ustawy o Prawie Budowlanym [6], Rozporządzeniach [7], [8] oraz z art. 6 Ustawy o zapewnianiu dostępności osobom ze szczególnymi potrzebami [2].

Osoba ze szczególnymi potrzebami wg ww. Ustawy to „osoba, która ze względu na swoje cechy zewnętrzne lub wewnętrzne, albo ze względu na okoliczności, w których się znajduje, musi podjąć dodatkowe działania lub zastosować dodatkowe środki w celu przezwyciężenia bariery, aby uczestniczyć w różnych sferach życia na zasadzie równości z innymi osobami” [2]. Do grupy osób ze szczególnymi potrzebami można zaliczyć zarówno osoby z niepełnosprawnościami, które posiadają orzeczenie o stałym inwalidztwie, ale również osoby z czasowymi dysfunkcjami wynikającymi np. z nabytej kontuzji czy choroby. Do tej grupy włączają się również osoby starsze oraz kobiety w ciąży.

W przepisach istnieje kilka określeń, które w odczuciu autorki niniejszej dysertacji dotyczą tej samej grupy osób, stąd aby ujednolicić terminologię w dalszej części pracy stosowane będzie określenie – osoby z niepełnosprawnościami.

Osoby z niepełnosprawnościami nie stanowią jednolitej grupy. W zależności od rodzaju i zakresu niepełnosprawności można wyróżnić grupy z określonym typem dysfunkcji. Trzeba mieć na uwadze również fakt, że osoby te mogą mieć dysfunkcje stałe lub czasowe oraz o różnym stopniu. Od stopnia lekkiego, gdzie obniżenie sprawności jest niewielkie, aż do stopnia znacznego, gdzie osoby nie są w stanie np. samodzielnie się poruszać.

Wszystkie dysfunkcje, zarówno te znaczne jak i lekkie, będą wpływać na zachowanie się ludzi podczas ewakuacji. Obecność osób z niepełnosprawnościami wpływa na wymagany czas bezpiecznej ewakuacji, powodując jej wydłużenie. Osoby z niepełnosprawnościami mogą inaczej postrzegać sygnały o zagrożeniu, w części lub w większości przypadków, potrzebują więcej czasu na przemieszczenie się do miejsca bezpiecznego (zwłaszcza w przypadku poruszania się po pionowych odcinkach dróg ewakuacyjnych), niż osoby w pełni sprawne. Wynika to z faktu mniejszej szybkości poruszania się, konieczności poruszania z użyciem sprzętu ortopedycznego czy wózka inwalidzkiego, konieczności pomocy ze strony innych osób lub konieczności użycia sprzętu do ewakuacji np. krzesła ewakuacyjnego.

Zagadnienie „ewakuacja” jest pojęciem bardzo obszernym i może być analizowane pod różnym kątem. W literaturze znajdziemy wiele badań poświęconym ewakuacji z budynków. Już w połowie XX wieku opisano kilka ważnych aspektów dotyczących ruchu na głównych odcinkach dróg ewakuacyjnych, czyli w korytarzach, drzwiach i na schodach [9], [10]. Badania nad charakterystyką ruchu na klatce schodowej przeprowadzili również Fang i inni w 2012 roku [11]. W badaniach tych autorzy wskazują, że prędkość schodzenia po schodach determinowana jest głównie przez widoczność na klatce schodowej, a także przez sprawność osób ewakuujących się oraz sposób wchodzenia na klatkę schodową.

W pracy autorki Kobes [12] znajdziemy obszerny przegląd literatury, uwzględniający różne aspekty ewakuacji – prędkość przemieszczania się, zachowanie się ludzi podczas ewakuacji, czy ewakuację osób z niepełnosprawnościami.

National Institute of Standards and Technology (NIST) zbiera dane z różnych źródeł na temat ewakuacji oraz prób przeciwpożarowych [13]. Dane te mogą być brane pod uwagę przy opracowywaniu nowych standardów i wykorzystywane w modelowaniu ewakuacji.

Bryan w 2002 roku przedstawił przegląd badań prowadzonych na przestrzeni ostatnich lat, które znacząco wpłynęły na rozwój dziedziny bezpieczeństwa pożarowego. Badania te wpłynęły na zmianę postrzegania zagrożeń powodowanych pożarem oraz zachowania ludzi [14]. Peacock i inni [15] dokonali przeglądu ćwiczeń ewakuacyjnych z budynków pod względem prędkości przemieszczania się oraz przedstawili nowe dane, aby zapewnić lepsze zrozumienie ewakuacji, zwłaszcza podczas poruszania się po schodach.

Jednym z czynników mających duży wpływ na wymagany czas bezpiecznej ewakuacji jest opóźnienie ewakuacji. Opóźnienie to może wynikać zarówno z wydłużonej reakcji ludzi na zagrożenie, jak również ze zjawiska zwlekania z podjęciem ewakuacji (np. bagatelizowaniem otrzymanych sygnałów alarmowych) oraz podejmowanie różnych działań dodatkowych. Tymi działaniami mogą być np. powiadamianie innych o zagrożeniu,

zbieranie rzeczy osobistych, pomaganie innym, ubieranie się itp. W 2009 roku Zhao i inni przedstawili wyniki ankiety przeprowadzonej w celu zbadania jakie zachowania wykazują ludzie przed podjęciem decyzji o ewakuacji w wielokondygnacyjnym budynku biurowym [16]. Zachowania, które zostały zaobserwowane to m.in. alarmowanie innych użytkowników budynku, zabieranie rzeczy osobistych, instruowanie innych, a także próby gaszenia pożaru. Autorzy wskazali przede wszystkim, że reakcja na alarm oraz podejmowane działania są cechą indywidualną każdego człowieka i wynikają ściśle z jego charakterystyki (wieku, przeszkolenia, doświadczenia, sprawności itd.). Wyniki badań nad czasem reakcji znajdziemy również w pracy Forssberg i inni z 2019 roku [17].

Autorzy Cisek i Orłowska na podstawie ankiet przeprowadzonych po ewakuacjach, zbadali jakie są odczucia osób podczas alarmu o ewakuacji oraz zaproponowali model alarmowania, który ma na celu usprawnić proces decyzyjny [18].

W literaturze można znaleźć liczne badania poświęcone zachowaniu ludzi, które zapoczątkowane zostały przez Bryana w 1956 roku [19], a następnie kontynuowane przez wielu badaczy – m.in. Woodsa [20], Sime [21] i Bryana [22]. Autorzy wzięli pod uwagę różne aspekty zachowania człowieka i jego wpływ na ewakuację. Na przykład, autorka Fahy w swoich badaniach opisała zjawisko paniki oraz jego właściwą interpretację [23].

Zestawienie czasów opóźnień i prędkości przemieszczania się pochodzących z analiz rzeczywistych pożarów oraz ćwiczeń ewakuacyjnych przedstawiły autorki Fahy i Proulx [24].

Istnieje również wiele opracowań dotyczących ewakuacji z różnych typów budynków. Nilsson i Johansson przedstawili analizę ewakuacji z sali kinowej [25], a w przedstawionych badaniach skupiają się na wzajemnym wpływie społecznym na ludzkie zachowanie. Natomiast Proulx [26] w 1995 roku przedstawiła wyniki czasu ewakuacji i ruchu mieszkańców w budynkach mieszkalnych. Eksperyment obejmował analizę czterech budynków, które zamieszkiwało średnio 150 osób, w tym dzieci, dorośli i osoby z niepełnosprawnościami.

Rozwój badań w tej dziedzinie pozwolił przyjąć, że zachowanie człowieka w czasie pożaru jest istotnym czynnikiem warunkującym przeżycie. Przegląd zachowań tłumu opisali Haghani i Sarvi [27]. Kobes w jednym ze swoich artykułów wskazała czynniki krytyczne, które decydują o reakcjach mieszkańców, oraz przedstawiła przegląd zachowań ludzi w budynkach podczas pożaru [12]. Autorzy Liu i inni na podstawie przeprowadzonych ankiet wskazali czynniki ludzkie, które wpływają na ewakuację z budynków uniwersyteckich [28]. W wielu badaniach stwierdzono, że ludzie wybierają te rozwiązania, które już znają. Podczas ewakuacji przemieszczają się do znajomych miejsc lub osób. Generalnie, podczas ewakuacji

ludzie wybierają znane sobie trasy lub wyjścia, nawet jeśli odległość do wyjścia jest większa i zazwyczaj wybierają tę drogę, którą przyszli [29]. Założenie to zostało opisane przez Sime'a w 1983 roku i można je znaleźć w wielu współczesnych badaniach [21], [30], [31], [32]. Kinateder i inni [33] również opisali zjawisko wyboru wyjść już znanych, a także wpływ zachowania sąsiadów na podejmowanie decyzji o wyborze wyjścia ewakuacyjnego.

Osoby ewakuujące się z budynku, który znają mają mniejszy problem z przemieszczaniem się, niż osoby znajdujące się w danym otoczeniu po raz pierwszy [34].

W 2012 roku Heliovaara [35] przedstawiła wyniki analizy zachowania ludzi w korytarzach oraz wyborze wyjścia. W badaniach tych autorzy identyfikują sposób zachowania pieszego – kooperacyjny i egoistyczny oraz jego wpływ na wynik ewakuacji.

Oprócz analizy zachowania ludzi, dane z rzeczywistych pożarów dostarczają również informacji o czasie przemieszczania się różnych grup ludzi, który ma wpływ na wymagany czas bezpiecznej ewakuacji.

Shi i inni zestawili dane pochodzące z różnych ćwiczeń ewakuacyjnych [36]. Autorzy skupili się na analizie czasu przed ewakuacją oraz prędkości poruszania się, w tym również osób z niepełnosprawnościami. Najnowszą bazę danych, obejmującą czasy poprzedzające ewakuację zebrane na podstawie studiów przypadków różnych incydentów i ćwiczeń ewakuacyjnych, dostarczyli Gwynne i Boyce w 2016 r. [37], a jej rozszerzoną wersję Lovreglio i inni [38] w 2019 roku.

Na szybkość poruszania się duży wpływ ma wiele czynników, w tym charakterystyka użytkowników i ich sprawność fizyczna. Tancogne i Laclemeence przeprowadzili badania dotyczące postrzegania zagrożenia pożarowego i procesu ewakuacji przez osoby poszkodowane w tym osoby z niepełnosprawnościami [39]. Dzięki tym badaniom mamy lepsze zrozumienie procesu ewakuacji z budynku osób, które mają trudności z samodzielną ewakuacją.

Karen Boyce [40] zasygnalizowała, że bardzo ważne jest zrozumienie możliwości ewakuacji osób z niepełnosprawnościami oraz konieczność projektowania opartego na wydajności, aby zapewnić bezpieczne środowisko wewnętrzne dla wszystkich użytkowników. Smedberg i inni [41] przedstawili wyniki ankiet przeprowadzonych na grupie osób starszych z różnymi ograniczeniami. Dzięki przeprowadzonym badaniom, autorzy przybliżają i podkreślają perspektywę osób z ograniczeniami funkcjonalnymi w zakresie możliwości wyjścia i związanych z nią aspektów dostępności.

Prędkości przemieszczania się dorosłych osób z niepełnosprawnościami oraz wpływ obecności osób z niepełnosprawnościami na ewakuację z budynku opisano w kilku

badaniach. M.in. Sharifi i inni [42] przedstawili wyniki dotyczące prędkości przemieszczania się w różnych środowiskach wewnętrznych. Wybrane wyniki przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Wybrane prędkości przemieszczania [42]

Miejsce	Populacja	Średnia prędkość, m/s	Odchylenie standardowe, m/s
Korytarz	Homogeniczna	0,93	0,22
	Heterogeniczna	0,82	0,22
Zjawisko "wąskiego gardła"	Homogeniczna	0,73	0,19
	Heterogeniczna	0,70	0,21
Schody	Homogeniczna	0,56	0,27
	Heterogeniczna	0,43	0,26

W literaturze możemy znaleźć wyniki badań poświęconych analizie prędkości poruszania się osób z niepełnosprawnościami. W 1999 roku Boyce i inni [43] rozważyli kwestię prędkości poruszania się osób z ograniczoną mobilnością po odcinkach poziomych oraz po schodach. W badaniach uwzględniono osoby z niepełnosprawnością ruchową, które poruszają się samodzielnie, oraz z wykorzystaniem kul ortopedycznych, lasek lub chodzików, a także osoby przemieszczające się na wózkach inwalidzkich [44]. Autorzy przeprowadzili badania z udziałem grupy 107 osób, z czego 6 osób było w pełni sprawnych. Otrzymali następujące wyniki, przedstawione w tabeli 2.2. Liczbę osób poruszających się w określony sposób przedstawia „n”.

Tabela 2.2. Prędkość przemieszczania się osób z niepełnosprawnościami [43]

Badana grupa	Średnia prędkość, m/s	Odchylenie standardowe, m/s
Osoby z niepełnosprawnościami (n=107)	1,00	0,42
Osoby z niepełnosprawnościami ruchu (n=101)	0,80	0,37
bez pomocy (n=52)	0,95	0,32
o kulach (n=6)	0,94	0,30
o lasce (n=33)	0,81	0,38
z chodzikiem (n = 10)	0,57	0,29
osoby w pełni sprawne (n=6)	1,25	0,32

Autorzy Christensen i inni w 2006 roku [45] opublikowali przegląd literatury dotyczący badań prędkości poruszania się osób z niepełnosprawnościami. W pracy autorów Shi i inni z 2009 roku [36] również znajdziemy zestawienie prędkości poruszania się tej grupy osób w zależności od różnych czynników. Z kolei autorzy Jiang i inni w 2012 roku [46] przeprowadzili badania dotyczące ewakuacji ze stacji metra w Pekinie, w której brały udział osoby poruszające się z pomocą asysty lub o kulach. W pracach Kuligowski i inni z lat 2013 oraz 2015 [47], [48] znajdziemy zestawienie wyników z badań, dotyczących szybkości ewakuacji osób z niepełnosprawnościami oraz osób starszych. Podobne zestawienie, dotyczące poruszania się osób z niepełnosprawnościami ewakuujących się samodzielnie lub z pomocą, znajdziemy także w publikacji Hashemi z 2018 roku [49], [44]. We wszystkich omawianych pracach można zauważyć, że osoby z niepełnosprawnościami poruszają się najwolniej spośród osób ewakuujących się.

Zgodnie ze światowymi statystykami prawie 16% populacji stanowią osoby z niepełnosprawnościami [50]. W Polsce sytuacja wygląda podobnie. Według danych statystycznych w roku 2011 populacja osób z niepełnosprawnościami stanowiła 12,2% [51]. Globalna tendencja do starzenia się społeczeństwa sprawia, że problem niepełnosprawności nabiera na sile. Zgodnie z danymi, osoby starsze stanowią największą grupę wśród osób z niepełnosprawnościami [50].

Polskie przepisy nie określają konkretnych rozwiązań ułatwiających osobom z niepełnosprawnościami bezpieczną ewakuację. W Rozporządzeniu w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie brak jest zapisów dotyczących ewakuacji osób z niepełnosprawnościami [5]. Przepisy określają minimalne wymagania odnośnie budowy oraz bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji i elementów budynku. Określają wymiary, liczbę oraz lokalizację wyjść ewakuacyjnych, korytarzy, schodów. Ze względu na fakt, że podczas pożaru nie ma możliwości korzystania z wind (z pominięciem dźwigów dla służb ratowniczych), schody są często jedyną drogą ewakuacyjną, co w przypadku osób z niepełnosprawnościami stanowi duży problem. Rozporządzenie w sprawie ppoż. [1] określa ogólnie wymóg zapewnienia odpowiednich warunków ewakuacji dostosowanych m.in. do stanu sprawności osób przebywających w budynku.

W literaturze możemy znaleźć wiele badań poświęconym tematyce ewakuacji osób z niepełnosprawnościami. Autorzy Christensen, Collins i inni [52] wykonali obszerny przegląd literatury w tym zakresie. Autorzy wskazali artykuły poruszające kwestie wpływu obecności osób z niepełnosprawnościami na proces ewakuacji, jak również badania poświęcone analizie szybkości ewakuacji. W 2019 roku Geoerg i inni [53] dokonali przeglądu i aktualizacji dostępnych zestawów danych [54] związanych z kluczowymi

czynnikami wpływającymi na wydajność ewakuacji populacji, w której obecne są osoby z różnego typu niepełnosprawnościami.

Badania pożarów oraz analizy katastrof przyczyniły się do wskazania ważnych problemów, które pojawiły się podczas ewakuacji. Dzięki interpretacji danych z rzeczywistych zdarzeń, podjęto działania mające na celu zminimalizowanie ich wystąpienia w przyszłości. Jednym z tragicznych w skutkach zdarzeń był zamach na World Trade Center w 2001 roku. Katastrofa przyczyniła się do wzmożenia rozważań odnośnie bezpieczeństwa osób w budynkach. W raporcie National Institute of Standards and Technology NIST [55] z 2005 roku przedstawiono przebieg ewakuacji wraz z uwzględnieniem ewakuacji osób z niepełnosprawnościami. W raporcie opisano sytuacje, które wpływały negatywnie na proces ewakuacji m.in. osoby z ograniczoną mobilnością oczekiwały na pomoc na schodach, tym samym tarasując przejście innym.

W dużych obiektach o skomplikowanej geometrii istnieje konieczność stosowania alternatywnych rozwiązań zapewniających bezpieczną ewakuację wszystkich użytkowników, w tym osób z niepełnosprawnościami. Jednym z rozwiązań technicznych jest projektowanie w budynku specjalnych pomieszczeń – obszarów schronienia, które będą zapewniać, przez określony czas, bezpieczne warunki podczas pożaru. Pomieszczenia te muszą spełnić wymagania określone prawnie. Miejsca te stanowią pewnego rodzaju poczekalnie, gdzie osoby mające problem z ewakuacją będą mogły poczekać na pomoc. Podstawowym celem stosowania obszarów schronienia, w przypadku ewakuacji z budynku o skomplikowanej geometrii, jest zapewnienie bezpiecznego miejsca dla osób ewakuujących się. Osoby zmęczone ewakuacją, osoby starsze, osoby z niepełnosprawnościami mogą w tym miejscu chwilę odpocząć, aby następnie kontynuować ewakuację (o ile warunki na to pozwalają) lub poczekać w tym miejscu na pomoc ekipy ratowniczej [56]. Obszary schronienia mogą być zlokalizowane na każdej kondygnacji w pobliżu klatki schodowej, stanowiąc jej przedsionek. Osoby mające trudność z poruszaniem się po schodach, mogą poczekać w tym miejscu na dalszą pomoc. Oczywiście, tak wydzielone strefy muszą być wyposażone w systemy ratunkowe (łączność oraz ochrona przed zadymieniem), które pozwolą szybko zlokalizować osoby, które potrzebują pomocy oraz zapewnią bezpieczne warunki na czas oczekiwania na pomoc.

W niektórych krajach przepisy przeciwpożarowe, zwłaszcza w budynkach wysokich, określają konieczność tworzenia w budynkach takich specjalnych stref schronienia. W artykule autorstwa Cheuk Lun i Wan Ki Chow [57] opisany został przykład zastosowania w wieżowcu całych pięter, jako miejsc schronienia. Autorzy wskazują, że takie rozwiązanie nie tylko zapewnia bezpieczne miejsce dla osób ewakuujących się, ale również może

stanowić punkt dowodzenia akcją ratowniczą. W zależności od budowy takiego piętra, może ono również zmniejszyć ryzyko rozprzestrzeniania się pożaru na wyższe kondygnacje [57].

Kolejnym rozwiązaniem jest zastosowanie różnego typu urządzeń transportowych do ewakuacji osób, które potrzebują pomocy. To rozwiązanie umożliwia transport osób z niepełnosprawnościami m.in. po schodach tak, aby umożliwić im jak najszybsze dotarcie do strefy bezpiecznej (najczęściej na zewnątrz budynku). Omawiane w literaturze urządzenia transportowe dzielimy na te, które wymagają obsługi przez min. 2 osoby (nosze, krzesła transportowe, płachty ratownicze) oraz urządzenia przeznaczone do obsługi przez jedną osobę (krzesła ewakuacyjne, schodolazy) [58]. W 2015 roku Hunt i inni [59] przeprowadzili badania dotyczące ewakuacji ze szpitala osób z ograniczoną mobilnością. Otrzymano wyniki prędkości poruszania się osób ewakuowanych za pomocą takich urządzeń transportowych, jak nosze, krzesło ewakuacyjne, płachty ratownicze czy krzesło transportowe [44].

Lavender i inni w 2014 roku [60] w swojej pracy sprawdzili m.in. prędkość zejścia po schodach podczas ewakuacji osób z ograniczoną mobilnością z użyciem urządzeń transportowych. Rozważono transport ręczny osoby z niepełnosprawnością oraz transport z użyciem krzesła materiałowego, a także dwóch różnych krzeseł transportowych. Odnotowano różnice w prędkości dla różnych typów urządzeń transportowych [44].

Wybrane prędkości przemieszczania się z użyciem urządzeń transportowych po poziomych odcinkach dróg ewakuacyjnych przedstawia Tabela 2.3, a po schodach Tabela 2.4.

Tabela 2.3. Prędkości przemieszczania urządzeń transportowych po odcinkach poziomych, m/s [59]

Ekipa obsługująca urządzenie	Nosze	Krzesło ewakuacyjne	Krzesło transportowe	Płachta ratownicza
Mężczyźni	$1,09 \pm 0,08$	$1,55 \pm 0,06$	$1,54 \pm 0,13$	$1,16 \pm 0,06$
Kobiety	$0,99 \pm 0,06$	$1,39 \pm 0,03$	$1,46 \pm 0,04$	$0,72 \pm 0,18$
Mieszana	$1,04 \pm 0,09$	$1,46 \pm 0,09$	$1,50 \pm 0,10$	$0,89 \pm 0,24$

Tabela 2.4. Prędkości przemieszczania urządzeń transportowych po schodach, m/s [59]

Ekipa obsługująca urządzenie	Nosze	Krzesło ewakuacyjne	Krzesło transportowe	Płachta ratownicza
Mężczyźni	0,63	0,83	0,50	0,82
Kobiety	0,44	0,82	0,66	0,52
Mieszana	$0,53 \pm 0,10$	$0,83 \pm 0,04$	$0,58 \pm 0,12$	$0,67 \pm 0,15$

Kuligowski i inni [47] opisali średnie prędkości osób starszych oraz osób z niepełnosprawnością ruchową, które potrzebują pomocy podczas ewakuacji. W badaniach tych, oprócz prędkości średniej (Tabela 2.5) możemy znaleźć również informacje o lokalnej prędkości osoby korzystającej z krzesła ewakuacyjnego oraz osób starszych podczas ewakuacji na schodach.

Tabela 2.5. Średnia prędkość przemieszczania osób z niepełnosprawnościami po schodach [47]

Badana grupa ludzi	Średnia prędkość, m/s
Cała grupa badanych, grupa heterogeniczna	$0,22 \pm 0,10$
Osoby poruszające się o lasce	$0,25 \pm 0,07$
Osoby przemieszczające się z pomocą innych osób	$0,21 \pm 0,16$
Osoby przemieszczające się z pomocą ratowników	$0,11 \pm 0,04$
Osoby przemieszczające się z pomocą krzesła ewakuacyjnego	$0,21 \pm 0,05$
Osoby starsze przemieszczające się bez pomocy	$0,29 \pm 0,12$

Krzesła ewakuacyjne mają przewagę nad pozostałymi rozwiązaniami jak transport ręczny lub urządzenia transportowe (nosze, transportery czy płachty ratownicze [60]), ponieważ są skonstruowane w taki sposób, aby mogła je obsługiwać jedna osoba. Ponadto, są składane i kompaktowe, a ich rozkładanie trwa jedynie kilka-kilkanaście sekund. Krzesła ewakuacyjne wyposażone są zazwyczaj w gąsienicowy układ hamowania przy zjeździe po schodach oraz koła do jazdy po odcinkach poziomych [61], co umożliwia łatwy transport zarówno na poziomych jak i pionowych odcinkach dróg ewakuacyjnych. W zależności od modelu, krzesła mogą mieć zarówno prostą konstrukcję, jak i bardziej skomplikowaną np. modele z elektrycznym wspomaganiem układu gąsienicowego [62].

Wśród innych rozwiązań dostępne są urządzenia do ewakuacji przez okno budynku, jednakże to rozwiązanie może nie być pomocne w przypadku ewakuacji osób sparaliżowanych. Niezależnie od stopnia sprawności osób ewakuowanych, do ewakuacji osób z budynku, zwłaszcza z wyższych kondygnacji mogą posłużyć zewnętrzne urządzenia techniczne jakimi są kosztowne podnośniki wysokiego podnoszenia. W przypadku tego rozwiązania potrzebne będą wyszkolone osoby do obsługi podnośnika oraz dostęp wokół budynku, co w rzeczywistości często stanowi problem, gdyż w pobliżu budynków zlokalizowane są parkingi.

W niektórych opracowaniach znajdujemy informacje o wykorzystaniu windy awaryjnej do ewakuacji ludzi, w tym osób z niepełnosprawnościami. Takie rozwiązania proponują m.in.

autorzy Koo i inni [63] oraz Bukowski i inni [64]. Chen i inni [65] wskazują, że windy mogą być wykorzystywane do wspomagania ewakuacji budynków ultra wysokościowych, jednak w tym celu mogą być stosowane tylko windy o specjalnych wymaganiach.

2.2. Modele ewakuacji

Badanie ewakuacji w rzeczywistych warunkach pożaru jest procesem skomplikowanym i trudnym do wykonania. Można analizować dane z rzeczywistych zdarzeń, co jest powszechne, natomiast w przypadku chęci analizy różnych scenariuszy ewakuacji, z uwzględnieniem różnych typów użytkowników budynku oraz różnych warunków, takie badania mogą być wręcz niemożliwe do przeprowadzenia. Trzeba mieć na uwadze również fakt, że pożar jest zjawiskiem dynamicznym i nieprzewidywalnym, a co za tym idzie nie da się dokładnie odwzorować jego natury oraz przebiegu. Przebieg pożaru można szacować na podstawie krzywych rozwoju pożaru, analizując odpowiednie jego parametry takie jak moc pożaru, szybkość rozwoju pożaru, rodzaj i ilość paliwa, ilość dostępnego powietrza, warunki w jakich pożar się rozwija itd. Niestety, analizy te opierają się na przyjęciu różnych założeń oraz uproszczeń.

Aby zminimalizować ryzyko narażenia osób na negatywne oddziaływanie produktów spalania w czasie pożaru, co może zagrozić ich zdrowiu oraz życiu, zamiast rzeczywistych prób ewakuacyjnych (w warunkach pożaru tj. przy wysokiej temperaturze, w obecności zadymienia oraz stężenia szkodliwych produktów spalania) do analiz rozwoju pożaru oraz analizy ewakuacji osób wykorzystuje się programy komputerowe. Niektóre z tych programów oparte są na numerycznej mechanice płynów CFD (Computational Fluid Dynamics), a zastosowane w nich algorytmy pozwalają na wystarczająco dokładne odwzorowanie warunków rzeczywistych.

Bezpieczna ewakuacja zależy przede wszystkim od stanu dróg ewakuacyjnych. Dla prawidłowego zaprojektowania systemów zapewniających dobre warunki na każdym odcinku drogi ewakuacyjnej potrzebna jest znajomość wymaganego czasu ewakuacji.

Ze względu, że eksperymenty z udziałem ludzi, ćwiczenia ewakuacyjne są zwykle skomplikowane i trudne do przeprowadzenia, dlatego do analiz ewakuacji stosuje się komputerowe programy symulacyjne, w których wykorzystuje się modele ewakuacji. Symulacje ewakuacji umożliwiają analizę wielu różnych scenariuszy, w tym tych bardziej złożonych. Modele komputerowe są wydajne i pozwalają uzyskać bardziej realistyczne wyniki w porównaniu do metod analitycznych. Oczywiście analizy komputerowe muszą być poparte danymi rzeczywistymi, aby wykonane symulacje można było uznać za prawidłowe. W tym celu stosuje się dane literaturowe zebrane na przestrzeni lat. Dane ze zdarzeń

rzeczywistych, mogą posłużyć zarówno jako parametry wejściowe do modeli ewakuacji, jak i w procesie walidacji modeli.

Aby zapewnić bezpieczną ewakuację wszystkim użytkownikom, ważne jest uwzględnienie w modelu osób z niepełnosprawnościami. Na podstawie źródeł literaturowych wiadomo, że ewakuacja osób z niepełnosprawnościami potrwa dłużej, a wymagany czas bezpiecznej ewakuacji jest zależny od stopnia niepełnosprawności. Dla realistycznego oszacowania czasu ewakuacji ważne jest uwzględnianie osób z niepełnosprawnościami, dlatego programy te powinny zapewniać taką możliwość. Ta opcja nie zawsze jest dostępna. W niektórych modelach istnieje jedynie możliwość różnicowania ludzi ewakuujących się w zależności od ich prędkości poruszania się. Inne modele dają możliwość ustawienia pewnych kryteriów lub modelowania ruchu za pomocą specjalnego sprzętu, takiego jak wózki inwalidzkie, laski czy chodzik, podczas gdy jeszcze inne modele umożliwiają modelowanie zachowań osób pomagających osobom z niepełnosprawnością ruchową dotrzeć do wyjścia lub na klatkę schodową. Christensen i inni [52] wskazali, że wiele modeli ewakuacji nie odnosi się odpowiednio do osób z niepełnosprawnościami. W 2018 roku Christensen przedstawił agentowy model symulacyjny o nazwie BUMMPEE. Model ten odnosi się do różnych kryteriów dla heterogenicznej populacji, takich jak indywidualna prędkość, wymiary osób, percepcja, pomoc innym osobom, zdolność do pokonywania terenu i profil psychologiczny [66]. Jednak ten model nie był pełni przetestowany na dużą skalę, został poddany walidacji tylko w małym kompleksie biurowym [63], [67], [68]. Rozszerzoną wersję modelu BUMMPEE do symulacji na dużą skalę zaprezentowali Manley i inni w 2011 roku [69]. Ten model został przetestowany pod kątem ewakuacji lotniska. Aby rozważyć nowe strategie ewakuacji, Manley i Kim [70] przedstawili model o nazwie Exitus, który demonstruje strategię wspomaganej ewakuacji osób niepełnosprawnych i korzystania z windy. Pokazuje to, że istnieją lepsze rozwiązania niż strategia oczekiwania na pomoc w projektowanych obszarach schronienia.

W 2013 roku Kuligowski wskazała potrzebę dalszych badań oraz że wciąż brakuje danych na temat zachowania ludzi podczas ewakuacji, a wszelkie nieprawidłowości mogą wynikać z przyjętych uproszczeń i założeń [71].

W literaturze można znaleźć opracowania, które pokazują porównanie wyników symulacji z danymi z prób ewakuacyjnych [72], ze standardami [73], czy z różnymi innymi modelami [74], [75]. Na ogół badania te obejmują złożoną geometrię budynku, składającą się z kilku pięter i wielu klatek schodowych.

Przegląd metod stosowanych w modelowaniu ewakuacji oraz dostępnych komputerowych modeli ewakuacji przedstawiają Gwynne i inni [76]. Badania te kontynuowała i uzupełniała

w kolejnych latach autorka Kuligowski w swoim pierwszym i drugim przeglądzie modeli ewakuacyjnych [77], [78]. W literaturze można znaleźć wiele opracowań dotyczących modeli ewakuacji, symulacji ewakuacji oraz walidacji modeli. Procedura walidacji opisana została przez Lovreglio i inni [79]. W 2006 roku Lo i inni wskazali, że większość modeli koncentruje się na modelowaniu przepływu ewakuowanych [80]. W tym badaniu autorzy skupili się na jednym aspekcie zachowania ludzi — wyborze wyjścia oraz zaproponowali model wyboru wyjścia oparty na teorii gier.

Ogólnie, zachowanie człowieka można symulować w modelach ewakuacyjnych za pomocą rozkładów i zmiennych probabilistycznych. Jak już wcześniej wspomniano, zachowanie osób przed ewakuacją ma główny wpływ na wynik wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji. W modelach obliczeniowych istnieją różne podejścia do symulacji zachowania przed ewakuacją i procesu podejmowania decyzji. Wśród nich jest model wprowadzony przez Lovreglio i innych [81], który można zaimplementować w dowolnym istniejącym oprogramowaniu.

Istnieją dwie główne metody symulowania zachowań ludzi, które zostały opisane przez Kuligowski [82]. W pracy autorka wskazuje, że modele ewakuacyjne nie symulują w sposób dokładny zachowań ludzi, a jedynie reprezentują niektóre rodzaje czynności i czas ich trwania.

Ze względu na różne reakcje ludzi, zwłaszcza w sytuacjach stresowych, oraz brak zebranych danych, modelowanie ewakuacji wymaga przyjęcia pewnych założeń, które mogą mieć wpływ na wymagany czas bezpiecznej ewakuacji. W niektórych modelach reprezentacja ludzkich zachowań może być trudna ze względu na specyficzne cechy modelu i ograniczone możliwości. Generalnie przyjmuje się, że w ewakuacjach o małym zagęszczeniu ludzi wymagany czas bezpiecznej ewakuacji zależy od czasu poprzedzającego ewakuację, a w ewakuacjach o dużym zagęszczeniu WCBE zależy głównie od czasu przemieszczania się [83].

Niedokładne odwzorowanie zachowań będzie miało wpływ na błędy w wynikach. Przyjęcie zbyt optymistycznych scenariuszy może skutkować otrzymaniem symulacji, w której wymagany czas bezpiecznej ewakuacji jest dużo krótszy niż by to miało miejsce w rzeczywistości. Takie zjawisko może mieć bardzo poważne konsekwencje, gdyby przyjęty wymagany czas bezpiecznej ewakuacji (WCBE) był dłuższy niż dostępny czas bezpiecznej ewakuacji (DCBE) wynikający zwykle z temperatury i zadymienia na drogach ewakuacyjnych oraz z bezpieczeństwa konstrukcji (Rysunek 2.1).

Czas potrzebny na ewakuowanie się ze strefy zagrożonej (WCBE), to czas potrzebny wszystkim ludziom na opuszczenie strefy niebezpiecznej. To czas od momentu zaistnienia

pożaru, do momentu dotarcia do strefy bezpiecznej – najczęściej na zewnątrz budynku. Projektując systemy zabezpieczeń przeciwpożarowych należy uwzględnić pewien margines bezpieczeństwa, aby warunki bezpieczne były zapewnione przez czas dłuższy niż ten wymagany.

WCBE to suma czasu detekcji, czasu alarmu i czasu przemieszczania się. Ogólnie WCBE można obliczyć jako (2.1) [84]:

$$WCBE = t_d + t_a + t_{p-ewak} + t_{przej} \quad (2.1)$$

gdzie:

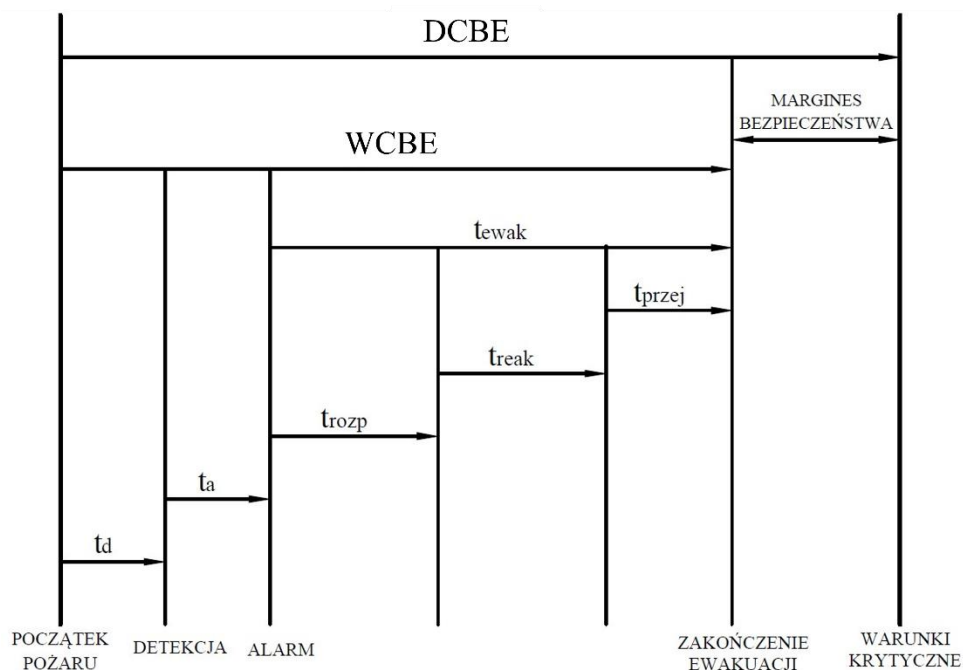
t_d – czas detekcji pożaru przez system detekcji lub przez użytkowników,

t_a – czas ogłoszenia alarmu o pożarze,

t_{p-ewak} – czas przed rozpoczęciem przemieszczania się do wyjścia, czyli suma czasu rozpoznania t_{rozp} i podjęcia reakcji t_{reak} ,

t_{przej} – czas przemieszczania się, czyli czas przejścia użytkowników do miejsca bezpiecznego.

Warunki bezpiecznej ewakuacji są zapewnione, gdy DCBE jest większy niż WCBE. Oznacza to, że czas potrzebny do bezpiecznej ewakuacji ze strefy niebezpiecznej nie może być dłuższy niż czas pogorszenia się warunków poniżej wartości krytycznych.



Rysunek 2.1. Składowe wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji WCBE [84].

Analizę WCBE oraz DCBE dla różnych grup osób z niepełnosprawnościami wykonali w swoim artykule autorzy Ahn i inni [85]. Autorzy w swych badaniach wskazali, że jednym z najważniejszych czynników zagrażającym ludziom jest ograniczenie widoczności na skutek zadymienia. Zadymienie, temperatura oraz FED (Fractional Effective Dose) mają największy wpływ na DCBE, dlatego bardzo ważne przy analizie bezpieczeństwa osób, zwłaszcza starszych, jest prawidłowe oszacowanie emisji dymu z pożaru. W badaniach zauważono, że we wszystkich przypadkach nie odnotowano ofiar śmiertelnych wśród populacji osób pełnosprawnych. Jednym z wiodących wniosków jest fakt, że obecność osób z niepełnosprawnościami wpłynęła na liczbę ofiar śmiertelnych. Autorzy wskazali również, że w przypadku ewakuacji osób z niepełnosprawnościami poruszających się o lasce lub na wózku inwalidzkim, najlepsze rezultaty osiągnięto stosując podjazdy.

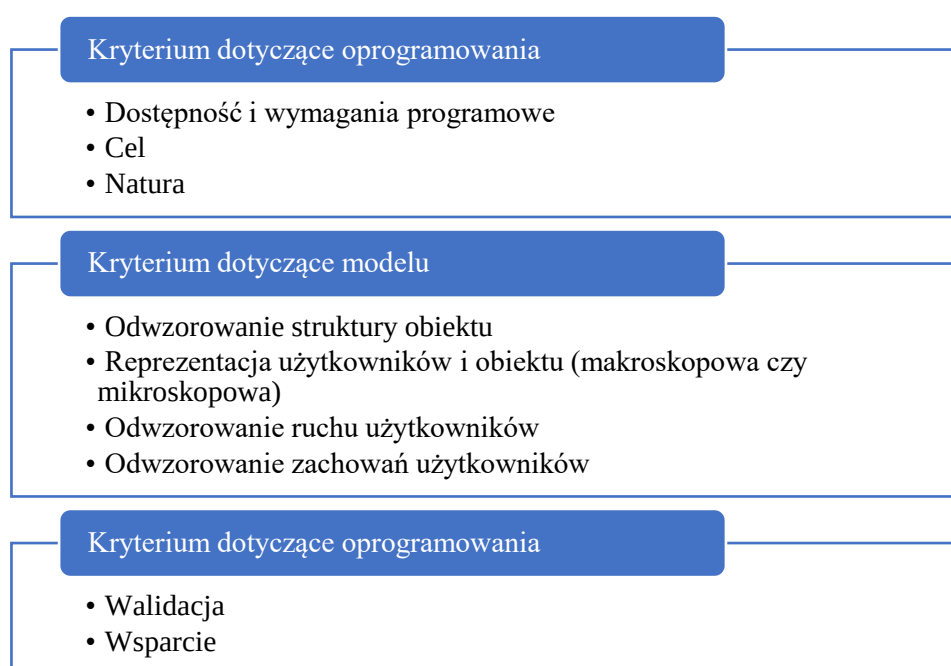
Porównanie wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji zmierzonego w warunkach rzeczywistych i czasu przewidywanego przez symulację przedstawiają autorzy Olsson i Regan [72], którzy w swoich badaniach wykorzystali program Simulex. W innych badaniach można znaleźć informacje o skutecznych narzędziach wykorzystywanych do analizy ewakuacji w złożonych obiektach. Na przykład Oven i inni [86] opisali możliwość wykorzystania programu buildingEXODUS do modelowania ewakuacji w wieżowcu. Przegląd modeli do modelowania ewakuacji w budynkach wysokościowych znajdziemy w publikacji autora Ronchi [87].

Należy pamiętać, że wyniki uzyskane z modeli zawsze obarczone są pewnymi niepewnościami, m.in. ze względu na charakter ludzkich zachowań. Kwestię właściwej interpretacji wyników uzyskanych z modeli szeroko opisali Ronchi i inni [88].

Istnieje wiele modeli ewakuacji stosowanych w Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego. Modele te mają różne cechy i mogą być wykorzystywane do różnych celów, od bardzo prostych do złożonych analiz. W artykułach przedstawionych przez Gwynne i inni [76] oraz Kuligowski i inni [77], [78] można znaleźć porównanie różnych dostępnych modeli. Modele podzielone są na kilka grup w zależności od różnych parametrów. Kategorie podziału obejmują m.in. dostępność modelu, zastosowaną metodologię modelowania, metody symulacji ruchu i zachowań, czy model współpracuje z innym oprogramowaniem, np. AutoCAD czy FDS, czy sposób walidacji modelu. W tabeli 2.6 przedstawiono fragment porównania różnych modeli [78].

Do modelowania ewakuacji budynków użytkownicy mogą wybrać oprogramowanie spośród wielu programów komputerowych dostępnych na rynku [78]. Niektóre z nich są znane bardziej, niektóre mniej. Na podstawie ankiet przeprowadzonych przez Lovregio w 2019 roku [89], będących uzupełnieniem badań z roku 2011 [90], do najczęściej wymienianych przez

ankietowanych programów należą: Pathfinder (wykorzystywany przez 35% osób ankietowanych), FDS+Evac oraz STEPS. Pozostałe modele, które również pojawiały się w odpowiedziach to: Simulex, Exodus, MassMotion, Legion, VISSIM/Viswalk, EVACNET, EGRESS, Pedestrian Dynamics, SimWalk, FPETool, Evacuationz oraz EVACSIM. Autorzy wskazali 72 programy dostępne na rynku oraz czynniki warunkujące ich popularność. Najważniejszym czynnikiem wpływającym na wybór modelu ewakuacji to weryfikacja i walidacja modelu. Kluczowe znaczenie dla użytkowników programu ma poziom rzetelności wyników czyli jak wiernie model odwzorowuje warunki rzeczywiste. Wyboru oprogramowania można dokonać uwzględniając kryteria opisane przez Kuligowski i Gwynne [91] oraz Castle i Longley [92]. Kryteria te przedstawia Rysunek 2.2.



Rysunek 2.2. Kryteria, które należy rozważyć przy wyborze oprogramowania [94]

Tabela 2.6. Porównanie wybranych programów symulacyjnych [78], [93]

Program	Powszechna dostępność	Metody modelowania	Możliwość symulacji	Współpraca z CAD
STEPS	Tak	Model ruchu	każdy typ budynku	Tak
Simulex **	Tak	Częściowy model behawioralny	każdy typ budynku	Tak
FDS+Evac *	Tak	Częściowy model behawioralny	każdy typ budynku	Nie/Tak
Pathfinder 2009 *	Tak	Częściowy model behawioralny	każdy typ budynku	Tak
SimWalk *	Tak	Częściowy model behawioralny	każdy typ budynku, model specjalizujący się w stacjach transportu publicznego	Tak
PEDFLOW *	Tak	Model behawioralny	każdy typ budynku	Tak
MassMotion *	Tak, użyczenie dla klienta na zasadzie doradztwa	Model behawioralny	każdy typ budynku	Tak
PathFinder	Użyczenie dla klienta na zasadzie doradztwa	Model ruchu	każdy typ budynku	Tak
EXIT89 *	Model nie został jeszcze wydany do użytku powszechnego	Częściowy model behawioralny	każdy typ budynku	Nie
EvacuationNZ *	Model nie został jeszcze wydany do użytku powszechnego	Model behawioralny	każdy typ budynku	Tak

* na podstawie danych z 2010 roku,

** na podstawie danych z 2009 roku.

2.3. Warunki na drogach ewakuacyjnych

Pożar jest jednym z największych zagrożeń dla osób przebywających w budynku. Ze względu na swoje właściwości, może powodować liczne niebezpieczne warunki, które mają wpływ na ludzi i bezpieczeństwo budynku. Pożar jest nieprzewidywalnym i niekontrolowanym procesem propagacji ciepła [95]. Niebezpieczne produkty spalania, wysoka temperatura oraz dym mogą być szkodliwe dla użytkowników, dla ekip ratowniczych, a także dla środowiska. Ogólnie rzecz biorąc, pożar emituje wiele substancji chemicznych, a emisja ta odbywa się w sposób bezpośredni – emisja szkodliwych gazów i stałych produktów spalania do powietrza, oraz w sposób pośredni poprzez zanieczyszczanie wód oraz uwalnianie substancji ze spalonych materiałów. Zanieczyszczenie gleb oraz wody może prowadzić do dalszej propagacji zanieczyszczeń. Przeprowadzono znaczną liczbę badań w sprawie emisji szkodliwych substancji z palących się materiałów. Wiele z nich jest cytowanych w raporcie NFPA „Research Roadmap: Environmental Impact of Fires in the Built Environment” [96]. Autorzy w swych badaniach przedstawili jakie zanieczyszczenia mogą być emitowane podczas pożaru oraz przedstawili listę pożarów, które miały znaczący wpływ na środowisko. Wśród głównych zanieczyszczeń znajdują się takie substancje jak: tlenek węgla, cyjanowodór, aldehydy, tlenki azotu, tlenki siarki, dioksyny, lotne związki organiczne, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, czy gazy cieplarniane tj. dwutlenek węgla, metan, tlenek diazotu [96].

Dym zawiera mieszaninę toksycznych produktów spalania i, w zależności od paliwa i warunków spalania, jego skład może być różny [97]. Dym jest niebezpieczny, ponieważ może zawierać niespalone cząstki, różne substancje toksyczne, ma wysoką temperaturę i przede wszystkim może częściowo lub całkowicie ograniczyć widoczność, a tym samym spowolnić lub uniemożliwić ewakuację [98], [99]. Zadymienie sprawia, że ludzie tracą orientację nawet w pomieszczeniach, które znają. Brak możliwości znalezienia wyjścia sprawia, że zaczynają się niepokoić, co dodatkowo przyczynia się do pogorszenia zdolności percepcji. Wyniki badań ewakuacji w różnych warunkach widoczności opisano w pracy autorstwa Zhang i inni [100]. Wyniki badań wpływu zadymienia na zachowanie oraz prędkość przemieszczania znajdziemy w pracy autorstwa Jin [101]. Wysunięto wniosek, że zarówno gęstość dymu jak i jego właściwości drażniące, wpływają na prędkość przemieszczania. W przypadku przemieszczania się w dymie o słabym działaniu drażniącym, prędkość przemieszczania maleje stopniowo wraz ze wzrostem gęstości dymu. W przypadku drażniącego dymu, prędkość przemieszczania gwałtownie maleje, zwłaszcza przy osiągnięciu określonego poziomu gęstości. Zaobserwowano, że zjawisko to wynika z faktu, że ludzie narażeni na działanie drażniące dymu nie są w stanie otworzyć oczu i poruszają się po omacku.

Biorąc pod uwagę bezpieczeństwo ludzi w środowisku wewnętrznym, głównym zagrożeniem dla użytkowników w przypadku pożaru w budynku jest narażenie na działanie ognia, dymu i toksycznych produktów spalania. Dane historyczne pokazują, że więcej ofiar śmiertelnych w pożarach wynika z zatrucia na skutek wdychania dymu niż z oparzeń [102]. Zagrożenia związane z oddziaływaniem ognia zależą przede wszystkim od rodzaju i rozmieszczenia obciążenia ogniowego, właściwości potencjalnego źródła zapłonu, właściwości zabezpieczeń przeciwpożarowych budynku oraz zastosowanych systemów wentylacji i systemów przeciwpożarowych [103]. Dym może powodować skutki natychmiastowe (ograniczając widoczność oraz przez czynniki toksyczne) lub długotrwałe (przez czynniki rakotwórcze i mutagenne) [96]. Przeprowadzono wiele badań w celu analizy emisji zanieczyszczeń z procesów spalania. Reisen i inni przedstawili wykaz emisji cząstek stałych i lotnych substancji organicznych z materiałów wykończeniowych [104]. Blomqvist i inni przedstawili badania emisji z pożarów określonych materiałów [105] oraz w symulowanych pożarach pomieszczeń [106].

