

mł. kpt. mgr inż. **Mateusz FLISZKIEWICZ**¹

mł. kpt. mgr inż. **Andrzej KRAUZE**²

SGSP, Katedra Techniki Pożarniczej

Zakład Informatyki i Łączności

dr hab. inż. **Tadeusz MACIAK** prof. SGSP³

SGSP, Politechnika Białostocka

MODELOWANIE ROZWOJU POŻARU I ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ DYMU PRZY WYKORZYSTANIU NUMERYCZNEJ MECHANIKI PŁYNÓW, NA PRZYKŁADZIE OPROGRAMOWANIA FDS

Modeling of fire development and spread of smoke by using numerical fluid mechanics, on the FDS example

Streszczenie

Program *Fire Dynamics Simulator (FDS)* wykorzystuje metody obliczeniowe numerycznej mechaniki płynów **CFD**. Model **CFD**, zastosowany w programie **FDS** pozwala badać rozwój pożaru w złożonych geometriach. **CFD** opisuje ruch płynu na podstawie rozwiązań układu równań różniczkowych cząstkowych Naviera-Stokesa. Wykorzystując one zasady zachowania masy, pędu i energii. W ramach sprawdzenia możliwości praktycznego wykorzystania programów komputerowych **CFD** w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, została wykonana symulacja komputerowa rozwoju pożaru oraz rozprzestrzeniania się dymu w obiekcie handlowym, z uwzględnieniem działania mechanicznej wentylacji oddymiającej. Symulację wykonano w programie *Fire Dynamics Simulator*.

Summary

Fire Dynamics Simulator (FDS) is a computational fluid dynamics (**CFD**) model of fire-driven fluid flow. The software solves numerically a form of the Navier-Stokes equations appropriate for low-speed, thermally-driven flow, with an emphasis on smoke and heat transport from fires. **FDS** is a powerful tool designed for particular

¹ Wkład merytoryczny: obsługa narzędzia do symulacji, obsługa komputerów i zaprogramowanie klastra obliczeniowego, przeprowadzenie obliczeń numerycznych przy pomocy programu komputerowego, przegląd piśmiennictwa;

² Wkład merytoryczny: postawienie praktycznego problemu projektowego do rozwiązania, wybór metody obliczeń, przeprowadzenie obliczeń analitycznych, opracowanie planu pracy, logiki oraz układu i treści artykułu, opracowanie wniosków;

³ Wkład merytoryczny: nadzór merytoryczny nad częścią badawczą, nadzór nad poprawnością merytoryczną tekstu.

fire hazard analysis and solving issues connected with fire safety engineering. Its practical application supports designing non-standard buildings abide by the rules of fire safety. This article describes general outline and main problems connected with using fire safety engineering tools like **FDS**. As a check, a practical usage of **CFD** computer programs in fire safety engineering, computer simulation was made of fire growth and spread of smoke in the building trade, including the operation of mechanical smoke ventilation.

Słowa kluczowe: numeryczna mechanika płynów, Fire Dynamics Simulator, inżynieria bezpieczeństwa pożarowego, rozwój pożaru, rozprzestrzenianie się dymu

Keywords: computational fluid dynamics, Fire Dynamics Simulator, fire safety engineering, fire growth, spread of smoke

1. Wprowadzenie

Dzisiejsze narzędzia pozwalają modelować zarówno pożary wewnętrzne, pożary niedowentylowane z symulacją zjawisk rozgorzenia i wstecznego ciągu płomienia, jak i pożary strumieniowe oraz powierzchniowe. Przy wykorzystaniu programów komputerowych bazujących na metodach obliczeniowej mechaniki płynów **CFD** (*Computational Fluid Dynamics*), możliwe jest m.in.:

- modelowanie zjawiska rozprzestrzeniania się dymu oraz gorących gazów pożarowych przy określonych przez użytkownika warunkach brzegowych,
- modelowanie wpływu instalacji oddymiania (grawitacyjnego, mechanicznego, strumieniowego) na rozprzestrzenianie się dymu lub weryfikacja efektywności wymienionych instalacji, poprzez wprowadzanie warunków brzegowych jako powierzchni o stałym strumieniu (wentylacja mechaniczna) lub stałym ciśnieniu (klapy dymowe),
- definiowanie właściwości czujek i tryskaczy, symulacja czasu zadziałania czujek dymu i ciepła oraz wpływu ich zadziałania na warunki brzegowe (np. uruchomienie wentylatorów, otwarcie klap dymowych).