Pożar w budynku oddziałuje na ludzi w całym czasie jego trwania. Rozważając zdolność przetrwania w sytuacji zagrożenia, można podzielić pożar na trzy główne fazy. Od momentu zapłonu i rozwoju pożaru – pierwsza faza – w tej fazie użytkownicy nie są zazwyczaj w dużym stopniu narażeni na działanie dymu i ognia. W tej fazie główny wpływ na zdolność ucieczki będą miały, opisane wcześniej, czynniki psycho-behawioralne użytkowników oraz czynniki logistyczne takie jak sposób alarmowania o pożarze i sposób reakcji użytkowników, czy znajomość budynku. Druga faza, czyli faza w której użytkownicy są narażeni na działanie dymu, ciepła oraz produktów toksycznych. W tej fazie na zdolność ucieczki główny wpływ będzie miał dym oraz produkty spalania, szczególnie ich ilość oraz ich toksyczne właściwości. Trzecia faza to niestety śmierć na skutek poparzeń, czy zatrucia toksycznymi substancjami [103].

W takim ujęciu, niezwykle ważna jest świadomość ludzi, aby w momencie wystąpienia pożaru niezwłocznie się ewakuować. Pierwsza faza pożaru jest tą, w której warunki ewakuacji są najlepsze, a prawdopodobieństwo bezpiecznej ucieczki jest najwyższe. Niestety, nieznajomość natury pożaru oraz bagatelizowanie sygnałów ostrzegawczych przyczynia się do sytuacji, w której ewakuacja podejmowana jest już w drugiej fazie pożaru, gdzie warunki bezpieczne nie są już zapewnione, a prawdopodobieństwo ucieczki drastycznie maleje.

Aby ewakuacja przebiegała w sposób bezpieczny, należy zastosować w budynku takie rozwiązania techniczne, aby drogi ewakuacyjne były wolne od niebezpiecznych produktów pożaru tj. wysokiej temperatury, toksycznych produktów spalania czy zadymienia, w czasie który będzie potrzebny na ewakuowanie się ze strefy zagrożonej. Za bezpieczne warunki

ewakuacji przyjmuje się warunki opisane w rozporządzeniu w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane metra i ich usytuowanie [107], w których:

- temperatura powietrza wynosi poniżej 60°C na wysokości mniejszej lub równej 1,8 m od poziomu drogi ewakuacyjnej,
- gęstość strumienia promieniowania cieplnego o wartości $2,5 \text{ kW/m}^2$ jest przez czas ekspozycji krótszy niż 30 s,
- temperatura gorących gazów pożarowych wynosi poniżej 200°C na wysokości ponad 2,5 m od poziomu drogi ewakuacyjnej,
- zasięg widzialności wynosi minimum 10 metrów na wysokości mniejszej lub równej 1,8 m od poziomu drogi ewakuacyjnej, oraz
- zawartość tlenu wynosi powyżej 15%.

Aby zapewnić strefę wolną od dymu na drogach ewakuacyjnych oraz ograniczyć ryzyko przedostania się dymu na drogi ewakuacyjne projektuje się w budynkach systemy zapobiegające zadymieniu lub służące oddymianiu. W celu usunięcia dymu gromadzącego się w górnej części klatki schodowej lub w strefie podsufitowej w budynkach stosuje się wentylację oddymiającą. W zależności od rodzaju budynku stosowane są systemy wentylacji oddymiającej naturalne lub mechaniczne. Głównym celem jest usunięcie dymu z taką szybkością, aby zapobiec powstawaniu warstwy dymu, której grubość mogłaby zagrozić bezpieczeństwu ludzi [108].

W związku z licznymi pożarami, które miały miejsce w przeszłości, kluczowe znaczenie ma analiza i przewidywanie warunków, takich jak np. ruch dymu i rozkład temperatury w korytarzach i na schodach, które są głównymi drogami ewakuacyjnymi. Ruch dymu jest jednym z najważniejszych aspektów analizy zagrożenia pożarowego [109], a do jego analizy stosuje się metody numeryczne.

Mechanizmy kontroli ognia i dymu w przypadku zastosowania wentylacji naturalnej opisali Short i inni [110]. W artykule autorzy opisują studium przypadku dla budynku biblioteki w Lanchester. Natomiast mechanizmy ruchu dymu oraz rozkład temperatury na klatce schodowej opisali autorzy Shi i inni [111].

Jednym ze skutków obecności dymu jest ograniczenie widoczności. W tym wypadku stosunkowo łatwo można określić punkt krytyczny, po którym ucieczka nie będzie już możliwa. Znacznie trudniej jest określić moment, w którym pozostałe czynniki zaczynają uniemożliwiać ucieczkę. W którym momencie dym będzie działać tak drażniaco na układ oddechowy, że uniemożliwi dalsze oddychanie lub ból wynikający z poparzeń będzie tak silny, że uniemożliwi dalszą ucieczkę?

W celu określenia skutków toksycznych poszczególnych produktów pożaru i ich mieszanin, konieczne jest określenie podstawowych parametrów, które posłużą do ilościowego określenia narażenia. Zgodnie z Prawem Habera, efekt toksyczny zależy od stężenia oraz czasu narażenia (pochłoniętej dawki) [112].

Efekt toksyczny pożaru można rozważać pod względem trzech głównych skutków. Po pierwsze, jakie są prawdopodobne stężenia gazów o działaniu drażniącym, które będą powodować spadek skuteczności ucieczki lub całkowite obezwładnienie człowieka. Po drugie, jakie są dawki ekspozycyjne na czynniki drażniące, które będą dawać skutek śmiertelny poprzez poparzenie chemiczne płuc. Po trzecie, jakie są dawki ekspozycyjne na czynniki duszące, które w zależności od ilości będą powodować dezorientację, utratę przytomności, a ostatecznie śmierć.

Z powodów etycznych badania szkodliwości produktów spalania na ludziach nie są możliwe do przeprowadzenia. Aby oszacować prawdopodobne narażenia i skutki, należy odpowiednio przeliczyć wartości uzyskane podczas badań na zwierzętach. Dodatkowo, dane można rozważyć na podstawie źródeł ze zdarzeń rzeczywistych, jednakże często dane te nie są kompletne i brak jest informacji na temat dokładnego stężenia zanieczyszczeń [103].

W produktach spalania obecne są substancje o różnym działaniu, które niejednokrotnie mogą wzajemnie potęgować swoje skutki. W dymie obecne są substancje drażniące, które mogą powodować czasowe podrażnienie oczu, błon śluzowych oraz układu oddechowego. Silne działanie drażniące powoduje niewydolność oddechową oraz ból, który działa obezwładniająco, przez co zdolność ucieczki znacząco maleje. Na podstawie danych wiadomo, że substancje o działaniu drażniącym są obecne podczas pożaru, natomiast ich dokładne zidentyfikowanie oraz oszacowanie niebezpiecznych stężeń jest trudne. Wśród najważniejszych czynników o działaniu drażniącym wyróżniono gazy takie jak: chlorowodór, fluorowodór, bromowodór, tlenki azotu, kwas fosforowy i dwutlenek siarki, a także substancje organiczne – aldehydy takie jak akroleina, formaldehyd czy aldehyd krotonowy [103].

Aby określić sumaryczny efekt działania substancji drażniących na człowieka wprowadzono parametr FIC (fractional irritant concentration) czyli cząstkowe stężenie drażniące. FIC zakłada, że każde stężenie obecnej substancji stanowi ułamek stężenia, które przyjęto za silnie drażniące. Całkowite FIC stanowi sumę poszczególnych FIC dla stwierdzonych substancji. Zależność ta opisana jest poniższym wzorem (2.2).

$$FIC = FIC_{HCl} + FIC_{HBr} + FIC_{HF} + FIC_{SO_2} + FIC_{NO_2} + FIC_{CH_2CHO} + FIC_{CH_2O} + \sum FIC_x \quad (2.2)$$

Jeżeli całkowity FIC wynosi 1, szacuje się, że atmosfera jest wysoce drażniąca, co znacznie spowalnia ucieczkę. Jeżeli FIC jest większy niż 1, to warunki stają się coraz gorsze. Przy FIC równym lub wyższym niż 4, szacuje się, że warunki są tak złe, że ucieczka jest całkowicie niemożliwa (z powodu niedotlenienia organizmu na skutek obkurczenia oskrzeli), natomiast wartość parametru równa 0,3 powinna zapewnić bezpieczną ucieczkę dla prawie wszystkich osób. Tabela 2.7 przedstawia stężenia wybranych substancji drażniących.

Wśród gazów o właściwościach duszących znajdują się tlenek węgla CO, cyjanowodór HCN, oraz dwutlenek węgla CO₂. Skutek duszący będzie miał również niski poziom tlenu O₂. Wymienione substancje występują praktycznie podczas każdego pożaru, a wysokie stężenia tlenu węgla we krwi ofiar pożarów zostało stwierdzone w prawie każdym badanym przypadku. Stąd wysunięto wniosek, że związek ten jest jednym z głównych czynników powodujących śmierć podczas pożaru [103].

Tabela 2.7. Niebezpieczne stężenia substancji drażniących [113]

Substancja	Stężenie przyjęte jako utrudniające ucieczkę połowy populacji osób ewakuujących się, ppm	Stężenie przyjęte jako obezwładniające dla połowy populacji osób ewakuujących się, (wg Pursera), ppm
Formaldehyd, HCHO *	6	30
Akroleina, CH ₂ CHO *	4	20
Chlorowodór, HCl	200	900
Bromowodór, HBr	200	900
Fluorowodór, HF	200	900
Dwutlenek siarki, SO ₂	24	120
Dwutlenek azotu, NO ₂	70	350

**Stężenie czynników jest nieznane, dla każdej substancji drażniącej o nieznanym stężeniu za stężenie obezwładniające przyjmuje się 0,5 OD/m (OD – optyczna gęstość dymu [B/m]).*

Powszechną metodą szacowania toksyczności gazu jest wyznaczenie cząstkowej dawki skutecznej FED (Fractional Effective Dose) [114], która porównuje skumulowaną dawkę wielu gazów z dawką obezwładniającą. FED może być wyliczona stosując dwie alternatywne metody: metodę utworzoną przez Pursera [113] lub metodę opisaną w normie ISO 13571 [114]. Zaleca się stosowanie metody Pursera, ze względu na to, że metoda ISO 13571 jest metodą uproszczoną, która uwzględnia wpływ tylko tlenu węgla i cyjanowodoru. Metoda Pursera uwzględnia dodatkowo duszący efekt tlenków azotu i działanie drażniące

chlorowodoru, bromowodoru, fluorowodoru, dwutlenku siarki, dwutlenku azotu oraz aldehydów. Wartość FED według metody Pursera obliczana jest jako [113]:

$$FED = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(Ct)_i} \Delta t \quad (2.3)$$

Gdzie:

C_i – średnie stężenie toksycznego gazu i w funkcji czasu,

Δt – wybrany przedział czasu, min,

Ct – dawka ekspozycyjna.

$$FED = (FED_{CO} + FED_{CN} + FED_{NO_x} + FLD_{irr})HV_{CO_2} + FED_{O_2} \quad (2.4)$$

Gdzie:

$$FED_{CO}(t) = \int_0^t 2,764 \cdot 10^{-5} (C_{CO_2}(t))^{1,036} dt \quad (2.5)$$

$C_x(t)$ – stężenie objętościowe gazu x w czasie t, ppm (za wyjątkiem tlenu - % dla O_2),

$$FED_{CN}(t) = \int_0^t \left(\frac{\exp\left(\frac{C_{CN}(t)}{43}\right)}{220} - 0,0045 \right) dt \quad (2.6)$$

C_{CN} – stężenie cyjanowodoru, ppm (można skorygować dla obecności innych nitryli),

$$C_{CN} = C_{HCN} - C_{NO_2} - C_{NO}$$

$$FED_{NO_x}(t) = \int_0^t \frac{C_{NO_x}(t)}{1500} dt \quad (2.7)$$

$$HV_{CO_2}(t) = \int_0^t \frac{\exp(0,1903 \cdot C_{CO_2}(t) + 2,0004)}{7,1} dt \quad (2.8)$$

$$FED_{O_2}(t) = \int_0^t \frac{1}{\exp(8,13 - 0,54(20,9 - C_{O_2}(t)))} dt \quad (2.9)$$

FLD_{irr} – frakcyjna dawka śmiertelna gazów drażniących, suma udziałów poszczególnych gazów drażniących, którą można obliczyć ze wzoru [113]:

$$FLD_{irr}(t) = \int_0^t \sum_{i=1}^7 \frac{C_i(t)}{FLD_i} dt \quad (2.10)$$

Dawki śmiertelne FLD_i dla gazów drażniących i przyjmuje się zgodnie z danymi literaturowymi (Tabela 2.8).

Oszacowanie poszczególnych parametrów warunków na drogach ewakuacyjnych pozwala określić czas, w którym warunki te będą umożliwiały ewakuację. To dzięki tym wynikom można oszacować DCBE. Do analizy warunków na drogach ewakuacyjnych wykorzystuje się narzędzia numerycznej mechaniki płynów. Program Fire Dynamics Simulator (FDS) pozwala śledzić zmiany warunków zachodzące podczas pożaru, a do obliczeń skutku toksycznego wykorzystuje metodę Pursera. Program został wykorzystany w prezentowanych poniżej badaniach.

Tabela 2.8. Frakcyjne dawki śmiertelne, przyjęte przez SFPE jako zabójcze dla połowy populacji [113]

Gaz drażniący	Chloro- wodór HCl	Bromowodór HBr	Fluorowodór HF	Dwutlenek siarki SO ₂	Dwutlenek azotu NO ₂	Akroleina* C ₃ H ₄ O	Formaldehyd* CH ₂ O
FLDi, ppm·min	114000	114000	87000	12000	1900	4500	22500

**Stężenie czynników jest nieznane, dla każdej substancji drażniącej o nieznanym stężeniu drażniącym za dawkę śmiertelną przyjmuje się 90 OD/m.min*

Program Pathfinder używany do symulacji ewakuacji dzięki integracji wyników z FDS również pozwala wyznaczyć FED dla poszczególnych istot. Program Pathfinder wykorzystano w badaniach, a wyniki prezentowane są w dalszej części pracy. Program wykorzystuje do obliczeń metody przytoczone powyżej, a szerzej opisane w SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [37]. Program oblicza FED uwzględniając jedynie stężenia trzech gazów: tlenku i dwutlenku węgla oraz tlenu. Całkowitą dawkę FED oblicza zgodnie z poniższym wzorem [115]:

$$FED_{tot} = FED_{CO} \times V_{CO_2} + FED_{O_2} \quad (2.11)$$

Dawka FED_{CO} zależy od stężenia objętościowego tlenku węgla, czasu narażenia, objętości powietrza wdychanego na minutę oraz poziomu karboksyhemoglobiny. Mnożnik V_{CO_2} reprezentuje stymulujący efekt dwutlenku węgla, który zwiększa szybkość z jaką pozostałe produkty spalania są wdychane. Z tego względu, pomimo, że CO₂ w stężeniu poniżej 5% nie powoduje skutków toksycznych, należy brać go pod uwagę przy obliczeniach. Niskie

stężenie tlenu będzie powodować niedotlenienie, stąd FED_{O_2} również jest brany pod uwagę i wyliczany zgodnie ze wzorem (2.9). Program do obliczeń przyjmuje wartość domyślną stężenia tlenu jako 19,5% [83].

Tabela 2.9 przedstawia informacje na temat toksyczności ostrej oraz działania drażniącego wybranych zanieczyszczeń. W tabeli przedstawiono ogólną klasyfikację zanieczyszczeń wraz z wartościami odniesienia. W celu identyfikacji narażenia na działanie toksyczne zestawiono wartości NDS, NDSC_h lub NDSP dla każdej substancji, zgodnie z rozporządzeniem [116].

Zgodnie z [116] NDS czyli „*Najwyższe Dopuszczalne Stężenie jest to wartość średnia ważona stężenia, którego oddziaływanie na pracownika w ciągu 8-godzinnego dobowego i przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy przez okres jego aktywności zawodowej nie powinno spowodować ujemnych zmian w jego stanie zdrowia oraz w stanie zdrowia jego przyszłych pokoleń*”. NDSC_h jest to „*Najwyższe Dopuszczalne Stężenie Chwilowe, czyli takie stężenie, które nie powinno spowodować ujemnych zmian w stanie zdrowia pracownika, jeżeli występuje w środowisku pracy nie dłużej niż 15 minut i nie częściej niż 2 razy w czasie zmiany roboczej, w odstępie czasu nie krótszym niż 1 godzina*”. Natomiast NDSP, czyli „*Najwyższe Dopuszczalne Stężenie Pułapowe to wartość stężenia, która ze względu na zagrożenie zdrowia lub życia pracownika nie może być w środowisku pracy przekroczona w żadnym momencie*”.

Toksyczność ostra może być również oszacowana na podstawie parametrów takich jak LD50, LC50, LCLo oraz TCL0, w zależności od drogi narażenia. Wartości te odnoszą się głównie do badań przeprowadzonych na zwierzętach. LCLo (low lethal concentration – najniższe stężenie śmiertelne) to najniższe stężenie powodujące śmierć ludzi lub zwierząt, LD50 (lethal dose – dawka śmiertelna) jest to dawka, przy której obserwuje się zgon 50% badanych zwierząt, natomiast LC50 (lethal concentration – stężenie śmiertelne) jest to stężenie, przy którym obserwuje się zgon 50% badanych zwierząt. Parametr TCL0 (Tolerable Contact Limit – dopuszczalny limit kontaktu) oznacza najniższe stężenie substancji w powietrzu, które w określonym czasie wywoła u człowieka działanie toksyczne lub ma działanie rakotwórcze lub szkodliwe dla rozwoju płodu.

Rozważając aspekt bezpieczeństwa w budynku trzeba mieć na uwadze fakt, że ludzie w różny sposób odbierają bodźce, a ich zdolność ucieczki zależy od wielu czynników. Osoby z niepełnosprawnościami będą bardziej narażone na działanie szkodliwych produktów pożaru, niż osoby w pełni sprawne. Wynika to z faktu, że niejednokrotnie do podjęcia ucieczki potrzebują pomocy innych osób, przez co muszą na taką pomoc poczekać, a w tym czasie pożar się rozwija. Osoby z niepełnosprawnościami nawet poruszając się samodzielnie,

przemieszczają się wolniej, a co za tym idzie potencjalny czas przebywania w niebezpiecznych warunkach jest dłuższy. Niezwykle ważne w wykonywanych analizach jest uwzględnianie populacji niejednorodnej, tak aby przewidzieć bezpieczne warunki dla możliwie szerokiej grupy osób.

Wykonanie analiz z użyciem programów numerycznych pozwala porównać WCBE oraz DCBE, co daje możliwość zbadania, czy istnieje bezpieczne środowisko wewnątrz budynku, aby w sytuacji zagrożenia móc się z niego ewakuować.

Tabela 2.9. Charakterystyka zagrożeń dla człowieka związanych z narażeniem na wybrane zanieczyszczenia

	Toksyczność ostra		Działanie żrące/drażniące		Najwyższe dopuszczalne stężenie (w mg/m3) [116]			Skutki tosykologiczne				
					NDS	NDSCh	NDSP	Parametr	Droga narażenia	Zwierzę	Dawka	Źródło danych
Fenol	Doustnie	kat. 3	Powoduje poważne oparzenia skóry oraz uszkodzenia oczu	Kat. 1B	7,8	16	-	LD50	doustnie	szczur	384 mg/kg	[117]
	W kontakcie ze skórą	kat. 3						LC50	inhalacja	szczur	316 mg/m3	
	W następstwie wdychania	kat. 3						LD50	skóra	królik	850 mg/kg	
Benzen	W następstwie wdychania	Kat. 1	Działanie drażniące na oczy oraz poważne uszkodzenie oczu	Kat. 2	1,6	-	-	LD50	doustnie	szczur	930 mg/kg	[118]
			Działanie żrące/drażniące na skórę	Kat. 2				LC50	inhalacja	szczur	32000 mg/m3 (7 h)	
			LD50	skóra				Królik	> 8260 mg/kg			
Toluen	W następstwie wdychania	Kat. 1	Działanie żrące/drażniące na skórę	kat. 2	100	200	-	LD50	doustnie	szczur	5000 mg/kg	[119], [120]
								LC50	inhalacja	Szczur	> 20 mg/dm3	
								LD50	skóra	królik	12267 mg/kg	
								LCLo	inhalacja	szczur	15320 mg/m3 (4 h)	

	Toksyczność ostra		Działanie żrące/drażniące		Najwyższe dopuszczalne stężenie (w mg/m3) [116]			Skutki tosykologiczne				
					NDS	NDSch	NDSP	Parametr	Droga narażenia	Zwierzę	Dawka	Źródło danych
Formaldehyd	Doustnie	kat. 3	Działanie żrące/drażniące na skórę i oczy	Kat. 1B	0,37	0,74	-	LD50	doustnie	szczur	800 mg/kg	[121]
	W kontakcie ze skórą	kat. 3						LC50	inhalacja	szczur	590 mg/m3	
	W następstwie wdychania	kat. 3						LD50	skóra	królik	270 mg/kg	
								TCL0	inhalacja	człowiek	17 mg/m3 (30 min)	
Aldehyd octowy	W następstwie wdychania oraz doustnie	Kat. 3	Poważne uszkodzenie oczu/działanie drażniące na oczy i drogi oddechowe	kat. 2	5	-	45	LD50	doustnie	szczur	661 mg/kg	[122], [123]
								LC50	inhalacja	szczur	24 g/m3 (4h)	
								LD50	skóra	królik	3540 mg/kg	
Kwas benzoesowy	Działanie toksyczne w następstwie powtarzalnego narażenia	Kat. 1	Działa drażniąco na skórę	Kat. 2	0,5	1,5	-	LD50	doustnie	Człowiek	500 mg/kg	[124], [125], [126], [127]
			Powoduje uszkodzenia oczu	Kat. 1				Szczur		1700 mg/kg		
								LC50	inhalacyjnie	szczur	> 26 mg/m3 (1h)	
								LD50	skóra	królik	>10000 mg/kg	

Rozdział 3. Badania ewakuacji z krzesłem ewakuacyjnym

Po wykonaniu przeglądu literatury i sprawdzeniu stanu aktualnej wiedzy, autorka pracy zdecydowała się wykonać badania eksperymentalne ewakuacji z budynku z udziałem osoby z niepełnosprawnością. Badania miały na celu sprawdzenie w jaki sposób przebiega ewakuacja z udziałem osoby z niepełnosprawnością, która transportowana jest za pomocą krzesła ewakuacyjnego.

W tym rozdziale przedstawiono metodykę oraz wyniki badań dotyczących ewakuacji z wybranego budynku użyteczności publicznej z wykorzystaniem krzesła ewakuacyjnego do transportu osoby o czasowym ograniczeniu zdolności samodzielnego poruszania się.

Celem badań było sprawdzenie jaki jest wymagany czas bezpiecznej ewakuacji z budynku uczelni wyższej grupy studentów w przypadku ewakuacji, w której udział bierze osoba o czasowym ograniczeniu zdolności poruszania, która jest ewakuowana za pomocą krzesła ewakuacyjnego. Przeprowadzono również ewakuację osoby poruszającej się samodzielnie o kulach. W badaniach analizowano czas przemieszania się oraz czas potrzebny na przygotowanie krzesła ewakuacyjnego do użycia.

Krzesło ewakuacyjne wykorzystane w badaniach to model FALCON firmy EnSafe (Rysunek 3.1). Jest to krzesło zaprojektowane w sposób umożliwiający transport osób w pozycji siedzącej po schodach i na poziomym podłożu. Krzesło posiada aluminiowo-stalową konstrukcję, umożliwia transport o maksymalnym obciążeniu do 200 kg. Cztery koła umożliwiają transport po płaskich powierzchniach, a prowadnice z systemem hamowania umożliwiają transport po schodach. Dodatkowe uchwyty pozwalają transportować krzesło wraz z obciążeniem w górę schodów.



Rysunek 3.1. Krzesło ewakuacyjne zastosowane w badaniach

3.1. Charakterystyka obiektu

Badania wykonano w budynku Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej. Budynek ten zlokalizowany jest w Gliwicach przy ul. Konarskiego 18. Jest to budynek wolnostojący, sześciokondygnacyjny, podpiwniczony. Budynek został wykonany w technologii szkieletowej, żelbetowej, w układzie słupowo-płytowo-belkowym. Budynek zaklasyfikowano do obiektów średniowysokich, jego wysokość wynosi 23,93 m.

Kondygnacje użytkowe obejmują piwnicę, parter oraz piętra I-V. W budynku znajduje się poddasze nieużytkowe. Wejście główne do budynku znajduje się od strony południowo-zachodniej.

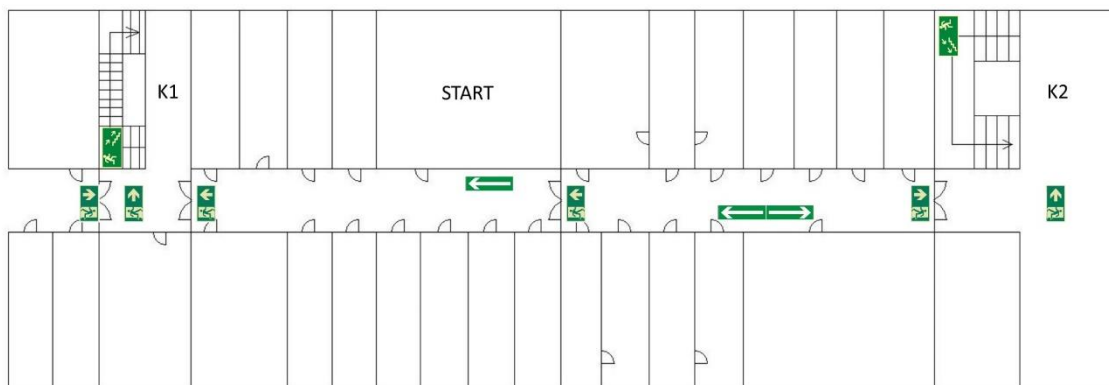
Obiekt pełni funkcję dydaktyczną oraz częściowo administracyjną. W piwnicy znajdują się pomieszczenia techniczno-magazynowe oraz pomocniczo-warsztatowe. Na parterze oraz piętrach I-V znajdują się pomieszczenia biurowe, laboratoryjne, sale wykładowe ćwiczeniowe z możliwością pobytu w większości pomieszczeń do 50 osób.

W budynku nie przewiduje się występowania materiałów pożarowo niebezpiecznych. W budynku występują materiały stanowiące typowe wyposażenie sal dydaktycznych oraz pomieszczeń administracyjnych. W części dydaktyczno-administracyjnej budynek został zakwalifikowany do kategorii zagrożenia ludzi ZL III (Budynki użyteczności publicznej, które nie pasują do kategorii ZL I i ZL II), piwnica i poddasze zostało zakwalifikowane jako PM (kategoria produkcyjne/magazynowe). Gęstość obciążenia ogniowego pomieszczeń zaplecza technicznego oraz piwnicy, została określona do 500 MJ/m².

Ewakuacja ze wszystkich stref pożarowych, gdzie przebywają ludzie na poszczególnych kondygnacjach budynku, prowadzona jest poprzez korytarze ewakuacyjne oraz klatki schodowe traktowane jako odrębne strefy pożarowe. Podczas badań, ewakuację prowadzono z sali wykładowej oznaczonej jako START (Rysunek 3.2) kierując się ku klatkom schodowym, a następnie na zewnątrz budynku. W zależności od obranego scenariusza ewakuacji, ewakuacja przebiegała boczną klatką schodową (K1) lub główną klatką schodową (K2) znajdującą się w centralnej części budynku. Scenariusze ewakuacji opisano w punkcie 3.2 (Tabela 3.1). Schemat piętra wraz z drogami ewakuacyjnymi przedstawia Rysunek 3.2. Dokładną charakterystykę klatek schodowych wraz z wymiarami podano w dalszej części pracy.

Klatki schodowe K1 i K2 stanowią odrębne strefy pożarowe wydzielone ścianami oddzielenia pożarowego o odporności ogniowej 120 minut (REI 120) z drzwiami o odporności ogniowej 60 minut (EIS 60). W budynku zaprojektowano, zgodnie z przepisami, urządzenia przeciwpożarowe służące do wykrywania i zwalczania pożaru oraz ograniczania jego skutków, a także służące do ewakuacji. Klatka schodowa K2 wyposażona

jest w system zapobiegania zadymieniu, urządzenia nadciśnieniowej ochrony przed zadymieniem, natomiast klatka schodowa K1 wyposażona jest w system usuwania dymu z klapą dymową oraz otworem nawiewu powietrza kompensacyjnego, zlokalizowanym w piwnicy.



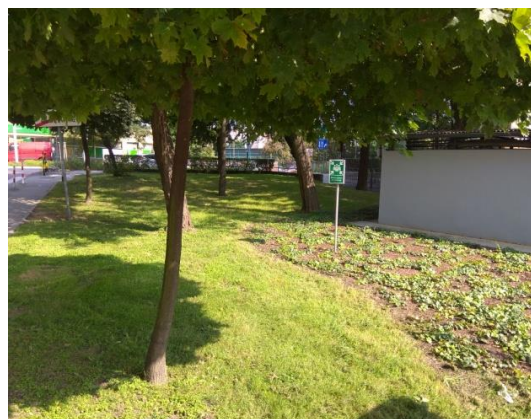
Rysunek 3.2. Schemat piętra z drogami ewakuacyjnymi (opracowanie własne)

Wyjście ewakuacyjne z klatki K1 znajdowało się w piwnicy, z klatki schodowej K2 – na poziomie parteru. Drzwi ewakuacyjne w klatce K1 posiadały wymiar w przejściu 1,5 m, są to drzwi dwuskrzydłowe. Z klatki schodowej K2 istniała możliwość ewakuacji przez dwoje drzwi dwuskrzydłowych o wymiarze w przejściu 1,8 m.

Punktami końcowymi ewakuacji były miejsca zbiórki obok budynku, zlokalizowane na trawniku za i obok parkingu. Punkt końcowy ewakuacji klatką schodową K2 przedstawia Rysunek 3.3, Natomiast punkt końcowy ewakuacji klatką schodową K1 przedstawia Rysunek 3.4.



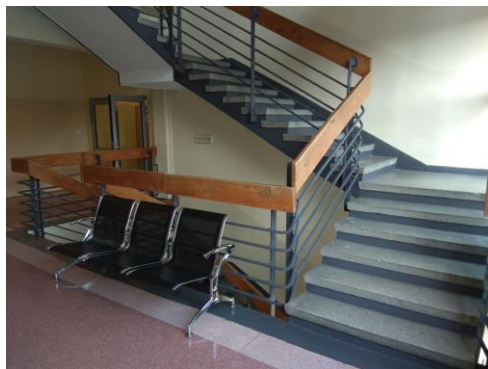
Rysunek 3.3. Miejsce zbiórki przed budynkiem Wydziału



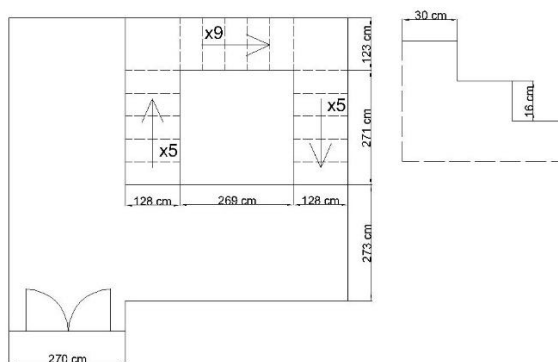
Rysunek 3.4. Miejsce zbiórki za budynkiem Wydziału

3.1.1. Charakterystyka klatek schodowych

Zarówno klatka K1 jak i K2 stanowią odrębne strefy pożarowe. Obie klatki schodowe zostały wykonane z takich samych materiałów. Różnią się one budową. Klatka schodowa K1 (Rysunek 3.5) charakteryzuje się długim spocznikiem znajdującym się na piętrze oraz dwoma małymi spocznikami, pozwalającymi na zmianę kierunku biegu schodów. Wymiary poszczególnych elementów przedstawia Rysunek 3.6.



Rysunek 3.5. Klatka schodowa K1

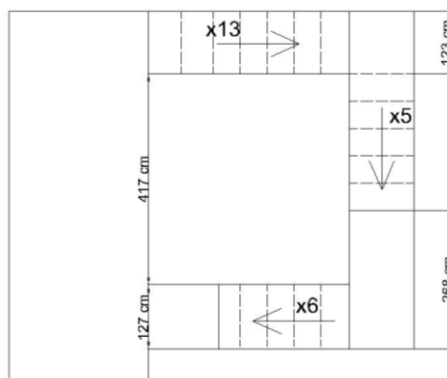


Rysunek 3.6. Schemat klatki schodowej K1, II piętro

Na parterze, układ klatki schodowej jest nieco inny, co przedstawia Rysunek 3.7 oraz Rysunek 3.8.

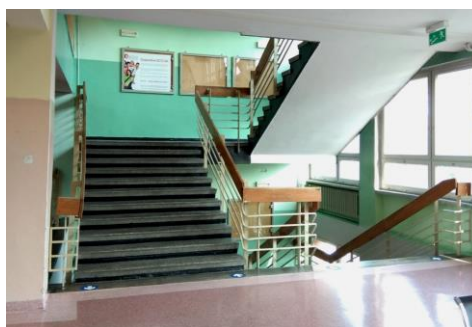


Rysunek 3.7. Klatka schodowa K1, parter

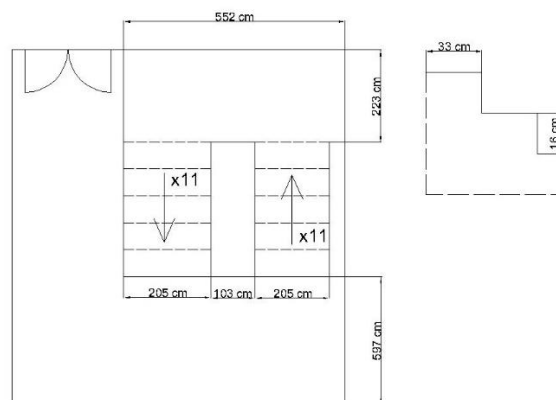


Rysunek 3.8. Schemat klatki schodowej K1, parter

W porównaniu do klatki schodowej K1, klatka K2 (Rysunek 3.9) jest szersza i posiada dwa długie spoczniki. Jeden na poziomie piętra oraz drugi pomiędzy piętrami, umożliwiające zmianę kierunku biegu schodów. Schemat klatki wraz z wymiarami przedstawia Rysunek 3.10.

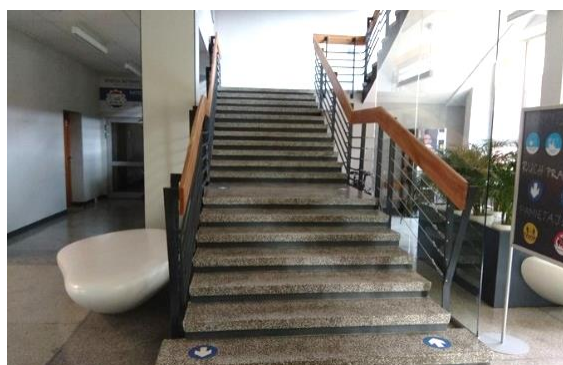


Rysunek 3.9. Klatka schodowa K2

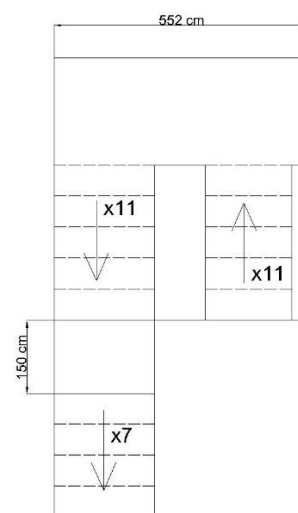


Rysunek 3.10. Schemat klatki schodowej K2, II piętro

Podobnie w tym wypadku, klatka schodowa K2 na poziomie parteru zmienia swój układ (Rysunek 3.11 oraz Rysunek 3.12).



Rysunek 3.11. Klatka schodowa K2, parter



Rysunek 3.12. Schemat klatki schodowej K2, parter

3.2. Założenia do badań

Celem badań było sprawdzenie jaki jest wymagany czas bezpiecznej ewakuacji z budynku w przypadku ewakuacji, w której udział bierze osoba o czasowym ograniczeniu zdolności poruszania, która jest ewakuowana za pomocą krzesła ewakuacyjnego. W badaniach analizowano czas przemieszania się (t_{przej}), który stanowi jedną ze składowych wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji (Rysunek 2.1). W przypadku scenariuszy uwzględniających ewakuację z krzesłem ewakuacyjnym tj. S3, S4, S9, S10 (Tabela 3.1) zmierzono również czas potrzebny na przygotowanie krzesła, czas wsiadania osoby z niepełnosprawnością na krzesło ewakuacyjne oraz zapinania pasów.

Przeanalizowano scenariusze ewakuacyjne uwzględniające ewakuację populacji osób w pełni sprawnych (P), ewakuację populacji, w której znajdowała się osoba

z niepełnosprawnością, która ewakuowana była za pomocą krzesła ewakuacyjnego (KE) oraz ewakuację osoby z niepełnosprawnością poruszającej się samodzielnie o kulach (K). Scenariusze ewakuacji przedstawia Tabela 3.1.

Populacja osób sprawnych (P) reprezentowana była przez 7 osób (4 kobiety i 3 mężczyzn) w przedziale wiekowym od 21 do 27 lat oraz BMI od 19,03 do 32,1, w prawie 85,7% subiektywnie oceniających swoją kondycję fizyczną jako „dobrą”. Wszystkie osoby biorące udział w badaniu były ochotnikami. W skład populacji KE wchodziły te same osoby co w populacji P oraz założono, że w badaniu bierze udział jedna osoba z niepełnosprawnością o czasowym ograniczeniu zdolności poruszania się. Osoba z niepełnosprawnością reprezentowana była przez kobietę w wieku 23 lat o BMI 21,05, która samodzielnie siada oraz zsiada z krzesła ewakuacyjnego. Krzesło ewakuacyjne we wszystkich próbach (KE) było obsługiwane przez dwóch mężczyzn w wieku 22 lat o BMI 20,8 i 32,1.

Populację K stanowiła osoba poruszająca się o kulach, reprezentowana przez kobietę w wieku 50 lat, o BMI 20,6, oceniająca swoją kondycję fizyczną jako dobrą.

W każdym scenariuszu ewakuacja rozpoczynała się w miejscu oznaczonym jako START (Rysunek 3.2). Ewakuacja klatką K1 przebiegała zgodnie z kierunkiem ewakuacji, natomiast klatką schodową K2 w przeciwnym. W każdym scenariuszu drzwi przeciwpożarowe oddzielające poszczególne strefy pożarowe były zamknięte. W przypadku ewakuacji populacji KE oraz K, drzwi były otwierane przez osoby pomagające w ewakuacji (osoba transportowana na krześle ewakuacyjnym oraz poruszająca o kulach nie otwierały drzwi samodzielnie).

Badania prowadzono przez trzy dni, uwzględniając przerwy na odpoczynek między próbami, aby zminimalizować wpływ zmęczenia uczestników badania na wyniki pomiarów.

Za punkt początkowy ewakuacji przyjęto moment rozpoczęcia świadomego ruchu w kierunku wyjść ewakuacyjnych. Koniec ewakuacji następował w momencie dotarcia do miejsca bezpiecznego – miejsca zbiórki. Pomiar czasu wykonano sekundomierzami sportowymi. Każdy scenariusz ewakuacji poparto pięcioma próbami ewakuacyjnymi (dla populacji P oraz KE), aby sprawdzić powtarzalność wyników. Wyjątek stanowiły scenariusze dotyczące populacji K, w tym wypadku przeprowadzono trzy próby ewakuacyjne.

Zmierzono również pokonany dystans oraz długości poszczególnych odcinków drogi, dzięki czemu obliczono średnie prędkości poruszania się osób podczas ewakuacji. Punkty pomiarowe zlokalizowano w miejscach, w których następowała zmiana ruchu z poziomego na pionowy. Poszczególne pomiary wykonywane były w następujących punktach: Na końcu korytarza - początku klatki schodowej; Na końcu klatki schodowej; Przy wyjściu z budynku; Na miejscu zbiórki.

Tabela 3.1. Scenariusze ewakuacji

Scenariusz	Klatka schodowa	Piętro	Populacja	
S1	K1	II	P	
S2		IV		
S3		II	KE	
S4		IV		
S5		II	K	
S6		IV		
S7	K2	II	P	
S8		IV		
S9		II	KE	
S10		IV		
S11		II	K	
S12		IV		

3.3. Analiza błędów i niepewności

Przeprowadzając badania oraz wykonując pomiary różnych wielkości fizycznych z wykorzystaniem różnego typu mierników, istnieje ryzyko popełnienia błędu. W teorii wyróżnia się trzy grupy błędów pomiarowych. Są to błędy systematyczne, błędy przypadkowe oraz błędy grube tzw. pomyłki.

Wykluczając maksymalnie ryzyko popełnienia błędów pomiarowych, wyniki otrzymane podczas pomiarów nadal obarczone są pewną niepewnością, która może wynikać chociażby z dokładności pomiaru konkretnego miernika. Aby zwiększyć dokładność oraz wiarygodność wyników, pomiary często wykonuje się kilkakrotnie, w celu uzyskania szeregu wyników, zgodnie z zasadą im więcej pomiarów tym mniejsza niepewność. Zazwyczaj wyniki poszczególnych pomiarów nieznacznie różnią się od siebie, co może być spowodowane m.in. ograniczonymi zdolnościami poznawczymi osoby przeprowadzającej pomiary, warunkami zewnętrznymi lub naturą badanego zjawiska. W opisanych badaniach, do pomiaru czasu zastosowano czasomierze sportowe, a różnice w wynikach dla konkretnych punktów pomiarowych mogły wynikać ze spóźnionej lub zbyt szybkiej reakcji osoby mierzącej przy zastopowaniu stopera. Aby wyeliminować niepewność przypadkową przeprowadzono pięć pomiarów, w wyniku czego uzyskano szereg wartości oraz pewien rozrzut. W przypadku pomiarów wielokrotnych miarą rozrzutu jest niepewność przypadkowa określana za pomocą odchylenia standardowego wartości średniej. Dla serii pomiarów równoważnych wynikiem końcowym jest średnia arytmetyczna określana wzorem (3.1), a odchylenie standardowe wartości średniej oblicza się zgodnie ze wzorem (3.2).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (3.1)$$

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.2)$$

Analizę niepewności oraz błędów przeprowadza się w celu określenia czy otrzymane wyniki są poprawne.

3.4. Wyniki badań

Wyniki pomiarów czasu przemieszczania się dla scenariusza S1 przedstawia Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Wyniki pomiarów czasu przemieszczania się dla scenariusza S1

Punkt pomiaru		Czas, mm:ss,00				
		Próba 1	Próba 2	Próba 3	Próba 4	Próba 5
Koniec korytarza	pierwsza osoba	00:13,06	00:14,30	00:15,60	00:18,59	00:15,17
	ostatnia osoba	00:24,57	00:27,57	00:26,57	00:29,61	00:26,34
Koniec schodów	pierwsza osoba	00:55,20	00:53,24	00:53,24	00:55,61	00:49,99
	ostatnia osoba	01:05,54	01:14,61	01:09,93	01:10,96	01:08,87
Wyjście z budynku	pierwsza osoba	01:06,24	00:57,03	00:57,77	00:58,36	00:52,31
	ostatnia osoba	01:16,68	01:26,02	01:12,11	01:13,41	01:12,17
Miejsce zbiórki	pierwsza osoba	01:16,26	01:05,15	01:12,15	01:13,39	01:12,27
	ostatnia osoba	01:29,00	01:38,15	01:21,85	01:23,54	01:22,88

Z powyższych danych można zauważyć, że całkowity czas przemieszczania się nie przekracza 2 minut. Dla porównania przedstawiono wyniki dla scenariusza S3 (Tabela 3.3).

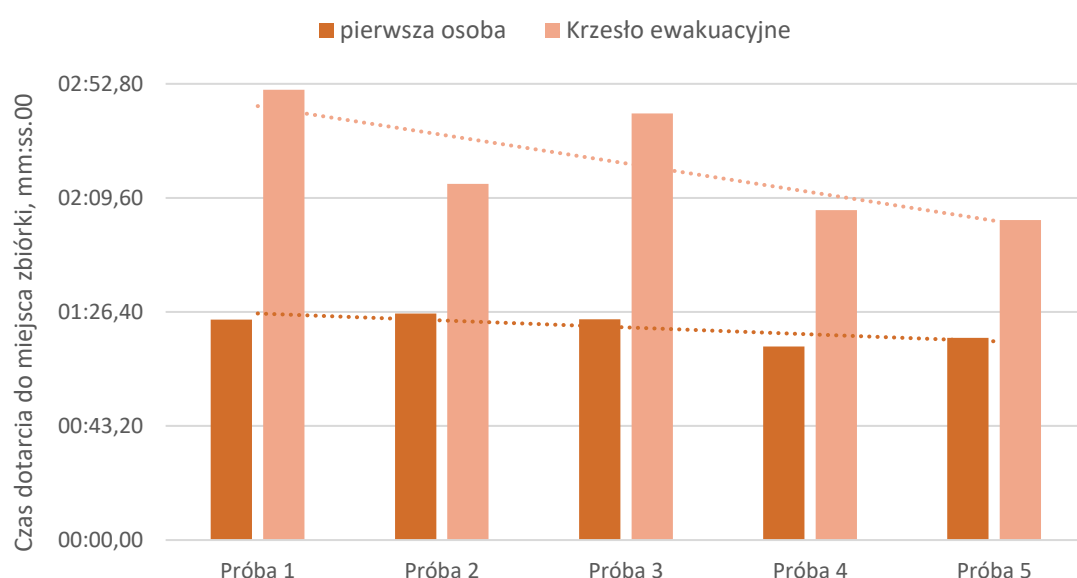
Tabela 3.3. Wyniki pomiarów czasu przemieszczania się dla scenariusza S3

Punkt pomiaru		Czas, mm:ss,00				
		Próba 1	Próba 2	Próba 3	Próba 4	Próba 5
Koniec korytarza	pierwsza osoba	00:18,05	00:16,69	00:16,63	00:15,60	00:18,09
	krzesło ewakuacyjne	00:12,15	00:14,21	00:13,89	00:15,14	00:14,70
Koniec schodów	pierwsza osoba	00:49,42	00:48,42	00:51,12	00:46,74	00:53,07
	krzesło ewakuacyjne	02:15,22	01:46,96	02:08,35	02:05,01	01:37,31
Wyjście z budynku	pierwsza osoba	00:53,16	00:53,15	00:54,72	00:49,18	00:55,49
	krzesło ewakuacyjne	02:41,99	01:53,00	02:14,29	02:05,01	01:42,31
Miejsce zbiórki	pierwsza osoba	01:23,51	01:25,77	01:23,64	01:13,27	01:16,59
	krzesło ewakuacyjne	02:50,54	02:14,94	02:41,57	02:05,01	02:01,23

Z wykresu podsumowującego czasy dotarcia na miejsce zbiórki dla scenariusza S3 (Rysunek 3.13) można zauważyć malejący trend zarówno w przypadku ewakuacji osób sprawnych jak

i użycia krzesła ewakuacyjnego, co oznacza, że z biegiem przeprowadzonych prób populacja biorąca udział w badaniu nabierała wprawy, przez co kolejne próby ewakuacyjne trwały krócej – ewakuacja przebiegała sprawniej. Taka obserwacja pozwala wysunąć wniosek, że systematyczne prowadzenie prób ewakuacyjnych będzie wpływać pozytywnie na zachowanie ludzi i sprawną ewakuację.

W przypadku prób przeprowadzanych kilkakrotnie w niedługich odstępach czasu, wpływ na otrzymane wyniki może mieć zmęczenie jakiegoś doświadczać będą uczestnicy prób. Jak można zauważyć, w tym przypadku czasy w kolejnych próbach są krótsze, co świadczy o tym, że grupa wraz z kolejnymi próbami nabierała wprawy i przewagę osiągnęło uczenie się, niż wpływ zmęczenia.