Programy komputerowe wykorzystujące technikę **CFD**, pozwalają wprowadzić odpowiednią reakcję spalania oraz właściwości materiałów spalanych, a w szczególności: skład chemiczny paliw, ciepło rozkładu i spalania paliwa. Najczęściej, opierając się na powszechnie uznanych wytycznych projektowych wprowadza się pożar o konkretnej krzywej rozwoju, określonej przez współczynnik rozwoju pożaru oraz wartość maksymalną strumienia ciepła. Dodatkowo po obliczeniu liniowej prędkości rozprzestrzeniania się pożaru oraz stosując odpowiednie funkcje programu, można ustawić promienisty i proporcjonalny

względem mocy, wzrost powierzchni pożaru. Ponadto możliwe jest zdefiniowanie ułamka masowego dymu, który warunkuje ilość powstającego dymu z 1 kg spalonego paliwa, właściwą gęstość optyczną dymu, która warunkuje intensywność pochłaniania promieniowania widzialnego przez dym o danym stężeniu oraz np. jeszcze ułamek masowy tlenku węgla, warunkującego ilość powstającego tlenku węgla z 1 kg spalonego paliwa. Wyniki symulacji odczytujemy przede wszystkim ze szczegółowych przekrojów lub dokładnie określonych punktów pomiarowych. Dodatkowo dla pewności wyniki można sprawdzić w tekstowych plikach wyjściowych, które generuje program. Programy pozwalają również na zdefiniowanie warunków atmosferycznych, w szczególności: ciśnienia atmosferycznego, wilgotności powietrza, kierunku i siły wiatru oraz temperatury powietrza, co oczywiście może być przydatne w przypadku modelowania np. wentylacji pożarowej działającej w oparciu o klapy dymowe lub okna oddymiające. W wyniku przeprowadzenia symulacji można uzyskać następujące dane:

- temperaturę, zasięg widzialności, nadciśnienie, podciśnienie, prędkości przepływu gazów, stężenia toksycznych i obojętnych gazów np. CO, O₂, CO₂, N₂,
- moc pożaru, czas zadziałania tryskaczy, czas zadziałania czujek dymu i temperatury.

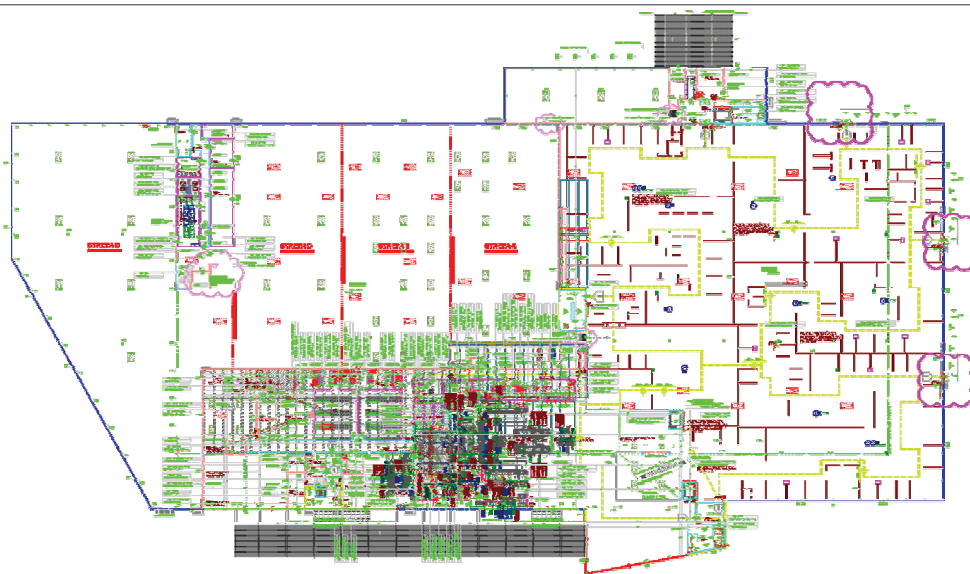
W wyniku symulacji uzyskuje się czas po którym występują przekroczenia wartości granicznych ocenianych parametrów. Otrzymany wynik umożliwia porównanie z wcześniej obliczonym wymaganym bezpiecznym czasem ewakuacji. Taka analiza pozwala ocenić czy w obiekcie są zachowane warunki do ewakuacji, na wypadek pożaru.

W artykule zaprezentowano przykład symulacji rozwoju pożaru oraz rozprzestrzeniania się dymu w obiekcie handlowym, z uwzględnieniem działania mechanicznej wentylacji oddymiającej. Symulacja została wykonana przy wykorzystaniu programu *Fire Dynamics Simulator*.

2. Przykład symulacji

W ramach sprawdzenia możliwości praktycznego wykorzystania programów komputerowych CFD w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, została wykonana symulacja komputerowa rozwoju pożaru oraz rozprzestrzeniania się dymu w obiekcie handlowym, z uwzględnieniem działania mechanicznej wentylacji oddymiającej. Celem analizy było skontrolowanie czy w tzw. wymaganym bezpiecznym czasie ewakuacji na wyznaczonych drogach ewakuacyjnych i pomieszczeniach wieloprzestrzennych w rozpatrywanym budynku, nie zostaną przekroczone wartości graniczne, uniemożliwiające ewakuację ludzi

z wyznaczonego obszaru. Określone wartości graniczne definiowane są poprzez: temperaturę oraz zasięg widzialności. Symulację przeprowadzono w pomieszczeniu o powierzchni około 7500 m² i kubaturze około 35 000 m³. Rozpatrywane pomieszczenie (antresola na której eksponowane są zaaranżowane wnętrza mieszkalne) podzielono na 4 strefy dymowe (zbiorniki dymu). Założono, że pożar powstał w jednej ze stref dymowych.



Ryc. 1. Widok rzutu rozpatrywanej kondygnacji (antresola) w aplikacji typu CAD

(Źródło: Opracowanie własne)

Fig. 1. View of the mezzanine in CAD applications.

(Source: own work.)

W pierwszej kolejności zostały sformułowane założenia wyjściowe dla instalacji wentylacji oddymiającej. Kryteria projektowe przyjęto według [4]. Dla obliczeń projektowych przyjęto wartości jak dla powierzchni handlowej chronionej standardowymi tryskaczami (czułość reagowania określona współczynnikiem RTI > 80), tj.:

- powierzchnię pożaru – 10 [m²],
- P - obwód pożaru – 12 [m],
- Q_w - maksymalną moc pożaru (jako konwekcyjny strumień ciepła) – 5000 [kW] (oznaczenie: Q_w),
- podział na 4 strefy dymowe o podstawie kurtyn dymowych 3 [m] od podłogi,
- Y - wysokość podstawy warstwy dymu – 3,1 [m],
- wysokość pomieszczenia – ok. 4,60 [m],
- c_e – współczynnik zasysania powietrza do warstwy dymu - 0,21 [kg*m^{-5/2}*s⁻¹],
- ρ₀ – gęstość powietrza - 1,22 [kg*m⁻³],

- C_w – ciepło właściwe powietrza - 1,01 [J/kg*K],
- θ – przyrost temperatury dymu [$^{\circ}$ K],
- T_o – temperatura otoczenia [$^{\circ}$ K],
- d – głębokość warstwy dymu w stosunku do podstaw wentylatorów – 1,5 [m],
- T_1 – temperatura bezwzględna dymu ($T_o + \theta$) [$^{\circ}$ K],
- Czas uruchomienia tryskaczy – ok. 220 [s] przy mocy pożaru ok. 2300 [kW] – na podstawie [5],
- γ – współczynnik bezwymiarowy.
-
- W oparciu o powyższe wartości przeprowadzono obliczenia w celu uzyskania podstawowej wydajności wentylacji oddymiającej. Obliczenia zostały wykonane zgodnie z zaleceniami normy [4].

Obliczenie masowej ilości dymu wpływającej do warstwy dymu:

$$M = C_e \times P \times Y^{3/2} = 0,21 \times 12 \times 2\sqrt{3,1^3} = 13,76 \text{ kg/s} \quad (4)$$

Przyrost temperatury dymu w stosunku do temperatury otoczenia:

$$\Theta = \frac{Q_w}{M * C_w} = \frac{5000}{13,76 * 1,01} = 360 \text{ }^{\circ}\text{K} \quad (5)$$

Przy czym rzeczywista temperatura warstwy dymu po uruchomieniu tryskaczy jest zbliżona lub niższa od temperatury uruchomienia tryskaczy.

Objętościowa ilość dymu, jaką należy odprowadzić ze strefy dymowej:

$$V_L = \frac{M * (T_o + \Theta)}{\rho_o * T_o} = \frac{13,76 * (288 + 360)}{1,22 * 288} = 25,40 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1} = 91400 \text{ m}^3 \times \text{h}^{-1} \quad (6)$$

Wymagana minimalna powierzchnia dla otworów uzupełniających powietrze (przy 5 m/s) dla strefy dymowej objętej pożarem (z uwzględnieniem podwyższonej temp. dymu wg obliczeń).

$$V_d = V_L \times \frac{T_o}{T_o + \Theta} = 25,40 \times \frac{288}{288 + 360} = 11,29 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1} \quad (7)$$

$$F = \frac{V_d}{5} = \frac{11,29}{5} = 2,26 \text{ m}^2 \quad (8)$$

W rzeczywistości w związku z niską temperaturą dymu nie przekraczającą 70 – 100 $^{\circ}$ C, wymagana powierzchnia otworów uzupełniających powietrze dla oddymianej strefy

dymowej wyniesie ok. $3,8 \text{ m}^2$.

Dopuszczalny przepływ dymu przez pojedynczy punkt wyciągowy:

$$V_{\max} = 4,16 * \gamma * d^{5/2} * (T_1 - T_0 / T_1)^{1/2} = 8,6 \text{ m}^3 \text{ x s}^{-1} = 31.000 \text{ m}^3 \text{ x h}^{-1} \quad (9)$$

gdzie: T_1 – temperatura warstwy dymu [$^{\circ}\text{K}$], T_0 – temperatura otoczenia [$^{\circ}\text{K}$]