Rysunek 3.13. Czas dotarcia na miejsce zbiórki dla scenariusza S3 (opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego eksperymentu)

Tabela 3.4 przedstawia zestawienie wyników średniego czasu dotarcia do punktu pomiarowego dla każdego analizowanego scenariusza. Natomiast, wyniki średniego czasu przemieszczania się w każdym scenariuszu ewakuacji po poziomych odcinkach oraz po schodach wraz z wartościami odchylenia standardowego przedstawia Tabela 3.5

Tabela 3.4. Zestawienie wyników średniego czasu dotarcia do określonego punktu pomiarowego w każdym scenariuszu ewakuacji

Scenariusz			Średni czas w punkcie pomiarowym, mm:ss,00		
Piętro	Klatka schodowa	Populacja Punkt pomiarowy	P	KE	K
II	K1	Koniec korytarza	00:19,76	00:14,02	00:22,81
		Koniec schodów	01:09,98	01:58,57	02:06,25
		Wyjście z budynku	01:16,08	02:07,32	02:10,13
		Miejsce zbiórki	01:23,10	02:22,66	02:39,34
	K2	Koniec korytarza	00:43,62	00:41,73	01:06,42
		Koniec schodów	01:07,58	01:32,13	02:44,74
		Wyjście z budynku	01:27,66	01:43,89	02:59,49
		Miejsce zbiórki	01:54,15	02:24,27	04:00,51
IV	K1	Koniec korytarza	00:17,48	00:14,77	00:24,30
		Koniec schodów	01:27,58	02:35,38	03:46,21
		Wyjście z budynku	01:29,87	02:54,45	03:50,18
		Miejsce zbiórki	01:40,68	03:04,91	04:19,39
	K2	Koniec korytarza	00:36,51	00:35,77	01:11,68
		Koniec schodów	01:24,80	02:11,13	04:25,70
		Wyjście z budynku	01:41,92	02:22,33	04:41,20
		Miejsce zbiórki	02:10,71	03:01,12	05:42,22

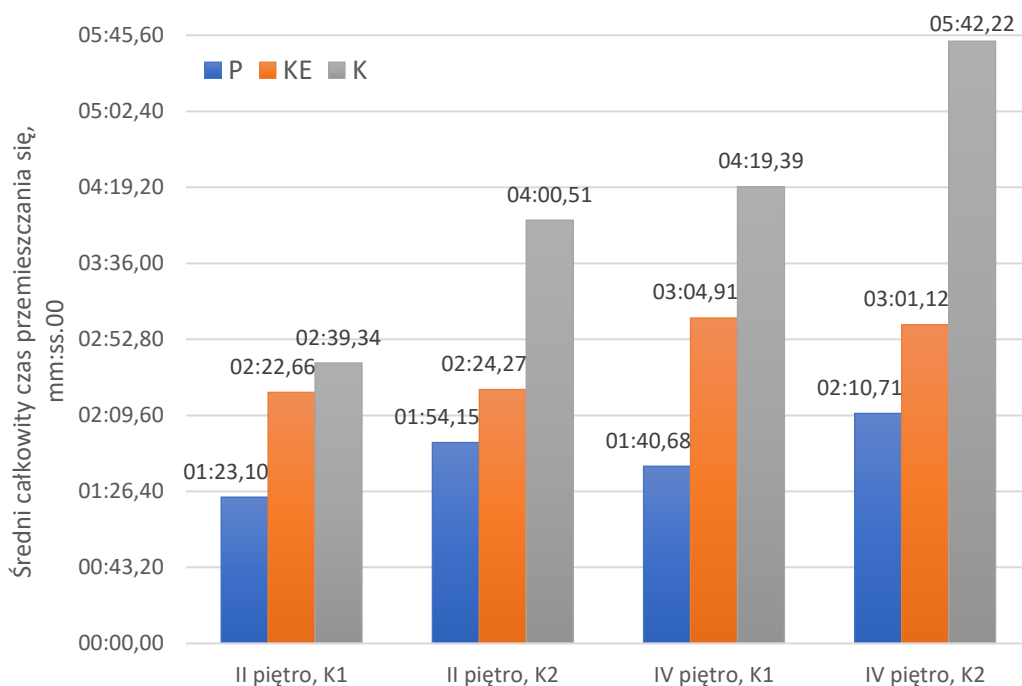
Tabela 3.5. Średni czas (t) i odchylenie standardowe (S_t) czasu przemieszczania się po poziomych odcinkach oraz po schodach

Scenariusz		Poziome odcinki					
Piętro	Klatka schodowa	P		KE		K	
		t, mm:ss,00	S _t , mm:ss,00	t, mm:ss,00	S _t , mm:ss,00	t, mm:ss,00	S _t , mm:ss,00
II	K1	00:19,76	00:05,34	00:14,02	00:01,03	00:22,81	00:00,78
	K2	00:43,62	00:05,54	00:41,73	00:00,79	01:06,42	00:08,07
IV	K1	00:17,48	00:06,80	00:14,77	00:01,36	00:24,30	00:01,96
	K2	00:36,51	00:03,26	00:35,77	00:06,82	01:11,68	00:05,67
		Schody					
Piętro	Klatka schodowa	P		KE		K	
		t, mm:ss,00	S _t , mm:ss,00	t, mm:ss,00	S _t , mm:ss,00	t, mm:ss,00	S _t , mm:ss,00
II	K1	00:37,97	00:04,70	01:44,55	00:14,77	01:43,44	00:06,58
	K2	00:28,29	00:03,30	00:50,40	00:02,49	01:38,32	00:04,33
IV	K1	00:58,70	00:06,69	02:20,61	00:03,32	03:21,90	00:04,70
	K2	00:53,06	00:07,14	01:35,35	00:03,98	03:14,02	00:15,62

Biorąc pod uwagę wyniki, które przedstawia Tabela 3.5 można zauważyć, że w przypadku poruszania się po poziomych odcinkach, średni czas przemieszczania się krzesła ewakuacyjnego jest krótszy niż w przypadku osób pełnosprawnych. Taka sytuacja może być spowodowana faktem, iż osoba transportowana za pomocą krzesła jest ostatnią osobą, która opuszcza pomieszczenie. Opóźnienie to wynika z potrzeby przygotowania krzesła ewakuacyjnego oraz jego dostarczenia do pomieszczenia. Osoby obsługujące krzesło, niejako czując presję czasu, starają się przemieszczać jak najszybciej, aby zniwelować różnice w czasie ewakuacji względem populacji osób pełnosprawnych i niejako dogonić grupę. O ile na odcinkach poziomych jest to możliwe, tak na schodach czasy te już są dłuższe ze względu na specyfikę poruszania się z krzesłem ewakuacyjnym.

Analizując średni całkowity czas przemieszczania się badanych populacji można stwierdzić, że najniższe wartości odnotowano dla populacji P, w każdym scenariuszu ewakuacji.

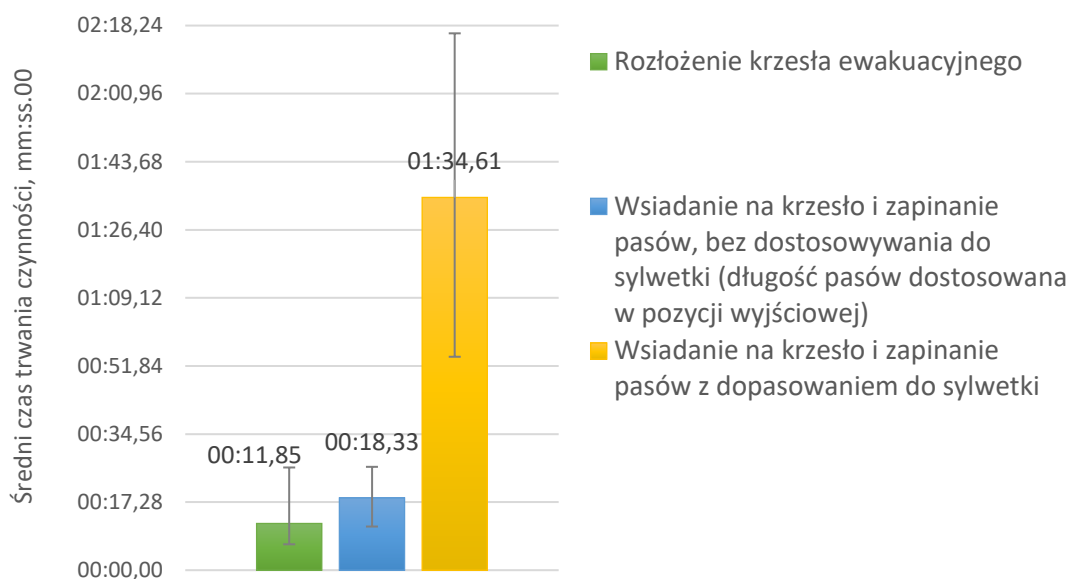
Natomiast najwolniej poruszała się osoba o kulach. Można również stwierdzić, że krzesło ewakuacyjne usprawniło proces ewakuacji w stosunku do przypadku, gdy osoba porusza się samodzielnie o kulach (Rysunek 3.14).



Rysunek 3.14. Średni całkowity czas przemieszczania się dla każdego scenariusza ewakuacyjnego dla populacji P, KE oraz K (opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego eksperymentu)

Dla ewakuacji z II piętra klatką K1 czas przemieszczania się jest o 10,47% krótszy dla KE niż dla K. W przypadku ewakuacji klatką K1 z piętra IV krzesło ewakuacyjne porusza się w czasie o 28,71% krótszym niż osoba o kulach. W przypadku ewakuacji klatką schodową K2 różnice te są znacznie większe. Dla prób z II piętra różnica ta wynosi 40,02% na korzyść krzesła ewakuacyjnego, a z piętra IV aż 47,07%.

Należy mieć na uwadze również fakt, że w przypadku zastosowania krzesła ewakuacyjnego, trzeba je najpierw przygotować do użycia – rozłożyć i ewentualnie dostarczyć do miejsca, w którym przebywa osoba z niepełnosprawnością, a także trzeba taką osobę na krzesło ewakuacyjnym posadzić (może ona wsiadać samodzielnie) oraz zapiąć pasami bezpieczeństwa. Czynności te będą wpływać na czas ewakuacji. Zmierzono czas trwania tych czynności, wyniki w postaci średniego czasu przedstawia Rysunek 3.15. Maksymalne i minimalne zmierzone wartości zaznaczono za pomocą słupków błędów. Sprawdzono również jaki będzie czas potrzebny na wniesienie krzesła z powrotem, np. w celu ewakuacji kolejnej osoby, wyniki te przedstawia Tabela 3.6.



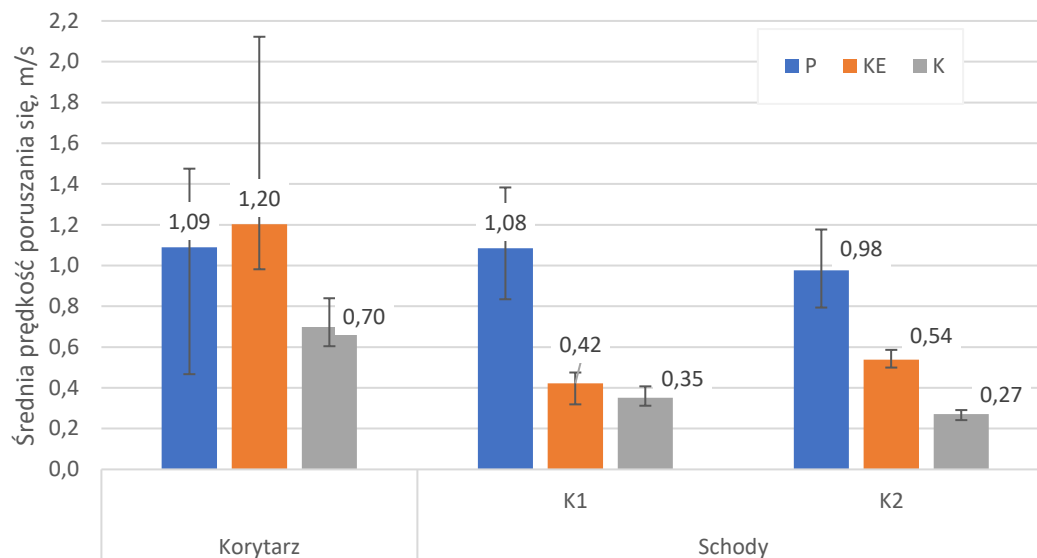
Rysunek 3.15. Czas potrzebny na przygotowanie krzesła ewakuacyjnego do użycia (opracowanie własne na podstawie przeprowadzonego eksperymentu)

Tabela 3.6. Czas oraz prędkość wnoszenia krzesła ewakuacyjnego z powrotem na dane piętro

Czynność	Klatka schodowa	Piętro	Średni czas trwania czynności, mm:ss,00	Dystans, m	Średnia prędkość, m/s
Wniesienie krzesła z powrotem	K1	II	01:30,12	55,72	0,62
		IV	01:51,47	81,14	0,73
	K2	II	01:34,56	85,22	0,90
		IV	02:53,80	110,74	0,64

Analizując czasy przemieszczania się po poszczególnych odcinkach dróg ewakuacyjnych oraz pokonany dystans, obliczono średnią prędkość poruszania się populacji w każdym scenariuszu ewakuacji. Obliczenia zostały wykonane osobno dla odcinków poziomych – korytarzy oraz dla odcinków pionowych – klatek schodowych. Wyniki średniej prędkości poruszania się przedstawia Rysunek 3.16. Maksymalne oraz minimalne wartości przedstawiono za pomocą słupków błęd.

Analizując wyniki średniej prędkości, można zauważyć, że wszystkie populacje najszybciej poruszają się po płaskich odcinkach. Prędkość populacji P oraz KE są zbliżone. Prędkość KE zależy od prędkości poruszania się osoby obsługującej krzesło ewakuacyjne. Wyższa wartość wynika z krótszego czasu poruszania się, który został zmierzony, co wynika z opisanego wcześniej zjawiska „pośpiechu” osób obsługujących krzesło. Osoby pełnosprawne poruszają się z podobną prędkością zarówno na korytarzach jak i schodach.



Rysunek 3.16. Średnia prędkość poruszania się populacji P, KE oraz K

Zgodnie z przypuszczeniami, prędkości poruszania się po schodach zarówno krzesła ewakuacyjnego jak i osoby o kulach są niższe w porównaniu do populacji P. Najniższą prędkość poruszania się we wszystkich scenariuszach wykazuje osoba poruszająca się o kulach. Zarówno na klatce schodowej K1 jak i K2, osoba o kulach porusza się ponad 3 krotnie wolniej od populacji P. Krzesło ewakuacyjne również porusza się wolniej od populacji P, natomiast różnice te są mniejsze. Dla klatki schodowej K1 różnica ta wynosi 61%, natomiast dla klatki schodowej K2 – około 45%. Analizując średnie prędkości, ewakuacja poprzez zastosowanie krzesła do ewakuacji osoby z niepełnosprawnością została usprawniona o niecałe 17% na K1 oraz o prawie 50% na klatce K2. Różnice w wynikach dla klatki K1 i K2 mogą wynikać z różnej budowy tych klatek schodowych. Również w przypadku poruszania się po korytarzu, średnia prędkość KE jest wyższa niż K o prawie 42%, dlatego w tym wypadku zastosowanie krzesła ewakuacyjnego jest zasadne.

Wartości prędkości poruszania się poszczególnych populacji określone za pomocą badań, zostaną wykorzystane w dalszych analizach wykonanych z wykorzystaniem programów symulacyjnych. Prędkość poruszania się po płaskich odcinkach dróg populacji osób pełnosprawnych proponuje się przyjąć jako 1,09 m/s; prędkość poruszania się krzesła ewakuacyjnego jako 1,20 m/s; a prędkość osoby poruszającej się o kulach jako 0,70 m/s. Dla odcinków pionowych – schodów, prędkość populacji pełnosprawnej 1,08 m/s dla ewakuacji klatką schodową K1 oraz 0,98 m/s dla klatki schodowej K2; prędkość poruszania się krzesła ewakuacyjnego 0,42 m/s dla klatki schodowej K1 oraz 0,54 m/s dla K2; natomiast prędkość osoby poruszającej się o kulach 0,35 m/s na klatce K1 oraz 0,27 m/s na klatce K2.

3.5. Wnioski z przeprowadzonych badań

Zgodnie z założeniami, badania wykazały, że ewakuacja populacji, w której znajduje się osoba z niepełnosprawnością trwa dłużej, nawet przy zastosowaniu pomocy w postaci krzesła ewakuacyjnego. Prędkość transportu krzesła ewakuacyjnego zależy od prędkości poruszania się osób, które je obsługują, ponieważ wybrany model krzesła nie posiada napędu. Niewątpliwie, krzesło ewakuacyjne jest przydatnym rozwiązaniem w przypadku ewakuacji osób o ograniczonej lub całkowitym braku zdolności poruszania się. Porównując zarówno WCBE jak i prędkości poruszania się, możemy zauważyć, że osoba poruszająca się samodzielnie o kulach, porusza się najwolniej, a WCBE jest najdłuższy. Wyznaczona na podstawie badań prędkość poruszania się poszczególnych populacji posłuży jako wartość modelowa do wykonania symulacji ewakuacji.

W przepisach techniczno-budowlanych wciąż brak jest określonych rozwiązań dotyczących ewakuacji osób z niepełnosprawnościami. Konieczne jest sporządzenie odpowiednich rozporządzeń, które będą uwzględniały ten aspekt ewakuacji. Zgodnie z praktyką, jedyną alternatywą ewakuacji osób o ograniczonej zdolności poruszania jest transport ręczny przez inne osoby ewakuujące się lub transport dźwigami dla straży pożarnej, zgodnie z normą [128], to rozwiązanie posiada jednak pewne ograniczenia. Transport ręczny często jest problematyczny, a niejednokrotnie niemożliwy do wykonania. W takim wypadku osoby mające problem z samodzielnym poruszaniem się, zmuszone są poczekać na służby ratownicze. Krzesło ewakuacyjne daje możliwość pomocy tym osobom oraz zapewnienie ewakuacji w tym samym czasie co reszta użytkowników budynku, bez konieczności czekania na pomoc [44].

Warto zwrócić uwagę również na fakt, że w badaniu brały udział osoby młode – studenci, którzy znają budynek. Poruszanie się po budynku, którego układ się zna przysparza mniej trudności, niż w przypadku poruszania się po budynku, w którym znajdujemy się sporadycznie lub pierwszy raz. Osoby młode cechują się zdolnością szybkiego uczenia się oraz znaczną sprawnością fizyczną, co sprawia, że wraz z większą liczbą przeprowadzonych prób ewakuacyjnych, skraca się wymagany czas bezpiecznej ewakuacji. Osoby te nabierają wprawy. Z tych względów trzeba nadmienić, że badania obarczone są pewnym błędem, którego autorka jest świadoma.

Są to pierwsze tego typu badania przeprowadzone w Polsce z użyciem krzesła ewakuacyjnego w rzeczywistym budynku użyteczności publicznej. Badania zostały przeprowadzone w utrudnionych warunkach mianowicie w czasie pandemii COVID-19. Sytuacja ta spowodowała wybór kilkusobowej grupy studentów jako grupy badawczej. Doświadczenie pozyskane podczas tych badań daje możliwość opracowania procedury na przyszłość, w celu przeprowadzenia prób z grupą docelową - grupą osób ze specjalnymi potrzebami.

Rozdział 4. Modelowanie rozwoju pożaru

W tej części pracy przedstawiono symulacje rozwoju pożaru w budynku. Obiektem badań jest fragment budynku wydziału, czyli opisana wcześniej (Podrozdział 3.1.1) klatka schodowa K1 wraz z fragmentem korytarza oraz salą dydaktyczną, w której zlokalizowane jest źródło pożaru. Model geometryczny obiektu został odwzorowany w programie PyroSim (wersja 2023.3.1206). Wykonano symulacje rozwoju pożaru z wykorzystaniem programu Fire Dynamics Simulator (FDS) wersja 6.8.0.

Aby przeanalizować sposób w jaki rozwija się pożar i rozprzestrzenia się w budynku dym, ciepło i gazy pożarowe, wykonuje się obliczenia numeryczne w programie FDS. Program FDS jest dedykowanym dla inżynierii bezpieczeństwa pożarowego narzędziem pozwalającym oszacować rozwój pożaru dzięki modelowaniu CFD. Program opiera się na metodzie dyskretyzacji FD (Finite Difference), czyli metodzie różnic skończonych.

Niezwykle ważnym aspektem podczas oszacowywania pożaru z użyciem narzędzi numerycznych jest prawidłowe i jak najdokładniejsze odwzorowanie geometrii budynku, charakterystyki pożaru, właściwości materiałów, jak również przyjęcie odpowiedniego procesu obliczeniowego. Przyjęcie konkretnych założeń będzie miało znaczący wpływ na uzyskane wyniki. Z racji, że pożar jest zjawiskiem skomplikowanym, wiele procesów w nim zachodzących nie da się dokładnie zamodelować, przez co należy przyjąć pewne uproszczenia.

Modele CFD działają poprzez rozwiązywanie układów równań różniczkowych, które opisują ruch płynu w badanym obszarze i czasie. Program FDS wykorzystuje do obliczeń równanie różniczkowe Naviera – Stokesa. Równanie to rozwiązywane jest w każdym węźle siatki obliczeniowej, natomiast pomiędzy węzłami wyliczane wartości są aproksymowane.

Ważnym aspektem budowy modelu obliczeniowego jest dobór odpowiedniej rozdzielczości siatki (odpowiedniej wielkości komórek), tak aby nie doprowadzić do ryzyka przekłamania wyników. Ogólną postać równań Naviera – Stokesa przedstawiono w równaniu (4.1) [129].

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla \cdot P + \rho f \quad (4.1)$$

gdzie:

ρ – gęstość płynu,

$\frac{D}{Dt}$ – operator Stokesa,

v – wektor przyspieszenia płynu (sił masowych),

P – tensor naprężeń wewnętrznych w elemencie płynu,

f – wektor prędkości.

Jednym z elementów, który będzie istotnie wpływać na wyniki symulacji jest przyjęty model turbulencji. Ogólnie rzecz biorąc FDS wykorzystuje głównie dwa modele turbulencji: LES (Large Eddy Simulation), czyli model dużych wirów oraz model DNS (Direct Numerical Simulation), czyli bezpośrednią symulację numeryczną.

DNS zakłada bezpośrednie rozwiązywanie równania Naviera-Stokesa bez uproszczeń. Metoda ta wymaga tworzenia bardzo gęstych siatek, co przy złożonych symulacjach nie daje możliwości ich policzenia ze względu na ograniczone moce obliczeniowe komputerów. Z tego względu metoda ta wykorzystywana jest głównie do analiz prostych przepływów turbulentnych.

Model LES jest modelem polegającym na przestrzennym uśrednieniu pola przepływu. Metoda LES jest metodą pośrednią, która pozwala podzielić obliczenia na część rozwiązywaną numerycznie oraz część rozwiązywaną analitycznie. Model LES dla wirów wielkoskalowych zakłada bezpośrednie numeryczne rozwiązanie równania Naviera-Stokesa, a wiry najmniejsze czyli takie, których wymiar jest mniejszy niż wymiar komórki obliczeniowej, obliczane są analitycznie lub pomijane. Jednym z ważnych parametrów charakteryzującym obliczenia w tej metodzie jest zatem tzw. filtr Smagorinskiego, czyli wielkość wirów, które w obliczeniach są pomijane. W miejsce tych wirów wprowadzana jest dodatkowa lepkość oddająca naprężenia, powodowane przez wiry [130]. Model LES jest bardzo często wykorzystywany do analizy przepływów w środowisku pożaru [131]. Model ten wymaga jednak dokładnej dyskretyzacji siatki obliczeniowej.

W wersji 6 FDS domyślnym modelem jest VLES (Very Large Eddy Simulation) zwany też modelem Unsteady RANS (URANS). Jest to model, który zyskał popularność w ostatnich latach. VLES to model samoadaptacyjny, w którym w zależności od rozdzielczości siatki następuje płynne przejście pomiędzy RANS (Reynolds Averaged Navier–Stokes) do DNS, maksymalnie wykorzystując zalety każdej z metod. Takie podejście pozwala w pełni wykorzystać moce obliczeniowe. Odpowiedni tryb LES dobierany jest pomiędzy granicami metod RANS i DNS. Model VLES jest dość skuteczny w rozwiązywaniu dużych struktur przepływu i może dawać zadowalające efekty dla siatek o niskiej rozdzielczości [132]. Dokładny opis modelu znajdziemy w publikacjach autora Han i inni [132], [133].

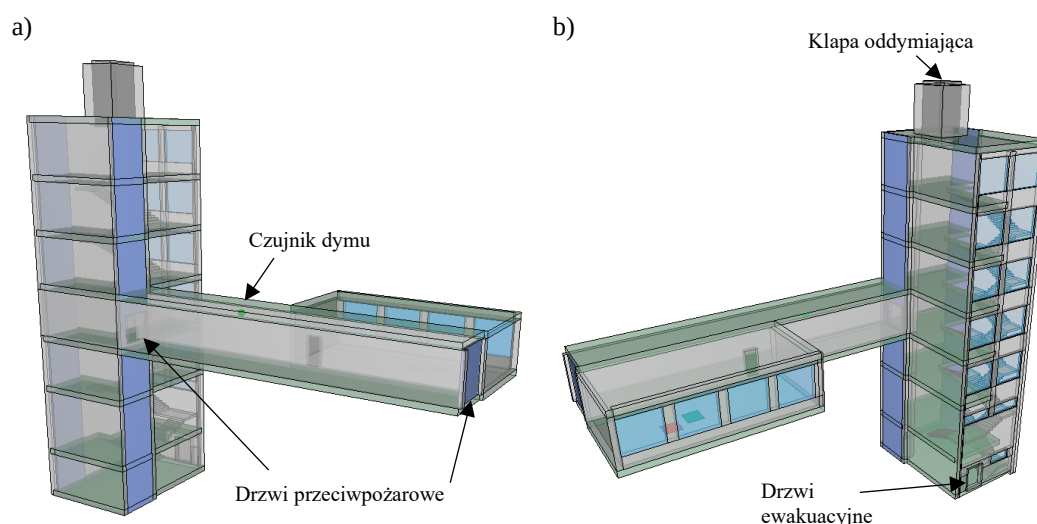
W wersji 6 FDS stosowane jest również podejście SGS (Subgrid-scale modeling) z wykorzystaniem modelu Deardorffa [134]. W przeciwieństwie do modelu Smagorinsky’ego używanego domyślnie w poprzednich wersjach FDS, model Deardorffa uwzględnia turbulentną energię kinetyczną.

FDS posiada pewne ograniczenia względem doboru domeny obliczeniowej. Program pozwala wykonać geometrię jedynie w domenie prostopadłościów, co nie pozwala na wierne odwzorowanie powierzchni zakrzywionych [135].

4.1. Charakterystyka modelu numerycznego

Geometrię obiektu odwzorowano z możliwie największą dokładnością. Geometria ta obejmuje salę dydaktyczną o powierzchni 70 m^2 zlokalizowaną na drugim piętrze budynku, korytarz o powierzchni 62 m^2 oraz klatkę schodową obejmującą 7 kondygnacji (piwnicę, parter, oraz 5 pięter). Klatka schodowa wyposażona jest w grawitacyjny system oddymiania składający się z klapy oddymiającej usytuowanej na dachu budynku oraz drzwi ewakuacyjnych zlokalizowanych w piwnicy i pełniących rolę otworu nawiewnego powietrza kompensacyjnego. Układ oddymiania został uwzględniony w modelu. Działa on automatycznie w momencie zadziałania czujki dymu zlokalizowanej na korytarzu analizowanej kondygnacji. Geometrię modelu wraz z wymienionymi elementami przedstawia Rysunek 4.1.

W celu zoptymalizowania czasu prowadzenia obliczeń numerycznych, w modelu numerycznym uwzględniono tylko tę część budynku, która stanowi prawidłową drogę ewakuacyjną. Założony kierunek ewakuacji jest zgodny z kierunkiem ewakuacji określonym w instrukcji przeciwpożarowej dla budynku. Na końcu korytarza znajdują się drzwi przeciwpożarowe oddzielające strefę pożarową od dalszej części budynku, co pozwoliło na przyjęcie danego uproszczenia modelu.



Rysunek 4.1. Model obliczeniowy, a) widok korytarza, b) widok od strony wyjścia ewakuacyjnego

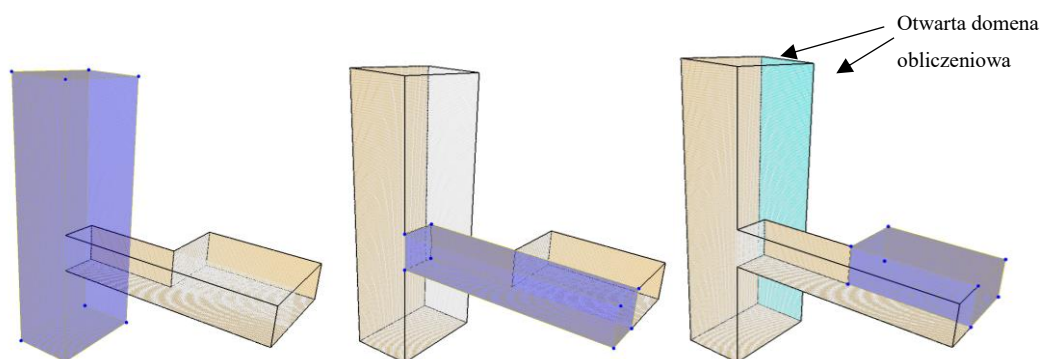
Zgodnie z NIST [134], aby określić w modelu jak dobrze obliczane jest pole przepływu, wyznacza się bezwymiarowe wyrażenie $D^*/\delta x$. W wyrażeniu tym D^* jest charakterystyczną średnicą pożaru, a δx to nominalny rozmiar komórki siatki. D^* oblicza się zgodnie ze

wzorem (4.2), w którym $\dot{Q}$ to szybkość wydzielania ciepła (moc pożaru po czasie) wyrażona w kW, ρ – gęstość powietrza ($\approx 1,2$), kg/m³, c_p – ciepło właściwe powietrza (≈ 1), kJ/kg K, T – temperatura powietrza otoczenia, K, a g – przyspieszenie ziemskie, m/s².

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho \cdot c_p \cdot T \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (4.2)$$

Dla komórki siatki o wymiarze 0,15 m wyrażenie $D^*/\delta x$ wynosi 4,86. Zgodnie z literaturą, wartość ta powinna mieścić się w przedziale między 4 a 16 [136]. Warunek ten został spełniony, ponadto biorąc pod uwagę fakt, iż gęstsza siatka wpłynęłaby znacząco na czas obliczeń, przyjęto wymiar komórki siatki o wartości 0,15 m za właściwy.

Model obliczeniowy składa się zatem z sieci obliczeniowej o wymiarach pojedynczej komórki 0,15 m x 0,15 m x 0,15 m. Sieć obliczeniowa składa się z 1014300 komórek. W celu zoptymalizowania obliczeń, sieć podzielono na 3 części, które okalają geometrię zamodelowanej części budynku. Część 1 – zawiera geometrię klatki schodowej, część 2 – zawiera geometrię korytarza, natomiast część 3 – zawiera geometrię sali dydaktycznej. Aby model działał poprawnie, ze względu na system usuwania dymu z klatki schodowej, domena obliczeniowa została otwarta w dwóch płaszczyznach siatki części 1 (Rysunek 4.2).



Rysunek 4.2. Sieć obliczeniowa z zaznaczonymi podziałami

Symulacje wykonano w celu określenia warunków jakie panują na drogach ewakuacyjnych podczas rozwoju pożaru i ewentualnej obecności na tej drodze osób ewakuujących się. Przeanalizowano takie parametry jak: zadymienie, rozkład temperatury oraz emisja zanieczyszczeń. Charakterystykę pożaru przedstawia Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Charakterystyka pożaru

Moc pożaru	t^2	Czas symulacji	Powierzchnia źródła pożaru	Reakcja	Typ reakcji	Radiative fraction	Emisja sadzy	Emisja CO
500,0 kW/m ²	200 s	20 minut	1 m ²	Poliuretan	Simple chemistry	35%	0,1 kg/kg	0,05 kg/kg

Do zamodelowania przegród budowlanych użyto odpowiednich materiałów oraz ich grubości, co przedstawia Tabela 4.2. Z kolei Tabela 4.3. przedstawia podstawowe właściwości użytych materiałów.

Tabela 4.2. Elementy modelu wraz z ich grubością

Element modelu	Ściana zewnętrzna budynku	Ściana działowa	Strop	Schody	Okno
Materiał	Beton	Beton	Beton	Beton	Szkło
Grubość	0,35 m	0,15 m	0,4 m	0,16 m	0,02 m

Tabela 4.3. Właściwości materiałów użytych w modelu

Materiał	Beton	Szkło
Właściwości		
Gęstość	2280,0 kg/m ³	2700,0 kg/m ³
Ciepło właściwe	1,04 kJ/(kg·K)	0,84 kJ/(kg·K)
Przewodność cieplna	1,8 W/(m·K)	0,76 W/(m·K)

W analizach numerycznych uwzględniono również emisję zanieczyszczeń w czasie rozwoju pożaru. Ze względu na przyjętą w modelu reakcję pożaru pianki poliuretanowej, toksyczne właściwości produktów spalania tego materiału przyjęto zgodnie z danymi literaturowymi przedstawionymi w publikacji autorów McKenna i inni [137], a wartości liczbowe określono za pomocą wartości opisanych przez autorów Reisen i inni [104]. Źródło zanieczyszczeń, podobnie jak źródło pożaru, zamodelowano jako vent o powierzchni 1 m². Zdefiniowano strumień masowy dla poszczególnych zanieczyszczeń (Tabela 4.4).

Strumień masowy poszczególnej substancji F_i wyznaczono zgodnie z zależnością (4.3), gdzie Y_i to ilość uzyskanej substancji z reakcji opisanych przez autora Reisen i inni [104].

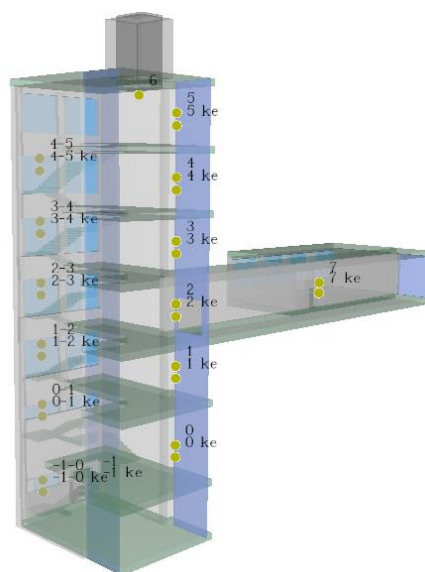
$$F_i = \frac{HRRPUA}{EHC} Y_i \quad (4.3)$$

Tabela 4.4. Przyjęte emisje zanieczyszczeń

HRRPUA = 500 kW/m ²		
EHC (PUR) = 21 MJ/kg		
	Y _i , kg/kg	F _i , kg/m ² s
Benzen	4,897·10 ⁻³	11,70·10 ⁻⁵
Toluen	0,459·10 ⁻³	1,09·10 ⁻⁵
Formaldehyd	9,30·10 ⁻⁴	2,21·10 ⁻⁵
Aldehyd octowy	1,21·10 ⁻³	2,88·10 ⁻⁵
Fenol	4,30·10 ⁻⁴	1,02·10 ⁻⁵
Kwas benzoesowy	7,65·10 ⁻³	1,82·10 ⁻⁴

Aby sprawdzić, w jaki sposób w zamodelowanym budynku rozprzestrzeniają się emitowane zanieczyszczenia, rozmieszczono czujniki pomiarowe. Czujniki fazy gazowej rejestrują udziały masowe poszczególnych zanieczyszczeń. Rozmieszczono je w taki sposób, aby kontrolować rozkład zanieczyszczeń na korytarzu oraz na klatce schodowej. Umieszczenie czujników pomiarowych w modelu przedstawiono za pomocą żółtych kropek (Rysunek 4.3). Na drogach ewakuacyjnych zlokalizowane są one na wysokości 1,8 m od poziomu podłogi. Jest to wysokość graniczna, do której należy zapewnić bezpieczne warunki podczas ewakuacji. Czujki te zlokalizowane są na spocznikach każdej kondygnacji w pobliżu drzwi przeciwpożarowych (0-5) oraz na spocznikach schodów. Dodatkowo, czujniki umiejscowiono również: bezpośrednio pod klapą dymową w odległości 0,5 m pod sufitem (6); na korytarzu w odległości 0,5 m od drzwi wyjściowych z sali (7); oraz w pobliżu wyjścia ewakuacyjnego w piwnicy budynku (-1).

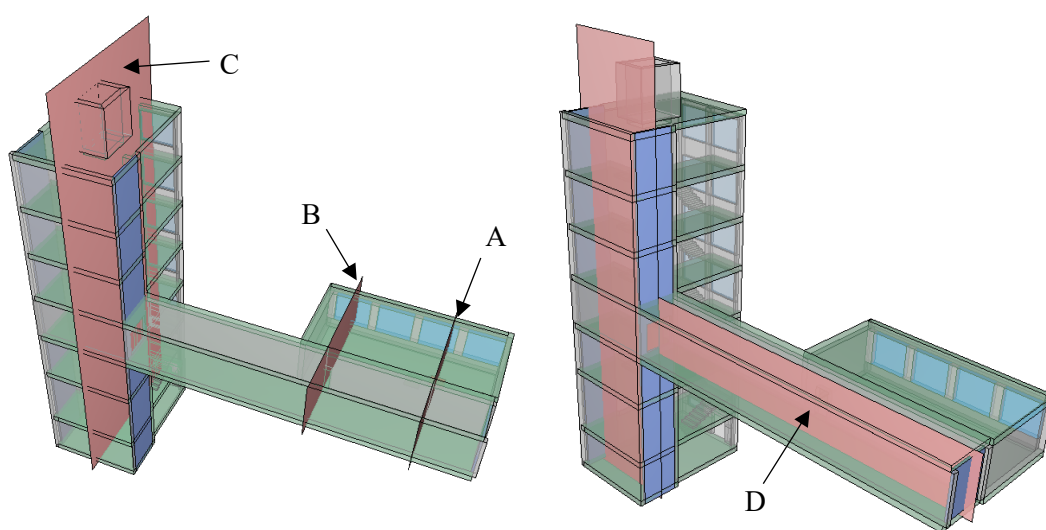
Dodatkowo w celu zbadania warunków osoby poruszającej się za pomocą krzesła ewakuacyjnego, zlokalizowano czujniki na wysokości 1,1 m. Odpowiednio zlokalizowane na drodze ewakuacyjnej, jak na wysokości 1,8 m. Na rysunku oznaczono je skrótem „ke”.



Rysunek 4.3. Lokalizacja czujników pomiarowych

W tych samych miejscach co czujniki pomiarowe fazy gazowej, zlokalizowano termopary służące do pomiaru temperatury. Do pomiarów użyto termopar o średnicy 1 mm.

W celu płynnego śledzenia zmian warunków panujących w budynku zamodelowano płaszczyzny 2D, które pozwalają przeanalizować m.in. rozkład temperatury, zadymienie oraz przemieszczanie się zanieczyszczeń. Płaszczyzny te zlokalizowano w wybranych miejscach modelu, co pokazuje Rysunek 4.4. Dwie płaszczyzny wynikowe zlokalizowane są w sali dydaktycznej tak, że przechodzą przez środek źródła pożaru (A) oraz przez środek drzwi wyjściowych z sali (B). Kolejne płaszczyzny zlokalizowane są na klatce schodowej (C) oraz wzdłuż korytarza (D) – poprowadzono ją przez jego środek.



Rysunek 4.4. Lokalizacja płaszczyzn wynikowych 2D

Przy obliczeniach widzialności przez dym istotnym parametrem jest VISIBILITY_FACTOR. Wartość domyślna tego parametru w programie FDS wynosi 3, co odpowiada obliczeniom widzialności obiektów odbijających światło i jest właściwa dla większości typowych przypadków [138], dlatego taka wartość została przyjęta w analizach. Podsumowanie głównych założeń przyjętych w modelu obliczeniowym przedstawia Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Główne założenia modelu obliczeniowego

Parametr	Wartość
Rozdzielczość siatki obliczeniowej	0,15 m
Model przepływu turbulentnego	Model VLES
Model SGS	Model Deardorffa
Źródło pożaru	Powierzchniowe źródło o wymiarach 1x1 m moc zmienna w czasie
Tyo reakcji	Poliuretan
Moc maksymalna modelowanego pożaru	0,5 MW
Współczynnik generacji sadzy	$Y_s = 0,1 \text{ kg/kg}$
Współczynnik generacji tlenku węgla	$Y_{CO} = 0,05 \text{ kg/kg}$
Zmienna VISIBILITY_FACTOR	3
Model spalania	Simple chemistry
Zmienna RADIATIVE_FRACTION	0,35
Temperatura na zewnątrz	20°C
Czas symulacji	20 minut

Przeanalizowano dwa przypadki rozwoju pożaru. W obu analizowanych przypadkach geometria drogi ewakuacyjnej, działanie systemów, lokalizacja oraz charakterystyka pożaru są takie same. Zasadniczą różnicę w analizowanych przypadkach stanowi obecność samozamykaczy (lub ich brak) w drzwiach przeciwpożarowych.

- *Przypadek 1*

Pierwszy przypadek zakłada, że zarówno drzwi do sali dydaktycznej, jak również drzwi przeciwpożarowe oddzielające korytarz i klatkę schodową pozostają otwarte przez cały czas trwania symulacji. Drzwi te nie są wyposażone w samozamykacze, co powoduje, że nie nastąpi ich automatyczne zamknięcie w momencie wystąpienia pożaru. Ewakuacja osób z sali dydaktycznej spowoduje z kolei ich otwarcie i pozostawienie w tym stanie.

- *Przypadek 2*

Drugi przypadek uwzględnia obecność samozamykaczy zamontowanych w drzwiach ewakuacyjnych oddzielających korytarz i klatkę schodową. Fakt ten sprawia, że drzwi te zostają automatycznie zamknięte w momencie pojawienia się sygnału alarmującego o pożarze. Następnie, drzwi te są otwierane kilkakrotnie na skutek ewakuacji ludzi. Sekwencja otwierania i zamykania drzwi odzwierciedla rzeczywiste czasy, które uzyskano w próbach ewakuacyjnych opisanych we wcześniejszej części pracy (Rozdział 3).

Różnice w założeniach do analizy obu przypadków przedstawia Tabela 4.6.

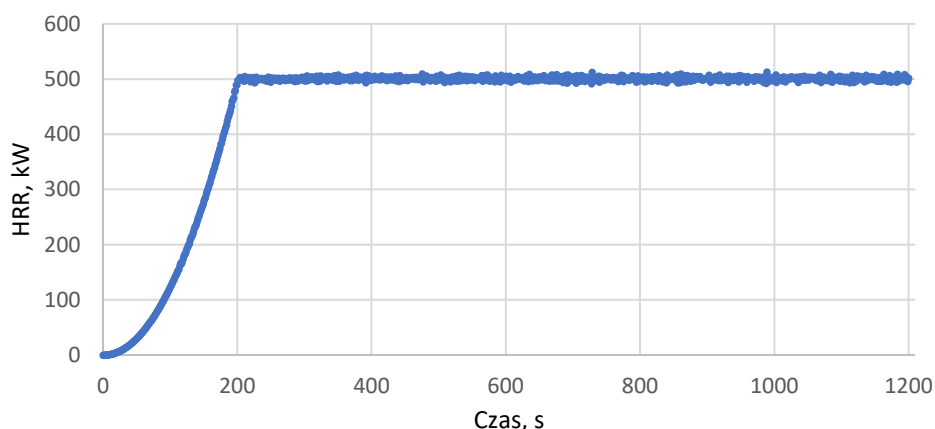
Tabela 4.6. Analizowane przypadki rozwoju pożaru

Model rozwoju pożaru	Drzwi do sali dydaktycznej	Drzwi przeciwpożarowe oddzielające korytarz i klatkę schodową	Obecność samozamykaczy na drzwiach przeciwpożarowych	Lokalizacja źródła pożaru
Przypadek 1	Otwarte przez cały czas trwania symulacji	Otwarte przez cały czas trwania symulacji	Nie	Sala dydaktyczna
Przypadek 2		Otwierane i zamykane zgodnie z sekwencją	Tak	

4.2. Wyniki badań

4.2.1. Przypadek 1 – drzwi bez samozamykaczy

Ze względu na przyjętą charakterystykę pożaru, wynikowy wykres HRR dla pierwszego przypadku kształtuje się w następujący sposób (Rysunek 4.5).

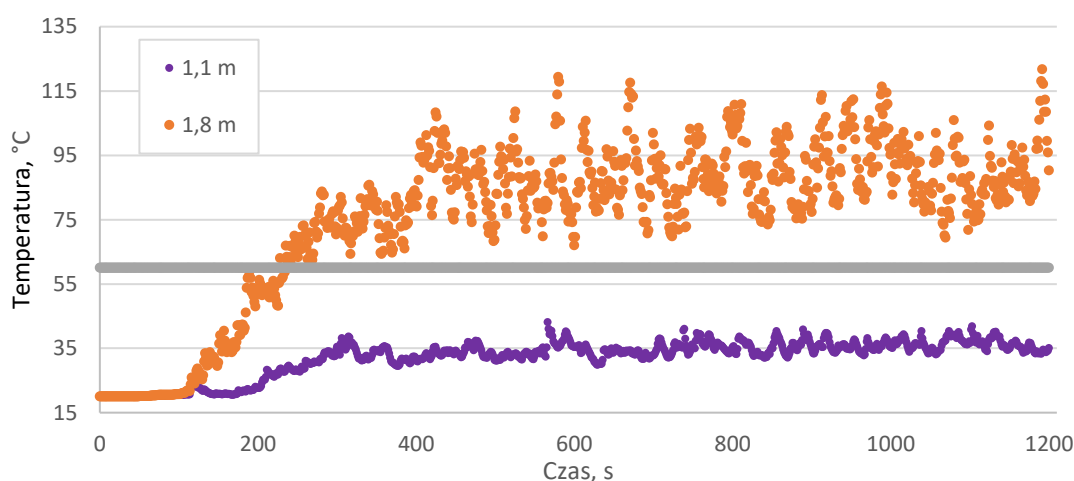


Rysunek 4.5. Wykres HRR w czasie dla przypadku pierwszego

Analizując główne parametry warunkujące bezpieczne warunki ewakuacji skupiono się osobno na analizie warunków na korytarzu oraz na klatce schodowej.

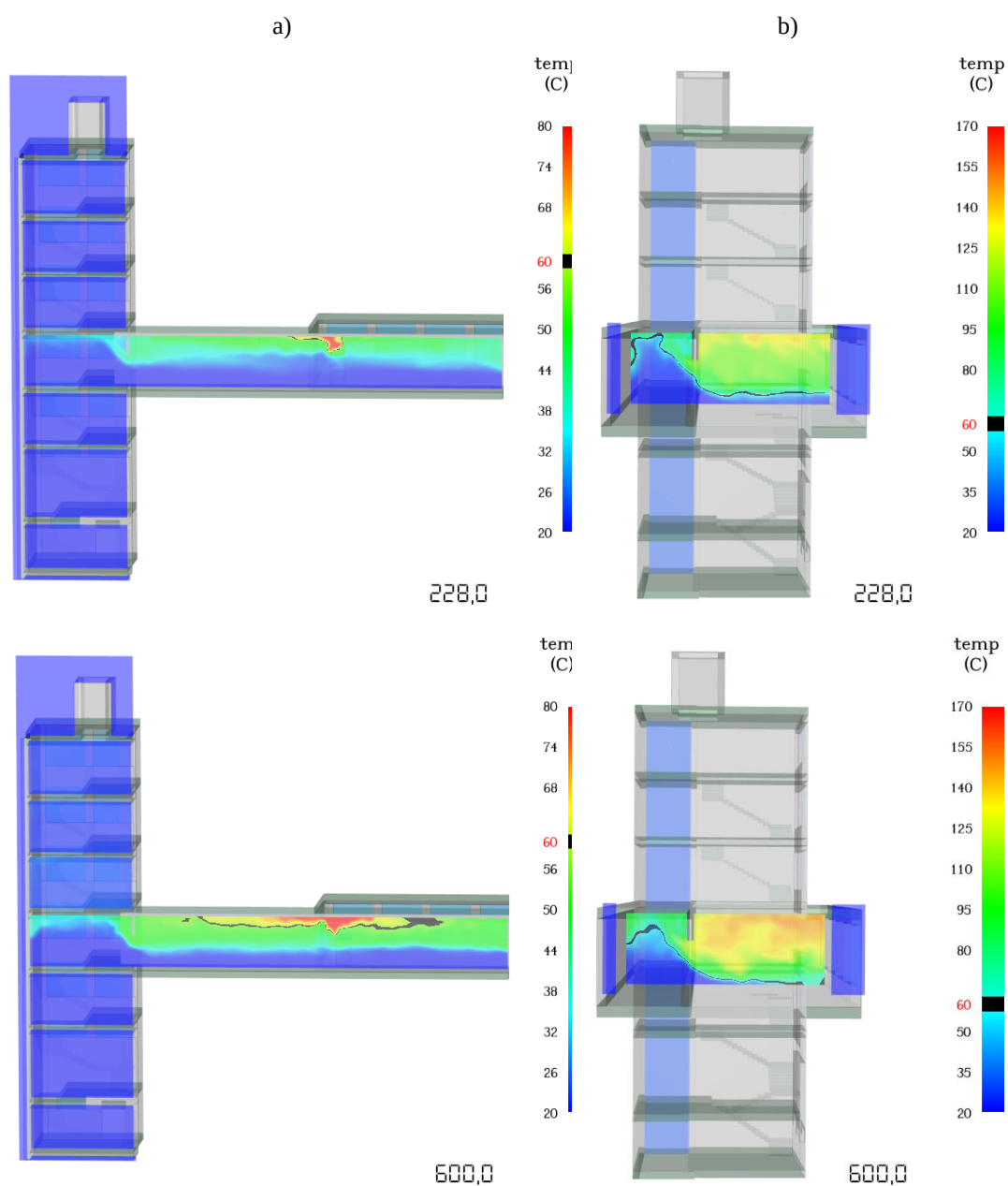
4.2.1.1 Korytarz

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji zaobserwowano, że temperatura w punkcie pomiarowym na wysokości 1,8 m na korytarzu, wraz z rozwojem pożaru, wzrasta ponad wartości bezpieczne. Ze względu na możliwość ewakuacji, temperatura na wysokości do 1,8 m od poziomu podłogi nie powinna przekraczać 60°C. W tym przypadku wartość ta zostaje przekroczona po upływie ok. 228 sekund (Rysunek 4.6), natomiast w punkcie pomiarowym na wysokości 1,1 m temperatura nie przekracza wartości granicznej przez cały czas trwania symulacji.