Minimalna ilość punktów wyciągowych (wentylatorów wyciągowych):

$$N \geq V_L / V_{\max} = 3 \quad (10)$$

Minimalna dopuszczalna odległość między punktami wyciągowymi:

$$S_{\min} = 0,9 * V_{\max}^{1/2} = 2,6 \text{ m} \quad (11)$$

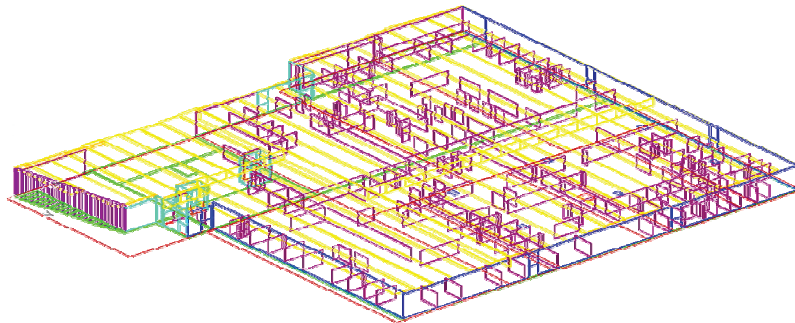
Na podstawie powyższych założeń uzyskano wymaganą wydajność wentylacji wyciągowej dla jednej strefy dymowej równą $91.400 \text{ m}^3 \text{ x h}^{-1}$. W rozpatrywanej strefie dymowej rozmieszono równomiernie 6 wentylatorów (w dwóch rzędach po 3 wentylatory w odległościach od ścian i kurtyn dymowych po ok. 10 m), o wydajnościach $6 \times 15.000 \text{ m}^3/\text{h}$ i powierzchni $0,2 \text{ m}^2$. Podstawa kurtyn (ścianek kurtynowych) znajduje się na wysokości 3 m od podłogi, czyli 10 cm poniżej obliczonej podstawy warstwy dymu w strefie dymowej. Przyjęto powierzchnię otworów napowietrzających równą powierzchni wszystkich otworów drzwiowych wychodzących bezpośrednio na zewnątrz budynku (3 szt. drzwi zewnętrznych o wymiarach geometrycznych otworów równych $1,8 \times 2,0 \text{ m}$ na poziomie antresoli), a także 1 szt. drzwi zewnętrznych w poziomie parteru, w rejonie schodów ruchomych, co zapewnia wystarczający dopływ powietrza uzupełniającego, nawet przy jednoczesnym działaniu niezależnych systemów wentylacji mechanicznej we wszystkich strefach oddymiania. Istotnym warunkiem jest prędkość przepływu powietrza uzupełniającego wpływającego do podstawy warstwy dymu z prędkością, która nie powinna przekroczyć 1 m/s . Przy takich założeniach wstępnych do wentylacji oddymiającej, symulacja komputerowa przeprowadzona w celu sprawdzenia poprawności powyższych założeń, powinna umożliwić sprawdzenie następujących danych:

- stopnia widzialności i temperatury na wysokości $1,8 \text{ m}$ dla założonego czasu ewakuacji,
- temperatury dymu na wysokości podstawy warstwy dymu, tj. $3,1 \text{ m}$,
- temperatury dymu pod stropem.

Kolejnym etapem było przygotowanie modelu rozpatrywanej części budynku. Wprowadzenie trójwymiarowej geometrii zostało wykonane na podstawie rzutów

i przekrojów. Użyto siatki regularnej sześcienniej o boku 10 cm - w okolicach źródła pożaru i miejsc gdzie występują największe przepływy oraz 20 cm dla pozostałych obszarów rozpatrywanej geometrii budynku. Obszar obliczeniowy został podzielony na 12 siatek obliczeniowych. Rozmiar siatki dobrano w oparciu o [6], [7]. Rysunek 4 przedstawia widok trójwymiarowej geometrii obiektu, która została wykonana w programie typu CAD.

W przypadku nie pokrycia się ścian, okien, drzwi lub innych elementów konstrukcyjnych budynku z siatką programu FDS, został przyjęty bardziej niekorzystny przypadek z uwagi na rozprzestrzenianie się dymu.



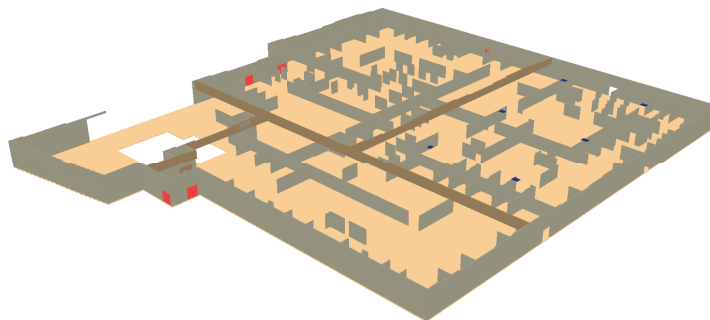
Ryc. 2. Widok geometrii antresoli w aplikacji typu CAD, tuż przed zaimportowaniem do programu FDS.

(Źródło: Opracowanie własne)

Fig. 2. View of the mezzanine in CAD application, just before importing into the FDS.

(Source: own work)

Na rysunku 5 przedstawiony został widok geometrii w programie do wizualizacji wyników symulacji *SmokeView* (przekrój poprzeczny na wysokości stropu).



Ryc. 3. Widok modelu obiektu w programie Smokeview.

(Źródło: Opracowanie własne)

Fig. 3 View of the model in Smokeview application

Niebieskie kwadraty przedstawiają lokalizację wentylatorów. Kurtyny dymowe widać na rysunku w postaci podłużnych elementów w kolorze brązowym.

W symulacji przyjęto początkową temperaturę wewnątrz i na zewnątrz obiektu równą 20°C. Parametry wiatru nie zostały wprowadzone do obliczeń symulacji komputerowej, ponieważ obiekt jest szczelnie odizolowany od otoczenia zewnętrznego. Właściwości materiałów budowlanych przyjęto w symulacji na podstawie [8]. W tabeli 2 przedstawiono wartości przyjętych współczynników dla poszczególnych materiałów.

Tabela 1.

Właściwości materiałów budowlanych, wprowadzonych do programu FDS.

(Źródło: opracowanie własne na podstawie [8].)

Tabela 1.

Properties of building materials, made to the FDS.

(Source: own elaboration based on [8].)

Material (Material)	Gęstość (Density) [kg/m³]	Ciepło właściwe (Specific Heat) [kJ/kg·K]	Współczynnik przewodzenia ciepła (Thermal conductivity) [W/m·K]
żelbet	2500	0,84	1,70
błoczki betonowe	800	0,84	0,30
plyta gipsowo- kartonowa	1000	1,00	0,30
szkło	2500	0,84	0,80
stal	7850	0,44	58
tynk wapienny	1700	0,84	0,70

Czas symulacji przyjęto na podstawie obliczonego wymaganego bezpiecznego czasu ewakuacji. Krok czasowy został ustalony automatycznie przez program i wyniósł 0,07071 s.

Przewidywany czas ewakuacji użytkowników obiektu został obliczony na podstawie [9]. Dostępny bezpieczny czas ewakuacji (z ang. **ASET** – *Available Safe Escape Time*), to wyliczony czas dostępny pomiędzy zainicjowaniem pożaru a czasem, w którym tolerowane, graniczne kryteria bytowe nie są przekroczone w określonej przestrzeni w budynku. Wymagany bezpieczny czas ewakuacji (z ang. **RSET** *Required Safe Escape Time*), to wyliczony czas dostępny pomiędzy zainicjowaniem pożaru a czasem, w którym użytkownicy, w określonych przestrzeniach w budynku, są w stanie osiągnąć bezpieczne miejsce. W tabelach 3 i 4 zaprezentowano obliczenie wymaganego bezpiecznego czasu ewakuacji, zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie [9].

Tabela 2.

Obliczenie wymaganego bezpiecznego czasu ewakuacji, cz.1.

(Źródło: opracowanie własne na podstawie [9].)

Tabel 2.

Calculation of the required safe evacuation time, part 1.

(Source: own elaboration based on [9].)

Projektowy scenariusz zachowań i rodzaj użytkownika (Design behavioral scenarios and occupancy types)	
Kategoria	B1
Gotowość użytkowników	Czuwający
Znajomość użytkowników	Niezaznajomieni
Gęstość użytkowników	Wysoka
Wydzielenia / złożoność	Jedno lub kilka
Efekt jakości systemu alarmowego na pierwsze-wstępne reakcje (Effect of alarm system on pre-movement)	
Poziom systemu alarmowego	A2 dwuetapowy system alarmowy: automatyczny system wykrywania pożaru w całym budynku przekazuje alarm do osób zarządzających budynkiem lub do ochrony, rozgłoszenie alarmu dla wszystkich użytkowników w zagrożonych przestrzeniach następuje ręcznie lub samoczynnie po upływie ustalonego czasu opóźnienia, jeśli wstępny alarm nie zostanie skasowany
Efekt złożoności budynku na czas ewakuacji (Effect of building complexity on evacuation time to a protected escape route)	
Poziom budynku	B2 (na przykład prosty, wielokondygnacyjny budynek biurowy) przedstawia prosty budynek, z wieloma przegrodami wewnętrznymi i zazwyczaj wielokondygnacyjny, z większością cech projektowanych zgodnie z warunkami techniczno-budowlanymi i prostym wewnętrznym rozplanowaniem.
Klasyfikacja systemu zarządzania bezpieczeństwem pożarowym i wpływ na	

czas ewakuacji (Classification of fire safety management characteristics and effects on evacuation time)	
Poziom zarządzania	Poziom Zarządzania M1: z wysokim poziomem wykszolenia personelu oraz z możliwą nieobecnością pracowników dozoru na kondygnacji budynku. Może nie być niezależnego audytu.

Tabela 3.

Obliczenie wymaganego bezpiecznego czasu ewakuacji, cz.2.

(Źródło: opracowanie własne na podstawie [9].)

Tabela 3.

Calculation of the required safe evacuation time, part 1.

(Source: own elaboration based on [9].)