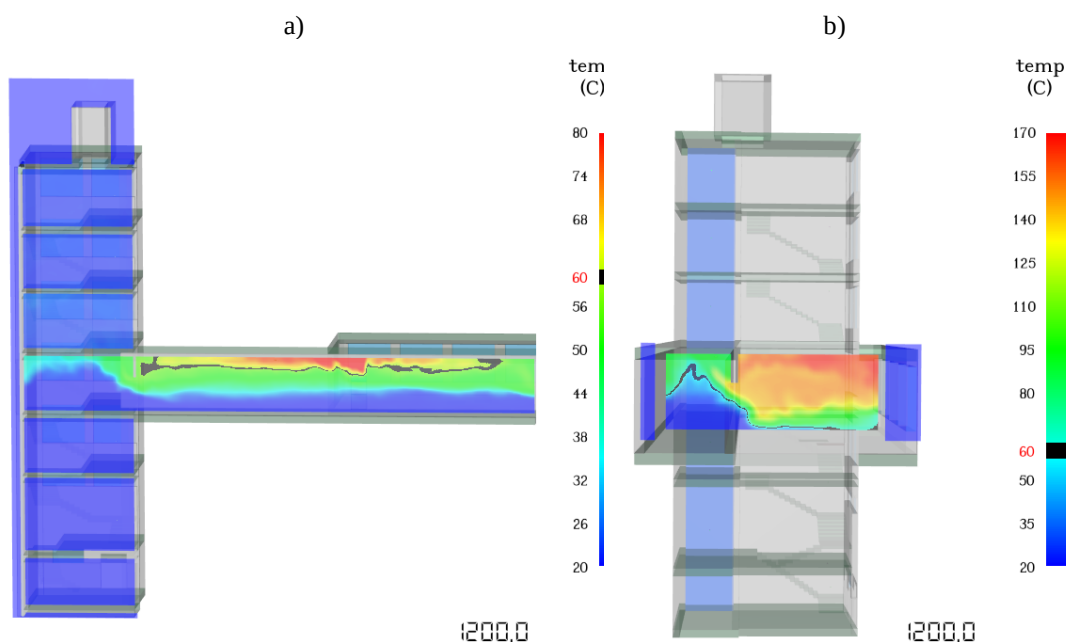


Rysunek 4.6. Wykres zmian temperatury w punkcie pomiarowym na korytarzu – przypadek 1

Rozkład temperatury na korytarzu przedstawiono na płaszczyznach wynikowych (Rysunek 4.7 oraz Rysunek 4.8). Temperaturę 60°C zaznaczono za pomocą czarnej obwódki. Na rysunku b) przedstawiono rozkład temperatury w płaszczyźnie obejmującej pomieszczenie oraz korytarz, przechodzącej przez światło drzwi wyjściowych z sali (B). Jak można zauważyć dzięki temu, że drzwi na klatkę schodową są stale otwarte, od pewnego momentu temperatura na korytarzu praktycznie już nie wzrasta. Do końca trwania symulacji warunki na korytarzu pozostają niebezpieczne. Rozkłady dla czasu 600 sekund oraz 1200 sekund są podobne. Gorące powietrze przemieszcza się na klatkę schodową i tam zostaje ochładzane przez powietrze napływające z zewnątrz.

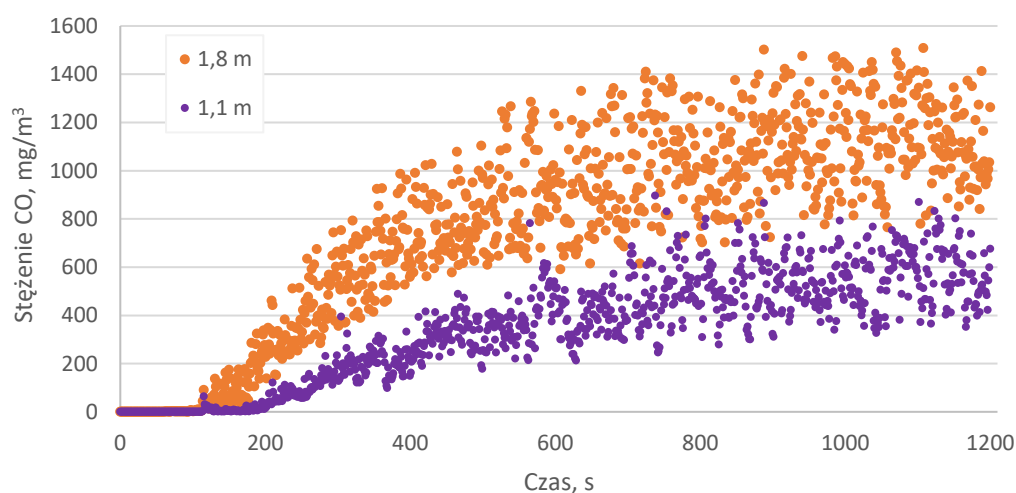


Rysunek 4.7. Rozkład temperatury na korytarzu po 228 sekundach oraz po 600 sekundach – przypadek 1. a) płaszczyzna wynikowa D, b) płaszczyzna wynikowa B



Rysunek 4.8. Rozkład temperatury na korytarzu po 1200 sekundach – przypadek 1. a) płaszczyzna wynikowa D, b) płaszczyzna wynikowa B

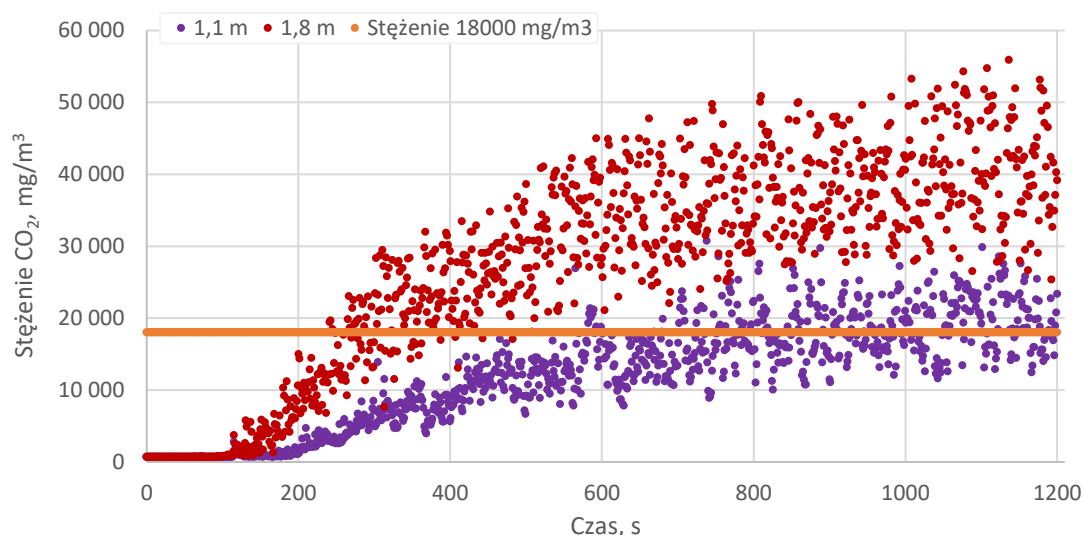
Stężenie tlenku węgla w punkcie pomiarowym na korytarzu przedstawia Rysunek 4.9. Obecność tlenku węgla we wdychanym powietrzu może być bardzo niebezpieczna. W zależności od stężenia oraz czasu narażenia można obserwować różne objawy, które nie są charakterystyczne. Im niższe stężenie tym czas narażenia nie powodujący objawów zatrucia jest dłuższy. Przebywanie 20 minut w warunkach, w których stężenie tlenku węgla nie przekracza 2000 mg/m^3 może prowadzić do zapaści [139]. Niższe stężenia przy dłuższym narażeniu będą powodować ból głowy, mdłości oraz apatię, a także mogą prowadzić do utraty przytomności.



Rysunek 4.9. Stężenie tlenku węgla w punkcie pomiarowym na korytarzu – przypadek 1

Wraz z rozwojem pożaru wzrasta stężenie dwutlenku węgla w powietrzu. Stężenie CO_2 powyżej wartości 18000 mg/m^3 będzie powodować przyspieszony oddech u osób

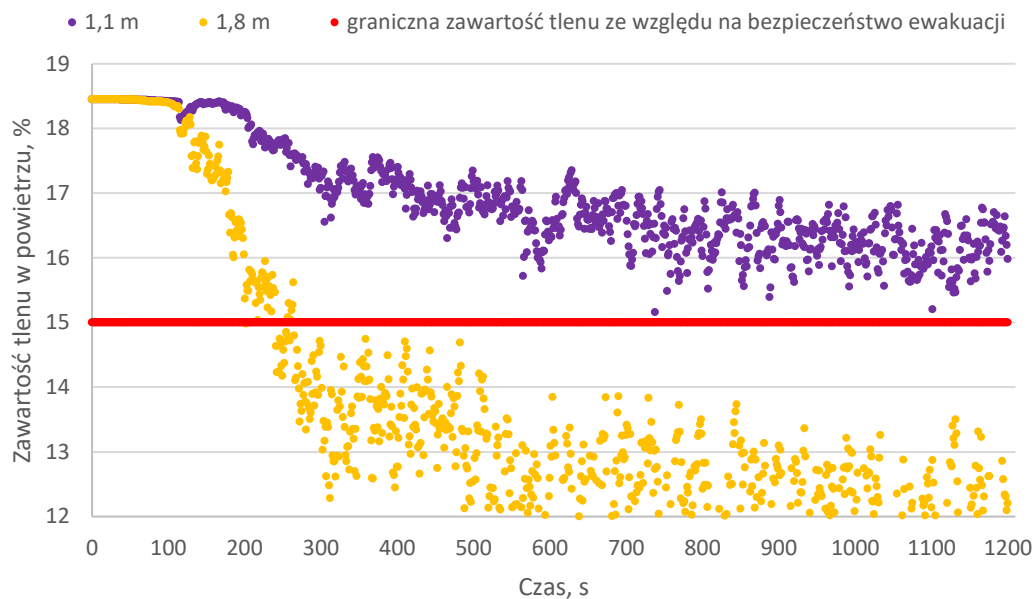
znajdujących się w danym środowisku. W takich warunkach ludzie narażeni są na wzmożone wdychanie innych, szkodliwych substancji znajdujących się w powietrzu. Wraz z dalszym wzrostem stężenia CO_2 będzie wzrastał negatywny wpływ na organizm. Oddychanie w takiej atmosferze będzie coraz trudniejsze, maleje również sprawność intelektualna. Pierwsze wartości stężenia powyżej 18000 mg/m^3 odnotowano w punkcie pomiarowym (na wysokości 1,8 m) na korytarzu po upływie około 240 sekund, a na wysokości 1,1 m po upływie ok. 580 sekund. Zmiany stężenia CO_2 w punkcie pomiarowym przedstawia Rysunek 4.10.



Rysunek 4.10. Przebieg zmian stężenia dwutlenku węgla w punkcie pomiarowym na korytarzu – przypadek 1

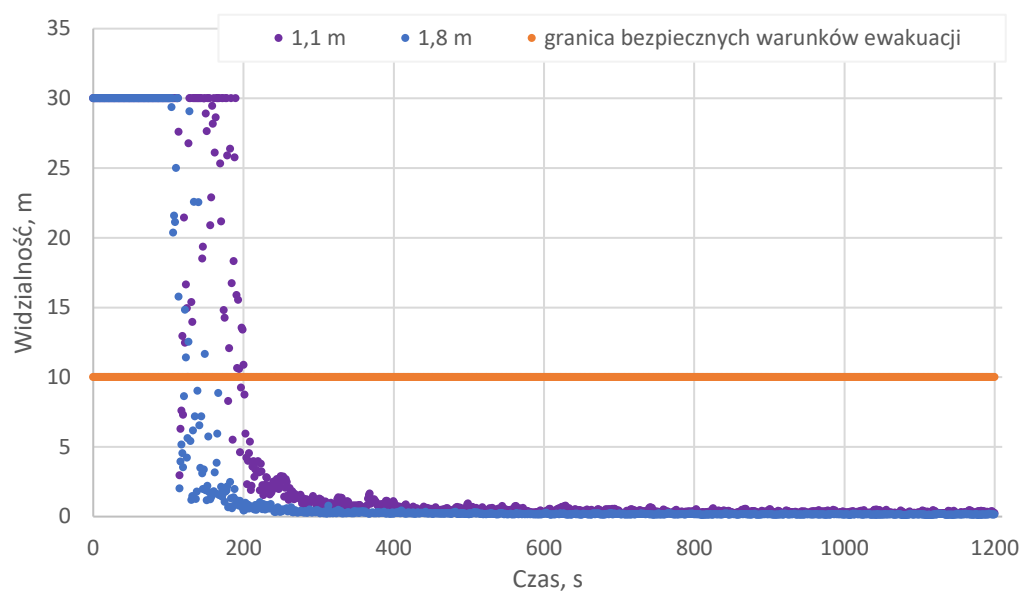
Na trudności w oddychaniu oraz ryzyko utraty przytomności wpływać będzie również niedobór tlenu we wdychanym powietrzu. Zmianę zawartości tlenu w powietrzu w punkcie pomiarowym na korytarzu przedstawia Rysunek 4.11. Jeśli zawartość tlenu w powietrzu wynosi poniżej 17% uznaje się, że panują warunki niedoboru tlenu. Gdy stężenie maleje poniżej 15% następuje osłabienie funkcji fizjologicznych i umysłowych. Jest to graniczna wartość stężenia, które nie powinno być niższe w przypadku chęci zapewnienia bezpiecznych warunków ewakuacji. Wraz z dalszym spadkiem stężenia gwałtownie wzrasta ryzyko śmierci. Atmosfera, w której zawartość tlenu wynosi poniżej 10% może spowodować nagłą utratę przytomności.

Na podstawie danych otrzymanych z przeprowadzonych symulacji można zaobserwować, że wartość graniczna 15% zostaje przekroczona w punkcie pomiarowym na wysokości 1,8 m po upływie 241 sekund od początku pożaru, natomiast na wysokości 1,1 m nie zostaje przekroczona przez cały czas trwania symulacji.



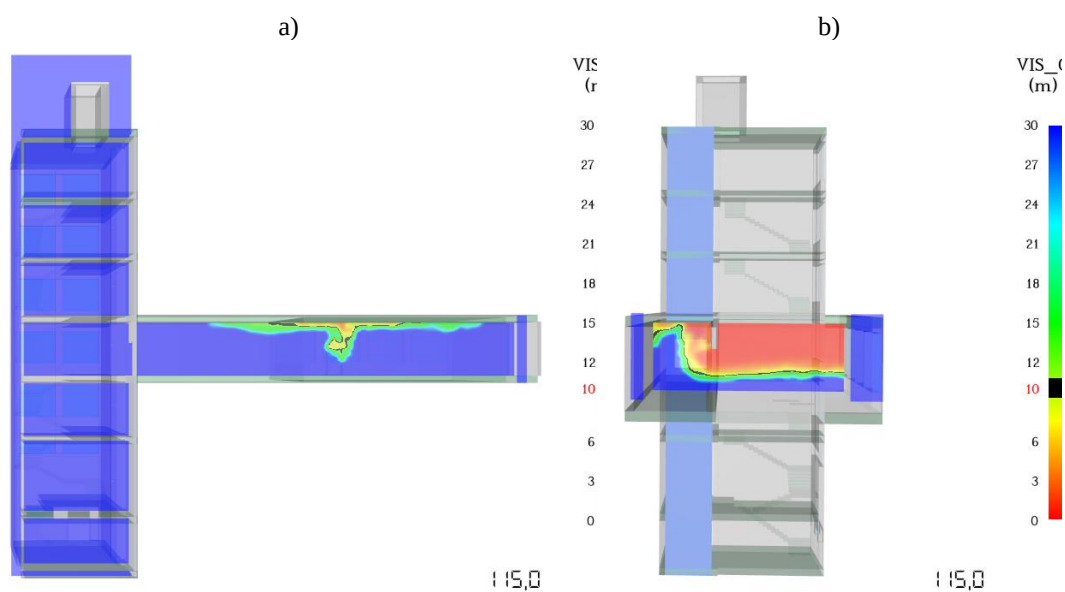
Rysunek 4.11. Zawartość tlenu w powietrzu w punkcie pomiarowym na korytarzu – przypadek 1

Kolejnym bardzo ważnym czynnikiem warunkującym możliwość ewakuacji jest poziom zadymienia drogi ewakuacyjnej. Na podstawie analiz numerycznych rozprzestrzeniania się dymu zaobserwowano, że widzialność w punktach pomiarowych na korytarzu maleje po upływie ok 100 sekund. Wartość graniczna 10 m widzialności na poziomie 1,8 m od podłogi została przekroczona po upływie 115 sekund. Dla wysokości 1,1 m pierwsze przekroczenia wartości granicznej również są w okolicy 115 sekund, można zauważyć pewien rozrzut wartości. Przekroczenie wartości granicznej na stałe następuje po upływie około 200 sekund. Oznacza to, że praktycznie po czasie dwóch minut od rozpoczęcia pożaru nie będzie już możliwości ewakuacji danym korytarzem. Przebieg zmian widzialności w punkcie pomiarowym na korytarzu przedstawia Rysunek 4.12.

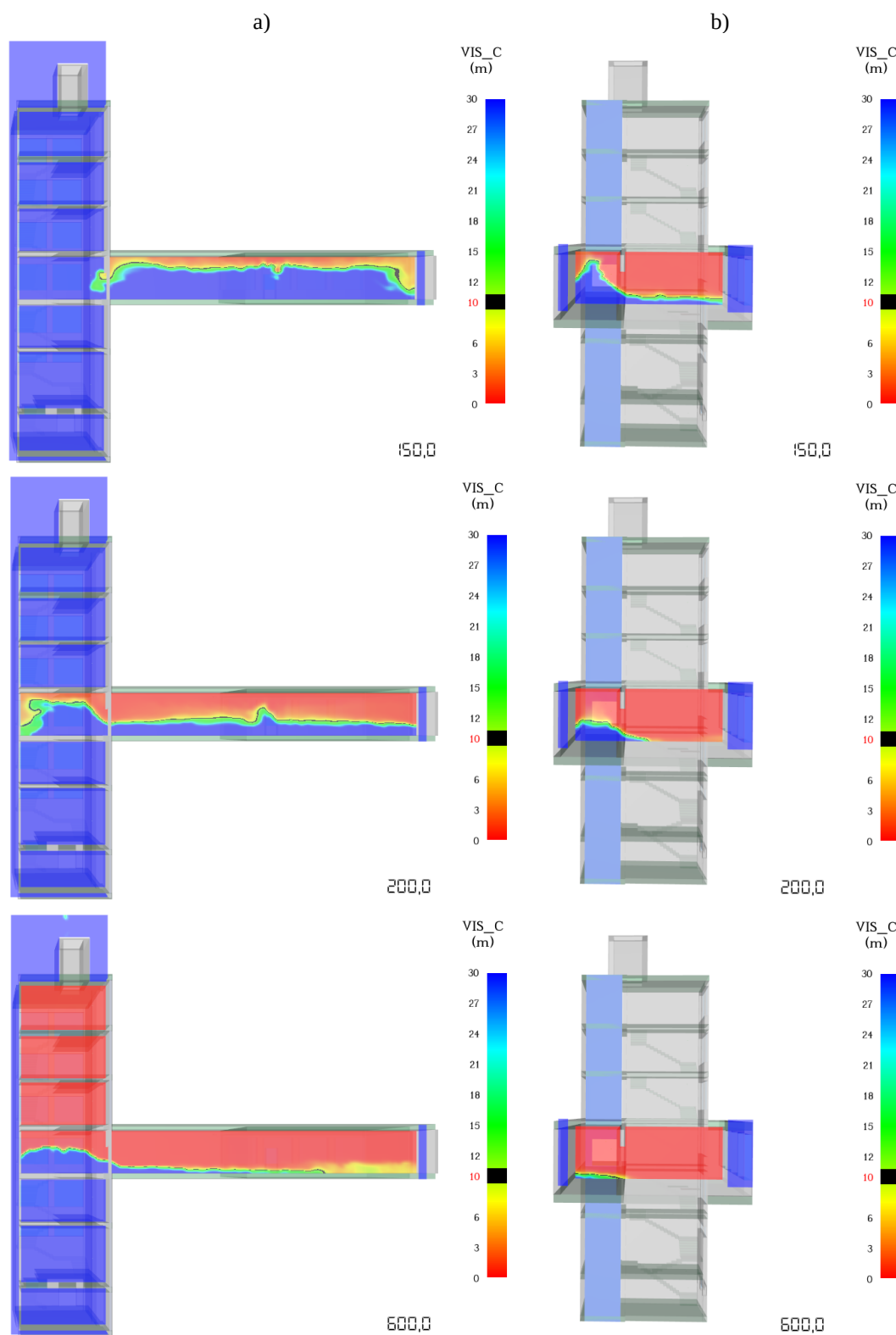


Rysunek 4.12. Zmiana widzialności w punkcie pomiarowym na korytarzu – przypadek 1

Zmianę widzialności na korytarzu zarejestrowanej na płaszczyznach wynikowych przedstawia Rysunek 4.13 oraz Rysunek 4.14.



Rysunek 4.13. Zadymienie korytarza po 115 sekundach – przypadek 2. a) płaszczyzna wynikowa D, b) płaszczyzna wynikowa B

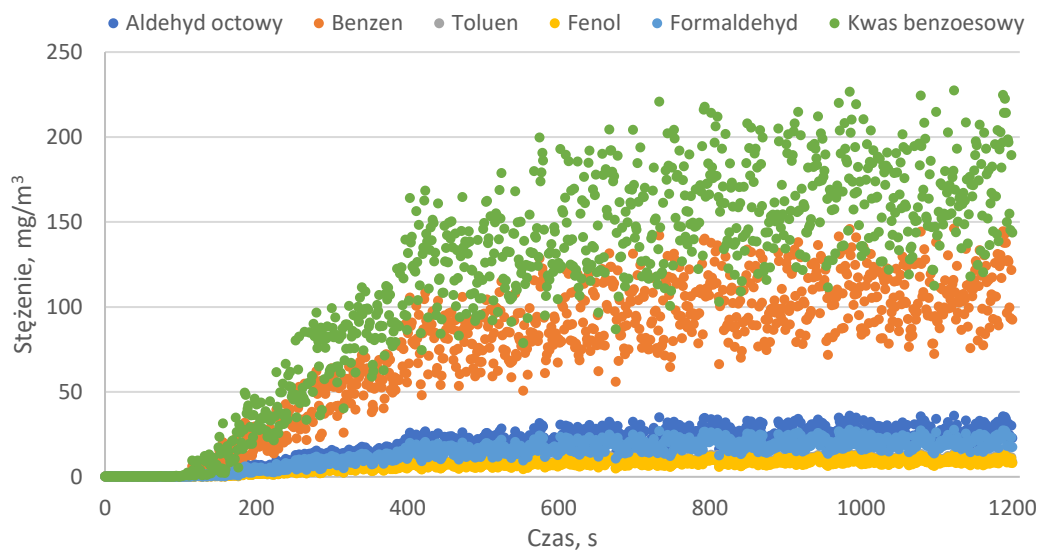


Rysunek 4.14. Zadymienie korytarza po 150, 200 oraz 600 sekundach – przypadek 2. a) płaszczyzna wynikowa D, b) płaszczyzna wynikowa B

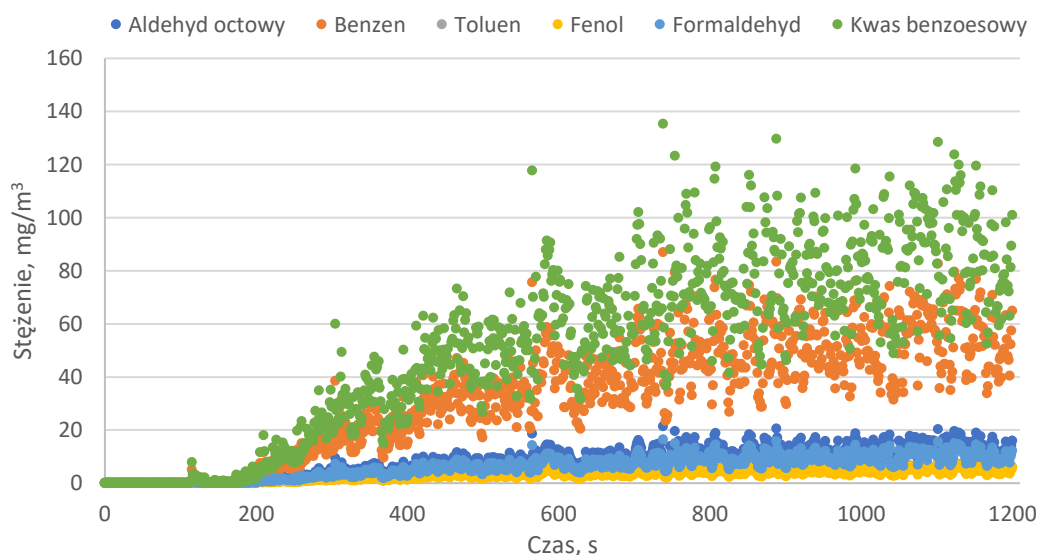
W przypadku rozprzestrzeniania się pozostałych zanieczyszczeń, zmiany stężeń odnotowanych w punkcie pomiarowym na wysokości 1,8 m przedstawia Rysunek 4.15,

natomiast w punkcie pomiarowym na wysokości 1,1 m – Rysunek 4.16. Dokładne wartości dla poszczególnych zanieczyszczeń przedstawia – Rysunek 4.17 oraz Rysunek 4.18.

Większość z analizowanych zanieczyszczeń posiada właściwości drażniące. Obecność tych zanieczyszczeń będzie działać na błony śluzowe oczu i układu oddechowego. Podrażnienia te będą sprzyjały występowaniu kaszlu, który dodatkowo będzie powodować nadmierne wdychanie innych zanieczyszczeń. Tym samym, niebezpieczny efekt działania szkodliwych czynników będzie się nasilał.



Rysunek 4.15. Stężenie zanieczyszczeń w punkcie pomiarowym na wysokości 1,8 m na korytarzu – przypadek 1



Rysunek 4.16. Stężenie zanieczyszczeń w punkcie pomiarowym na wysokości 1,1 m na korytarzu – przypadek 1

Odnotowane stężenia zanieczyszczeń na wysokości pomiarowej 1,1 m są w każdym przypadku niższe niż na wysokości 1,8 m.

Przy krótkotrwałym narażeniu na niskie stężenia benzenu, nie wykazuje on działania toksycznego. Maksymalne wartości stężenia na wysokości 1,8 m, otrzymane w analizach, są prawie 11-krotnie niższe od stężenia mogącego powodować objawy chorobowe, przyjętego jako 1600 mg/m^3 (przy narażeniu godzinnym) (Rysunek 4.17 a). Należy jednak pamiętać, że substancja ta sklasyfikowana jest jako rakotwórcza, dlatego w tym aspekcie nie ma minimalnej dawki niebezpiecznej – każde stężenie może mieć negatywny wpływ na organizm człowieka.

Formaldehyd, w stężeniach niewiele przekraczających dopuszczalne, będzie działał głównie drażniąco na oczy i wywoływał ich łzawienie. Natomiast w większych stężeniach, już około 15 mg/m^3 , wywoła pierwsze objawy zatrucia objawiające się kaszlem, bólem głowy, uczuciem duszności oraz kołataniem serca [121]. Zgodnie z danymi literaturowymi za stężenie obojętne dla połowy populacji przyjmuje się wartość 6 ppm, co w przeliczeniu daje wartość ok. $7,5 \text{ mg/m}^3$ (w warunkach normalnych) (patrz. Tabela 2.7). Pierwsze przekroczenia tej wartości na wysokości pomiaru 1,8 m zostają odnotowane po upływie 239 sekund, a około pół minuty później wartość ta przekroczone zostaje na stałe. Na wysokości pomiaru 1,1 m wartość ta zostaje przekroczone po raz pierwszy po upływie 421 sekund. Wdychanie przez 30 minut stężeń o minimalnej wartości 17 mg/m^3 może spowodować objawy zatrucia ostrego. Z wykresu przedstawionego na stronie 76 (Rysunek 4.17 b) można zauważyć, że w przeprowadzonych badaniach numerycznych odnotowano wysokie wartości stężenia formaldehydu.

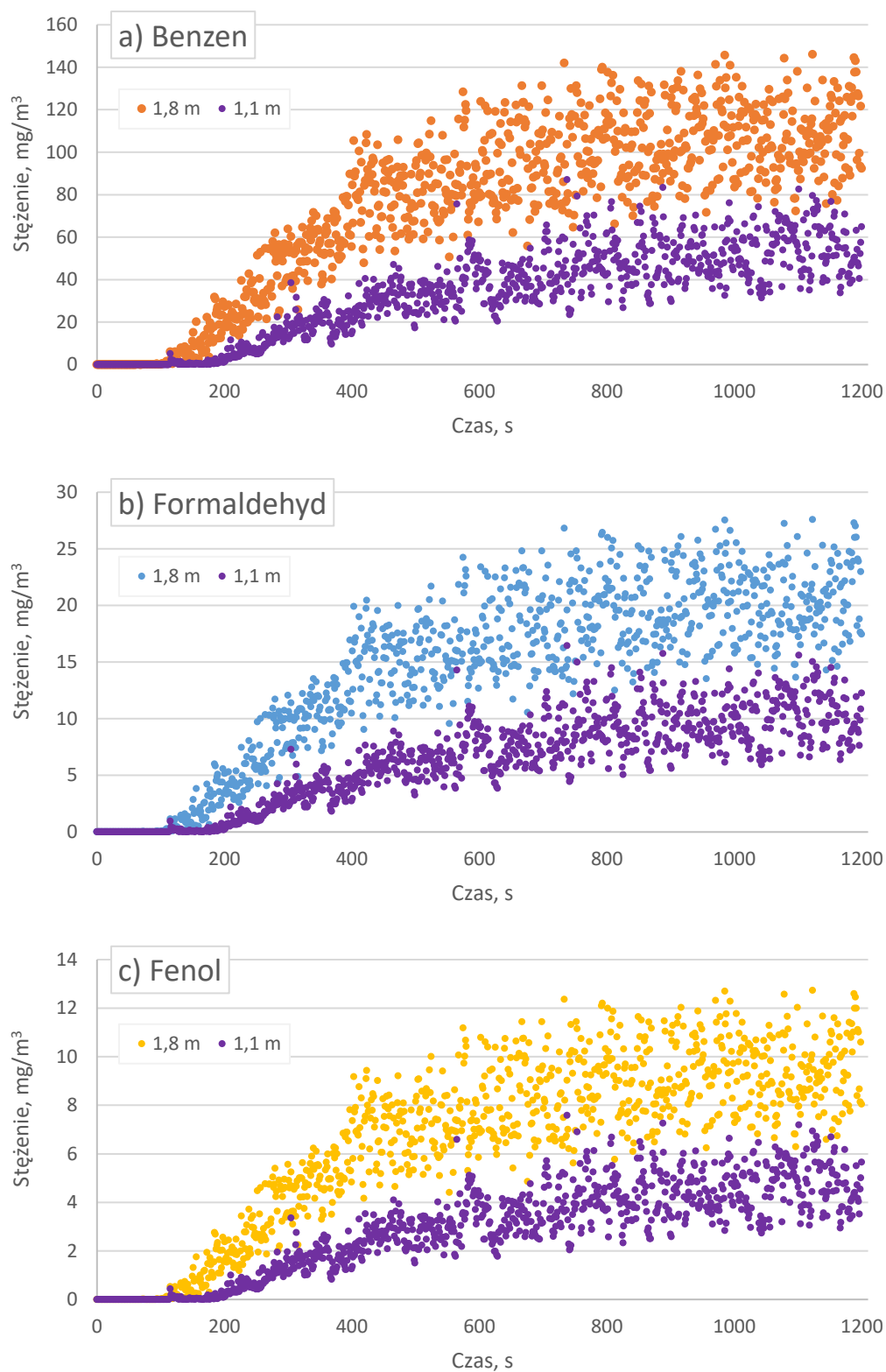
Kolejną substancją, która działa drażniąco jest fenol. Może on również powodować zatrucie ostre. W przeprowadzonych badaniach stężenie fenolu podczas całego czasu trwania pożaru nie przekracza wartości NDSCh, czyli wartości stężenia niebezpiecznego przy 15-minutowym narażeniu (Rysunek 4.17 c).

Pary toluenu są cięższe od powietrza, przez co gromadzą się w dolnej części pomieszczenia, co może być bardzo niebezpieczne dla osób ewakuujących się. Toluen również wykazuje działanie drażniące. W stężeniach przekraczających NDS pary toluenu mogą wywoływać podobne objawy jak kaszel, łzawienie oczu, zawroty głowy. Przy wysokich stężeniach ok. 3000 mg/m^3 objawy przypominają stan upojenia alkoholowego, a utrata przytomności może wystąpić przy narażeniu na bardzo wysokie stężenia tj. ponad 18000 mg/m^3 [119]. W analizowanym przypadku, odnotowane stężenia są niskie, nieprzekraczające 15 mg/m^3 (Rysunek 4.18 a).

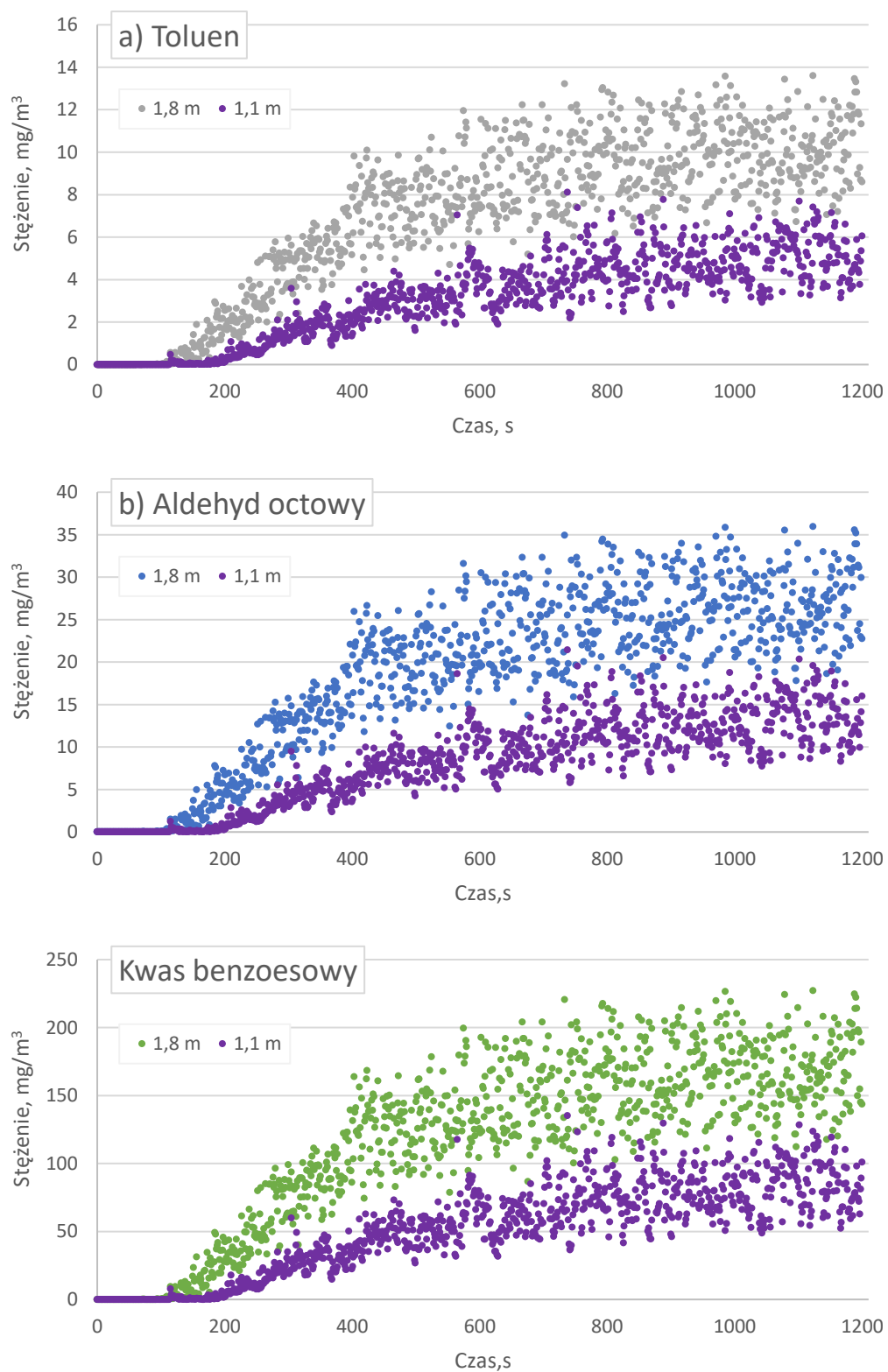
Aldehyd octowy wykazuje działanie drażniące na skórę, oczy oraz układ oddechowy. Na podstawie badań [140] wykazano, że powoduje podrażnienie oczu przy 15-minutowym narażeniu na stężenie w przedziale od 25 do 50 ppm. Podrażnienie nosa i gardła może

wystąpić przy 15-minutowym narażeniu na stężenie 200 ppm, a układu oddechowego przy 30-minutowym narażeniu na stężenie 134 ppm (ok. 241,15 mg/m³) [122]. Badania na ochotnikach wykazały, że łagodne działanie drażniące na oczy i górne drogi oddechowe odnotowano przy krótkim narażeniu na stężenia w przedziale od 90 do 240 mg/m³ [141]. Ponadto, aldehyd octowy wykazuje działanie rakotwórcze. NDSP dla narażenia na aldehyd octowy wynosi 45 mg/m³ i wartość ta nie została przekroczona w żadnym momencie trwania pożaru (Rysunek 4.18 b).

Kwas benzoesowy w krótkotrwałym narażeniu nie wykazuje toksyczności ostrej. Działa on drażniąco na skórę oraz oczy co związane jest z jego kwasowością. Na podstawie przeprowadzonych badań [124] zaproponowano przyjęcie wartości NDS 0,5 mg/m³. Wartość NDSCh przyjęto jako trzykrotność NDS czyli 1,5 mg/m³. Drogami narażenia na kwas benzoesowy jest droga inhalacyjna oraz wchłanianie przez skórę. Ze względu na brak dokładnych danych literaturowych na temat jednorazowych stężeń, które wywoływałyby negatywne reakcje organizmu człowieka w przypadku narażenia na kwas benzoesowy, w tym wypadku nie porównuje się uzyskanych wyników do wartości granicznych. Należy przyjąć, że obecność kwasu benzoesowego w środowisku wewnętrznym może powodować podrażnienie błon śluzowych oraz skóry. Dokładne wartości stężeń kwasu benzoesowego w punkcie pomiarowym na korytarzu przedstawia Rysunek 4.18 c.



Rysunek 4.17. Stężenie zanieczyszczeń w punkcie pomiarowym na korytarzu: a) benzenu, b) formaldehydu, c) fenolu



Rysunek 4.18. Stężenie zanieczyszczeń w punkcie pomiarowym na korytarzu: a) tolenu b) aldehydu octowego, c) kwasu benzoesowego

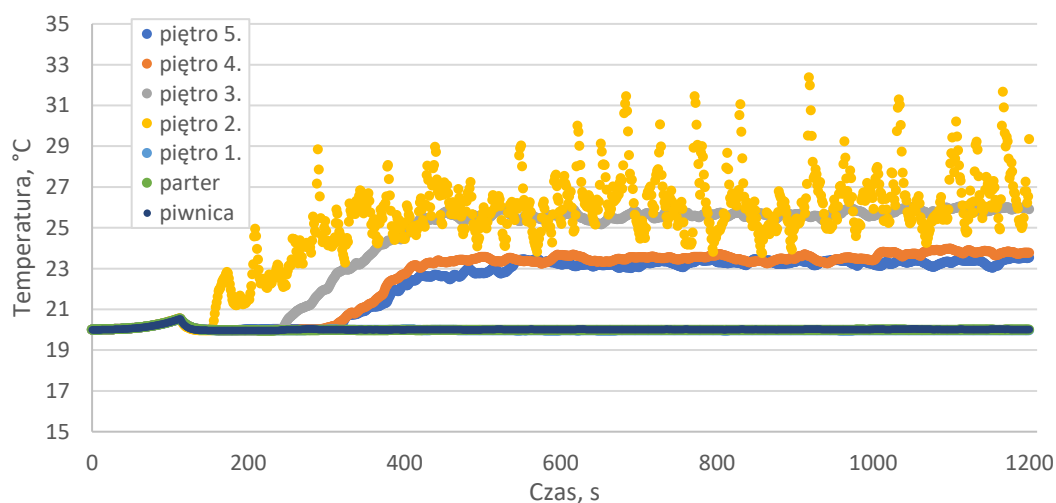
4.2.1.2 Klatka schodowa

Rozkład temperatury w punktach pomiarowych na klatce schodowej przedstawia się zgodnie z poniższymi wykresami (Rysunek 4.19 oraz Rysunek 4.20). Pomiary pochodzą z punktów pomiarowych zlokalizowanych zgodnie rysunkiem na stronie 63 (Rysunek 4.3).

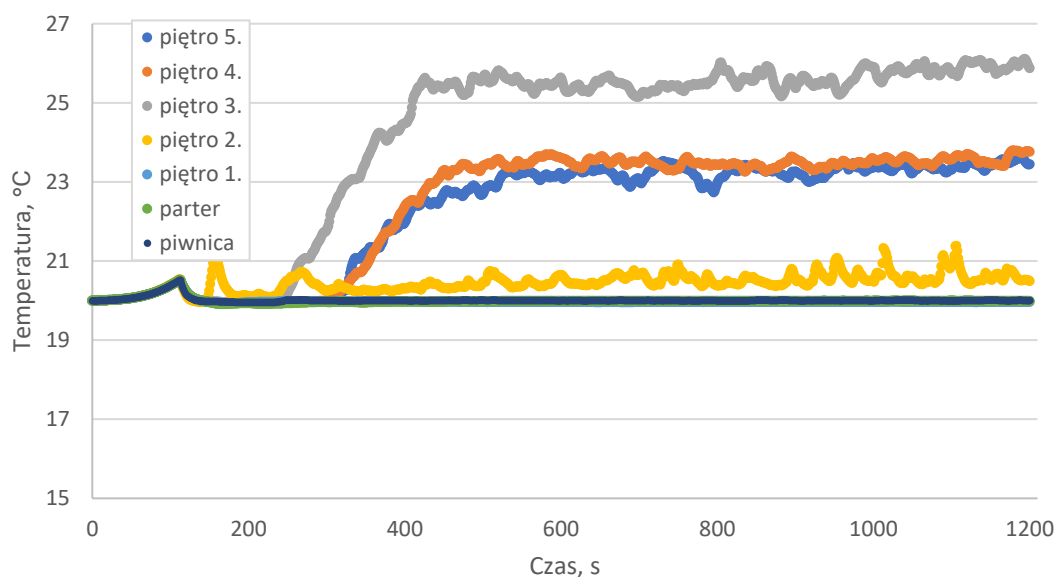
Jak można zauważyć, w przypadku pomiaru na wysokości 1,8 m najwyższe wartości odnotowano na drugim piętrze, czyli piętrze na którym zlokalizowane jest źródło pożaru. Gorący dym wpadając na klatkę schodową miesza się z powietrzem i ochładza, co widać na poniższym wykresie.

W przypadku pomiaru na wysokości 1,1 m rozkład temperatury przedstawia się nieco inaczej. Na drugim piętrze temperatura nie jest najwyższa z tego względu, że czujnik znajduje się praktycznie poniżej warstwy zadymienia. Najwyższą temperaturę odnotowano natomiast na piętrze trzecim. Odnotowane wartości są niższe o około 50% od wartości granicznej ze względu na bezpieczeństwo ewakuacji.

Na klatce schodowej działa grawitacyjny system usuwania dymu, dzięki czemu gorące powietrze wraz z dymem, zgodnie z prawami fizyki, przemieszcza się ku górze i zostaje wyprowadzone na zewnątrz przez klapę oddymiającą. Powietrze kompensujące napływa przez drzwi zlokalizowane w piwnicy, dlatego też temperatura powietrza na kondygnacjach znajdujących się poniżej pożaru praktycznie pozostaje bez zmian i wynosi tyle co temperatura otoczenia (20 °C). Zmianę temperatury na płaszczyznach wynikowych przedstawia Rysunek 4.21. Rysunek przedstawia rozkład temperatury w czasie 210s – w tym czasie dym zaczyna przedostawać się na klatkę schodową, w czasie 360s – dym zaczyna przedostawać się na zewnątrz budynku poprzez klapę dymową, oraz w czasie 600s – w połowie założonego czasu symulacji.



Rysunek 4.19. Rozkład temperatury w punktach pomiarowych na wysokości 1,8 m na klatce schodowej – przypadek 1



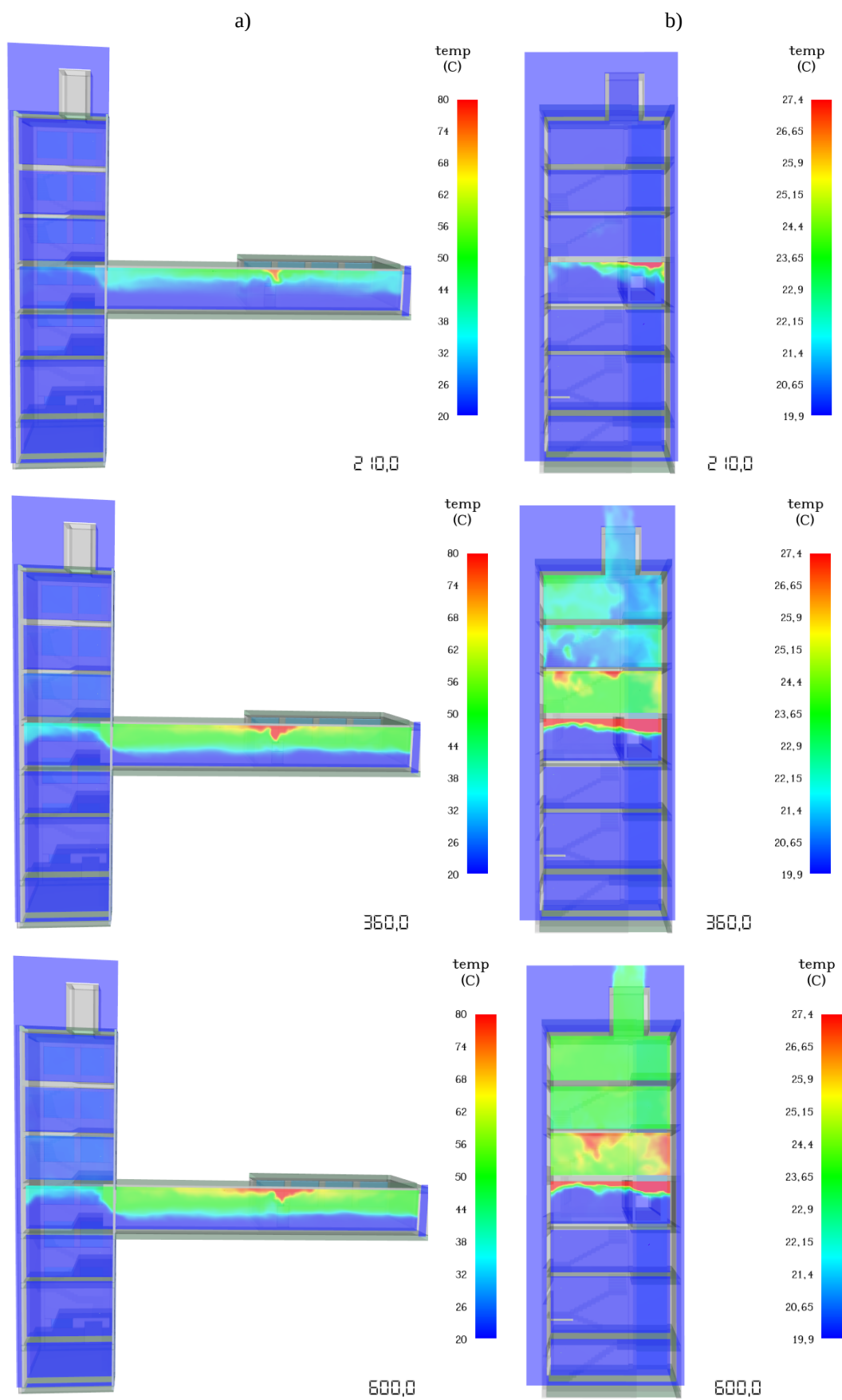
Rysunek 4.20. Rozkład temperatury w punktach pomiarowych na wysokości 1,1 m na klatce schodowej – przypadek 1

Stężenie tlenku węgla odnotowane w punktach pomiarowych na klatce schodowej przedstawia Rysunek 4.22 oraz Rysunek 4.23. Jak można zaobserwować wyniki uzyskane w punktach pomiarowych na klatce schodowej są niższe niż na korytarzu.

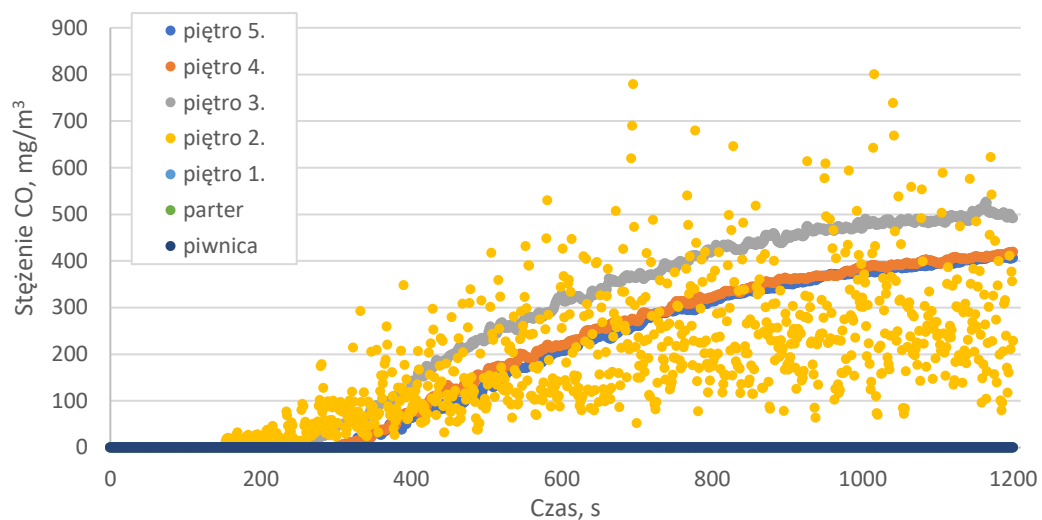
Analizując rozkład stężenia dwutlenku węgla na klatce schodowej na wysokości pomiaru 1,8 m (Rysunek 4.24) można zauważyć, że stężenie CO_2 wzrasta wraz z trwaniem pożaru. Największe wahania wartości odnotowano na drugim piętrze. Dla kondygnacji znajdujących się poniżej źródła pożaru nie zaobserwowano wzrostu stężenia dwutlenku węgla. Jest ono przez cały czas trwania pożaru praktycznie na stałym poziomie ok. 675 mg/m^3 .

Przebieg zmian stężenia w punktach pomiarowych na wysokości 1,1 m przedstawia Rysunek 4.25. W tym wypadku najwyższe stężenia odnotowano na trzecim piętrze.

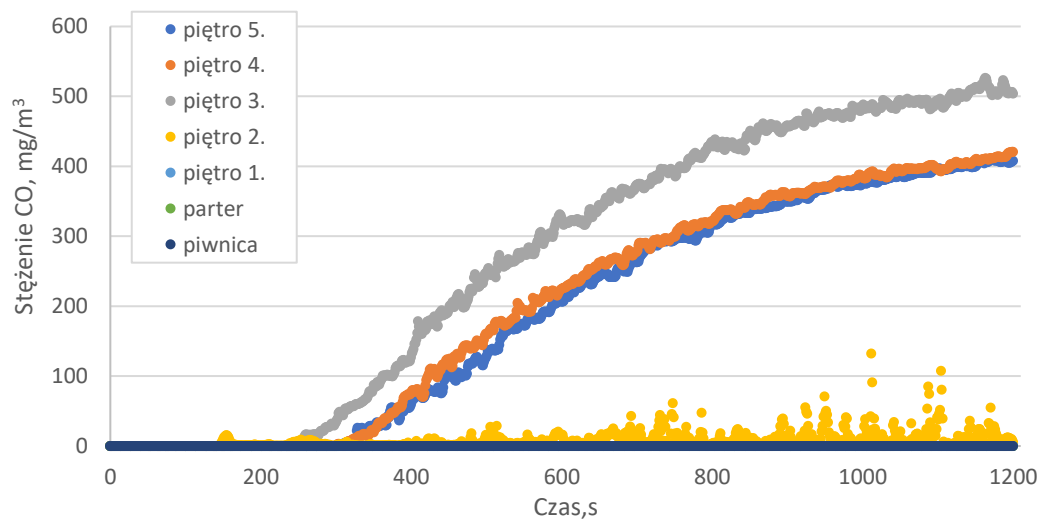
Wszystkie wartości odnotowane na tej wysokości są niższe niż na wysokości 1,8 m.



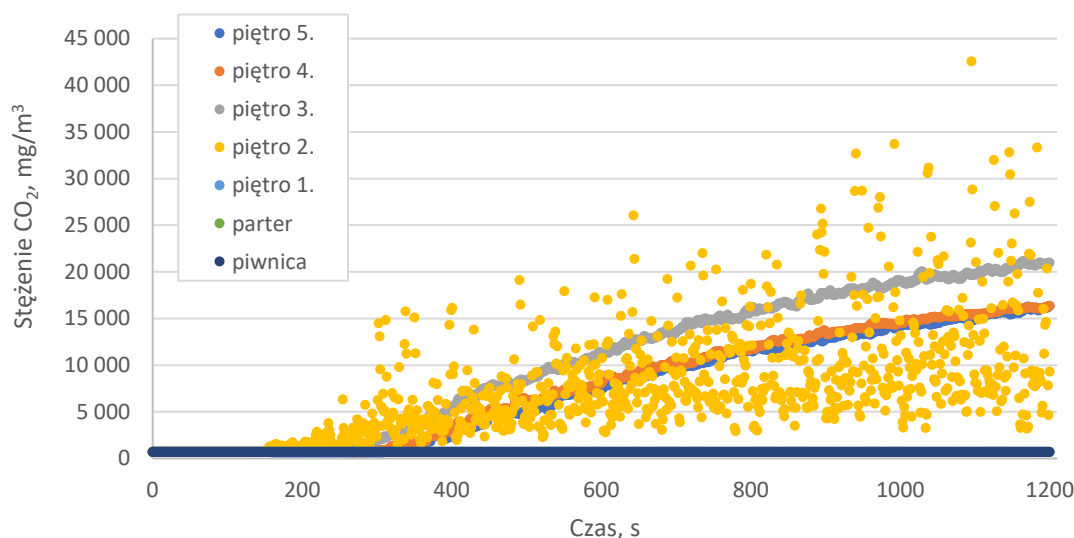
Rysunek 4.21. Rozkład temperatury na klatce schodowej – przypadek 1. a) płaszczyzna wynikowa D, b) płaszczyzna wynikowa C



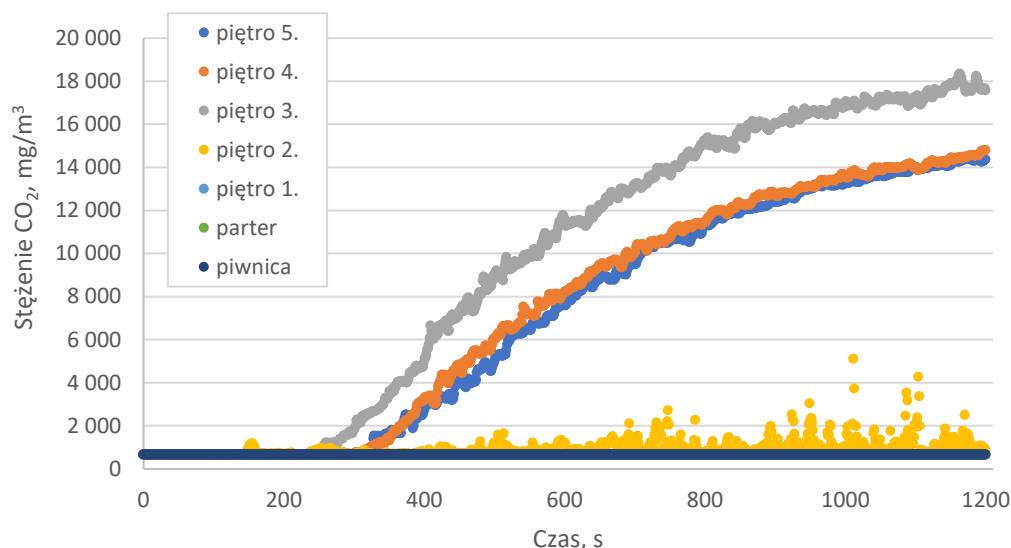
Rysunek 4.22. Stężenie tlenu węgla w punkcie pomiarowym na wysokości 1,8 m na klatce schodowej – przypadek 1



Rysunek 4.23. Stężenie tlenu węgla w punkcie pomiarowym na wysokości 1,1 m na klatce schodowej – przypadek 1

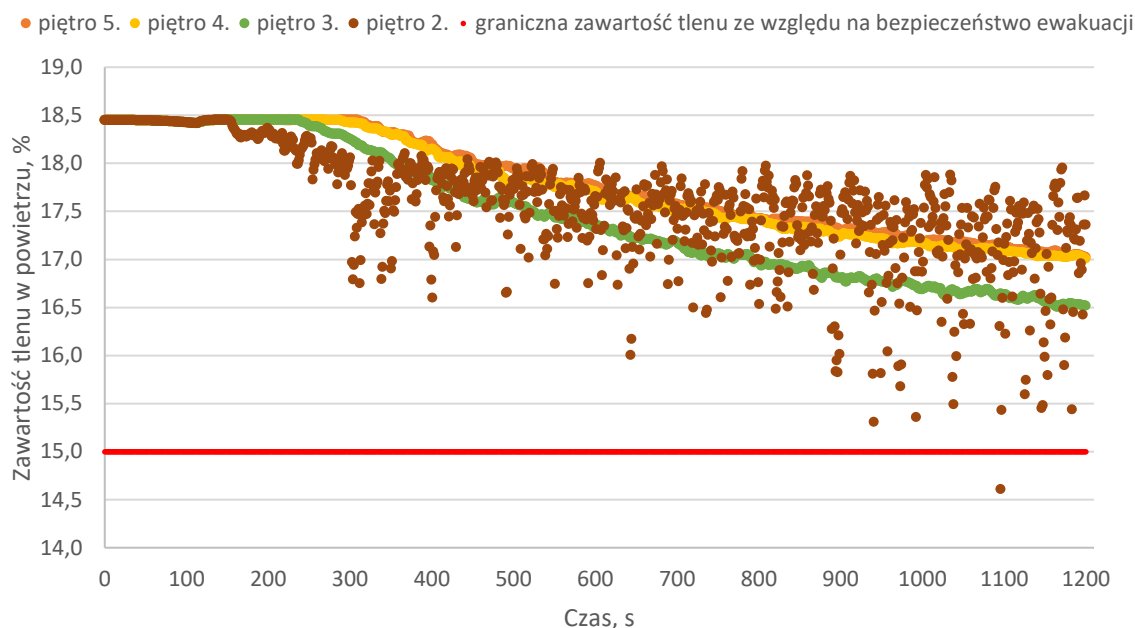


Rysunek 4.24. Przebieg zmian stężenia dwutlenku węgla w punktach pomiarowych na wysokości 1,8 m na klatce schodowej – przypadek 1

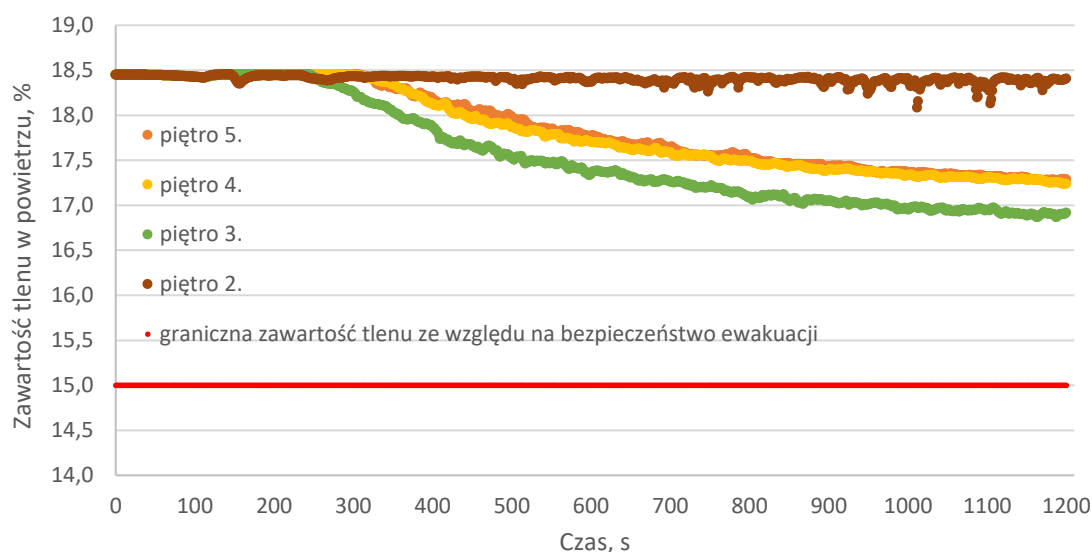


Rysunek 4.25. Przebieg zmian stężenia dwutlenku węgla w punktach pomiarowych na wysokości 1,1 m na klatce schodowej – przypadek 1

Zawartość tlenu w powietrzu na klatce schodowej maleje wraz z rozwojem pożaru, podobnie jak ma to miejsce na korytarzu. Sytuacja ta nie dotyczy kondygnacji poniżej pożaru – w tym wypadku, podobnie jak stężenie CO_2 , stężenie tlenu pozostaje na stałym poziomie przez cały czas trwania pożaru (zaobserwowane zmiany stężeń są pomijalne). Jak można zauważyć na wykresie (Rysunek 4.26 oraz Rysunek 4.27) wartość stężenia nie przekracza wartości minimalnej 15%.



Rysunek 4.26. Zawartość tlenu w powietrzu w punktach pomiarowych na wysokości 1,8 m na klatce schodowej – przypadek 1

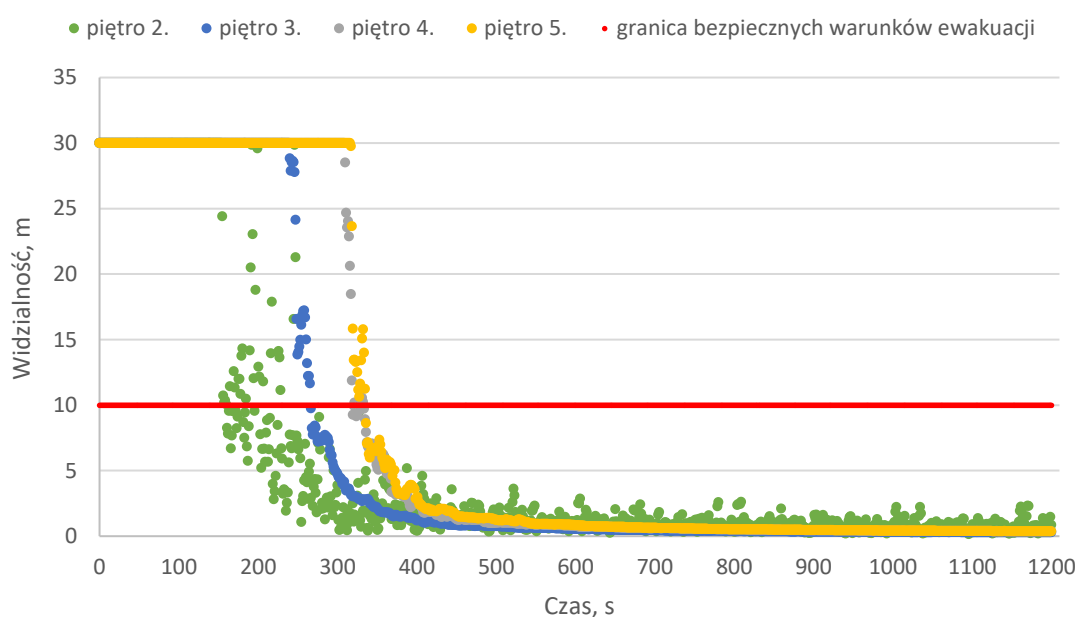


Rysunek 4.27. Zawartość tlenu w powietrzu w punktach pomiarowych na wysokości 1,1 m na klatce schodowej – przypadek 1

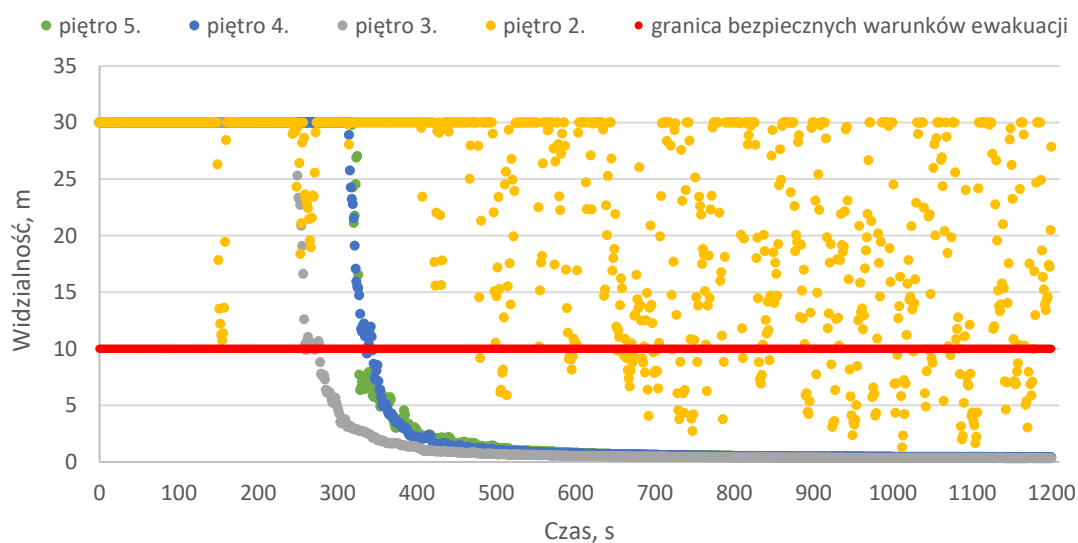
Wraz z przemieszczaniem się dymu na klatkę schodową, maleje na niej widzialność. W pierwszej kolejności dym, wydostając się na klatkę schodową, ogranicza widoczność na drugim piętrze. Przekroczenie wartości granicy bezpiecznej na wysokości pomiaru równej 1,8 m następuje po ok. 160 sekundach (na podstawie wyników w punkcie pomiarowym – Rysunek 4.3). Następnie, wraz z przemieszczaniem się dymu ku górze, pogarszają się warunki na wyższych kondygnacjach. Ograniczenie widzialności poniżej granicy krytycznej na trzecim piętrze następuje po ok. 266 sekundach, a na piętrze czwartym i piątym po

ok. 320 sekundach (Rysunek 4.28). Oznacza to, że po tym czasie nie ma możliwości ewakuowania się daną klatką schodową ze wspomnianych pięter. To ryzyko nie dotyczy kondygnacji znajdujących się poniżej drugiego piętra, gdyż w tym rejonie nie zaobserwowano zadymienia.

Nieco inaczej przedstawia się wykres dla pomiaru na wysokości 1,1 m. W tym wypadku można zauważyć duże wahania w wynikach w punkcie pomiarowym na drugim piętrze (Rysunek 4.29). Na pozostałych piętrach przebiegi są podobne jak w przypadku pomiaru na wysokości 1,8 m.

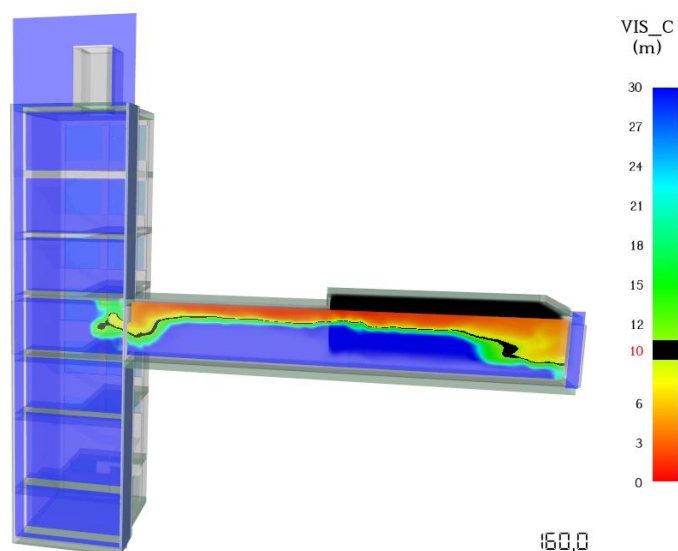


Rysunek 4.28. Zmiana widzialności w punktach pomiarowych na wysokości 1,8 m na klatce schodowej podczas pożaru – przypadek 1

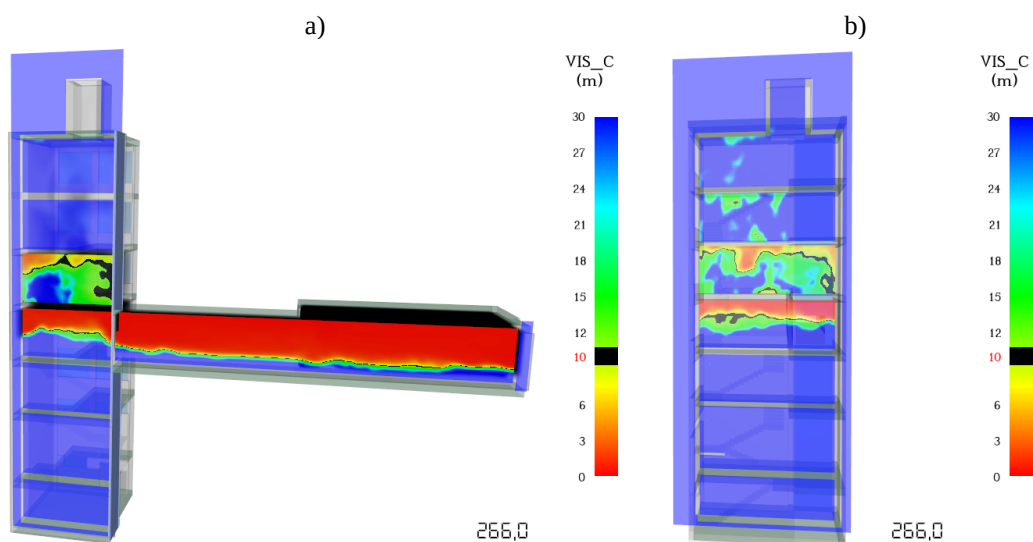


Rysunek 4.29. Zmiana widzialności w punktach pomiarowych na wysokości 1,1 m na klatce schodowej podczas pożaru – przypadek 1

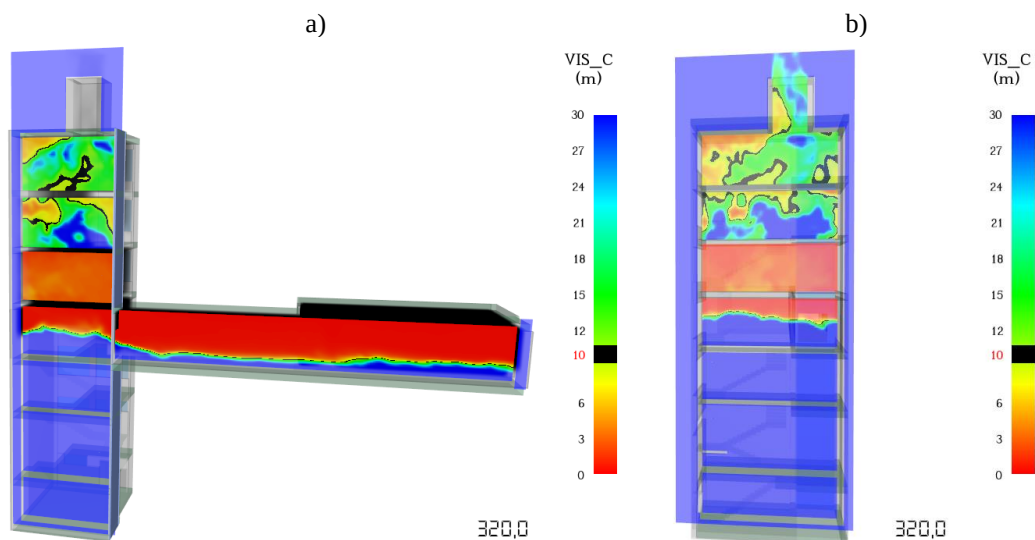
Na poniższych rysunkach przedstawiono wyniki na płaszczyznach wynikowych. Przedstawiają one wartości zadymienia w omawianych punktach krytycznych tj. po czasie 160, 266 oraz 320 sekund (Rysunek 4.30 – Rysunek 4.32). Wyniki przedstawiono na płaszczyznach położonych wzdłuż osi X oraz Y. Lokalizację płaszczyzn przedstawia Rysunek 4.4 na stronie 63. Wartość krytyczną 10 m widzialności zaznaczono za pomocą czarnej obwódki (Rysunek 4.30).



Rysunek 4.30. Widzialność na drodze ewakuacyjnej w 160 sekundzie pożaru

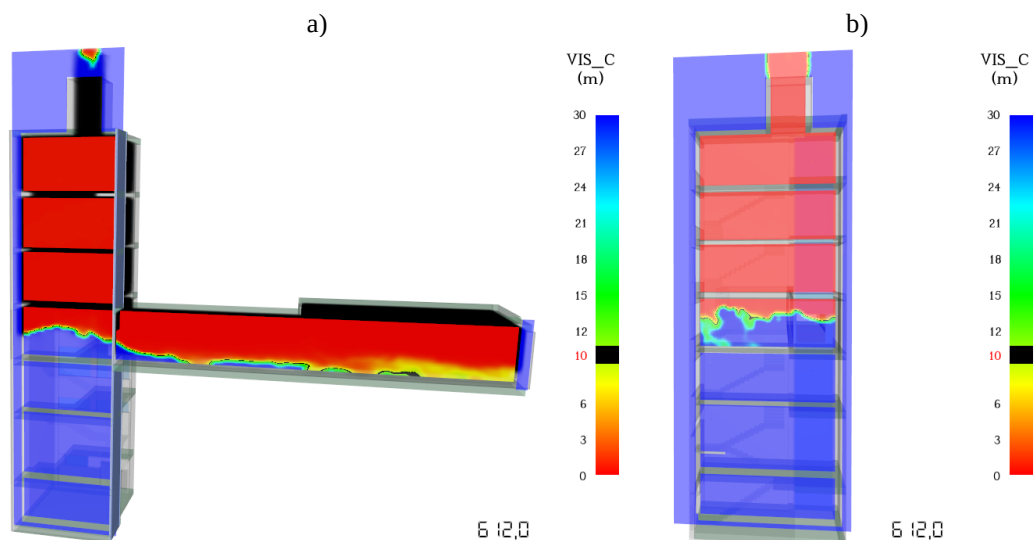


Rysunek 4.31. Widzialność na drodze ewakuacyjnej w 266 sekundzie pożaru. a) płaszczyzna wynikowa D, b) płaszczyzna wynikowa C



Rysunek 4.32. Widzialność na drodze ewakuacyjnej w 320 sekundzie pożaru. a) płaszczyzna wynikowa D, b) płaszczyzna wynikowa C

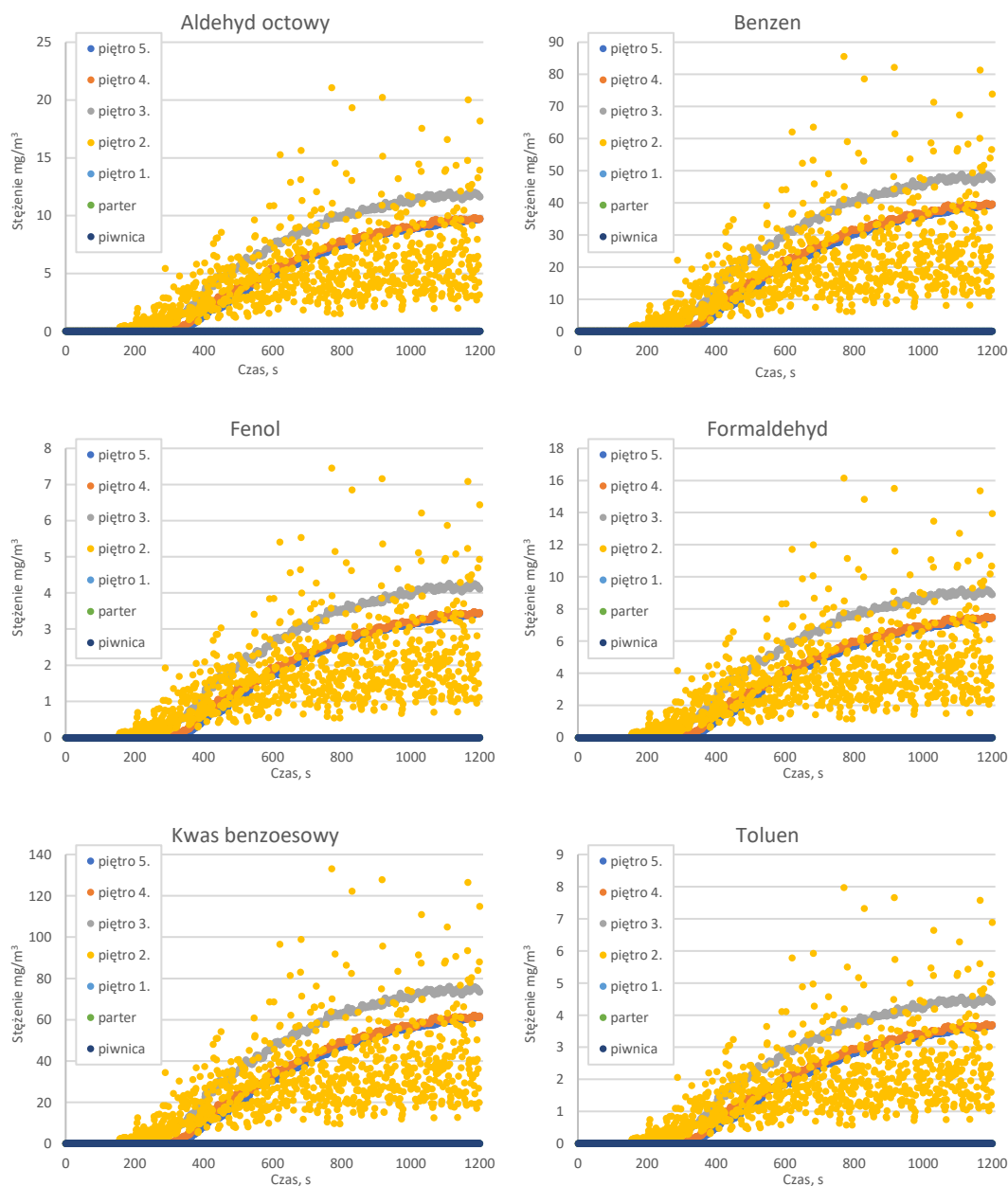
Całkowite zadymienie klatki schodowej (zerowa widzialność), od poziomu drugiego piętra wznwyż, następuje po upływie ok. 612 sekund (Rysunek 4.33).



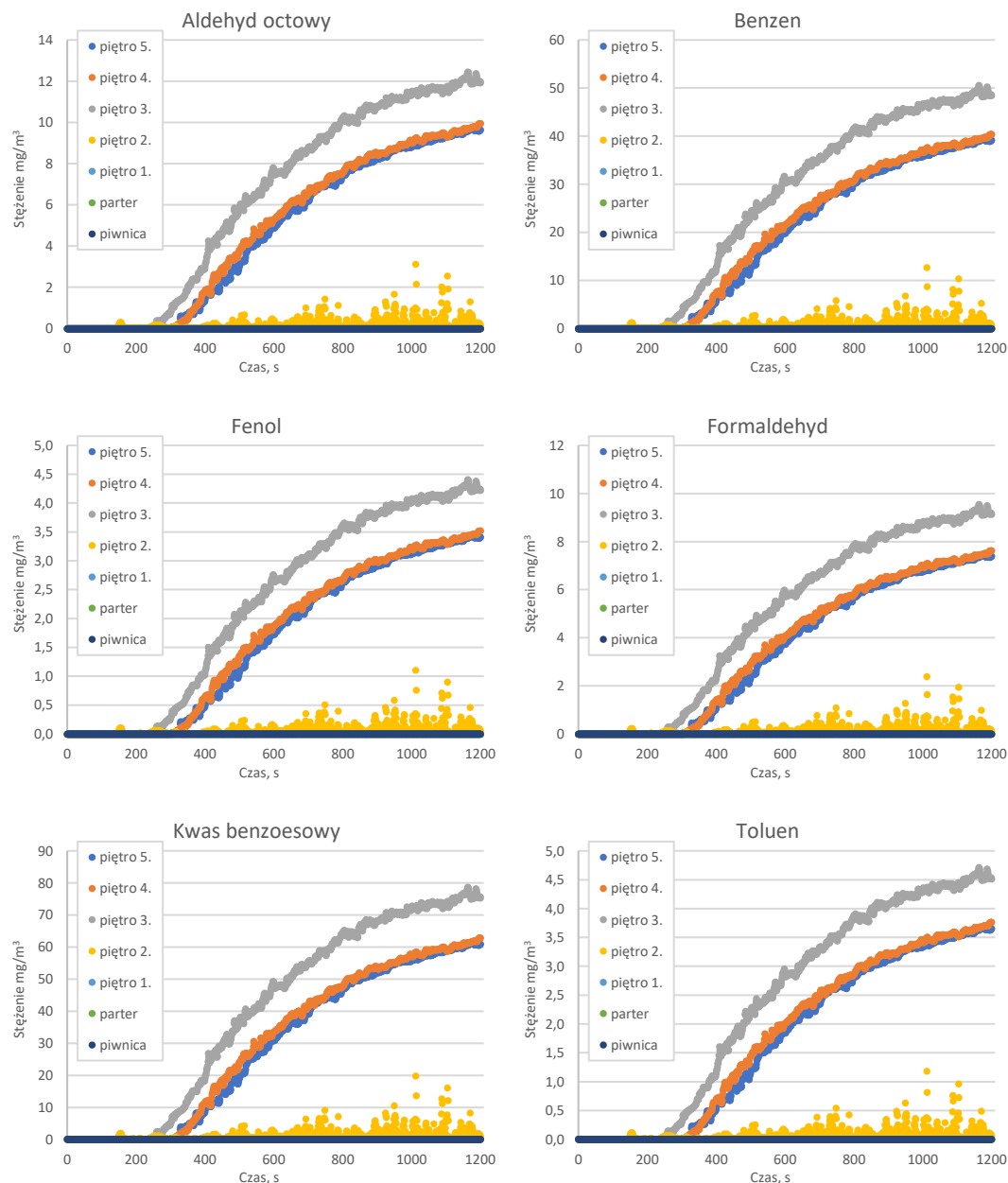
Rysunek 4.33. Widzialność na drodze ewakuacyjnej w 612 sekundzie pożaru. a) płaszczyzna wynikowa D, b) płaszczyzna wynikowa C

Przeanalizowano również rozkład zanieczyszczeń na klatce schodowej w punktach pomiarowych umieszczonych na dwóch wysokościach. Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano podobne przebiegi dla każdego z zanieczyszczeń. Na wysokości 1,8 m stężenie zanieczyszczeń rośnie wraz z rozwojem pożaru na piętrze objętym pożarem oraz na piętrach powyżej. Największe wahania wartości odnotowano na drugim piętrze. Następnie, wraz z przedostawaniem się powietrza na wyższe kondygnacje, stężenie na nich jest niższe

w stosunku do piętra poniżej tj. wartości odnotowane na trzecim piętrze są wyższe niż na piętrze czwartym, itd. Jak można zauważyć na poniższych wykresach (Rysunek 4.34). Na wysokości 1,1 m wahania na drugim piętrze nie są już tak intensywne (Rysunek 4.35). Na obu wysokościach pomiaru, na piętrach znajdujących się poniżej źródła pożaru odnotowane stężenia zanieczyszczeń są pomijalnie małe i stałe dla całego czasu trwania pożaru. Oznacza to, że działający na klatce schodowej system usuwania dymu uniemożliwia przedostawanie się zanieczyszczeń na niższe kondygnacje.



Rysunek 4.34. Rozkład stężenia zanieczyszczeń na klatce schodowej w punktach pomiarowych na wysokości 1,8 m – przypadek 1



Rysunek 4.35. Rozkład stężenia zanieczyszczeń na klatce schodowej w punktach pomiarowych na wysokości 1,1 m – przypadek 1

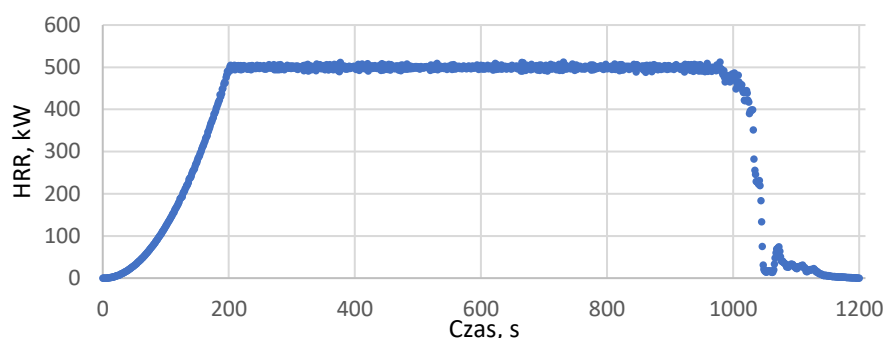
Odnotowane wartości stężenia zanieczyszczeń na wysokości 1,1 m są niższe od wartości otrzymanych na wysokości 1,8 m.

W porównaniu do stężenia zanieczyszczeń na korytarzu, stężenie na klatce schodowej dla poszczególnych substancji jest niższe. Dym wraz z zanieczyszczeniami wypływając na klatkę schodową zaczyna rozchodzić się w przestrzeni klatki schodowej i mieszać się z czystym powietrzem napływającym z zewnątrz poprzez drzwi w piwnicy. Po dotarciu do sufitu klatki schodowej zanieczyszczenia usuwane są na zewnątrz budynku za pomocą klapy oddymiającej.

4.2.2. Przypadek 2 – drzwi z samozamykaczami

Przypadek drugi zakłada obecność samozamykaczy w drzwiach oddzielających korytarz od klatki schodowej. Drzwi te podczas pożaru otwierane są kilkakrotnie, co odwzorowuje zachowanie ludzi – ewakuację ze strefy objętej pożarem.

Wykres HRR dla przypadku drugiego przedstawia się zgodnie z poniższym wykresem (Rysunek 4.36):



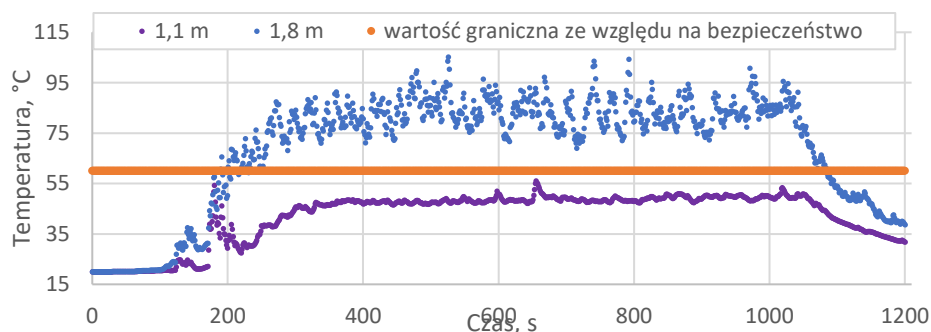
Rysunek 4.36. Wykres HRR dla przypadku drugiego

Podobnie jak w punkcie 4.2.1, wyniki analiz dla tego przypadku podzielono na analizę warunków na korytarzu oraz na klatce schodowej.

4.2.2.1 Korytarz

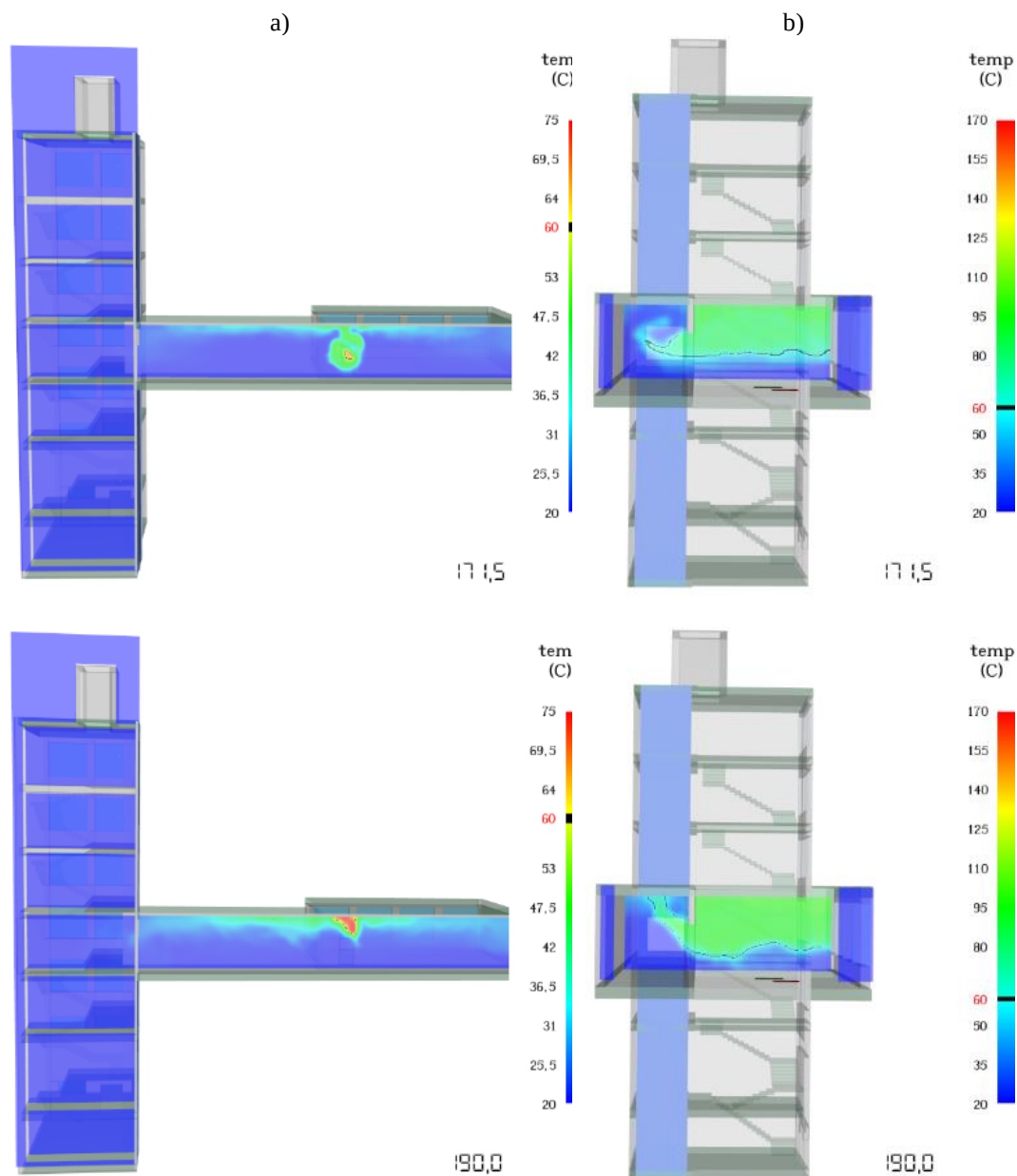
Przebieg zmian temperatury w punkcie pomiarowym na korytarzu przedstawia Rysunek 4.37. Wartość graniczna temperatury ze względu na bezpieczeństwo ewakuacji została przekroczona na wysokości pomiaru 1,8 m po upływie ok. 190 sekund. Następnie, temperatura utrzymuje się na wysokim poziomie osiągając maksymalnie wartość 107 °C. Pod koniec symulacji, po upływie ok. 1030 sekund, temperatura zaczyna spadać. Bezpieczne warunki ewakuacji pod względem temperatury utrzymane są przez ok. 3 minuty od momentu zaistnienia pożaru.

Na wysokości pomiaru 1,1 m wartość graniczna nie została przekroczona przez cały czas trwania symulacji.



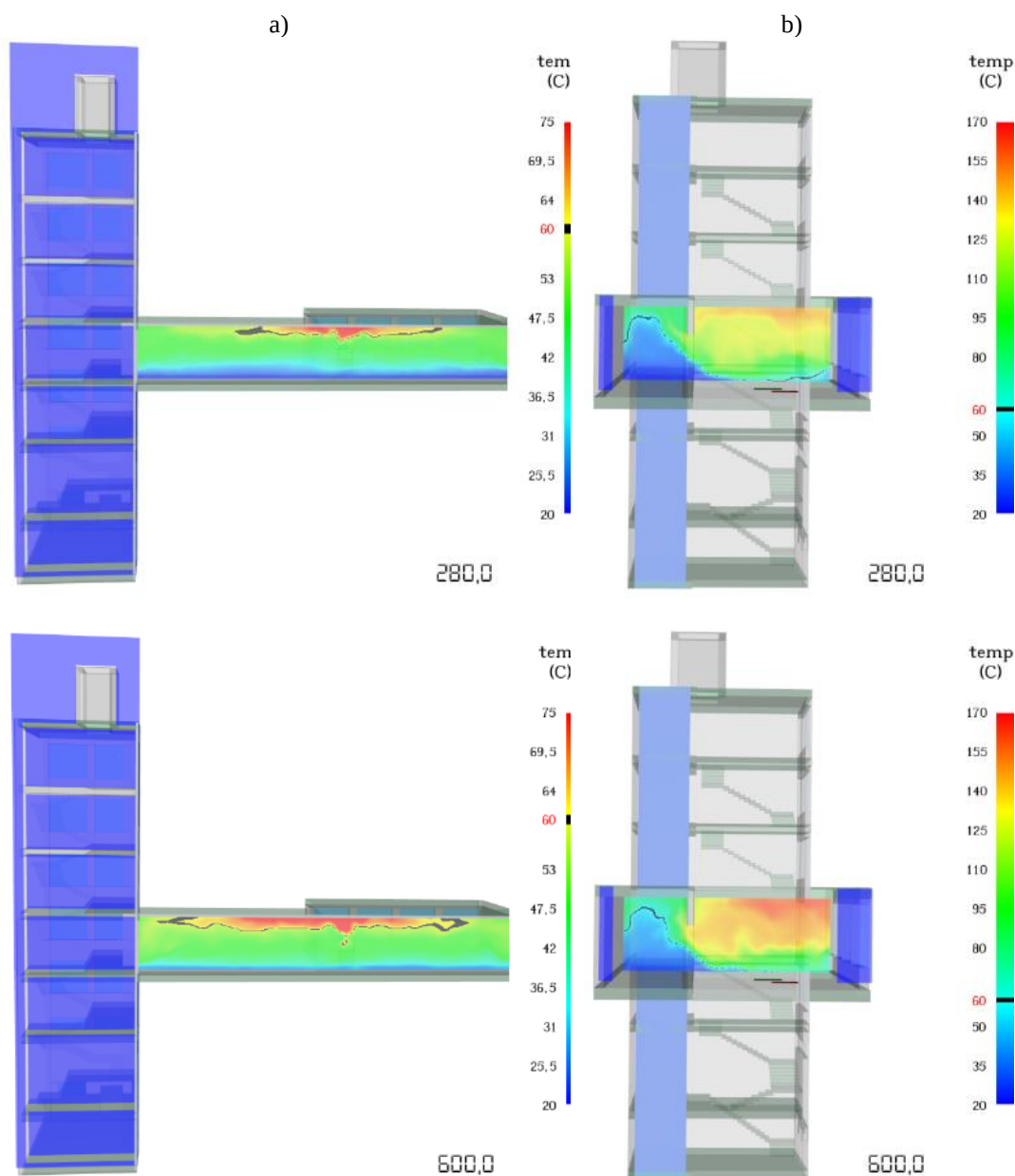
Rysunek 4.37. Wykres zmian temperatury w punkcie pomiarowym na korytarzu – przypadek 2

Zmianę temperatury na płaszczyznach wynikowych przedstawia Rysunek 4.38 oraz Rysunek 4.39.