Obliczenie Wymaganego Bezpiecznego Czasu Ewakuacji - WBCE (Calculation of Required Safe Escape Time RSET)	
Obliczenie czasu detekcji pożaru	Dane producentów i normowe: td – czas detekcji pożaru: 60 s .
Obliczenie czasu alarmowania	ta – czas alarmowania: 3 s. Zainstalowany dźwiękowy system ostrzegawczy.
Obliczenie czasu pierwszych-wstępnych reakcji	Kategoria scenariuszy i modyfikacje: B1 czuwający, niezaznajomieni - M1 B2 A1. tp-wr - czas reakcji: $120 + 30 + 30 = 180$ s
Obliczenie czasu przejścia	Prędkość na drodze poziomej – 1,2 m/s. Obliczenie długości drogi do najdalej położonego wyjścia ewakuacyjnego z antresoli przy założeniu, że jedne drzwi ewakuacyjne są niedostępne: długość drogi w poziomie – ok. 71 m (czas przejścia $71 \text{ m} : 1,2 \text{ m/s} = 60$ s). Przepustowość przez wszystkie drzwi ewakuacyjne o łącznej szerokości 14,4 m według [10] wynosi 1,33 osób/m/s co umożliwia przejście w ciągu sekundy 19,15 osób. Powierzchnia rozpatrywanej części obiektu wynosi ok. 7876 m ² , zgodnie z rozporządzeniem [11], przyjęto maksymalną

BADANIA I ROZWÓJ

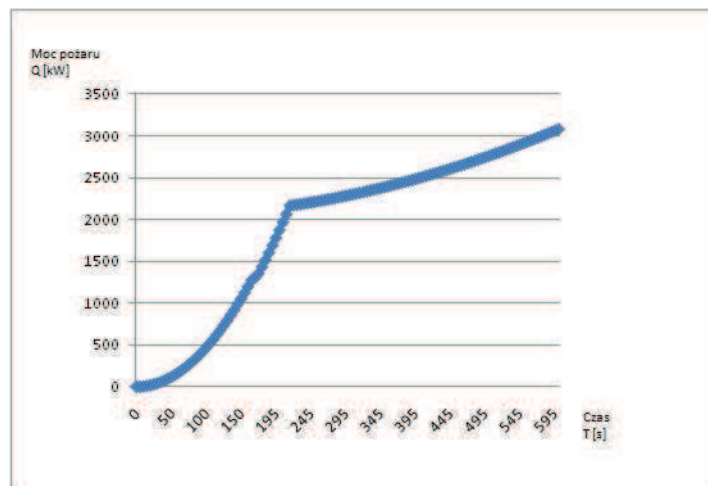
	<p>liczbę użytkowników wg wskaźnika: $4\text{m}^2/\text{osobę}$ (jak dla pomieszczeń handlowo-usługowych). Stąd maksymalna liczba osób przebywających w tym obszarze wynosi: 1969 osoby.</p> <p>Czas przejścia wszystkich użytkowników przez drzwi wyjściowe: $1969 : 19,15 = 103 \text{ s}$</p> <p>$t_p$ – czas przemieszczania: 163 s</p>
$WBCE = t_d + t_a + t_p - w_r + t_p = 406 \text{ s}$	

Założono, że pożar powstaje w okolicach dwóch wyjść ewakuacyjnych (na antresoli), w przestrzeni handlowej z meblami (dział mebli i wyposażenia kuchni/jadalni). Uznano, że pożar w tym obszarze jest najbardziej niekorzystny ze względu na występowanie dużej ilości materiałów oraz lokalizację w pobliżu wyjść ewakuacyjnych. Na podstawie [4], przyjęto gęstość mocy pożaru 625 kW/m^2 i powierzchnię pożaru 5 m^2 . Moment zadziałania tryskaczy - 220 s, przyjęto zgodnie z [5]. Do symulacji wprowadzono szybki rozwój pożaru (współczynnik $\alpha=0,04689$ zgodnie z Procedurami **KG PSP** [13], do momentu zadziałania tryskaczy), oraz wolny (współczynnik $\alpha=0,00293$ zgodnie z Procedurami **KG PSP** [13], po zadziałaniu tryskaczy). Zmiana mocy pożaru w czasie przebiega według zależności:

$$q = \alpha * t^2 \quad (12)$$

gdzie q – ilość wydzielającego się ciepła, α – stała określająca przebieg krzywej rozwoju pożaru, t – czas od momentu powstania pożaru

Zgodnie z tym założeniem uruchomienie tryskaczy, które znajdują się na wysokości 4,5 metra nastąpi po około 220 sekundach przy mocy pożaru 2300 kW. W rozpatrywanej przestrzeni handlowej występować mogą meble i artykuły wyposażenia kuchni oraz jadalni, między innymi: meble kuchenne, dywany i wykładziny podłogowe, obrusy, tkaniny, zasłony, lampy, oświetlenie oraz galanteria kuchenna. W związku z tym do analizy przyjęto jako materiał spalany piankę poliuretanową, z uwagi na najwyższy współczynnik dymotwórczości. Właściwości palne pianki poliuretanowej zostały dobrane na podstawie [12]. Poniżej znajduje się wykres zmiany mocy pożaru w funkcji upływu czasu, dla rozpatrywanego scenariusza.