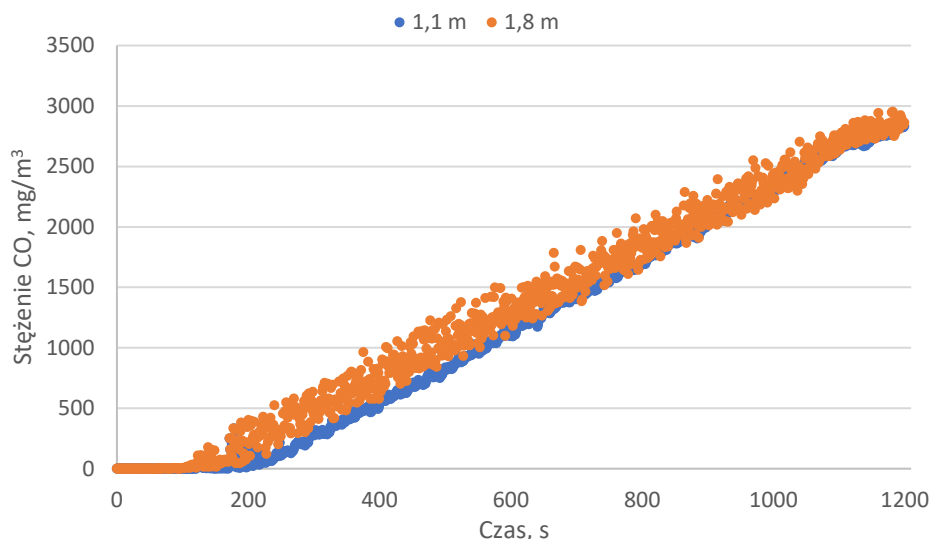
Rysunek 4.38. Rozkład temperatury na korytarzu po 171,5 oraz 190 sekundach – przypadek 2.

a) płaszczyzna wynikowa D, b) płaszczyzna wynikowa B



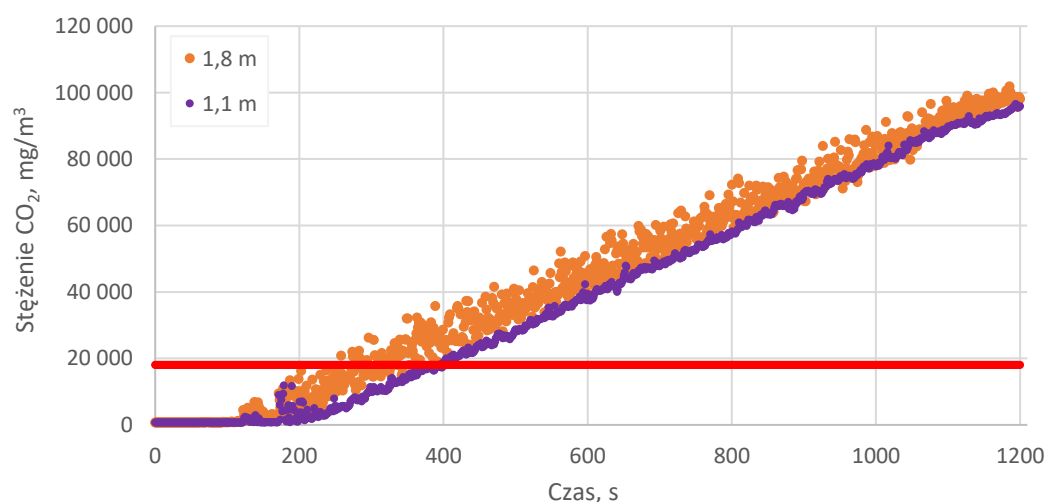
Rysunek 4.39. Rozkład temperatury na korytarzu po 280 oraz 600 sekundach – przypadek 2.
a) płaszczyzna wynikowa D, b) płaszczyzna wynikowa B

Stężenie tlenku węgla na korytarzu przedstawia Rysunek 4.40. Przebywanie 5 – 10 minut w warunkach gdzie stężenie tlenku węgla wynosi ok. 4000 mg/m^3 może prowadzić do zapaści, a po 30 minutach do zgonu. Przy stężeniu 8000 mg/m^3 ryzyko zapaści może nastąpić już po 1 – 2 minutach, a zgon po ok. 15 minutach. Wdychanie powietrza, w którym stężenie tlenku węgla wynosi ok. 15000 mg/m^3 już po 1 – 3 minutach prowadzi do zgonu [139]. Przy tak wysokich stężeniach CO zgon może nastąpić już po kilku oddechach, bez objawów ostrzegawczych. Wiązanie CO we krwi prowadzi do porażenia układu oddechowego oraz ostrej niewydolności układu krążenia.



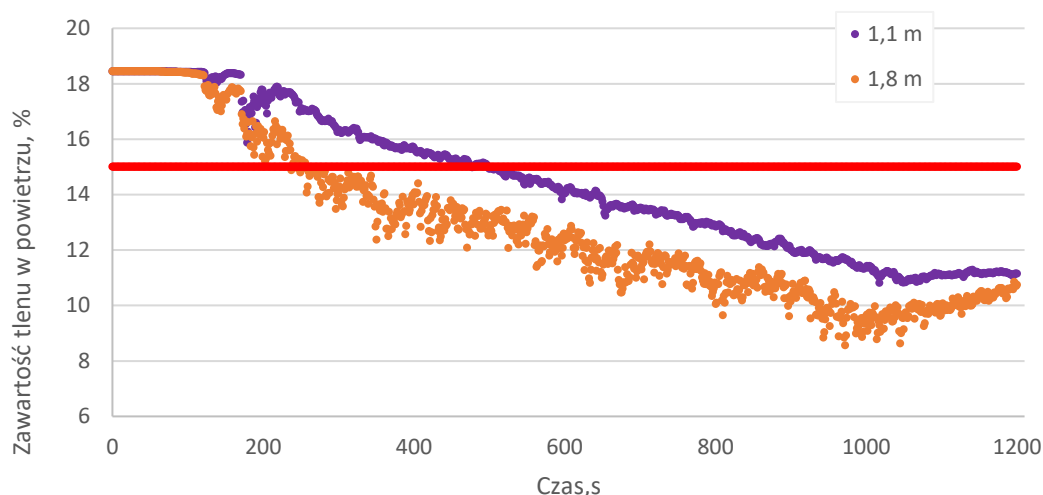
Rysunek 4.40. Stężenie tlenku węgla w punkcie pomiarowym na korytarzu – przypadek 2

Wraz z biegiem czasu w sposób ciągły wzrasta stężenie dwutlenku węgla. Wartość odniesienia 18000 mg/m^3 w tym przypadku zostaje przekroczona (na wysokości pomiaru 1,8 m) po raz pierwszy po upływie 258 sekund, a na stałe po ok 354 sekundach (Rysunek 4.41). Na wysokości 1,1 m wartość graniczna zostaje przekroczona po upływie 400 sekund.



Rysunek 4.41. Przebieg zmian stężenia dwutlenku węgla w punkcie pomiarowym na korytarzu – przypadek 2

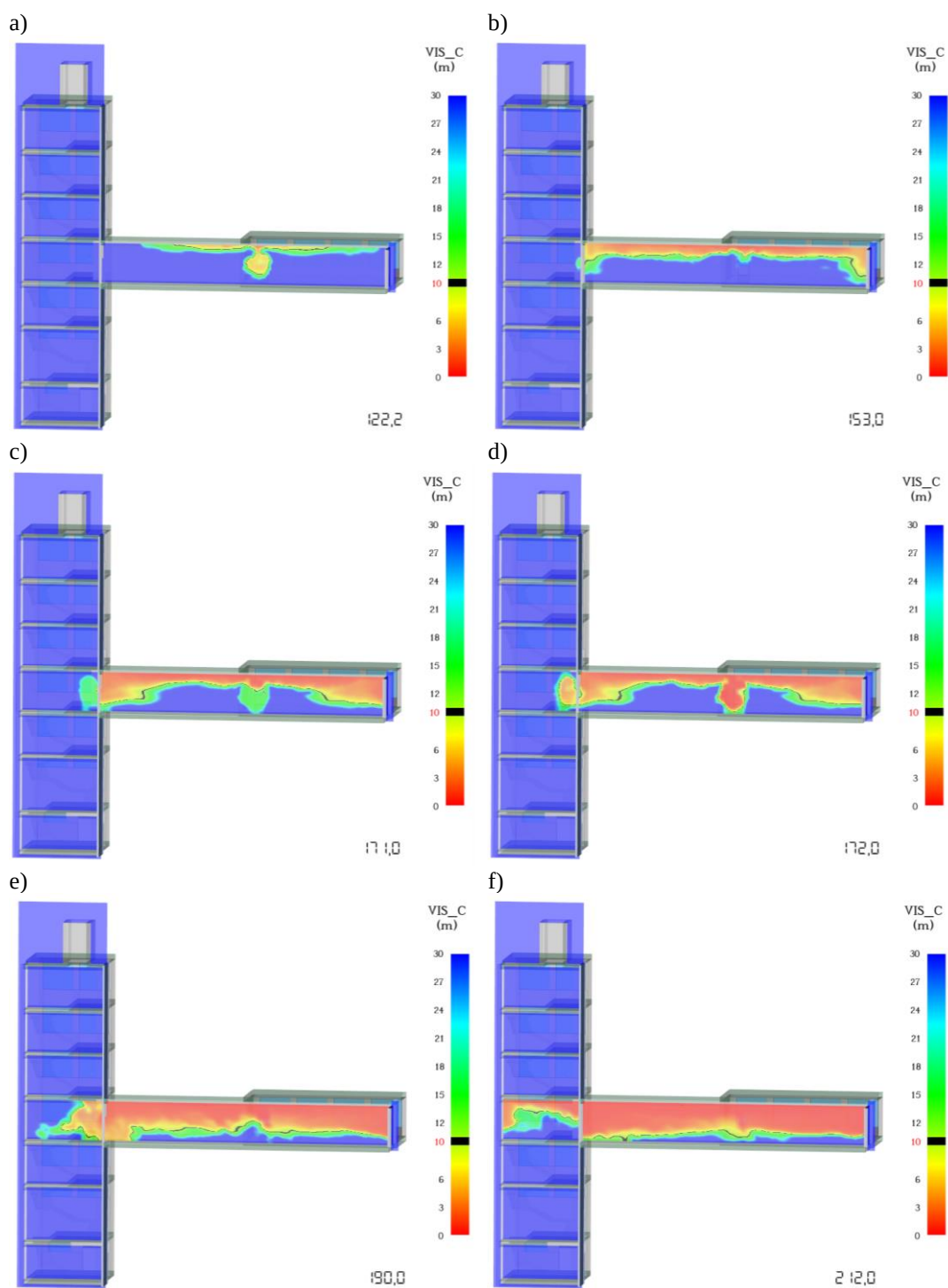
Podobnie jak w przypadku 1, zawartość tlenu w powietrzu maleje. Granica bezpiecznego stężenia tlenu zostaje przekroczona po upływie ok. 237 sekund, w przypadku pomiaru na wysokości 1,8 m oraz po upływie 499 sekund w przypadku pomiaru na wysokości 1,1 m. Najniższa odnotowana wartość w punkcie pomiarowym podczas symulacji pożaru wynosi 8,5 % (1,8 m) (Rysunek 4.42).



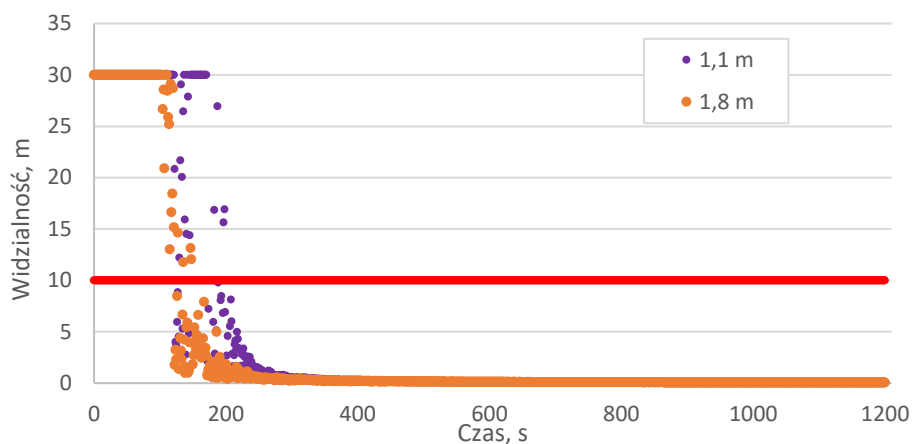
Rysunek 4.42. Zawartość tlenu w powietrzu w punkcie pomiarowym na korytarzu – przypadek 2

Dym wypływając na korytarz zaczyna przemieszczać się ku górze i tworzyć warstwę pod sufitem. Przemieszczając się wzdłuż sufitu trafia na ścianę z drzwiami przeciwpożarowymi przez co warstwa dymu zaczyna w tych miejscach opadać, co powoduje kumulację dymu w pobliżu drzwi ewakuacyjnych i tym samym utrudnione lub całkowicie uniemożliwione jest ich dostrzeżenie. Następnie, dym zaczyna zajmować całą objętość korytarza. Chwilowe otwarcie drzwi na klatkę schodową powoduje przedostanie się na nią dymu, jednakże w znacznie mniejszych ilościach niż w przypadku 1, co przedstawiono w dalszej części analizy wyników (podrozdział 4.2.2.2). Otwarcie drzwi powoduje również wzrost ilości dymu wypływającego z sali, co pokazuje Rysunek 4.43 c i d. Zamknięcie drzwi na stałe w 210 sekundzie, uniemożliwia przedostawanie się dymu na klatkę schodową, przez co korytarz zostaje całkowicie zadymiony.

Czujnik pomiarowy na korytarzu zlokalizowany jest w pobliżu drzwi wyjściowych z sali dydaktycznej. Dym wypływając na korytarz w pierwszej kolejności kumuluje się w pobliżu drzwi (Rysunek 4.43 a), przez co widzialność gwałtownie spada, co obserwuje się po upływie ok 120 sekund. Graniczna wartość bezpiecznej widzialności 10 m zostaje przekroczona w 122 sekundzie, a około 190 sekundy widoczność w punkcie pomiarowym spada do zera. Wykres zmian widoczności w punkcie pomiarowym przedstawia Rysunek 4.44.

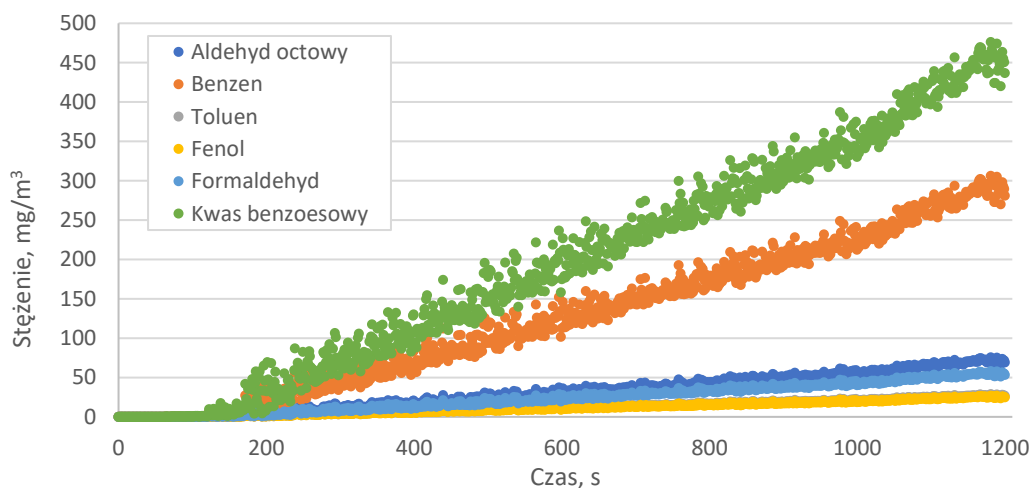


Rysunek 4.43. Zadymienie korytarza – przypadek 2

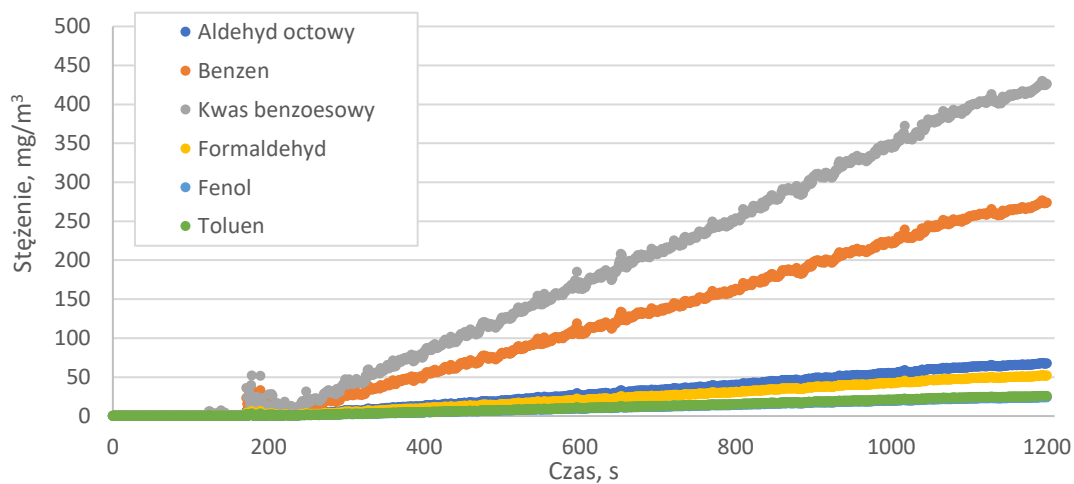


Rysunek 4.44. Zmiana widzialności w punkcie pomiarowym na korytarzu – przypadek 2

Rozkład stężeń pozostałych zanieczyszczeń w punkcie pomiarowym na wysokości 1,8 m na korytarzu przedstawia Rysunek 4.45, a na wysokości 1,1 m Rysunek 4.46.



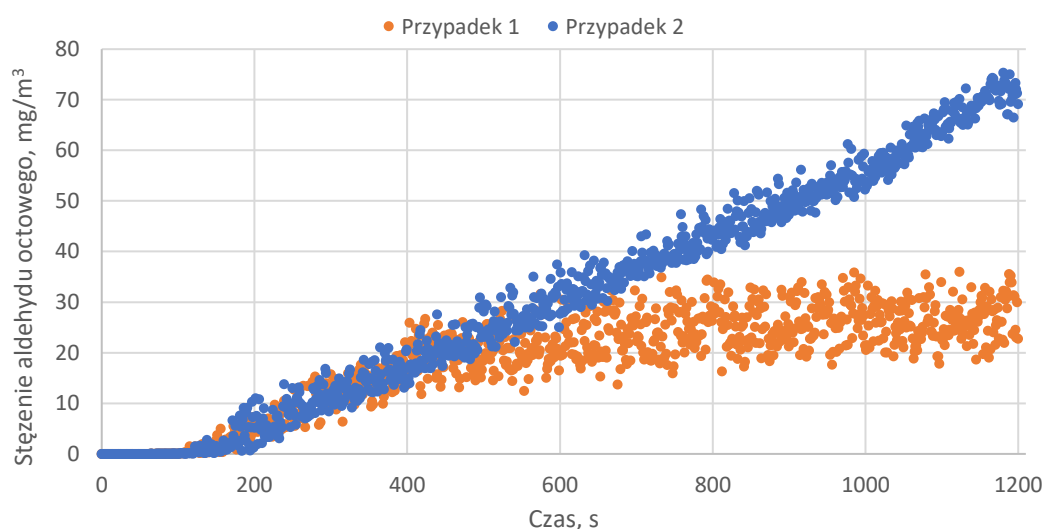
Rysunek 4.45. Stężenie zanieczyszczeń w punkcie pomiarowym na wysokości 1,8 m na korytarzu – przypadek 2



Rysunek 4.46. Stężenie zanieczyszczeń w punkcie pomiarowym na wysokości 1,1 m na korytarzu – przypadek 2

W tym przypadku maksymalne stężenia zanieczyszczeń odnotowane na korytarzu są wyższe niż w przypadku 1. Zamknięcie drzwi na klatkę schodową powoduje, że zanieczyszczenia kumulują się w zamkniętej przestrzeni korytarza. W początkowym okresie trwania pożaru stężenie zanieczyszczeń wzrasta powoli, co widać na wykresie jako wypłaszczenie do ok. 120 sekundy (Rysunek 4.45). Następnie stężenie rośnie w sposób liniowy do końca trwania symulacji.

Na przykładzie rozkładu stężenia aldehydu octowego przedstawiono różnicę w odnotowanych wynikach w punkcie pomiarowym dla obu analizowanych przypadków na wysokości pomiaru 1,8 m (Rysunek 4.47). Po upływie około 500 sekund w przypadku 1 stężenie zaczyna utrzymywać się na stałym poziomie – przedostaje się ono na klatkę schodową, natomiast w przypadku 2 stężenie to nadal stale rośnie, gdyż kumuluje się na korytarzu. Podobnie kształtują się przebiegi dla pozostałych zanieczyszczeń.



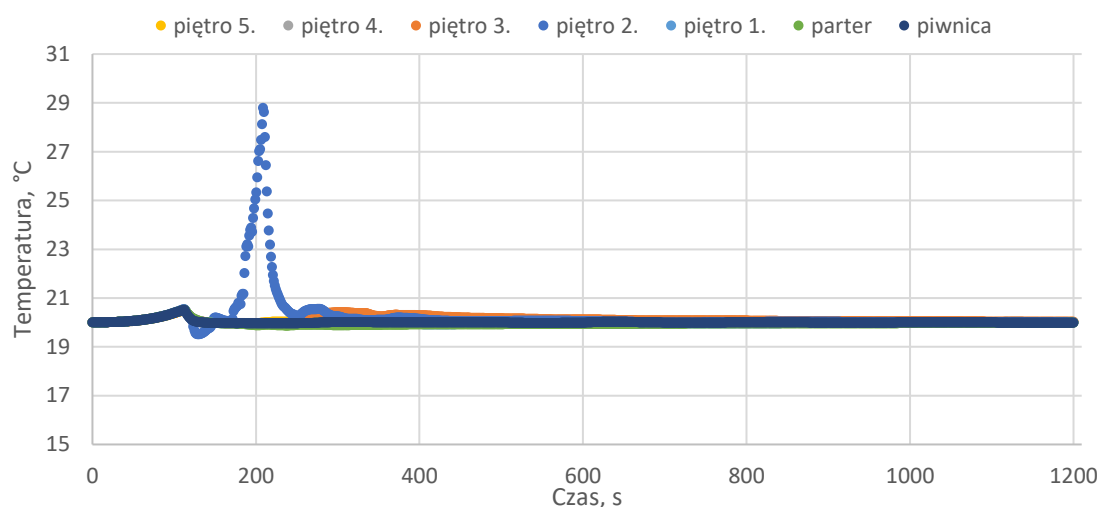
Rysunek 4.47. Stężenie aldehydu octowego na korytarzu na wysokości 1,8 m w obu przypadkach

4.2.2.2 Klatka schodowa

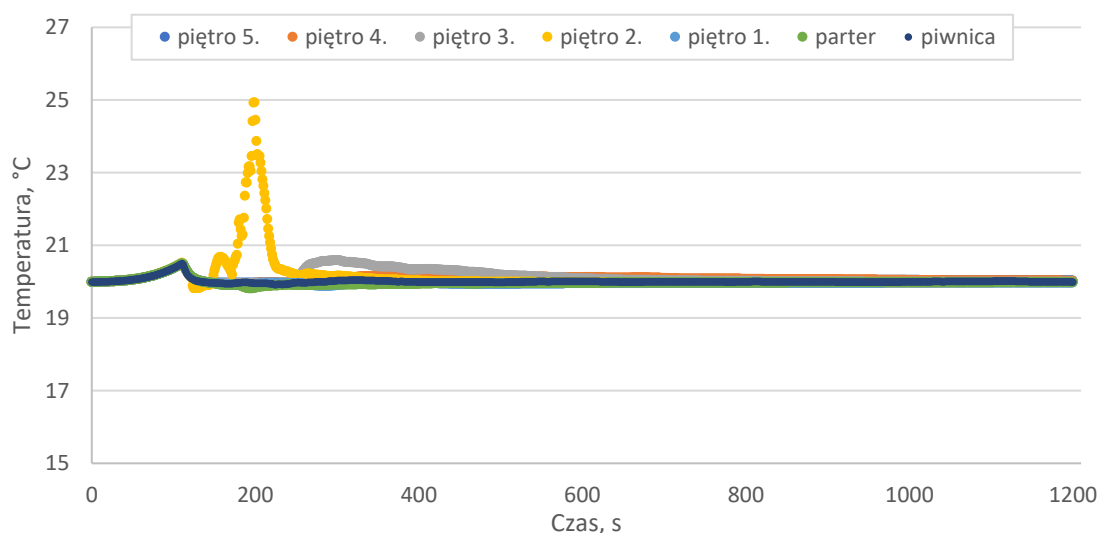
Analizując rozkład temperatury w punktach pomiarowych na wysokości 1,8 m na klatce schodowej można zauważyć, że nieznaczny wzrost temperatury odnotowano na drugim piętrze w czasie, w którym następowało kilkukrotne otwarcie drzwi przeciwpożarowych. Widoczny pik na wykresie (Rysunek 4.48) osiąga maksymalną wartość ok 29°C. Na pozostałych kondygnacjach zmiany temperatury są nieznaczne w zakresie $\pm 1^\circ\text{C}$ temperatury otoczenia. Można zatem założyć, że pod względem temperatury na całej klatce schodowej zapewnione są bezpieczne warunki ewakuacji, przez cały czas trwania pożaru.

Na wysokości pomiaru 1,1 m otrzymane wyniki są niższe niż na wysokości 1,8 m, a przebiegi funkcji temperatury w czasie są podobne – Rysunek 4.49.

Przebieg zmian temperatury na klatce schodowej przedstawiony za pomocą płaszczyzn wynikowych przedstawia Rysunek 4.39.



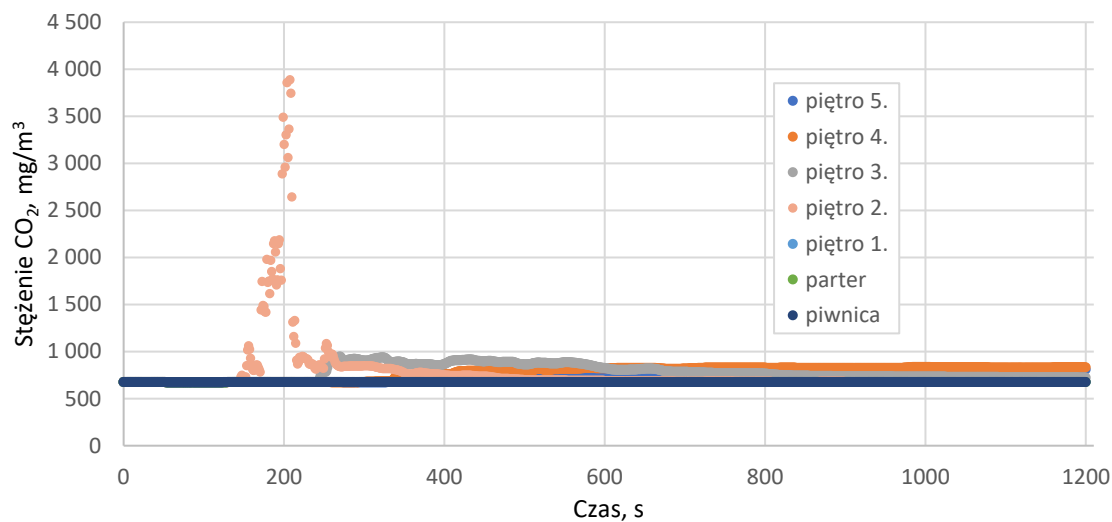
Rysunek 4.48. Rozkład temperatury w punktach pomiarowych na wysokości 1,8 m na klatce schodowej – przypadek 2



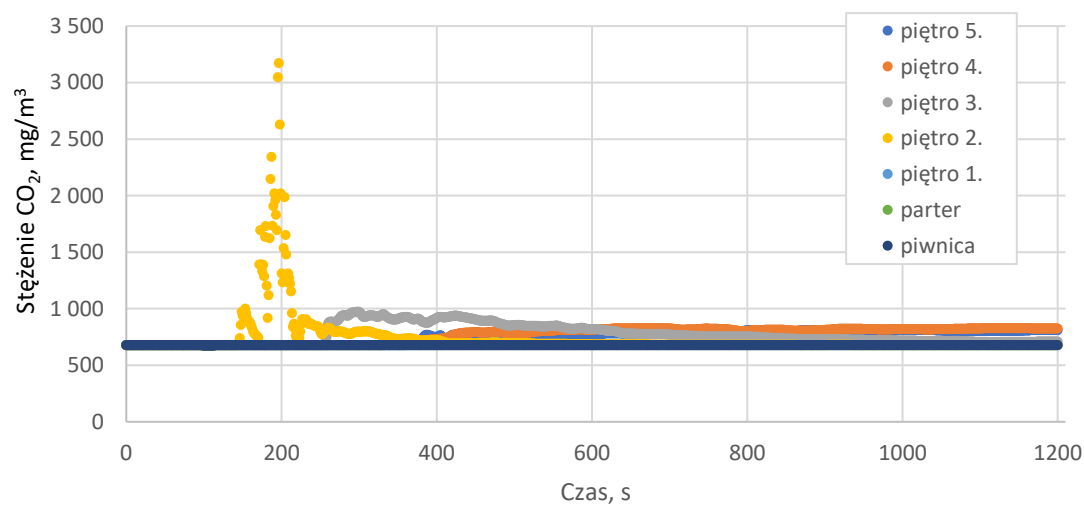
Rysunek 4.49. Rozkład temperatury w punktach pomiarowych na wysokości 1,1 m na klatce schodowej – przypadek 2

Odnotowane w punktach pomiarowych na wysokości 1,8 m stężenie dwutlenku węgla jest dużo niższe niż w przypadku 1. Wzrost stężenia widoczny na wykresie dotyczy głównie piętra 2, a na pozostałych zmiany stężenia są niewielkie rzędu maksymalnie 500 mg/m³. Stężenia poniżej 1000 mg/m³ są stężeniami jakie mogą pojawić się w budynku podczas normalnego użytkowania. Wartości stężenia odnotowane na drugim piętrze nie przekroczyły 4000 mg/m³, a przyrost jest krótkotrwały (Rysunek 4.50). Z tego względu osoby przebywający krótki czas w takiej atmosferze nie są narażone na niebezpieczeństwo,

a jedynie mogą odczuwać wrażenie „zaduchu”. Stężenie CO_2 na wysokości pomiaru 1,1 m na klatce schodowej przedstawia Rysunek 4.51.

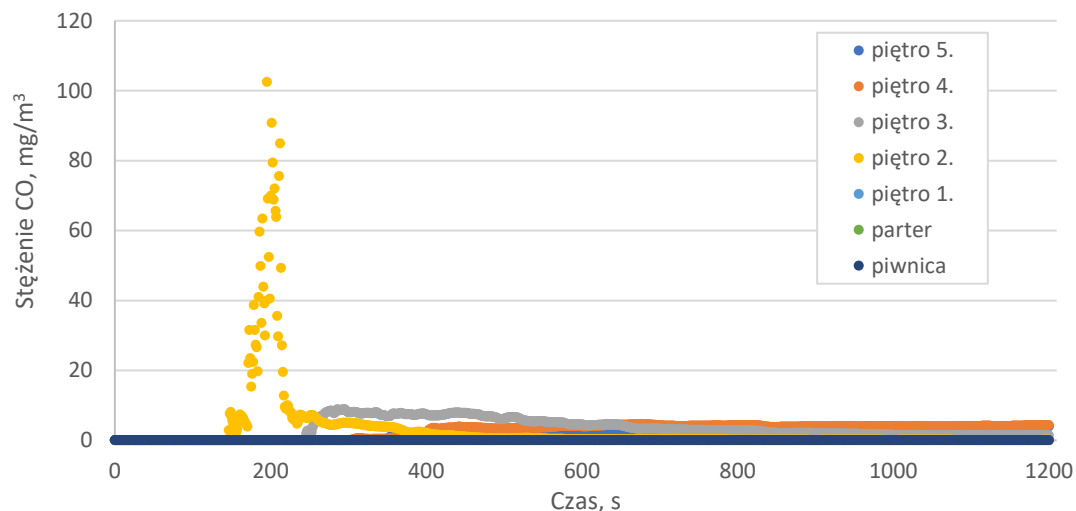


Rysunek 4.50. Stężenie dwutlenku węgla w punktach pomiarowych na wysokości 1,8 m na klatce schodowej – przypadek 2

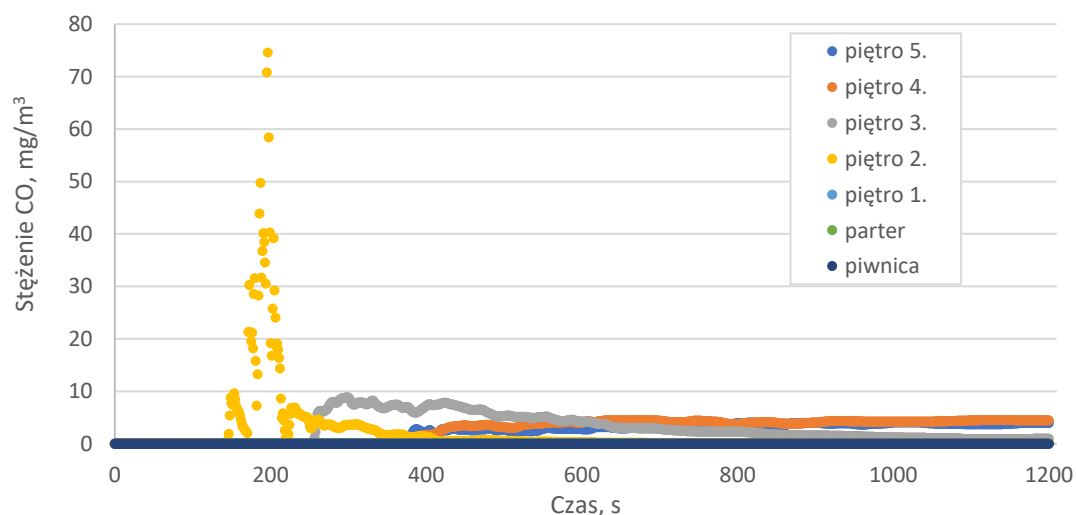


Rysunek 4.51. Stężenie dwutlenku węgla w punktach pomiarowych na wysokości 1,1 m na klatce schodowej – przypadek 2

Wartości stężenia tlenu węgla odnotowane w punktach pomiarowych na klatce schodowej przedstawia Rysunek 4.52 oraz Rysunek 4.53. Jak można zauważyć stężenia są wielokrotnie niższe niż na korytarzu, a także niższe niż w przypadku 1 – przy braku samozamykaczy.



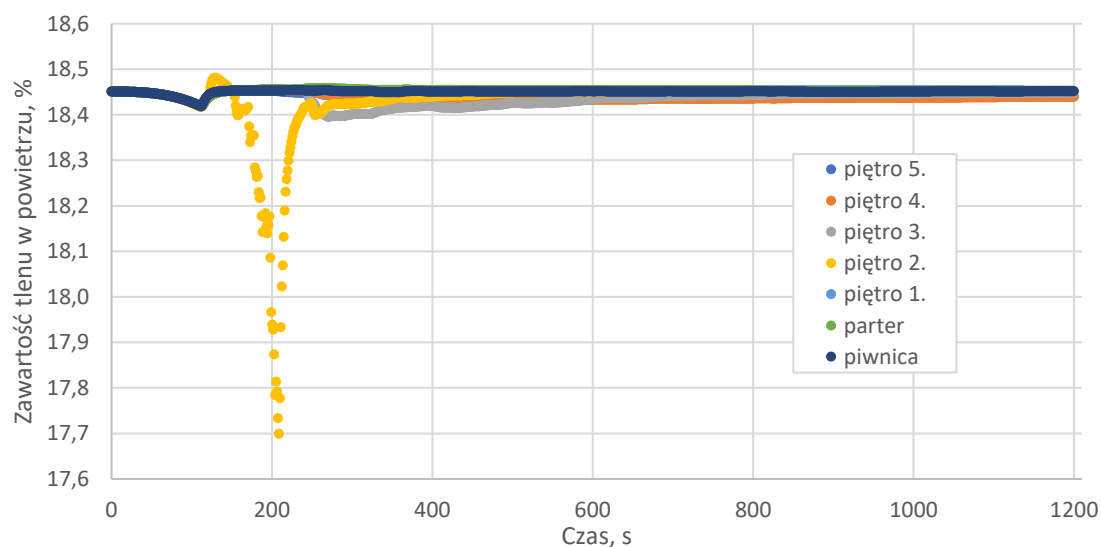
Rysunek 4.52. Stężenie tlenku węgla w punktach pomiarowych na wysokości 1,8 m na klatce schodowej – przypadek 2



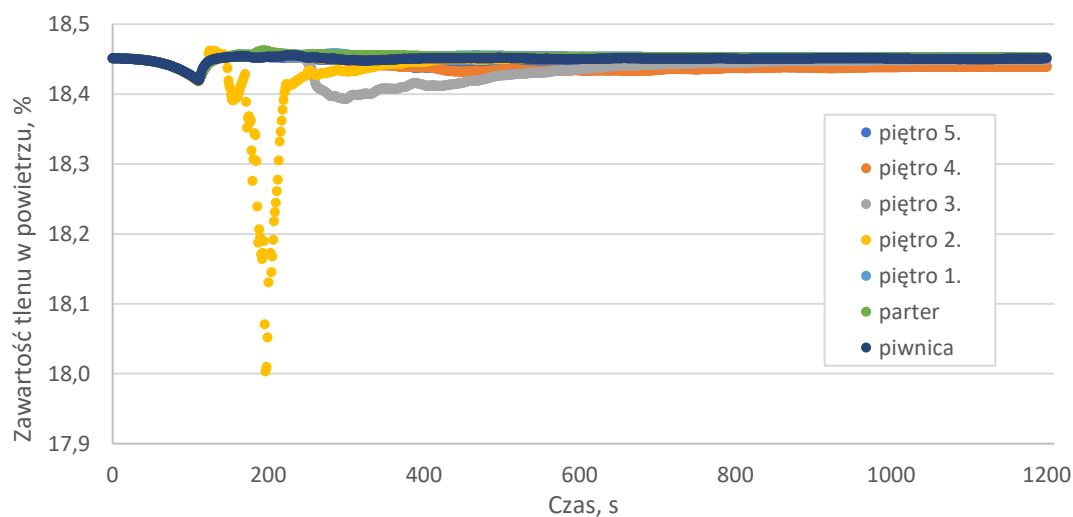
Rysunek 4.53. Stężenie tlenku węgla w punktach pomiarowych na wysokości 1,1 m na klatce schodowej – przypadek 2

Krótkotrwały spadek zawartości tlenu w powietrzu zaobserwowano w punkcie pomiarowym na drugim piętrze. Minimalna wartość stężenia na wysokości pomiaru 1,8 m wyniosła ok 17,7%. Na pozostałych piętrach zmiany stężenia tlenu są minimalne rzędu 0,1% (Rysunek 4.54).

Podobnie kształtuje się wykres dla punktu pomiarowego na wysokości 1,1 m (Rysunek 4.55).

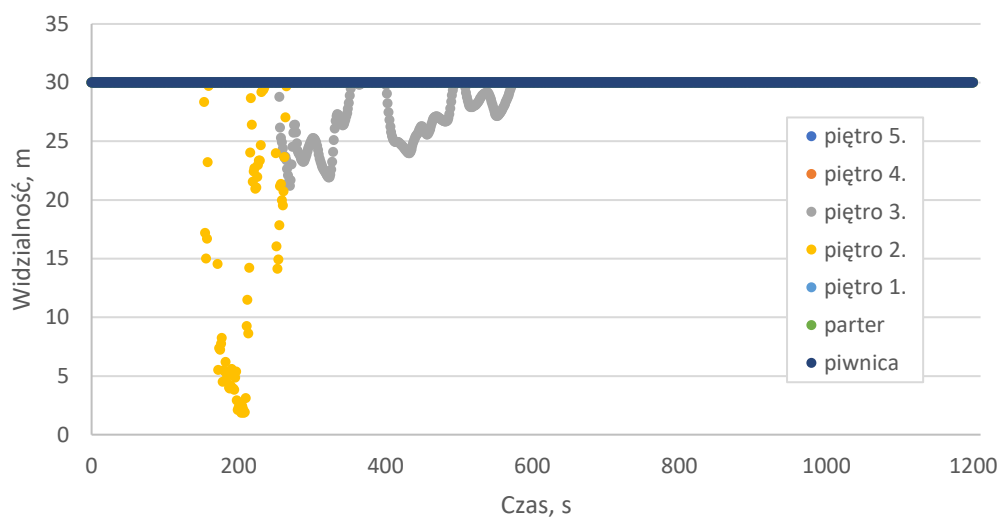


Rysunek 4.54. Zawartość tlenu w powietrzu w punktach pomiarowych na wysokości 1,8 m na klatce schodowej – przypadek 2

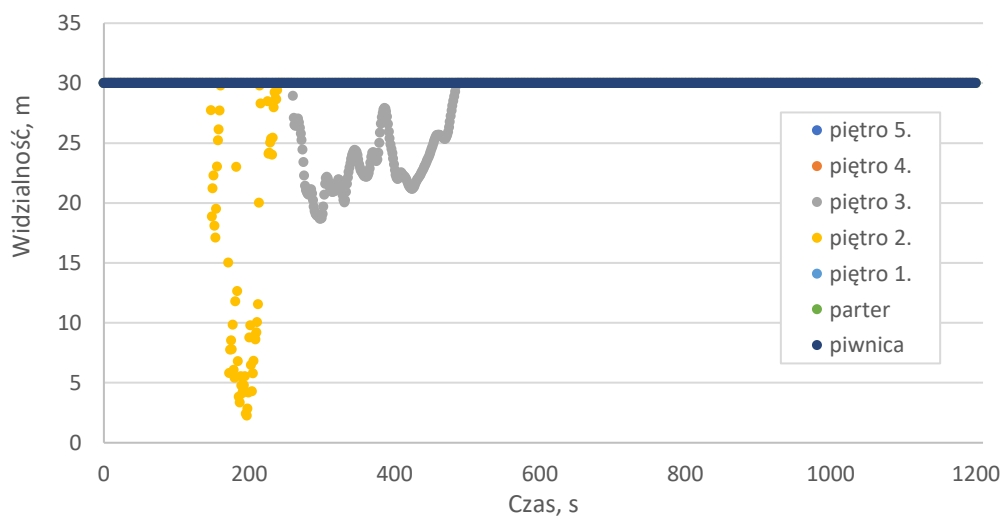


Rysunek 4.55. Zawartość tlenu w powietrzu w punktach pomiarowych na wysokości 1,1 m na klatce schodowej – przypadek 2

Przedostanie się przez otwarte drzwi dymu wpływa na zmianę widoczności. Jak można zauważyć na wykresach (Rysunek 4.56 oraz Rysunek 4.57) jedynie na drugim piętrze widoczność spada gwałtownie praktycznie do zera. Punkt pomiarowy zlokalizowany jest w pobliżu drzwi ewakuacyjnych, stąd tak duży wpływ wypływającego dymu na odnotowane wartości.

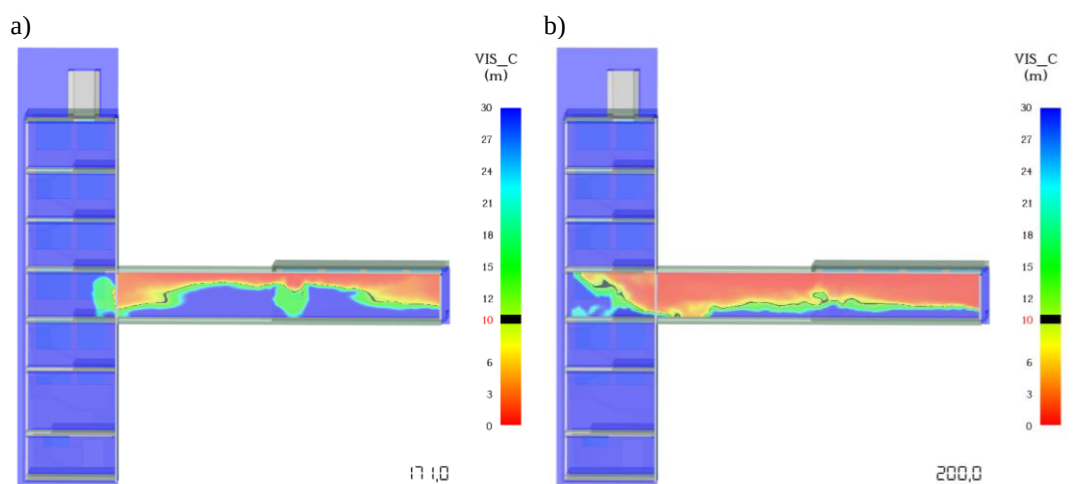


Rysunek 4.56. Widzialność w punktach pomiarowych na wysokości 1,8 m na klatce schodowej – przypadek 2

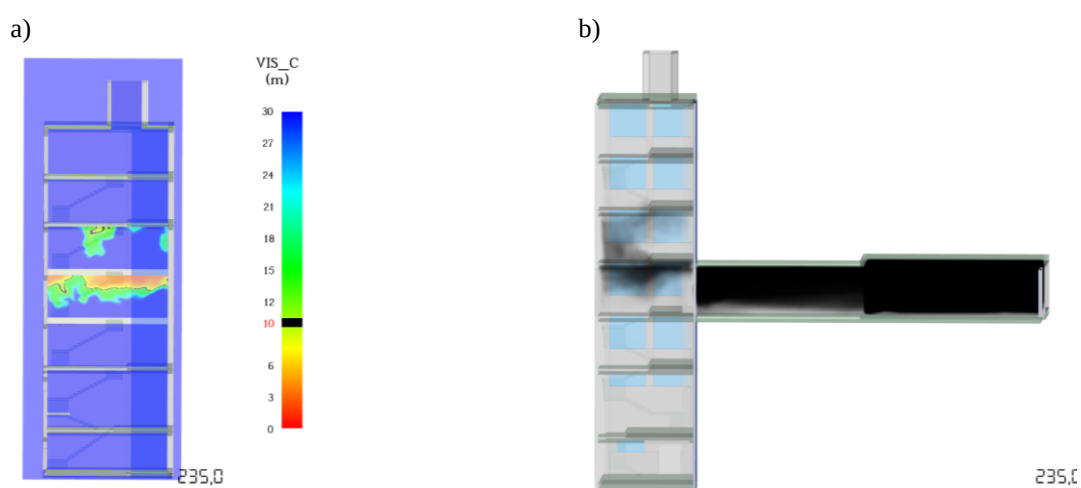


Rysunek 4.57. Widzialność w punktach pomiarowych na wysokości 1,1 m na klatce schodowej – przypadek 2

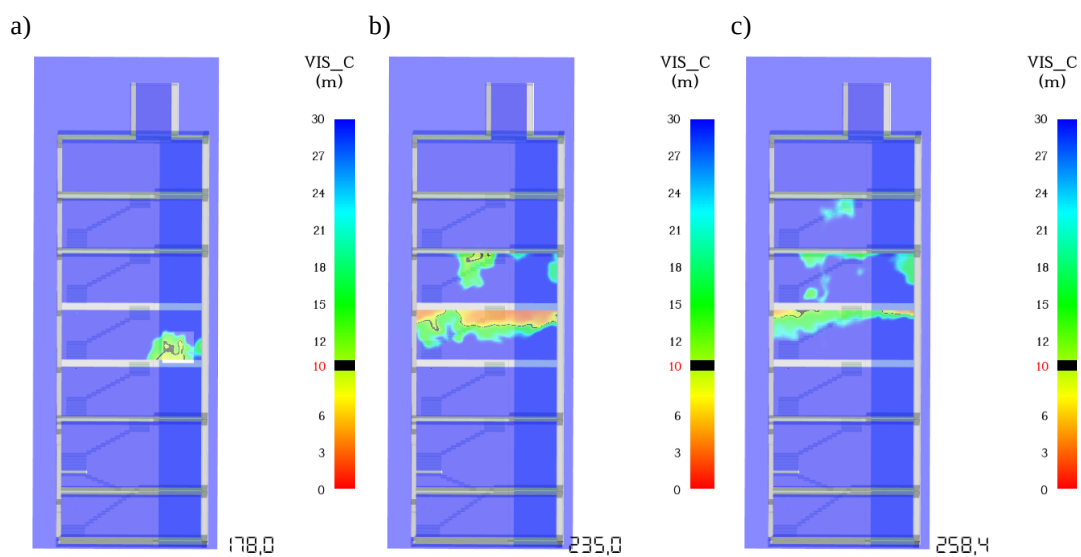
Kształtowanie się zadymienia na klatce schodowej przedstawiono za pomocą płaszczyzn wynikowych dla lepszego zobrazowania zachodzących zmian (Rysunek 4.58 – Rysunek 4.60).



Rysunek 4.58. Zadymienie klatki schodowej – przypadek 2, płaszczyzna wynikowa D. a) po 171, b) po 200 sekundach

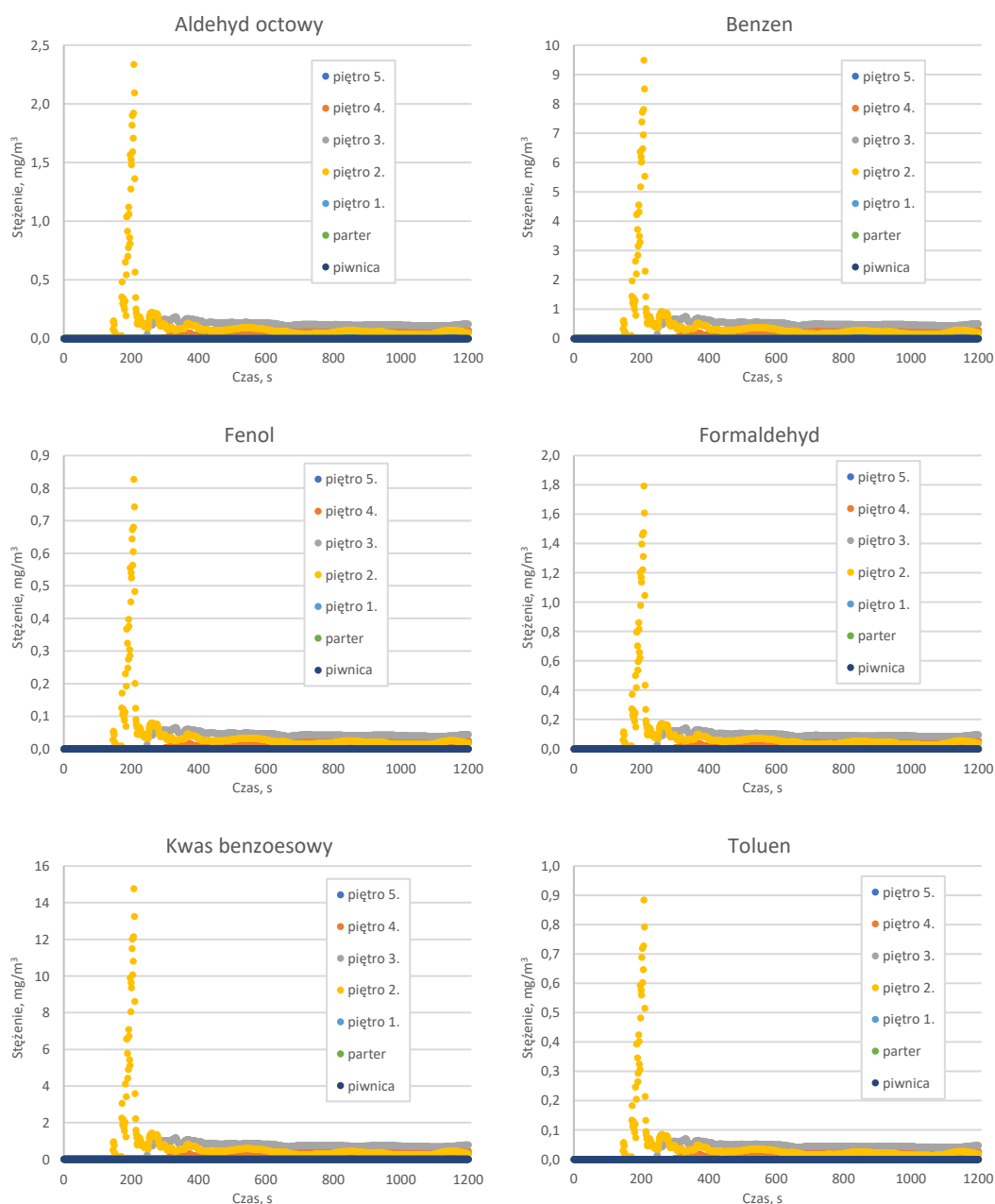


Rysunek 4.59. Zadymienie klatki schodowej – przypadek 2. a) płaszczyzna wynikowa D po 235 sekundach, b) wizualizacja zadymienia po 235 sekundach

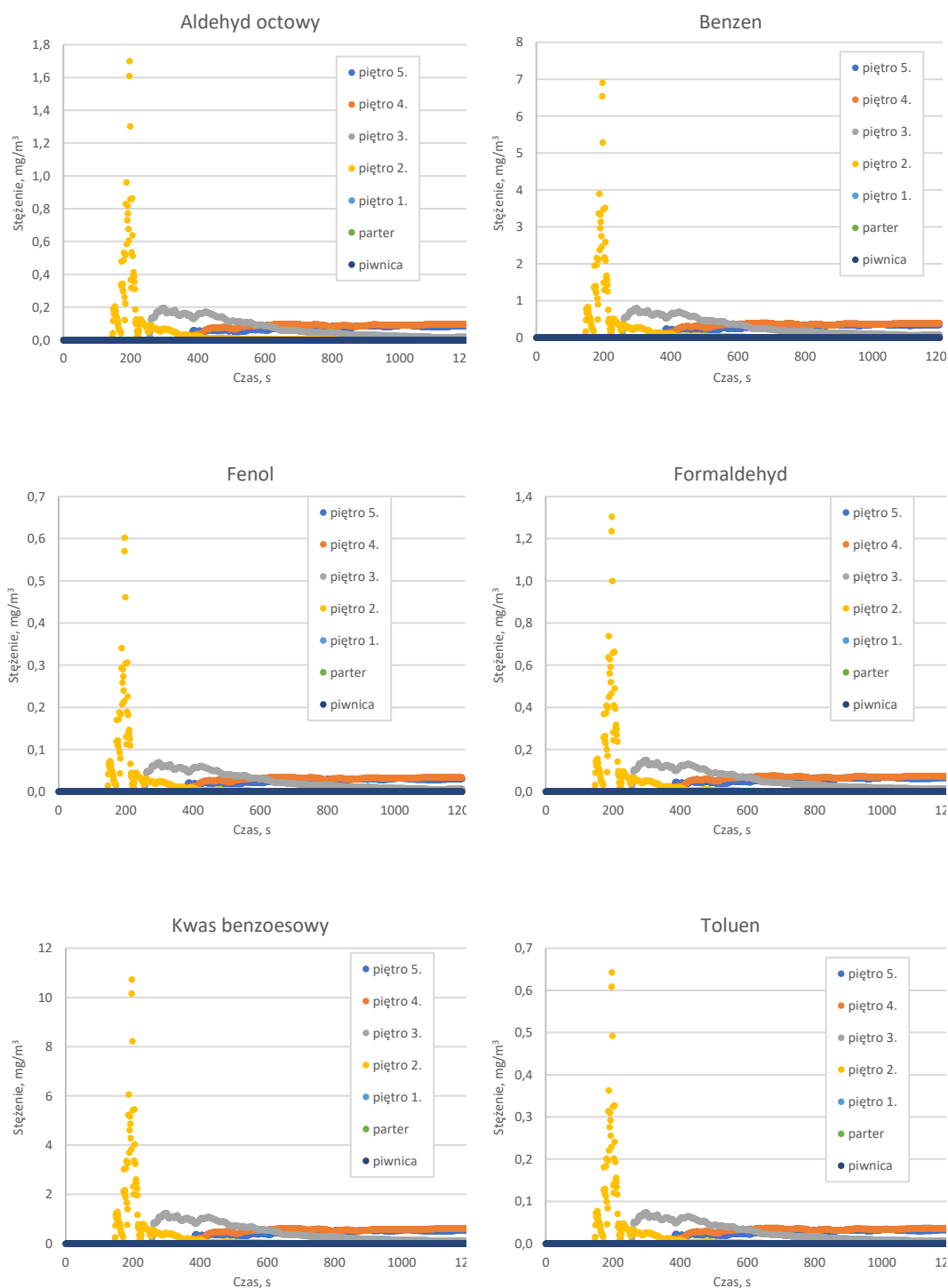


Rysunek 4.60. Zadymienie klatki schodowej – przypadek 2. a) – c) płaszczyzna wynikowa C

Rozkład zanieczyszczeń na klatce schodowej na wysokości pomiaru 1,8 m przedstawia Rysunek 4.61, a na wysokości 1,1 m – Rysunek 4.62. Dla każdej substancji wykresy przebiegają podobnie. Najwyższe stężenie odnotowano na drugim piętrze, a wzrost wartości jest chwilowy tylko w momencie otwarcia drzwi przeciwpożarowych. Punkt pomiarowy zlokalizowany jest w pobliżu drzwi. Następnie zanieczyszczenia mieszają się z czystym powietrzem dostarczanym na klatkę schodową i przemieszczają się do góry, co widoczne jest na wykresach. Wzrost wartości na kondygnacjach powyżej drugiego piętra następuje z pewnym przesunięciem czasu. Podobnie jak w przypadku 1, nie odnotowano zmian stężenia zanieczyszczeń na kondygnacjach znajdujących się poniżej piętra objętego pożarem.



Rysunek 4.61. Rozkład stężenia zanieczyszczeń na wysokości pomiaru 1,8 m na klatce schodowej – przypadek 2



Rysunek 4.62. Rozkład stężenia zanieczyszczeń na wysokości pomiaru 1,1 m na klatce schodowej – przypadek 2

Porównując wyniki dla obu przypadków można zauważyć, że odnotowane stężenia zanieczyszczeń na klatce schodowej w przypadku 2 są co najmniej kilkukrotnie niższe.

4.3. Wnioski z przeprowadzonych analiz numerycznych

Analiza powyższych przypadków pozwala wysnuć zasadniczy wniosek, że w przypadku zastosowania samozamykaczy bezpieczne warunki na klatce schodowej są zapewnione praktycznie przez cały czas trwania pożaru. Obecność samozamykaczy na drzwiach oddzielających klatkę schodową od korytarza sprawia, że drzwi zostają zamknięte natychmiast po każdorazowym otwarciu przez osoby ewakuujące się. W takim przypadku klatka schodowa praktycznie przez cały czas trwania pożaru jest wolna od zadymienia, a ewentualne zanieczyszczenia uwalniane są w takich ilościach, które nie będą niebezpieczne dla osób ewakuujących się.

Niestety, takie rozwiązanie automatycznie sprawia, że korytarz na którym nie zastosowano systemu usuwania dymu, w krótkim czasie staje się miejscem niebezpiecznym i ewakuacja tą drogą nie jest możliwa. Bardzo ważne jest zatem opuszczenie podczas pożaru danej strefy w czasie, w którym warunki są uznane za bezpieczne. W sytuacji zagrożenia nie ma czasu na zastanawianie się i lekceważenie sygnałów alarmowych.

W analizowanym przypadku sytuacja ta ma miejsce już po upływie ok. 2,5 minut od rozpoczęcia pożaru, kiedy to zadymienie na poziomie drugiego piętra przekracza wartość graniczną ze względu na bezpieczeństwo. O ile populacja osób w pełni sprawnych oraz osoby ewakuowanej za pomocą krzesła ewakuacyjnego jest w tym przypadku możliwa, tak już ewakuacja osoby poruszającej się o kulach może być zagrożona, gdyż osoba ta porusza się najwolniej.

Dzięki zastosowaniu samozamykaczy na drzwiach oddzielających korytarz od klatki schodowej, przedostawanie się dymu i produktów pożaru jest zminimalizowane, dzięki czemu warunki na klatce schodowej dłużej utrzymują się na bezpiecznym poziomie i umożliwiają ewakuację osób z wyższych pięter. Przypadek 1, w którym nie zastosowano tego rozwiązania pozwala na swobodny wypływ dymu na klatkę schodową tym samym uniemożliwiając ewakuację z wyższych kondygnacji.

Na podstawie otrzymanych wyników analiz, wybierając parametr krytyczny, którego wartość graniczna została przekroczona najszybciej, stwierdza się, że dostępny czas bezpiecznej ewakuacji (DCBE) w obu analizowanych przypadkach wynosi ok 2 minuty. Po tym czasie następuje zadymienie korytarza uniemożliwiające przemieszczanie się.

Dodatkowo w przypadku 1, ze względu na zadymienie klatki schodowej, po upływie niecałych 3 minut nie ma możliwości ewakuacji z kondygnacji znajdujących się powyżej poziomu pożaru.

Analiza warunków na dwóch wysokościach pozwoliła oszacować potencjalne narażenie osoby w pełni sprawnej poruszającej się w pozycji pionowej, jak również osoby z niepełnosprawnością, której głowa podczas transportu w pozycji siedzącej za pomocą krzesła ewakuacyjnego znajduje się niżej. Jak zauważono, narażenie osoby transportowanej za pomocą krzesła ewakuacyjnego może być niższe, niż osoby poruszającej się w pozycji pionowej. Gorący dym kumuluje się w warstwie podsufitowej i następnie stopniowo opada, przez co osoba przemieszczająca się w pozycji pionowej nieco wcześniej narażona jest na wyższe stężenia substancji niebezpiecznych obecnych w powietrzu. Należy jednak pamiętać, że bezpieczeństwo osoby transportowanej za pomocą krzesła ewakuacyjnego jest uzależnione od bezpieczeństwa osób obsługujących krzesło ewakuacyjne, dlatego wniosek ten jest ważny i może wskazywać potencjalny problem.

Zestawienie wyników z badań eksperymentalnych oraz symulacyjnych pozwala wyciągnąć wniosek, że DCBE jest wystarczający, aby z danej strefy zagrożenia w bezpieczny sposób ewakuowały się wszystkie osoby. Biorąc pod uwagę analizowane parametry, pogorszenie warunków na korytarzu poniżej wartości bezpiecznych następuje po upływie ok 2 minut, gdzie w warunkach rzeczywistych, w tym czasie wszystkie osoby ewakuujące się z danej strefy zdążyły już opuścić budynek lub co najmniej przemieścić się na klatkę schodową poniżej poziomu piętra objętego pożarem.

Należy nadmienić, iż analizę wyników w tym rozdziale wykonano w odniesieniu do wartości uzyskanych wprost z analiz numerycznych. Jak w każdym przypadku, wyniki obarczone są pewnym błędem. W dokumentacji technicznej FDS znajdziemy dane statystyczne na temat niepewności modelu, wyznaczone na podstawie porównania danych pomiarowych z rzeczywistych eksperymentów oraz danych z modeli obliczeniowych. Dzięki porównaniu tych wartości, wyznaczono jaki jest błąd szacowania konkretnych wielkości fizycznych przez FDS. Względne odchylenie standardowe wartości przewidzianych przez model FDS wraz z wartością błędu statystycznego znajdziemy w raporcie NIST [142], który stanowi dokumentację techniczną FDS w zakresie jego walidacji. Tabela 4.7 przedstawia, w sposób skrócony, wybrane niepewności szacowania wielkości w modelu FDS. Niepewność modelu reprezentuje odchylenie standardowe oraz bias.

Tabela 4.7. Wybrane niepewności modelu FDS [142]

Wielkość fizyczna	Względne odchylenie standardowe σ_M	Bias
Temperatura warstwy podsufitowej dymu przy wentylacji naturalnej	0,13	1,04
Wysokość warstwy podsufitowej dymu	0,08	1,05
Stężenie tlenu	0,17	0,97
Stężenie dwutlenku węgla	0,14	1
Stężenie tlenku węgla	0,55	1
Stężenie dymu	0,92	2,76
Temperatura powierzchni	0,18	1,08
Szybkość uwalniania ciepła	0,45	1,48

Rozdział 5. Modelowanie ewakuacji

W tym rozdziale pracy przedstawiono analizy ewakuacji osób z budynku z uwzględnieniem osób z niepełnosprawnościami z wykorzystaniem symulatora ewakuacji.

Zgodnie z rozdziałem 2.2 tej pracy, modelowanie ewakuacji jest procesem złożonym, w którym należy przyjąć pewne uproszczenia. Na rynku dostępnych jest wiele programów do modelowania ewakuacji, natomiast do wykonania modelu w tej pracy wykorzystano program Pathfinder.

Program ten został wybrany zgodnie z kryteriami opisanymi w rozdziale 2.2 (Rysunek 2.2). Pathfinder jest narzędziem komercyjnym opracowanym przez Thunderhead Engineering, do którego darmowy dostęp zapewnia licencja edukacyjna.

Program Pathfinder jest symulatorem zachowania tłumu, który umożliwia wyznaczenie czasu bezpiecznego wyjścia z budynku. Oprogramowanie wykorzystuje w obliczeniach algorytmy sztucznej inteligencji, dzięki czemu umożliwia modelowanie złożonych scenariuszy ewakuacji.

Pathfinder to program oparty na modelu agentowym, czyli takim który służy do symulacji zachowań i interakcji pomiędzy autonomicznymi jednostkami, zwanymi agentami. Program umożliwia w modelu przypisanie indywidualnych cech każdej zdefiniowanej osobie. Oznacza to, że każda jednostka może posiadać indywidualne cechy fizyczne oraz osobowościowe, a także podejmować indywidualne decyzje. Dzięki takiemu podejściu, w modelu obliczeniowym można zadać takie parametry, które będą odzwierciedlać również cechy osób z niepełnosprawnościami (rozmiar, prędkość przemieszczania, priorytet czy czas opóźnienia w podjęciu decyzji o ucieczce), co nie jest tak oczywiste i możliwe do wprowadzenia w innych modelach.

Program współpracuje z innymi programami, dzięki czemu istnieje możliwość m.in. importu złożonej geometrii budynku, czy współpracy z FDS.

Pathfinder pozwala obserwować realistyczny przepływ ludzi na drogach ewakuacyjnych. W programie dostępne są dwie metody modelowania przemieszczania się ludzi. Metoda sterująca „Steering” oparta jest na idei zachowań sterujących. Ruch agenta sterowany jest za pomocą mechanizmów sterujących oraz kontroli kolizji, dzięki czemu agent może reagować na zmieniające się środowisko oraz na innych użytkowników. Oznacza to, że agent może zboczyć ze ścieżki w celu ominięcia jakiej przeszkody np. zatoru, jednocześnie wciąż podążając we właściwym kierunku, w zadanym celu [143]. W tej metodzie dostępnych jest kilka zachowań sterujących np. „omijaj pasażerów”, „unikaj ścian”, itd, dzięki czemu

możliwe jest modelowanie zachowań bardziej złożonych. Domyślnie, przejście przez drzwi nie jest ograniczane dodatkowymi parametrami, w odróżnieniu do metody drugiej – SFPE. Alternatywna metoda „SFPE” bazuje na koncepcji opracowanej przez SFPE (Society of Fire Protection Engineers). W tym przypadku ruch agentów oparty jest na modelu przepływu. Profile prędkości przemieszczania zależą od gęstości zaludnienia w poszczególnych pomieszczeniach, a przejście przez drzwi kontrolowane jest przez szerokość drzwi [143]. Ogólnie rzecz biorąc, agenci mogą swobodnie przemieszczać się w całej geometrii, a przepływ ograniczany jest przez drzwi.

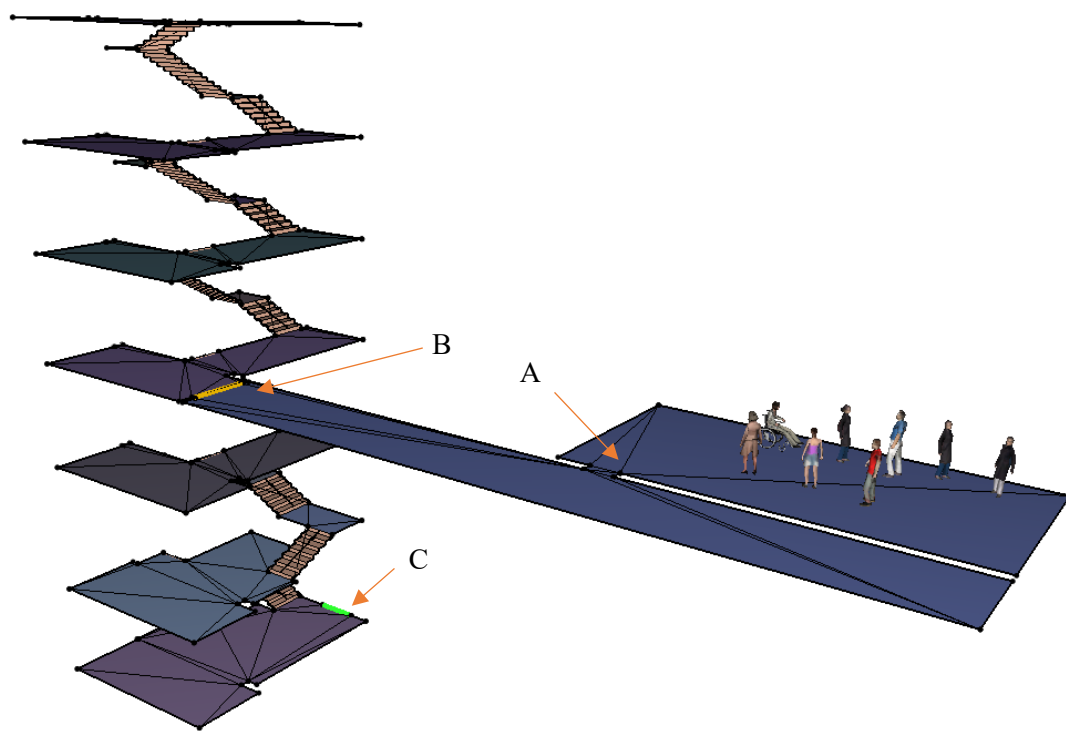
Pathfinder umożliwia modelowanie geometrii 3D, natomiast sam ruch agentów w modelu odbywa się w granicach siatki nawigacyjnej. Siatka jest ciągła, tworzą ją sąsiadujące ze sobą trójkąty. Przeszkody w modelu reprezentowane są jako luki w siatce nawigacyjnej.

Program Pathfinder podlega ciągłym procesom weryfikacji. W literaturze znajdziemy wiele opracowań, w których wyniki uzyskane w rzeczywistej ewakuacji porównywane są z wynikami symulacji dla tych samych środowisk otrzymanymi w programie Pathfinder. Jak potwierdzono badaniami, program Pathfinder dobrze odzwierciedla wyniki uzyskiwane w warunkach rzeczywistych, dlatego może być stosowany do sprawdzania czasów ewakuacji z budynków. Wiarygodność uzyskanych wyników będzie zależeć przede wszystkim od kompetencji oraz doświadczenia osoby opracowującej dany model obliczeniowy. Oczywiście, jak w każdym przypadku, wyniki uzyskane z symulacji obarczone są pewnymi błędami. Z tego względu należy zawsze krytycznie podejść do analizy uzyskanych wyników.

Program Pathfinder jest powszechnie stosowanym narzędziem do analizy strategii ewakuacji z różnego typu budynków. Ronchi i Nilsson [144] proponują stosowanie modelu do oszacowania strategii ewakuacji z wieżowców. Cuesta i inni w publikacji [145] przedstawili porównanie różnych programów (w tym Pathfinder) do modelowania ewakuacji ze szkoły. Autorzy Yan i inni w swojej publikacji [146] przedstawili analizy strategii ewakuacji z wieżowca Yangtze River International Conference Center. Autorzy zaproponowali wykorzystanie programu Pathfinder do analizy zastosowania wind w ewakuacji oraz wyznaczenie DCBE z wykorzystaniem programu Pyrosim. Model ewakuacji z biurowca przedstawili autorzy Ivanov i Chow [147], którzy porównali wyniki uzyskane w programie Pathfinder z rzeczywistymi próbami ewakuacyjnymi przeprowadzonymi w tym budynku. Mandal i inni [148] zaproponowali natomiast zastosowanie programu do modelowania ewakuacji z budynku uniwersytetu. Wśród publikacji znajdujemy również przykład zastosowania programu Pathfinder do modelowania ewakuacji ze szpitala [149].

5.1. Charakterystyka modelu ewakuacji

Model ewakuacji wykonano w programie Pathfinder wersja 2023.3.1206. Geometrię obiektu zaimportowano do programu i jest ona taka sama, jak zastosowana w programie Pyrosim i omówiona w poprzednim rozdziale. Siatkę nawigacyjną tworzy pomieszczenie, korytarz oraz klatka schodowa. Połączenie pomiędzy poszczególnymi elementami siatki stanowią drzwi o szerokości odpowiadającej warunkom rzeczywistym (Tabela 5.1). Początek ewakuacji ma miejsce w sali dydaktycznej, w której znajduje się cała ewakuowana populacja użytkowników. Koniec ewakuacji w modelu następuje w momencie przejścia ostatniego użytkownika na zewnątrz modelu przez drzwi ewakuacyjne zlokalizowane na końcu klatki schodowej w piwnicy (C). To odpowiada momentowi wyjścia z budynku w badaniach eksperymentalnych. Model wykonano w sposób możliwie dobrze reprezentujący rzeczywisty przypadek opisany w rozdziale 3.1. Siatkę nawigacyjną w obiekcie przedstawia Rysunek 5.1.



Rysunek 5.1. Siatka nawigacyjna obiektu w programie Pathfinder

Tabela 5.1. Wymiary poszczególnych elementów obiektu

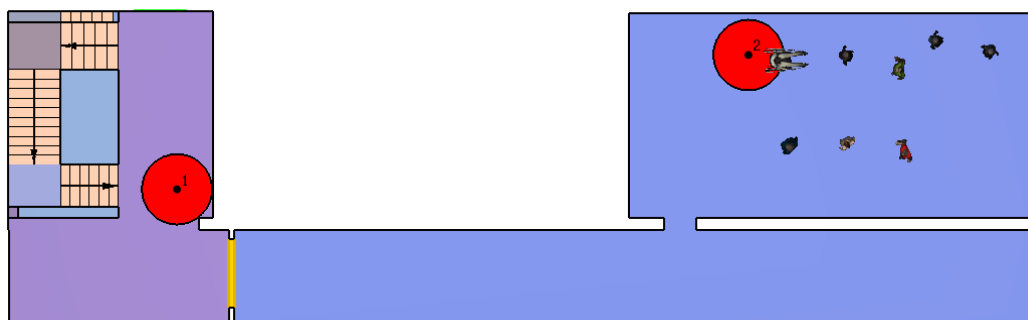
Parametr		Wartość
Szerokość korytarza		2,7 m
Szerokość drzwi	A	0,9 m
	B	2 m
	C	1,5 m

W analizach z wykorzystaniem programu Pathfinder starano się odzwierciedlić przeprowadzone badania, opisane w Rozdziale 3.

Zamodelowana populacja użytkowników obiektu jest heterogeniczna. Oznacza to, że poszczególne osoby posiadają indywidualne cechy, które omówiono poniżej. Populacja składa się z 8 osób, z czego jeden użytkownik jest osobą z niepełnosprawnością ruchową, która do ewakuacji potrzebuje asysty. Z tego powodu dwóch użytkowników w populacji zamodelowano jako ekipę pomocników, którzy pomogą ewakuować się za pomocą krzesła ewakuacyjnego osobie z niepełnosprawnością.

Program nie daje możliwości wprowadzenia tego przypadku wprost, dlatego należy przyjąć pewne założenia. Osobę z niepełnosprawnością można zdefiniować poprzez zadanie odpowiedniej prędkości poruszania się, rozmiaru użytkownika (również uwzględnić konieczność poruszania się na wózku) oraz zdefiniowanie pewnych zachowań (w tym potrzeby pomocy przy poruszaniu się).

Zgodnie z badaniami opisanymi we wcześniejszej części pracy (Rozdział 3), ekipa obsługująca krzesło musi najpierw udać się po krzesło ewakuacyjne na klatkę schodową, przygotować je do użycia i następnie wrócić do sali po osobę z niepełnosprawnością. Czas potrzebny na wykonanie tych etapów został zmierzony w próbach rzeczywistych i następnie zaimplementowany do modelu. Lokalizację poszczególnych miejsc w modelu przedstawia Rysunek 5.2.



Rysunek 5.2. Widok na drugie piętro w modelu ewakuacji

W badaniach w rzeczywistym budynku (Rozdział 3) otrzymano również średnie prędkości przemieszczania się poszczególnych populacji osób. Prędkości poruszania się po poziomych i pionowych odcinkach dróg ewakuacyjnych zostały zaimplementowane do modelu. Rozważono kilka przypadków, aby sprawdzić czy przyjęte założenia będą wpływać na otrzymane wyniki.

Mając pewien zakres danych z badań eksperymentalnych, do modelu wprowadzono odpowiednie wartości zgodnie z przypadkami opisanymi poniżej (Tabela 5.2. Analizowane przypadki doboru wartości wejściowych do modelu ewakuacji). Program na podstawie wbudowanych algorytmów oraz rachunku prawdopodobieństwa przyjmuje w symulacjach prędkość z zadanego zakresu, zgodnie z założoną funkcją prawdopodobieństwa. Poszczególne wartości wejściowe wraz z charakterystyką użytkowników obiektu przedstawia Tabela 5.3.

Tabela 5.2. Analizowane przypadki doboru wartości wejściowych do modelu ewakuacji

	Założona prędkość na odcinkach poziomych	Założona prędkość na schodach
Przypadek 1	Zakres wartości dla każdego profilu przyjęty zgodnie z badaniami eksperymentalnymi, rozkład normalny	Minimalna średnia prędkość otrzymana w badaniach eksperymentalnych, stała
Przypadek 2		Średnia prędkość otrzymana w badaniach eksperymentalnych, stała
Przypadek 3		Maksymalna średnia prędkość otrzymana w badaniach eksperymentalnych, stała
Przypadek 4	Zakres wartości dla każdego profilu przyjęty zgodnie z badaniami eksperymentalnymi, rozkład normalny	Przyjęta zgodnie z wartościami SFPE, zależy od nachylenia
Przypadek 5	Zakres wartości dla każdego profilu przyjęty zgodnie z badaniami eksperymentalnymi, rozkład jednostajny	Minimalna średnia prędkość otrzymana w badaniach eksperymentalnych, stała
Przypadek 6		Średnia prędkość otrzymana w badaniach eksperymentalnych, stała
Przypadek 7		Maksymalna średnia prędkość otrzymana w badaniach eksperymentalnych, stała

	Założona prędkość na odcinkach poziomych	Założona prędkość na schodach
Przypadek 8	Zakres wartości dla każdego profilu przyjęty zgodnie z badaniami eksperymentalnymi, rozkład jednostajny	Przyjęta zgodnie z wartościami SFPE, zależy od nachylenia
Przypadek 9	Minimalna średnia prędkość otrzymana w badaniach eksperymentalnych, stała	Przyjęta zgodnie z wartościami SFPE, zależy od nachylenia
Przypadek 10	Średnia prędkość otrzymana w badaniach eksperymentalnych, stała	
Przypadek 11	Maksymalna średnia prędkość otrzymana w badaniach eksperymentalnych, stała	

Tabela 5.3. Charakterystyka profili użytkowników

Profil użytkownika Parametr	Użytkownik z niepełnosprawnością ruchową ewakuowany za pomocą krzesła ewakuacyjnego	Ekipa pomocnicza	Użytkownicy pełnosprawni	Użytkownik poruszający się o kulach
Liczba użytkowników w populacji	1	2	4	1
Rozmiar użytkownika	Rozmiar krzesła: Wysokość całkowita 163 cm Szerokość 52 cm Głębokość 104 cm	Średnica 45,58 cm Wysokość 1,83 m	Średnica 45,58 cm Wysokość 1,83 m	Średnica 45,58 cm Wysokość 1,83 m
Prędkość użytkownika na odcinkach poziomych	0,98 – 2,12 m/s	0,47 – 1,48 m/s	0,47 – 1,48 m/s	0,60 – 0,84 m/s
	Stała lub zgodnie z założonym rozkładem			
Prędkość użytkownika na schodach	0,32 – 0,48 m/s	0,32 – 0,48 m/s	0,83 – 1,38 m/s	0,31 – 0,41 m/s
	Stała lub zgodnie z danymi SFPE – prędkość zależy od nachylenia			
Zachowanie użytkownika	Czekanie na pomoc ekipy pomocniczej	Pomoc osobie z niepełnosprawnością	Ewakuacja w kierunku	Ewakuacja w kierunku

Profil użytkownika Parametr	Użytkownik z niepełnosprawnością ruchową ewakuowany za pomocą krzesła ewakuacyjnego	Ekipa pomocnicza	Użytkownicy pełnosprawni	Użytkownik poruszający się o kulach
	następnie ewakuacja w kierunku wyjścia (drzwi C)	następnie ewakuacja w kierunku wyjścia (drzwi C)	wyjścia (drzwi C)	wyjścia (drzwi C)
Czas zwłoki	Zależny od czasu przygotowania przez ekipę pomocniczą	Czas przygotowania krzesła oraz przygotowania użytkownika do ewakuacji, na podstawie badań przeprowadzonych w rzeczywistym budynku	brak	brak

Założony czas zwłoki odzwierciedla potrzebę udania się ekipy pomocniczej po krzesło ewakuacyjne zlokalizowane na klatce schodowej, rozłożenie go oraz przygotowanie użytkownika do transportu – posadzenie użytkownika oraz zapięcie pasów bezpieczeństwa.

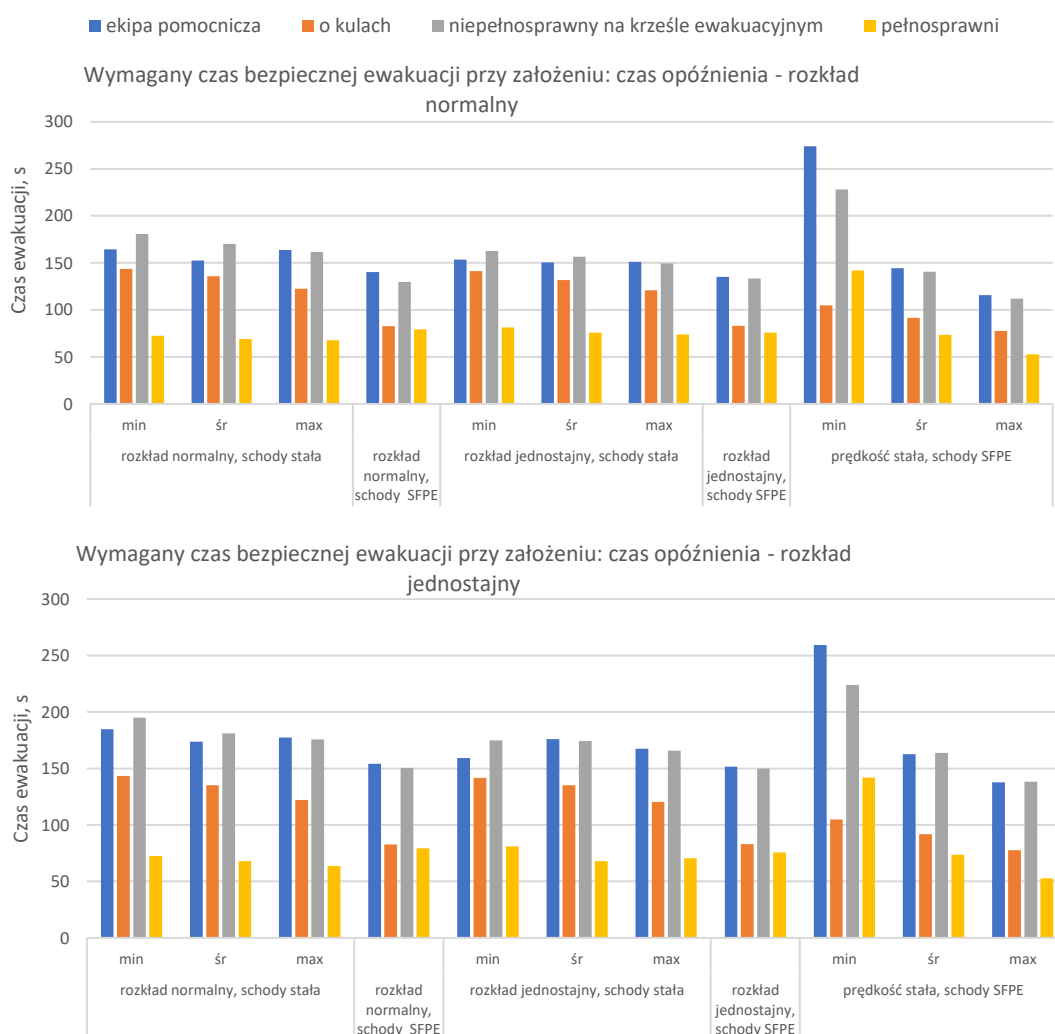
W badaniach przeprowadzonych w rzeczywistym budynku zbadano ile czasu zajmuje wykonanie powyższych czynności i dane te zostały zadane w modelu. Czas potrzebny na rozłożenie krzesła przyjęto w zakresie od 6 do 26 sekund, a czas potrzebny na przygotowanie użytkownika w zakresie od 11 do 26 sekund. Przyjęto założenie, że program dobierze wartość czasu na podstawie rozkładu jednostajnego oraz normalnego. Porównanie wyników dla obu przypadków przedstawiono w dalszej części pracy. Podsumowanie głównych założeń modelu przedstawia Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Charakterystyka modelu

Parametr	Wartość
Model przemieszczania się	Steering
Interwał aktualizacji	0,1 s
Minimalny współczynnik przepływu	0,1
Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa	rozkład jednostajny / rozkład normalny
Współczynnik redukcji w przypadku zatłoczenia	0,7

5.2. Wyniki symulacji ewakuacji

Wyniki wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji otrzymane z symulacji różnią się wzajemności od tego, jakie założenia zostały przyjęte. Wyniki symulacji przedstawia Rysunek 5.3.



Rysunek 5.3. Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji poszczególnej populacji w zależności od przyjętych założeń symulacji

Porównując wyniki symulacji dla przypadku, w którym założono rozkład jednostajny przyjmowanego czasu opóźnienia z rozkładem normalnym można zauważyć, że w większości przypadków dla różnych założeń prędkości oraz dla różnych profili użytkowników wyniki dla rozkładu normalnego są wyższe. Przypadki, w których wyniki są niższe zaznaczono kolorem (Tabela 5.5). Można zauważyć również dla profilu „o kulach” oraz „pełnosprawni”, że niezależnie od przyjętego rozkładu wyniki są jednakowe. Te przypadki w tabeli oznaczono jako „0”.

Tabela 5.5. Różnice w wynikach dla przyjętego rozkładu normalnego i jednostajnego (zachowanie)

Założony rozkład	Założona prędkość	ekipa pomocnicza	o kulach	niepełnosprawny na krześle ewakuacyjnym	pełnosprawni
rozkład normalny, schody stała	minimalna prędkość na schodach	20,5 s	0	14 s	0
	średnia prędkość na schodach	21,1 s	-0,6 s	10,9 s	-1,1 s
	maksymalna prędkość na schodach	13,8 s	-0,5 s	13,8 s	-3,9 s
rozkład normalny, schody SFPE		14,2 s	0	20,6 s	0
rozkład jednostajny, schody stała	minimalna prędkość na schodach	6 s	0,5 s	12,2 s	-0,2 s
	średnia prędkość na schodach	25,7 s	3,5 s	17,8 s	-7,9 s
	maksymalna prędkość na schodach	16,3 s	-0,5 s	16,4 s	-3,5 s
rozkład jednostajny, schody SFPE		16,4 s	0	16,4 s	-0,1 s
prędkość stała, schody SFPE	minimalna prędkość na korytarzu	-14,7 s	0	-4,4 s	0
	średnia prędkość na korytarzu	18,4 s	0	23,1 s	0
	maksymalna prędkość na korytarzu	21,9 s	0	26,3 s	0

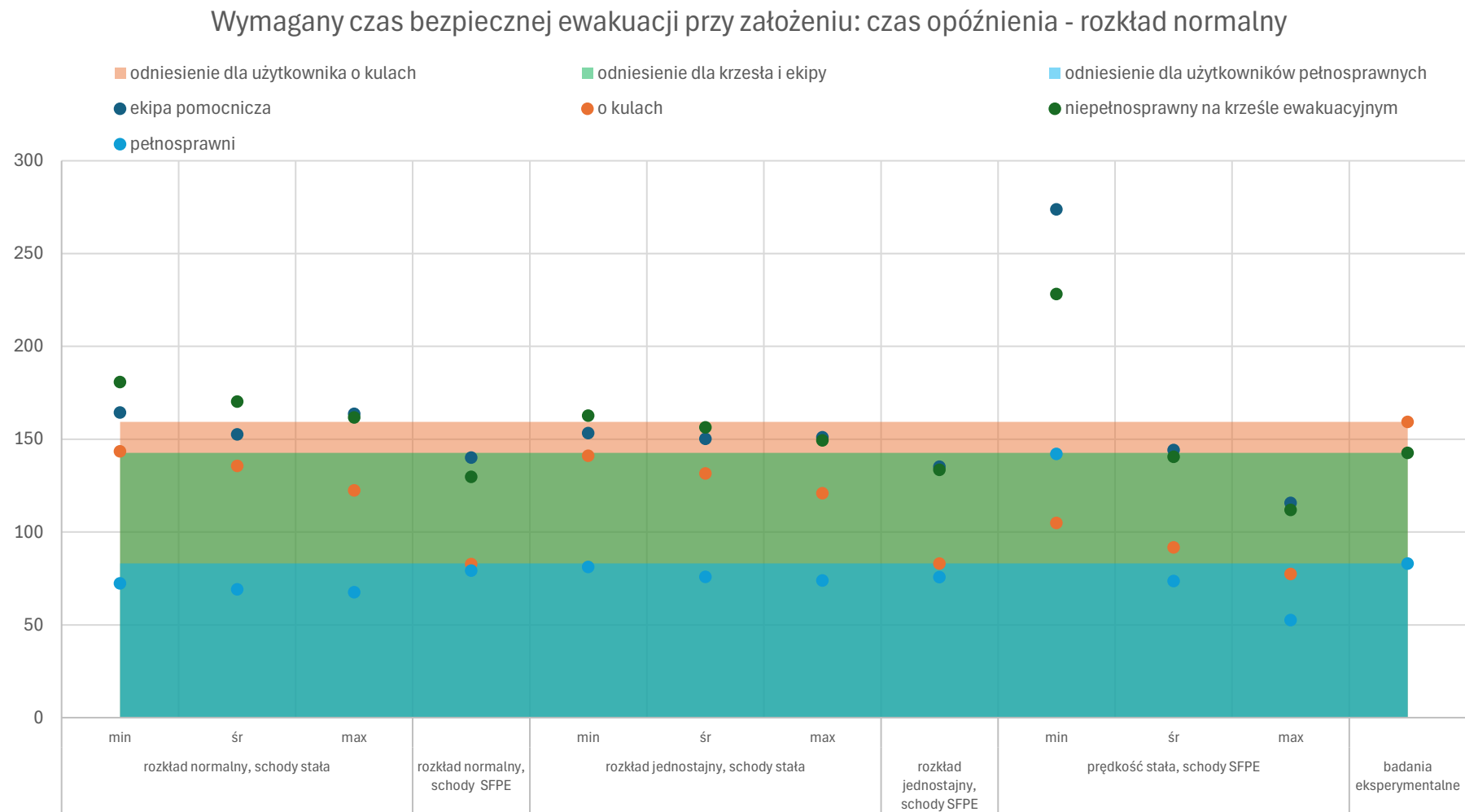
Wyniki otrzymane z symulacji porównano również z danymi eksperymentalnymi. Porównanie wyników dla każdego analizowanego przypadku przedstawia Rysunek 5.4 dla przyjętego rozkładu normalnego czasu opóźnienia oraz Rysunek 5.5 dla rozkładu jednostajnego.

Tabela 5.6. Wartości procentowe różnicy w wynikach względem wyników eksperymentalnych

	rozkład jednostajny dla czasu opóźnienia										
	rozkład normalny, schody stała			rozkład normalny, schody SFPE	rozkład jednostajny, schody stała			rozkład jednostajny, schody SFPE	prędkość stała, schody SFPE		
	min	śr	max		min	śr	max		min	śr	max
ekipa pomocnicza	30	22	24	8	12	23	17	6	82	14	-3
o kulach	-10	-15	-23	-48	-11	-15	-24	-48	-34	-42	-51
niepełnosprawny na krześle ewakuacyjnym	37	27	23	5	23	22	16	5	57	15	-3
pełnosprawni	-13	-18	-23	-5	-3	-18	-15	-9	71	-11	-37
	rozkład normalny dla czasu opóźnienia										
	rozkład normalny, schody stała			rozkład normalny, schody SFPE	rozkład jednostajny, schody stała			rozkład jednostajny, schody SFPE	prędkość stała, schody SFPE		
	min	śr	max		min	śr	max		min	śr	max
ekipa pomocnicza	15	7	15	-2	8	5	6	-5	92	1	-19
o kulach	-10	-15	-23	-48	-11	-17	-24	-48	-34	-42	-51
niepełnosprawny na krześle ewakuacyjnym	27	19	13	-9	14	10	5	-6	60	-1	-22
pełnosprawni	-13	-17	-19	-5	-2	-9	-11	-9	71	-11	-37

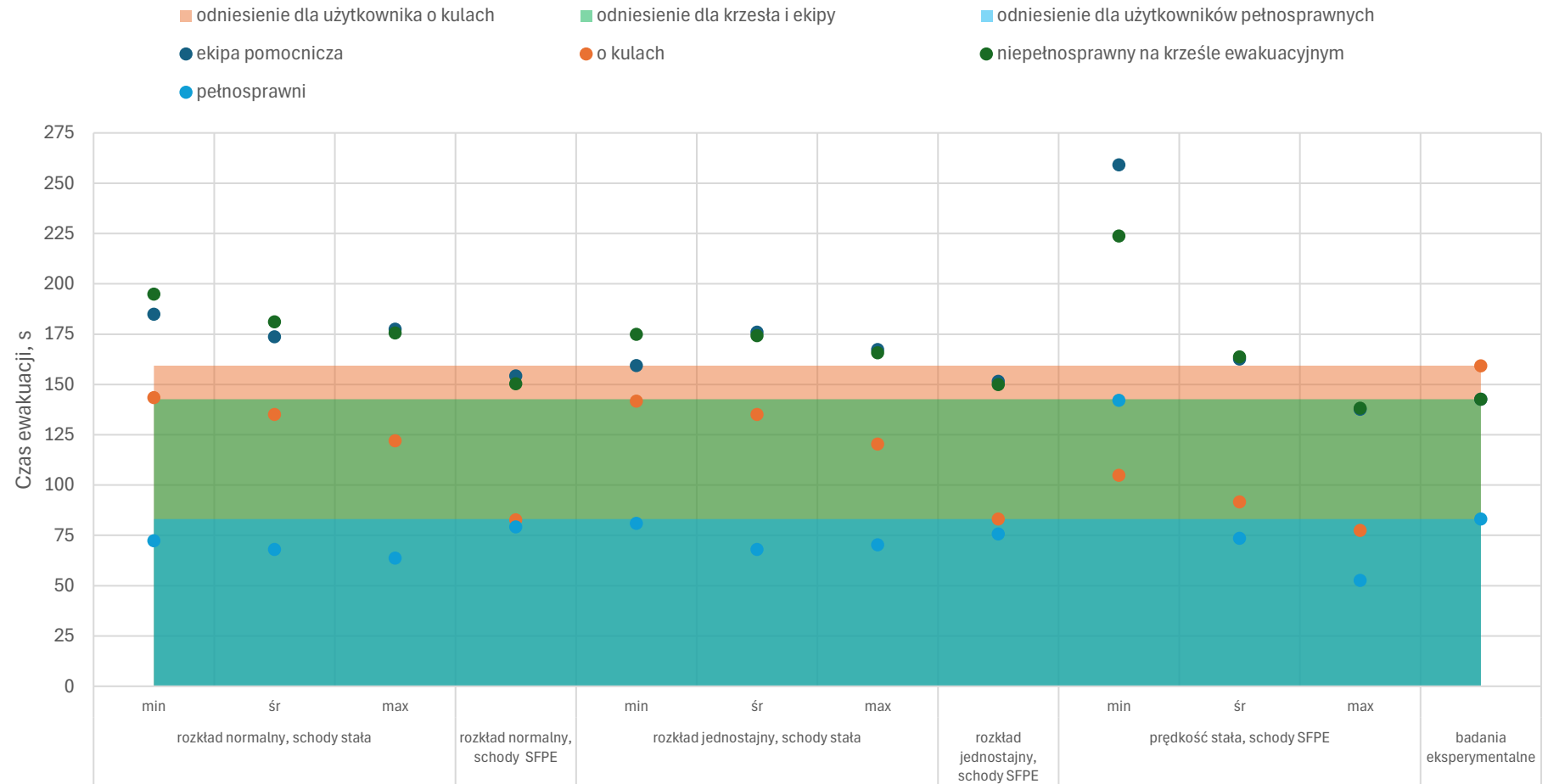
W powyższej tabeli można zauważyć, że program zaniżył WCBE osoby poruszającej się o kulach. Wartości z symulacji są w każdym przypadku niższe, niż średnia wartość otrzymana z badań eksperymentalnych. Oznacza to, że program zbyt optymistycznie szacuje czas potrzebny temu użytkownikowi do ewakuacji. Maksymalna odchyłka względem wartości eksperymentalnych wynosi 48%. Podobnie kształtują się wyniki dla populacji osób pełnosprawnych. W tym przypadku również wartości otrzymane z symulacji są niższe, czyli osoby te szybciej się ewakuują niż ma to miejsce w rzeczywistości. W przypadku tej populacji różnice nie są już tak duże, maksymalnie różnią się o 37%. Natomiast w jednym przypadku można zauważyć znaczne niedoszacowanie wartości, tutaj czas w symulacji jest

o 71% wyższy niż w rzeczywistości – może to wynikać z faktu, że w tym przypadku przyjęto minimalną prędkość poruszania się na odcinkach poziomych.



Rysunek 5.4. Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji w zależności od przyjętych założeń symulacji – rozkład normalny czasu opóźnienia

Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji przy założeniu: czas opóźnienia - rozkład jednostajny



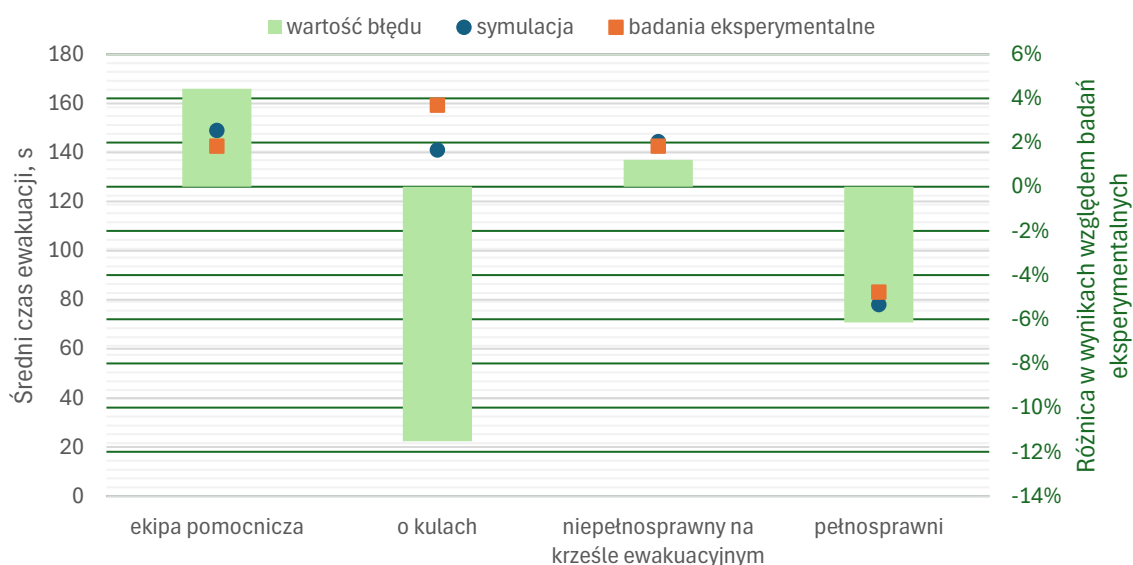
Rysunek 5.5. Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji w zależności od przyjętych założeń symulacji – rozkład jednostajny czasu opóźnienia

Analizując wyniki wywnioskowano, że najlepsze odwzorowanie warunków rzeczywistych dla poszczególnych populacji wygląda następująco:

- Populacja osób pełnosprawnych – przypadek, w którym założono rozkład jednostajny dla prędkości na korytarzu oraz minimalną prędkość na schodach, rozkład normalny dla czasu opóźnienia – różnica w wynikach wynosi 2%.
- Użytkownik poruszający się o kulach – przypadek, w którym założono rozkład normalny dla prędkości na korytarzu oraz minimalną prędkość na schodach, niezależnie od przyjętego rozkładu dla czasu opóźnienia różnica w wynikach wynosi 10%.
- Ekipa pomocnicza/osoba transportowana za pomocą krzesła – przypadek, w którym założono stałą średnią prędkość na korytarzu oraz prędkość na schodach zależną od nachylenia, zgodnie z danymi SFPE, rozkład normalny dla czasu opóźnienia – różnica w wynikach wynosi 1%.