Ryc. 4. Zmiana mocy pożaru w funkcji upływu czasu
(Źródło: Opracowanie własne)

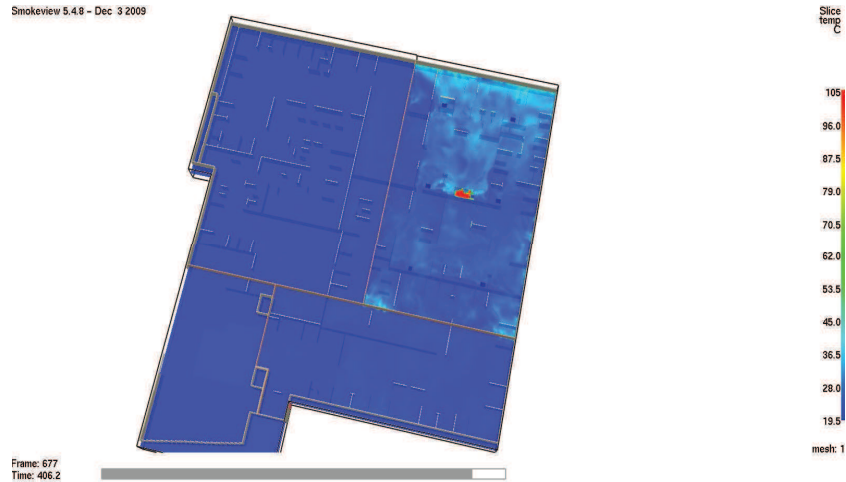
Fig. 4. Change of fire power as a function of time.
(Source: own work)

W celu sprawdzenia warunków ewakuacji w badanym czasie, analizie poddano następujące parametry symulowanego pożaru:

- Zasięg widzialności - sprawdzono dla znaków fluorescencyjnych na wysokości 1,8 m od poziomu podłogi.
- Temperatura - na wysokości 1,8 m od poziomu podłogi i na 2,5 m.
Wartości graniczne sprawdzanych parametrów:
- Temperatura – 60 °C (333 K, możliwość poparzenia górnych dróg oddechowych przy wysokiej wilgotności powietrza, wartość przyjęta zgodnie z [9] oraz Procedurami KG PSP [13]),
- Temperatura - 200 °C (473 K, na wysokości 2,5 m nad poziomem posadzki (parametr określający warunki do ewakuacji zgodnie z [9] oraz Procedurami KG PSP [13]),
- Zasięg widzialności – 10 m dla krawędzi elementów budowlanych i fluorescencyjnych znaków ewakuacyjnych, 15 m dla znaków podświetlanych (parametry określające warunki do ewakuacji zgodnie [9] oraz Procedurami KG PSP [13]).

Wyniki symulacji zostały przedstawione za pomocą przekrojów poziomych badanych parametrów pożaru. Przekroje przedstawiają analizowane parametry w momencie przekroczenia wartości granicznych oraz po przewidywanym czasie ewakuacji. Kolorem czarnym zaznaczone zostały wartości graniczne poszczególnych parametrów pożaru. Uzyskano następujące wyniki symulacji:

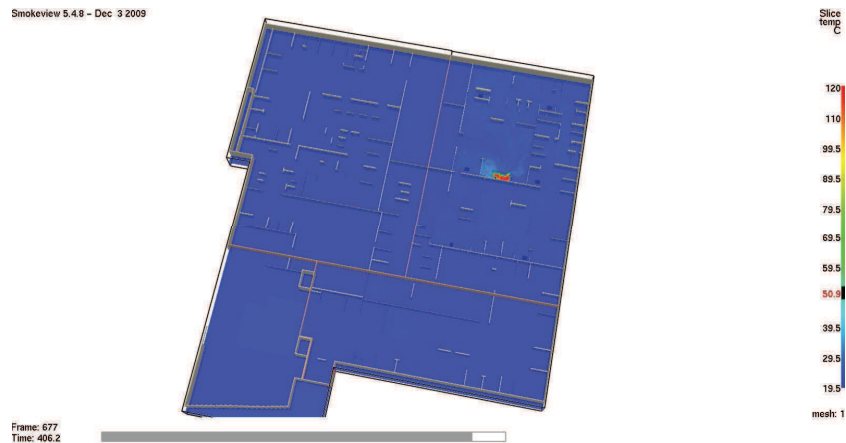
- Rozkład temperatury na wysokości 2,5 m, na poziomie antresoli, po przewidywanym czasie ewakuacji. Wartości graniczne temperatury na wysokości 2,5 m nie zostaną przekroczone.



Ryc. 5. Rozkład temperatury na wysokości 2,5 m, na poziomie antresoli.
(Źródło: Opracowanie własne)

Fig. 5. The temperature distribution at a height of 2.5 m, on the mezzanine.
(Source: own work.)

- Rozkład temperatury na wysokości 1,8 m, na poziomie antresoli. Po czasie przewidywanym czasie ewakuacji, wartości graniczne temperatury nie zostaną przekroczone.