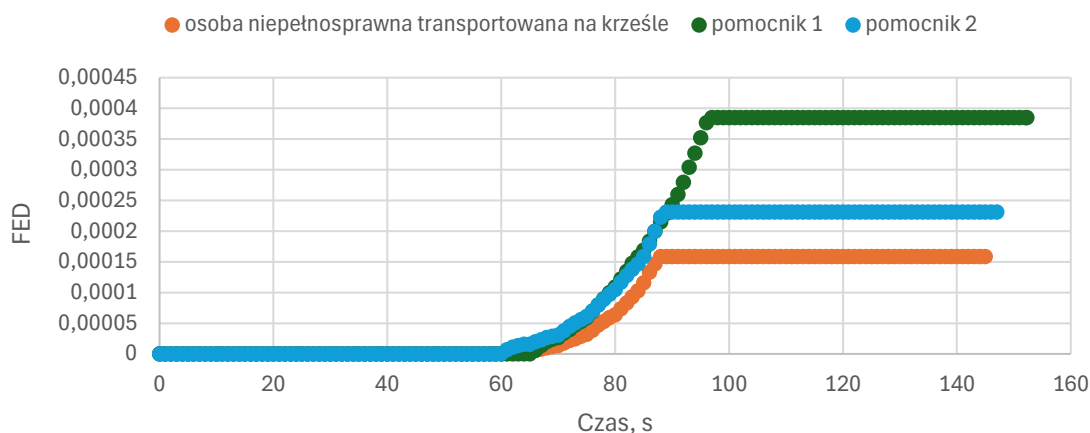
Na podstawie tej analizy sporządzono symulację łączącą wszystkie te przypadki, które najlepiej odwzorowują rzeczywistość. Otrzymano następujące wyniki (Rysunek 5.6).

Wyniki otrzymane z symulacji porównano z wynikami otrzymanymi z badań eksperymentalnych. Różnice w wynikach przedstawiono za pomocą słupków. W przypadku ekipy pomocniczej oraz osoby transportowanej za pomocą krzesła różnica w wynikach wynosi odpowiednio 4,4% oraz 1,2%. W przypadku osoby poruszającej się o kulach uzyskany WCBE jest krótszy o ok. 11,5% niż czas otrzymany w badaniach eksperymentalnych. Podobnie w przypadku populacji osób pełnosprawnych, gdzie różnica wynosi ok. 6,1%.



Rysunek 5.6. Wyniki symulacji względem badań eksperymentalnych

Do modelu zaimportowano dane z FDS, dzięki czemu program oszacował FED dla użytkowników. FED dla tych użytkowników przedstawia Rysunek 5.7.



Rysunek 5.7. FED w czasie

Zgodnie z otrzymanymi wynikami zarówno populacja osób pełnosprawnych jak i użytkownik poruszający się o kulach opuszczają niebezpieczną strefę zanim następuje narażenie. Osoby narażone na działanie szkodliwych czynników to osoba z niepełnosprawnością, która oczekuje na ekipę pomocniczą oraz osoby w ekipie pomocniczej (pomocnik 1 oraz pomocnik 2).

5.3. Wnioski z przeprowadzonych symulacji ewakuacji

Na podstawie analiz opisanych w niniejszym rozdziale można wysunąć kilka wniosków. Modelowanie ewakuacji, pomimo usilnych prób jak najlepszego odwzorowania warunków rzeczywistych, zawsze będzie procesem opartym na przyjęciu pewnych założeń oraz uproszczeń. Ze względu na możliwość przyjęcia w modelu różnych rozkładów prawdopodobieństwa prędkości oraz innych parametrów, wprowadzenie danych z badań eksperymentalnych wprost, nie gwarantuje uzyskania pożądanych wyników. Model opracowany w badaniach został poddany walidacji, dzięki czemu opracowano optymalne założenie, które najlepiej, spośród przytoczonych przypadków, odwzorowało rzeczywiste czasy ewakuacji z budynku. Najlepsze odwzorowanie warunków rzeczywistych dla poszczególnych populacji uzyskano przyjmując następujące założenia:

- rozkład jednostajny dla prędkości na korytarzu oraz minimalną prędkość na schodach, rozkład normalny dla czasu opóźnienia – dla populacji osób w pełni sprawnych,
- rozkład normalny dla prędkości na korytarzu oraz minimalną prędkość na schodach, niezależnie od przyjętego rozkładu dla czasu opóźnienia – dla użytkownika poruszającego się o kulach,

- stałą średnią prędkość na korytarzu oraz prędkość na schodach zależną od nachylenia, zgodnie z danymi SFPE, rozkład normalny dla czasu opóźnienia – dla ekipa pomocniczej oraz osoby transportowanej za pomocą krzesła ewakuacyjnego.

Różnice między czasem ewakuacji poszczególnych populacji względem badań eksperymentalnych przyjmują wartości w zakresie od 1,2% do 11,5%. Najlepsze odwzorowanie uzyskano dla użytkownika ewakuowanego za pomocą krzesła ewakuacyjnego.

Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji (WCBE) otrzymany z analiz symulacyjnych wynosi odpowiednio 78 sekundy dla populacji osób pełnosprawnych (P), 141 sekundy dla osoby poruszającej się o kulach (K) oraz 144 sekundy dla osoby transportowanej za pomocą krzesła ewakuacyjnego (KE).

WCBE otrzymany w badaniach eksperymentalnych wynosi odpowiednio – 83 sekundy (P), 159 sekund (K) oraz 143 sekundy (KE).

Analizując narażenie użytkowników na niekorzystne oddziaływanie niebezpiecznych substancji obecnych w powietrzu – za pomocą parametru FED, zauważono, że najbardziej narażone są osoby pozostające najdłużej w niebezpiecznym otoczeniu. Jest nią osoba z niepełnosprawnością, która oczekuje za pomoc oraz osoby w ekipie pomocniczej, które muszą wrócić się do pomieszczenia objętego pożarem. Zastosowanie krzesła z jednej strony usprawnia proces ewakuacji osoby z niepełnosprawnościami, z drugiej strony znów osoby obsługujące je są narażone na działanie szkodliwych czynników.

Na podstawie powyższego należałoby zastanowić się, czy nie lepszym rozwiązaniem byłoby przetransportowanie osoby z niepełnosprawnością bliżej klatki schodowej, gdzie zlokalizowane jest krzesło ewakuacyjne, zamiast oczekiwania w pomieszczeniu w którym rozwija się pożar. Autorka pracy pozostawia ten scenariusz do dalszego rozważenia w przyszłości.

Rozdział 6. Wnioski końcowe

Autorka w ramach swoich badań do oceny potencjalnych warunków na drogach ewakuacyjnych wykorzystała narzędzie numerycznej mechaniki płynów. Wykonanie symulacji rozwoju pożaru pozwoliło określić potencjalne narażenie użytkowników budynku na niebezpieczne warunki, prześledzić rozwój pożaru, oszacować w jaki sposób zanieczyszczenia przemieszczają się w budynku oraz czy zagrażają one bezpośrednio osobom ewakuującym się z budynku, z uwzględnieniem dłuższego czasu ewakuacji spowodowanego wolniejszym przemieszczaniem się osób z niepełnosprawnościami.

Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych zauważono, że w większości przypadków stężenia niebezpiecznych substancji na wysokości pomiaru 1,1 m – odpowiadającej wysokości osoby transportowanej na krześle ewakuacyjnym są niższe niż dla pomiaru na wysokości 1,8 m. Ta obserwacja pozwala stwierdzić, że zastosowanie krzesła ma swoje uzasadnienie. Narażenie osoby transportowanej za pomocą krzesła ewakuacyjnego może być niższe, gdyż osoba ta będąc w pozycji siedzącej znajduje się nieco niżej osoby poruszającej się w pozycji pionowej. Dodatkowo, osoba poruszająca się samodzielnie za pomocą kul, przemieszcza się wolniej, a wyprostowana postawa może sprawić, że szybciej znajdzie się ona w strefie niebezpiecznej (wysokość strefy wolnej od dymu maleje w czasie).

Należy jednak pamiętać, że bezpieczeństwo osoby transportowanej za pomocą krzesła ewakuacyjnego jest uzależnione od bezpieczeństwa osób obsługujących krzesło ewakuacyjne.

Wyniki badań potwierdzają postawioną hipotezę, że wykorzystując narzędzia numeryczne do analizy rozwoju pożaru można ocenić stan środowiska, czyli oszacować jakie warunki mogą wystąpić na drogach ewakuacyjnych podczas pożaru. Równocześnie badania potwierdziły postawioną hipotezę, że w zależności od pozycji w jakiej poruszają się osoby, może być różne ich narażenie na niebezpieczne warunki podczas pożaru.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury autorka stwierdza, że stan wiedzy na temat ewakuacji osób z niepełnosprawnościami jest obszerny, natomiast istnieją obszary, które wymagają większej ilości informacji. Podchodząc do tematu kompleksowo, autorka wskazała główne wyzwania jakie niosą za sobą zmiany w przepisach, w sprawie obowiązku zapewnienia bezpiecznej ewakuacji wszystkim osobom znajdującym się w budynku. Autorka dokonała porównania dostępnych rozwiązań wspomagających proces ewakuacji, opisanych przez różnych badaczy. Na podstawie wykonanej oceny, do badań eksperymentalnych wybrała jedno rozwiązanie, które uznała za najbardziej optymalne w danych warunkach.

Przeprowadzenie badań ewakuacji na przykładzie wybranego obiektu pozwoliło wskazać pewne ogólne problemy związane z organizacją ewakuacji osób z niepełnosprawnościami oraz możliwość narażenia na niebezpieczne warunki środowiskowe występujące podczas pożaru, w zależności od sposobu przemieszczania się.

Autorka pracy przeprowadziła badania empiryczne ewakuacji osób z udziałem osoby o ograniczonej możliwości samodzielnego poruszania się. Badania zostały wzbogacone dodatkowo o zastosowanie w procesie ewakuacji krzesła ewakuacyjnego, w celu sprawdzenia czy rozwiązanie to usprawni proces ewakuacji.

Na podstawie przeglądu literatury stwierdza się, że ewakuacja w której uczestniczą osoby z niepełnosprawnościami przebiega inaczej niż w przypadku ewakuacji osób w pełni sprawnych. Ograniczenia związane z brakiem możliwości samodzielnego poruszania się lub poruszania się z pewnymi ograniczeniami powoduje konieczność zapewnienia pomocy tym osobom. Osoby z niepełnosprawnościami często zdane są na pomoc innych osób, o ile poruszają się samodzielnie to zazwyczaj znacznie wolniej lub zmuszone są, aby poczekać na pomoc. Badania empiryczne przeprowadzone w ramach tej pracy również wskazały, że ewakuacja osoby z ograniczoną możliwością poruszania się trwa najdłużej.

Obecność osób z niepełnosprawnościami wpływa na proces ewakuacji w taki sposób, że ewakuacja przebiega wolniej oraz należy udzielić pomocy tym osobom, co wymaga dodatkowej organizacji.

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz przeglądu literatury można stwierdzić, że istnieją rozwiązania techniczne mające na celu usprawnienie procesu ewakuacji osób z niepełnosprawnościami. Przeprowadzone badania potwierdzają konieczność zapewnienia skutecznych metod pomocy przy ewakuacji osobom, które szczególnie tego potrzebują.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono, że zastosowanie krzesła ewakuacyjnego w procesie ewakuacji z budynku osoby z niepełnosprawnością jest rozwiązaniem lepszym niż samodzielna ewakuacja tej osoby z pomocą kul. Proces ewakuacji z zastosowaniem krzesła ewakuacyjnego względem próby, w której osoba porusza się o kulach, został usprawniony, co najlepiej obrazują średnie prędkości poruszania się. W zależności od klatki schodowej, prędkość poruszania się z wykorzystaniem krzesła ewakuacyjnego jest wyższa o niecałe 17% na K1 oraz o prawie 50% na klatce K2. Również w przypadku poruszania się po korytarzu, średnia prędkość poruszania się krzesła ewakuacyjnego jest wyższa niż osoby poruszającej się o kulach o prawie 42%, dlatego w tym wypadku zastosowanie krzesła ewakuacyjnego jest zasadne. Tym samym potwierdzono hipotezę, że istnieją środki techniczne wspomagające proces ewakuacji, które pomagają zapewnić bezpieczną ewakuację osobom z niepełnosprawnościami.

Dzięki przeprowadzonym badaniom eksperymentalnym sprawdzono prędkość ewakuacji osób z niepełnosprawnościami, z uwzględnieniem różnych sposobów przemieszczania się tych osób. Wyznaczona prędkość poruszania się po płaskich odcinkach dróg populacji osób pełnosprawnych otrzymana z badań wynosi 1,09 m/s; prędkość poruszania się krzesła ewakuacyjnego 1,20 m/s; a prędkość osoby poruszającej się o kulach 0,70 m/s. Dla ewakuacji po schodach prędkość poruszania się populacji pełnosprawnej mieści się w zakresie od 0,98 do 1,08 m/s; prędkość poruszania się krzesła ewakuacyjnego od 0,42 m/s do 0,54 m/s; natomiast prędkość osoby poruszającej się o kulach w przedziale od 0,27 do 0,35 m/s. Takie wartości wprowadzono do programu symulacji ewakuacji.

Badania empiryczne na wybranej grupie osób przeprowadzono w celu wyznaczenia konkretnych parametrów co pozwoliło zbudować bazę danych, która następnie może być wykorzystana w programach symulacyjnych m.in. w celu oszacowania czasu ewakuacji.

Autorka pracy wskazała możliwość implementacji danych otrzymanych w przeprowadzonych przez siebie badaniach empirycznych do komercyjnego programu symulacyjnego, co pozwala uwzględnić w modelu symulacyjnym różne populacje użytkowników budynku, w tym również osoby z niepełnosprawnością.

Na podstawie analizy dostępnych programów autorka wskazała, że istnieje możliwość modelowania ewakuacji również z uwzględnieniem osób z niepełnosprawnościami. W zależności od programu, użytkownik może w większy lub mniejszy sposób modyfikować parametry programu. Narzędzie, które wybrano do analiz pozwala na wprowadzenie heterogenicznej populacji dzięki możliwości zdefiniowania indywidualnych profili użytkowników – zarówno pod kątem prędkości poruszania się, a także podejmowanych zachowań. Autorka modyfikując ustawienia programu sprawdziła w jaki sposób zadane parametry wpływają na wynik symulacji.

Wyniki symulacji porównano z wynikami rzeczywistych prób. Stwierdzono, że najlepsze odwzorowanie wyników uzyskano dla osoby transportowanej za pomocą krzesła ewakuacyjnego – dla tego przypadku różnice w wynikach wynoszą 1,2%. Dla pozostałych populacji wynoszą 4,4% (ekipa pomocnicza), 6,1% (populacja osób w pełni sprawnych) oraz 11,5% (użytkownik poruszający się o kulach).

Narzędzie komercyjne, przy odpowiednim doborze parametrów symulacji oraz wprowadzeniu danych wejściowych, daje możliwość symulacji ewakuacji osoby z niepełnosprawnością uzyskując przy tym wyniki na zadowalającym poziomie zbieżności z wynikami badań empirycznych, co potwierdza czwartą hipotezę badawczą.

Podstawowym kryterium oceny bezpieczeństwa osób jest sprawdzenie czy wymagany czas bezpiecznej ewakuacji jest wystarczający, aby wszystkie osoby narażone zdążyły się

bezpiecznie ewakuować ze strefy niebezpiecznej. W tym celu można porównać WCBE oraz DCBE.

Zestawienie danych pochodzących z analiz numerycznych rozwoju pożaru oraz z symulacji ewakuacji umożliwiło porównanie jakie warunki panują na drogach ewakuacyjnych oraz jak przebiega proces ewakuacji w czasie. Dzięki temu porównano WCBE oraz DCBE, czyli stan środowiska oraz czas potrzebny na ewakuację, co pozwala bezpośrednio wyciągnąć wnioski na temat bezpieczeństwa użytkowników budynku. Wyniki otrzymanych analiz wskazują, że wszystkie osoby narażone zdążą się ewakuować ze strefy niebezpiecznej zanim nastąpi pogorszenie warunków.

Autorka pracy osiągnęła założone cele i głęboko wierzy, że przedstawiony problem oraz otrzymane wyniki wypełnią lukę badawczą, a tym samym przyczynią się do poprawy sytuacji związanej z opracowaniem rozwiązań gwarantujących osobom ze szczególnymi potrzebami możliwość ewakuacji w sposób bezpieczny, na równi z osobami w pełni sprawnymi.

Bibliografia

- [1] Dz.U. 2023 poz. 822, ‘Obwieszczenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 21 marca 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów’.
- [2] Dz.U. 2019 poz. 1696, ‘Ustawa z dnia 19 lipca 2019 r. o zapewnianiu dostępności osobom ze szczególnymi potrzebami’.
- [3] ‘Informacja o sytuacji osób starszych w Polsce za 2023 r.’ Minister ds Polityki Senioralnej, 2024.
- [4] ‘pożar, informacje z Encyklopedii PWN’. Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: <https://encyklopedia.pwn.pl/szukaj/po%C5%BCar.html>
- [5] Dz.U. 2022 poz. 1225, ‘Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie’.
- [6] Dz.U. 2024 poz. 725, ‘Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 21 marca 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo budowlane’.
- [7] Dz.U. 2022 poz. 1679, ‘Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 11 września 2020 r. w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego’.
- [8] Dz.U. 2023 poz. 1563, ‘Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 5 sierpnia 2023 r. w sprawie uzgadniania projektu zagospodarowania działki lub terenu, projektu architektoniczno-budowlanego, projektu technicznego oraz projektu urządzenia przeciwpożarowego pod względem zgodności z wymaganiami ochrony przeciwpożarowej’.
- [9] J. J. Fruin, *Pedestrian Planning and Design*. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971.
- [10] V. M. Predtechenskii and A. I. Milinskii, *Planning for Foot Traffic Flow in Buildings*. in TT. Amerind, 1978.
- [11] Z.-M. Fang *et al.*, ‘Experimental study on evacuation process in a stairwell of a high-rise building’, *Building and Environment*, vol. 47, pp. 316–321, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.009.
- [12] M. Kobes, I. Helsloot, B. de Vries, and J. G. Post, ‘Building safety and human behaviour in fire: A literature review’, *Fire Safety Journal*, vol. 45, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.firesaf.2009.08.005.
- [13] E. D. Kuligowski *et al.*, ‘Movement on Stairs During Building Evacuations’, National Institute of Standards and Technology, NIST TN 1839, Sep. 2014. doi: 10.6028/NIST.TN.1839.
- [14] J. Bryan, ‘A selected historical review of human behaviour in fire’, *Fire Protection Engineering*, vol. 16, Fall, 1 Oct 2002, pp. 6–13, Oct. 2002.
- [15] R. D. Peacock, B. L. Hoskins, and E. D. Kuligowski, ‘Overall and local movement speeds during fire drill evacuations in buildings up to 31 stories’, *Safety Science*, vol. 50, no. 8, pp. 1655–1664, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.ssci.2012.01.003.
- [16] C. M. Zhao, S. M. Lo, S. P. Zhang, and M. Liu, ‘A Post-fire Survey on the Pre-evacuation Human Behavior’, *Fire Technol*, vol. 45, no. 1, pp. 71–95, Mar. 2009, doi: 10.1007/s10694-007-0040-6.

- [17] M. Forssberg, J. Kjellström, H. Frantzich, A. Mossberg, and D. Nilsson, 'The Variation of Pre-movement Time in Building Evacuation', *Fire Technol*, vol. 55, no. 6, pp. 2491–2513, Nov. 2019, doi: 10.1007/s10694-019-00881-1.
- [18] M. Cisek and I. Orłowska, 'Alarming and warning model for improving the effectiveness of sequential evacuation from high-rise buildings', *ZN SGSP*, vol. 2, no. 90, pp. 23–44, Sep. 2024, doi: 10.5604/01.3001.0054.7281.
- [19] J. L. Bryan, *A Study of the Survivors Reports on the Panic in the Fire at the Arundel Park Hall in Brooklyn, Maryland on January 29, 1956*. University of Maryland, 1957.
- [20] P. G. Wood, 'The behaviour of people in fire', *Fire Safety Science*, vol. 953, 1972.
- [21] J. D. Sime, 'Affiliative behaviour during escape to building exits', *Journal of Environmental Psychology*, vol. 3, no. 1, pp. 21–41, 1983, doi: [https://doi.org/10.1016/S0272-4944\(83\)80019-X](https://doi.org/10.1016/S0272-4944(83)80019-X).
- [22] J. L. Bryan, 'Behavioral response to fire and smoke', *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, pp. 3315–3341, Jan. 2002.
- [23] R. F. Fahy, G. Proulx, and L. Aiman, 'Panic or not in fire: Clarifying the misconception', *Fire and Materials*, vol. 36, no. 5–6, pp. 328–338, 2012, doi: <https://doi.org/10.1002/fam.1083>.
- [24] R. F. Fahy and G. Proulx, 'Toward creating a database on delay times to start evacuation and walking speeds for use in evacuation modeling', in 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire: 26 March 2001, Boston, MA., U.S.A. Mar. 2001, pp. 175–183.
- [25] D. Nilsson and A. Johansson, 'Social influence during the initial phase of a fire evacuation—Analysis of evacuation experiments in a cinema theatre', *Fire Safety Journal*, vol. 44, no. 1, pp. 71–79, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.firesaf.2008.03.008.
- [26] G. Proulx, 'Evacuation time and movement in apartment buildings', *Fire Safety Journal*, vol. 24, no. 3, pp. 229–246, Jan. 1995, doi: 10.1016/0379-7112(95)00023-M.
- [27] M. Haghani and M. Sarvi, 'Crowd behaviour and motion: Empirical methods', *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 107, pp. 253–294, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.trb.2017.06.017.
- [28] Y. Liu, J. Yu, Q. Yin, C. Sun, and A. Sun, 'Impacts of human factors on evacuation performance in university gymnasiums', *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 582, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.physa.2021.126236.
- [29] A. Chen, J. He, M. Liang, and G. Su, 'Crowd response considering herd effect and exit familiarity under emergent occasions: A case study of an evacuation drill experiment', *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 556, p. 124654, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.physa.2020.124654.
- [30] T. J. Shields and K. E. Boyce, 'A study of evacuation from large retail stores', *Fire Safety Journal*, vol. 35, no. 1, pp. 25–49, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(00\)00013-8](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(00)00013-8).
- [31] M. Kubicki and H. Park, 'A New Method for Quantifying Exit Usage', *Fire Technology*, vol. 59, no. 5, pp. 2179–2187, Sep. 2023, doi: 10.1007/s10694-023-01451-2.
- [32] H. E. K. Dessy Syarlianti Himasari Hanan and L. Tambunan, 'Experience with the circulation path as a determinant factor in evacuation exit selection', *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 1878–1888, 2023, doi: 10.1080/13467581.2022.2145213.

- [33] M. Kinateder, B. Comunale, and W. H. Warren, 'Exit choice in an emergency evacuation scenario is influenced by exit familiarity and neighbor behavior', *Safety Science*, vol. 106, pp. 170–175, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2018.03.015.
- [34] M. Hassanain, 'On the challenges of evacuation and rescue operations in high-rise buildings', *Structural Survey*, vol. 27, pp. 109–118, May 2009, doi: 10.1108/02630800910956443.
- [35] S. Heliövaara, J.-M. Kuusinen, T. Rinne, T. Korhonen, and H. Ehtamo, 'Pedestrian behavior and exit selection in evacuation of a corridor – An experimental study', *Safety Science*, vol. 50, no. 2, pp. 221–227, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.ssci.2011.08.020.
- [36] L. Shi, Q. Xie, X. Cheng, L. Chen, Y. Zhou, and R. Zhang, 'Developing a database for emergency evacuation model', *Building and Environment*, vol. 44, no. 8, pp. 1724–1729, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.11.008.
- [37] M. J. Hurley *et al.*, Eds., *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. New York, NY: Springer New York, 2016. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
- [38] R. Lovreglio, E. Kuligowski, S. Gwynne, and K. Boyce, 'A pre-evacuation database for use in egress simulations', *Fire Safety Journal*, vol. 105, pp. 107–128, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2018.12.009.
- [39] M. Tancogne-Dejean and P. Laclémence, 'Fire risk perception and building evacuation by vulnerable persons: Points of view of laypersons, fire victims and experts', *Fire Safety Journal*, vol. 80, pp. 9–19, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.firesaf.2015.11.009.
- [40] K. Boyce, 'Safe evacuation for all - Fact or Fantasy? Past experiences, current understanding and future challenges', *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 28–40, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.05.004.
- [41] E. Smedberg, G. Carlsson, G. Gefenaite, B. Slaug, S. M. Schmidt, and E. Ronchi, 'Perspectives on egressibility of older people with functional limitations', *Fire Safety Journal*, vol. 127, p. 103509, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103509.
- [42] M. S. Sharifi, D. Stuart, K. Christensen, A. Chen, Y. S. Kim, and Y. Chen, 'Analysis of Walking Speeds Involving Individuals with Disabilities in Different Indoor Walking Environments', *J. Urban Plann. Dev.*, vol. 142, no. 1, p. 04015010, Mar. 2016, doi: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000288.
- [43] K. E. Boyce, T. J. Shields, and G. W. H. Silcock, 'Toward the Characterization of Building Occupancies for Fire Safety Engineering: Capabilities of Disabled People Moving Horizontally and on an Incline', *Fire Technology*, vol. 35, no. 1, p. 17, 1999.
- [44] Karolina Szulc, Marcin Cisek, and Małgorzata Król, 'Evaluation of the Evacuation of People with Disabilities, Using an Evacuation Chair. Research Report', *SAFETY & FIRE TECHNOLOGY*, vol. 60, no. 2, pp. 42–59, Dec. 2022, doi: 10.12845/sft.60.2.2022.2.
- [45] K. M. Christensen, S. D. Collins, J. M. Holt, and C. N. Phillips, 'The Relationship Between the Design of the Built Environment and the Ability to Egress of Individuals with Disabilities', *Review of Disability Studies: An International Journal*, vol. 2, no. 3, Art. no. 3, 2006, Accessed: Oct. 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.rdsjournal.org>
- [46] C. S. Jiang, S. Z. Zheng, F. Yuan, H. J. Jia, Z. N. Zhan, and J. J. Wang, 'Experimental assessment on the moving capabilities of mobility-impaired disabled', *Safety Science*, vol. 50, no. 4, pp. 974–985, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.ssci.2011.12.023.
- [47] E. Kuligowski, R. Peacock, E. Wiess, and B. Hoskins, 'Stair evacuation of older adults and people with mobility impairments', *Fire Safety Journal*, vol. 62, pp. 230–237, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.firesaf.2013.09.027.

- [48] E. Kuligowski, R. Peacock, E. Wiess, and B. Hoskins, 'Stair evacuation of people with mobility impairments: STAIR EVACUATION OF PEOPLE WITH MOBILITY IMPAIRMENTS', *Fire Mater.*, vol. 39, no. 4, pp. 371–384, Jun. 2015, doi: 10.1002/fam.2247.
- [49] M. Hashemi, 'Emergency evacuation of people with disabilities: A survey of drills, simulations, and accessibility', *Cogent Engineering*, vol. 5, no. 1, p. 1506304, Jan. 2018, doi: 10.1080/23311916.2018.1506304.
- [50] World Health Organization and World Bank, 'World report on disability 2011'. World Health Organization, p. Summary also available in Braille, 2011.
- [51] W. CMS, 'Dane demograficzne - Biuro Pełnomocnika Rządu do Spraw Osób Niepełnosprawnych'. Accessed: May 19, 2023. [Online]. Available: <https://niepelnosprawni.gov.pl/index.php?c=page&id=78&v=1684504537>
- [52] K. M. Christensen, S. D. Collins, J. M. Holt, and C. N. Phillips, 'The Relationship Between the Design of the Built Environment and the Ability to Egress of Individuals with Disabilities', *RDS*, vol. 2, no. 3, 2006.
- [53] P. Geoerg, F. Berchtold, S. Gwynne, K. Boyce, S. Holl, and A. Hofmann, 'Engineering egress data considering pedestrians with reduced mobility', *Fire and Materials*, vol. 43, no. 7, pp. 759–781, Nov. 2019, doi: 10.1002/fam.2736.
- [54] S. M. Gwynne and K. E. Boyce, 'Engineering data', *SFPE handbook of fire protection engineering*, pp. 2429–2551, 2016.
- [55] J. D. Averill *et al.*, 'Occupant Behavior, Egress, and Emergency Communications (Draft)'.
- [56] C. C. K. Cheng, A. Y. T. Leung, K. M. Lam, F. N. Demirbilek, and B. J. Williamson, 'A Cfd Study of Hong Kong Refuge Floor Design: Floor Height Effect', *Eng. Appl. Comp. Fluid Mech.*, vol. 4, no. 3, pp. 425–433, Sep. 2010, doi: 10.1080/19942060.2010.11015329.
- [57] C. L. Chow and W. K. Chow, 'Fire safety aspects of refuge floors in supertall buildings with computational fluid dynamics', *Journal Of Civil Engineering And Management*, vol. 15, no. 3, pp. 225–236, Jun. 2009, doi: 10.3846/1392-3730.2009.15.225-236.
- [58] B. Branowski, M. Zabłocki, and P. Pohl, 'Wybrane zagadnienia koncepcyjne i konstrukcyjne budowy urządzeń do ewakuacji osób niepełnosprawnych z wysokich budynków', *Ergonomia Niepełnosprawnym*, p. 49, 2011.
- [59] A. Hunt, E. R. Galea, and P. J. Lawrence, 'An analysis and numerical simulation of the performance of trained hospital staff using movement assist devices to evacuate people with reduced mobility: MOVEMENT ASSIST DEVICES TO EVACUATE PRM', *Fire Mater.*, vol. 39, no. 4, pp. 407–429, Jun. 2015, doi: 10.1002/fam.2215.
- [60] S. A. Lavender, G. E. Hedman, J. P. Mehta, P. A. Reichelt, K. M. Conrad, and S. Park, 'Evaluating the physical demands on firefighters using hand-carried stair descent devices to evacuate mobility-limited occupants from high-rise buildings', *Applied Ergonomics*, vol. 45, no. 3, pp. 389–397, May 2014, doi: 10.1016/j.apergo.2013.05.005.
- [61] J. Lecewicz-Bartoszewska and A. Polak-Sopinska, *Ergonomia niepełnosprawnym: współczesne i przyszłe kierunki rozwoju*. Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2011.
- [62] K. Szulc, 'Ewakuacja z budynku z użyciem krzesła ewakuacyjnego', in *Współczesne problemy ochrony środowiska i energetyki 2021*, M. Bogacka i K. Pikoń, 2022, pp. 85–92.

- [63] J. Koo, Y. S. Kim, B.-I. Kim, and K. M. Christensen, 'A comparative study of evacuation strategies for people with disabilities in high-rise building evacuation', *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 2, pp. 408–417, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.eswa.2012.07.017.
- [64] R. W. Bukowski, 'Addressing the Needs of People Using Elevators for Emergency Evacuation', *Fire Technol*, vol. 48, no. 1, pp. 127–136, Jan. 2012, doi: 10.1007/s10694-010-0180-y.
- [65] J. Chen, J. Ma, and S. M. Lo, 'Event-driven modeling of elevator assisted evacuation in ultra high-rise buildings', *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 74, pp. 99–116, May 2017, doi: 10.1016/j.simpat.2017.03.004.
- [66] K. Christensen, 'Agent-Based Emergency Evacuation Simulation with Individuals with Disabilities in the Population', *The Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, p. 14, Jun. 2008.
- [67] J. Koo, Y. S. Kim, and B.-I. Kim, 'Estimating the impact of residents with disabilities on the evacuation in a high-rise building: A simulation study', *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 24, pp. 71–83, May 2012, doi: 10.1016/j.simpat.2012.02.003.
- [68] K. Christensen, S. Sharifi, and A. Chen, 'Considering Individuals with Disabilities in Building Evacuation: Agent-Based Simulation Study', Jan. 2013.
- [69] M. Manley, Y. S. Kim, K. Christensen, and A. Chen, 'Modeling Emergency Evacuation of Individuals with Disabilities in a Densely Populated Airport', *Transportation Research Record*, vol. 2206, no. 1, pp. 32–38, Jan. 2011, doi: 10.3141/2206-05.
- [70] M. Manley and Y. S. Kim, 'Modeling emergency evacuation of individuals with disabilities (exitus): An agent-based public decision support system', *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 9, pp. 8300–8311, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.eswa.2012.01.169.
- [71] E. Kuligowski, 'Predicting Human Behavior During Fires', *Fire Technol*, vol. 49, no. 1, pp. 101–120, Jan. 2013, doi: 10.1007/s10694-011-0245-6.
- [72] P. Å. Olsson and M. A. Regan, 'A comparison between actual and predicted evacuation times', *Safety Science*, vol. 38, no. 2, pp. 139–145, Jul. 2001, doi: 10.1016/S0925-7535(00)00064-3.
- [73] N. A. Hoffmann, D. A. Henson, and C. POPE, 'Analysis of the evacuation of a crush loaded train in a tunnel', in *Safety in road and rail tunnels (Nice, 9-11 March 1998)*, 1998, pp. 677–687.
- [74] A. Cuesta, O. Abreu, and D. Alvear, Eds., *Evacuation Modeling Trends*. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-20708-7.
- [75] E. D. Kuligowski and J. A. Milke, 'A performance-based design of a hotel building using two egress models: a comparison of the results', p. 12.
- [76] S. Gwynne, E. R. Galea, M. Owen, P. J. Lawrence, and L. Filippidis, 'A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment', *Building and Environment*, vol. 34, no. 6, pp. 741–749, Nov. 1999, doi: 10.1016/S0360-1323(98)00057-2.
- [77] E. D. Kuligowski, 'A review of building evacuation models', National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, NBS TN 1471, 2005. doi: 10.6028/NIST.TN.1471.
- [78] E. Kuligowski, R. Peacock, and B. Hoskins, 'A Review of Building Evacuation Models, 2nd Edition, NIST Technical Note 1680', Jan. 2010.

- [79] R. Lovreglio, E. Ronchi, and D. Borri, 'The validation of evacuation simulation models through the analysis of behavioural uncertainty', *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 131, pp. 166–174, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.ress.2014.07.007.
- [80] S. M. Lo, H. C. Huang, P. Wang, and K. K. Yuen, 'A game theory based exit selection model for evacuation', *Fire Safety Journal*, vol. 41, no. 5, pp. 364–369, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.firesaf.2006.02.003.
- [81] R. Lovreglio, E. Ronchi, and D. Nilsson, 'A model of the decision-making process during pre-evacuation', *Fire Safety Journal*, vol. 78, pp. 168–179, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.firesaf.2015.07.001.
- [82] E. Kuligowski, 'Modeling Human Behavior during Building Fires'. Technical Note (NIST TN), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, Dec. 30, 2008.
- [83] A. Król and M. Król, 'The factors determining the number of the endangered people in a case of fire in a road tunnel', *Fire Safety Journal*, vol. 111, p. 102942, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.firesaf.2019.102942.
- [84] *PD 7974-6:2019 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings Human factors. Life safety strategies. Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6)*. British Standard, 2019.
- [85] C. Ahn, H. Kim, I. Choi, and D. Rie, 'A Study on the Safety Evaluation of Escape Routes for Vulnerable Populations in Residential Facilities', *Sustainability*, vol. 14, no. 10, p. 5998, May 2022, doi: 10.3390/su14105998.
- [86] V. A. Oven and N. Cakici, 'Modelling the evacuation of a high-rise office building in Istanbul', *Fire Safety Journal*, vol. 44, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.firesaf.2008.02.005.
- [87] E. Ronchi and D. Nilsson, 'Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research', *Fire Sci Rev*, vol. 2, no. 1, p. 7, 2013, doi: 10.1186/2193-0414-2-7.
- [88] E. Ronchi, P. A. Reneke, and R. D. Peacock, 'A Method for the Analysis of Behavioural Uncertainty in Evacuation Modelling', *Fire Technol*, vol. 50, no. 6, pp. 1545–1571, Nov. 2014, doi: 10.1007/s10694-013-0352-7.
- [89] R. Lovreglio, E. Ronchi, and M. J. Kinsey, 'An Online Survey of Pedestrian Evacuation Model Usage and Users', *Fire Technol*, vol. 56, no. 3, pp. 1133–1153, May 2020, doi: 10.1007/s10694-019-00923-8.
- [90] E. Ronchi and M. Kinsey, 'Evacuation models of the future: insights from an online survey of user's experiences and needs', *emergency*, vol. 3, p. 4, 2011.
- [91] E. D. Kuligowski and S. Gwynne, 'What a User should Know when Selecting an Evacuation Model', *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 28, 2005.
- [92] C. J. Castle and P. A. Longley, 'Building evacuation in emergencies: a review and interpretation of software for simulating pedestrian egress', *Geospatial technologies and homeland security*, pp. 209–228, 2008.
- [93] J. Ditlev and H. Rusch, 'CFPA-E Guideline No 19:2023 F Fire safety engineering concerning evacuation from buildings', *CFPA Europe*, Feb. 2023.
- [94] K. Żydek and M. Król, 'Możliwości stosowania modelowania ewakuacji ludzi z budynków na wypadek pożaru', in *Rozwiązania i optymalizacje techniczne jako przedmiot badań naukowych.*, Lublin: Wydawnictwo Naukowe TYGIEL, 2020, pp. 184–192.

- [95] R. Jevtic, 'Selection of the fire detectors and their arrangement in object', *Bezbednost, Beograd*, vol. 57, pp. 197–215, Jan. 2015, doi: 10.5937/bezbednost1501197J.
- [96] M. McNamee, G. Marlair, and B. Truchot, 'Research Roadmap: Environmental Impact of Fires in the Built Environment', NFPA, Feb. 2020.
- [97] A. A. Stec, 'Fire toxicity – The elephant in the room?', *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 79–90, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.05.003.
- [98] D. Brzezińska, *Wentylacja pożarowa obiektów budowlanych*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2015.
- [99] M. Król and A. Król, 'Multi-criteria numerical analysis of factors influencing the efficiency of natural smoke venting of atria', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 170, pp. 149–161, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.jweia.2017.08.012.
- [100] J. Zhang, J. Zhao, Z. Song, and L. Duan, 'Experimental and modeling study on evacuation behaviors considering small groups under different visibility', *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 623, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.physa.2023.128850.
- [101] T. Jin, 'Studies on human behavior and tenability in fire smoke', *Fire Safety Science*, vol. 5, pp. 3–21, 1997.
- [102] 'NFPA - Reporter's Guide: The consequences of fire'. Accessed: Nov. 09, 2021. [Online]. Available: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/Press-Room/Reporters-Guide-to-Fire-and-NFPA/Consequences-of-fire>
- [103] D. A. Purser, 'Combustion toxicity', *SFPE handbook of fire protection engineering*, pp. 2207–2307, 2016.
- [104] F. Reisen, M. Bhujel, and J. Leonard, 'Particle and volatile organic emissions from the combustion of a range of building and furnishing materials using a cone calorimeter', *Fire Safety Journal*, vol. 69, pp. 76–88, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.firesaf.2014.08.008.
- [105] P. Blomqvist, B. Persson, and M. Simonson, 'Fire Emissions of Organics into the Atmosphere', *Fire Technol*, vol. 43, no. 3, pp. 213–231, Sep. 2007, doi: 10.1007/s10694-007-0011-y.
- [106] P. Blomqvist, L. Rosell, and M. Simonson, 'Emissions from Fires Part II: Simulated Room Fires', *Fire Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 59–73, Jan. 2004, doi: 10.1023/B:FIRE.0000003316.63475.16.
- [107] Dz.U. 2011 nr 144 poz. 859, 'Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 17 czerwca 2011 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane metra i ich usytuowanie'.
- [108] F. W. Mowrer, 'Enclosure Smoke Filling and Management with Mechanical Ventilation', p. 24, 2002.
- [109] G. Hadjisophocleous and Q. Jia, 'Comparison of FDS Prediction of Smoke Movement in a 10-Storey Building with Experimental Data', *Fire Technol*, vol. 45, no. 2, pp. 163–177, Jun. 2009, doi: 10.1007/s10694-008-0075-3.
- [110] C. A. Short, G. E. Whittle, and M. Owarish, 'Fire and smoke control in naturally ventilated buildings', *Building Research & Information*, vol. 34, no. 1, pp. 23–54, Jan. 2006, doi: 10.1080/09613210500356089.
- [111] W. X. Shi, J. Ji, J. H. Sun, S. M. Lo, L. J. Li, and X. Y. Yuan, 'Influence of fire power and window position on smoke movement mechanisms and temperature distribution in an emergency staircase', *Energy and Buildings*, vol. 79, pp. 132–142, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.02.083.

- [112] J. H. Klotz, J. A. Milke, P. G. Turnbull, R. American Society of Heating, and A.-C. Engineers, *Handbook of Smoke Control Engineering*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2012.
- [113] D. A. Purser and J. L. McAllister, 'Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases, and heat', *SFPE handbook of fire protection engineering*, pp. 2308–2428, 2016.
- [114] 'ISO 13571:2012 Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires', ISO.
- [115] 'Pathfinder Technical Reference Manual', Thunderhead Support. Accessed: Jun. 13, 2023. [Online]. Available: <https://support.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/2023-1/technical-reference-manual/>
- [116] Dz.U. 2018 poz. 1286, 'Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy'.
- [117] 'Baza niebezpiecznych substancji chemicznych - Fenol', Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy. Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P27600224401410431343241&id_czynn_chem=242
- [118] Barbara Frydrych, J. Szymańska, and Elżbieta Bruchajzer, 'Benzen. Dokumentacja proponowanych dopuszczalnych wielkości narażenia zawodowego', *PiMOSP*, vol. 38, no. 3, pp. 21–117, Sep. 2022, doi: 10.54215/PiMOSP/2.113.2022.
- [119] 'Baza niebezpiecznych substancji chemicznych - Toluen', Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy. Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P27600224401410431343241&id_czynn_chem=515
- [120] 'Toluene | Medical Management Guidelines | Toxic Substance Portal | ATSDR'. Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: <https://wwwwn.cdc.gov/TSP/MMG/MMGDetails.aspx?mmgid=157&toxoid=29>
- [121] 'Baza niebezpiecznych substancji chemicznych - Formaldehyd', Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy. Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P27600224401410431343241&id_czynn_chem=255
- [122] PubChem, 'Acetaldehyde'. Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/177>
- [123] L. M. Appelman, R. A. Woutersen, and V. J. Feron, 'Inhalation toxicity of acetaldehyde in rats. I. Acute and subacute studies', *Toxicology*, vol. 23, no. 4, pp. 293–307, 1982, doi: 10.1016/0300-483x(82)90068-3.
- [124] R. Soćko and A. Broda, 'Kwas benzoesowy Dokumentacja proponowanych dopuszczalnych wielkości narażenia zawodowego', *PiMOSP*, vol. 39, no. 3, pp. 19–45, Sep. 2023, doi: 10.54215/PiMOSP/2.117.2023.
- [125] 'SAFETY DATA SHEET Benzoic Acid', Fisher Scientific. Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.durhamtech.edu/sites/default/files/safety_data_sheets/Chemistry-and-Biology/Benzoic%20Acid%20cas65-85-0%20SDS.pdf
- [126] 'Karta charakterystyki substancji chemicznej – kwas benzoesowy', CHEMPUR. Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: http://wnoz.sggw.pl/wp-content/uploads/kwas_benzoesowy.pdf

- [127] 'Safety Data Sheet according to 29CFR1910/1200 and GHS Rev. 3 - Benzoic Acid', Fisher Scientific. Accessed: Feb. 20, 2024. [Online]. Available: https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en_US/documents/programs/education/regulatory-documents/sds/chemicals/chemicals-b/S25195.pdf
- [128] 'PREN 81-76 Safety rules for the construction and installation of lifts - Particular applications for passengers and goods passenger lifts - Part 76: Evacuation of persons with disabilities using lifts'.
- [129] W. Nocula, 'Sieci obliczeniowe – poprawny dobór i modelowanie', STIGO.
- [130] W. Węgrzyński, *Wpływ układu przegród w budynkach na przepływ dymu w warunkach pożaru*. in *Prace Naukowe. Monografie. Instytut Techniki Budowlanej*, no. 470. Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej, 2021.
- [131] M. Król, *Analiza efektywności oddymiania grawitacyjnego budynków w warunkach działania wiatru* / Małgorzata Król. in *Monografia* / [Politechnika Śląska]; 741. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2018.
- [132] X. Han and S. Krajnović, 'An efficient Very Large Eddy Simulation model for simulation of turbulent flow', *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 71, pp. 1341–1360, Apr. 2013, doi: 10.1002/flid.3714.
- [133] X. Han and S. Krajnović, 'Very-Large-Eddy Simulation Based on k- ω Model', *AIAA Journal*, vol. 53, pp. 1103–1108, Apr. 2015, doi: 10.2514/1.J053341.
- [134] K. McGrattan, R. McDermott, and M. Vanella, 'Fire dynamics simulator: user's guide', National Institute of Standards and Technology, NIST SP 1019 Sixth Edition, 2023.
- [135] M. Fliszkiewicz, A. Krauze, and T. Maciak, *Badanie skuteczności projektowanych instalacji wentylacji oddymiającej, przy wykorzystaniu symulacji CFD*, vol. 43. in *Zeszyty Naukowe SGSP*, vol. 43. 2012.
- [136] L. Li, D. Zhu, Z. Gao, P. Xu, and W. Zhang, 'A study on longitudinal distribution of temperature rise and carbon monoxide concentration in tunnel fires with one opening portal', *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, p. 101535, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101535>.
- [137] S. T. McKenna and T. R. Hull, 'The fire toxicity of polyurethane foams', *Fire Sci Rev*, vol. 5, no. 1, p. 3, Dec. 2016, doi: 10.1186/s40038-016-0012-3.
- [138] P. Smardz and J. Paliszek-Saładyna, 'Zalecenia dotyczące prawidłowego stosowania modelu CFD w symulacjach pożarowych dla programu fire dynamics simulator'.
- [139] 'Trwa okres grzewczy. Wraz z nim wzrasta zagrożenie zatrucia TLENKIEM WĘGLA - Komenda Miejska Państwowej Straży Pożarnej w Płocku - Portal Gov.pl', Komenda Miejska Państwowej Straży Pożarnej w Płocku. Accessed: Jul. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.gov.pl/web/kmpsp-plock/tlenek-wegla>
- [140] 'Occupational health guidelines for chemical hazards.', Oct. 2023, doi: 10.26616/NIOSH PUB81123.
- [141] 'Acetaldehyde (EHC 167, 1995)'. Accessed: Feb. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc167.htm>
- [142] K. McGrattan, R. McDermott, and M. Vanella, 'Fire dynamics simulator: Technical Reference Guide Volume 3: Validation', National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NIST SP 1018-3 Sixth Edition, Mar. 2024.
- [143] Thunderhead Engineering, 'Pathfinder - Technical Reference Manual Version: 2023-3', 2023.

- [144] E. Ronchi and D. Nilsson, ‘Modelling total evacuation strategies for high-rise buildings’, *Build. Simul.*, vol. 7, no. 1, pp. 73–87, Feb. 2014, doi: 10.1007/s12273-013-0132-9.
- [145] A. Cuesta, E. Ronchi, S. M. V. Gwynne, M. J. Kinsey, A. L. E. Hunt, and D. Alvear, ‘School egress data: comparing the configuration and validation of five egress modelling tools: School Egress Data’, *Fire Mater.*, vol. 41, no. 5, pp. 535–554, Aug. 2017, doi: 10.1002/fam.2405.
- [146] Z. Yan, Y. Wang, L. Chao, and J. Guo, ‘Study on Evacuation Strategy of Commercial High-Rise Building under Fire Based on FDS and Pathfinder’, *CMES*, vol. 138, no. 2, pp. 1077–1102, 2024, doi: 10.32604/cmcs.2023.030023.
- [147] M. L. Ivanov and W.-K. Chow, ‘Experimental and numerical evacuation study in tall office building’, *Journal of Building Engineering*, vol. 76, p. 107103, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jobbe.2023.107103.
- [148] T. Mandal, K. Ramachandra Rao, and G. Tiwari, ‘Experiment, Simulation and Calibration of Parameters of Laboratory Evacuation’, *Transp. in Dev. Econ.*, vol. 10, no. 1, p. 4, Jun. 2024, doi: 10.1007/s40890-023-00194-7.
- [149] V. Kodur, A. Jha, and N. Lajnef, ‘Critical Egress Parameters Governing Assisted Evacuation in Hospital Buildings’, *Fire*, vol. 7, no. 3, p. 85, Mar. 2024, doi: 10.3390/fire7030085.