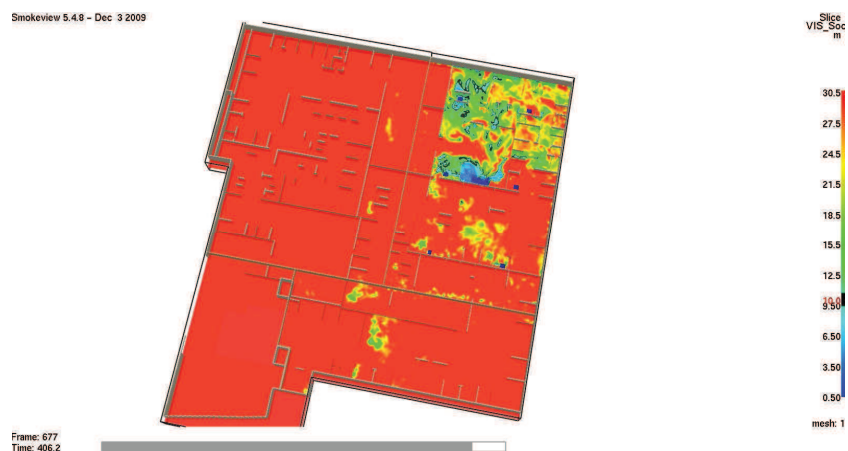


Ryc. 6. Rozkład temperatury na wysokości 1,8 m, na poziomie antresoli.
(Źródło: Opracowanie własne)

Fig. 6. The temperature distribution at a height of 1.8 meters on the mezzanine.
(Source: own work.)

- Spadek zasięgu widzialności na wysokości 1,8 metra, na poziomie antresoli. Po przewidywanym czasie ewakuacji, czyli po 406 sekundach od momentu powstania

pożaru, zasięg widzialności spadł punktowo poniżej wartości granicznych, w zaledwie kilku miejscach strefy dymowej, w której powstał pożar. W sąsiednich strefach dymowych nie obserwuje się spadku zasięgu widzialności poniżej wartości granicznej.



Ryc. 7. Spadek zasięgu widzialności na wysokości 1,8 metra na poziomie antresoli
(Źródło: Opracowanie własne)

Fig. 7. Decrease in range of visibility at a height of 1.8 meters on the mezzanine.
(Source: own work)

Tabela 4.

Tabela z zestawieniem otrzymanych wyników analizy komputerowej

(Źródło: Opracowanie własne)

Tabela 4.

Summary table of results of computer analysis

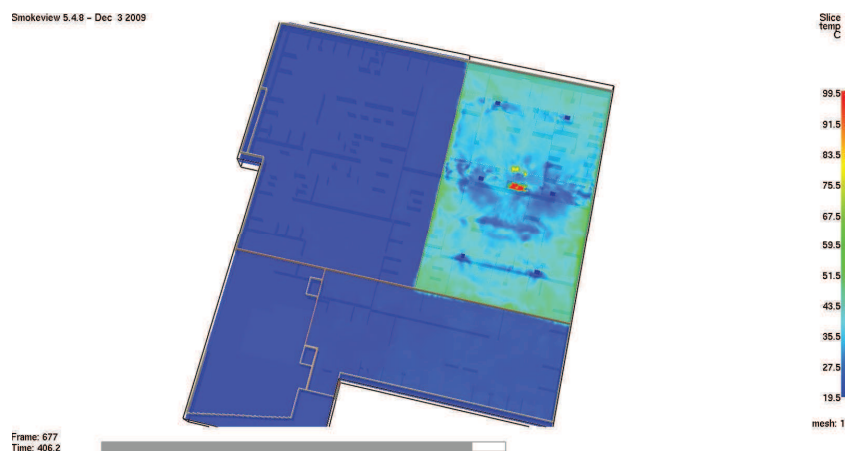
(Source: own work.)

Rozpatrywany parametr, wartość graniczna (The relevant parameter, the critical limit) *	Czas (time) [s] **	Obszar na jakim rozpatrywany parametr został przekroczony (The area in which the parameter under consideration was exceeded)
Temperatura – wys. 1,8 m	WBCE	Nie występuje przekroczenie
Temperatura – wys. 2,5 m	WBCE	Nie występuje przekroczenie
Zasięg widzialności - wys. 1,8 m	WBCE	Przekroczenie występuje punktowo w zaledwie kilku miejscach rozpatrywanej strefy dymowej, co nie powinno pogorszyć warunków ewakuacji. W sąsiednich strefach dymowych warunki dla ewakuacji zostają zachowane.

* Za warunki krytyczne uznaje się przekroczenie temperatury 60 °C (333 K) na wysokości 1,8 m, 200 °C (473 K) na wysokości 2,5 m oraz widzialność poniżej 10 m na wysokości 1,8 m. Biorąc pod uwagę błąd wyznaczania temperatury wynoszący około 15%, obserwowano czy nie zostały przekroczone temperatury odpowiednio: 51 °C (324 K) i 170 °C (443 K).

** skrót WBCE oznacza tzw. wymagany bezpieczny czas ewakuacji, który dla tego scenariusza wynosi 406 sekund.

- Rozkład temperatury dymu na wysokości warstwy dymu – 3,1 m, na poziomie antresoli. Temperatura osiąga maksymalną wartość 99,5 °C (372,5 K, bezpośrednio nad pożarem).



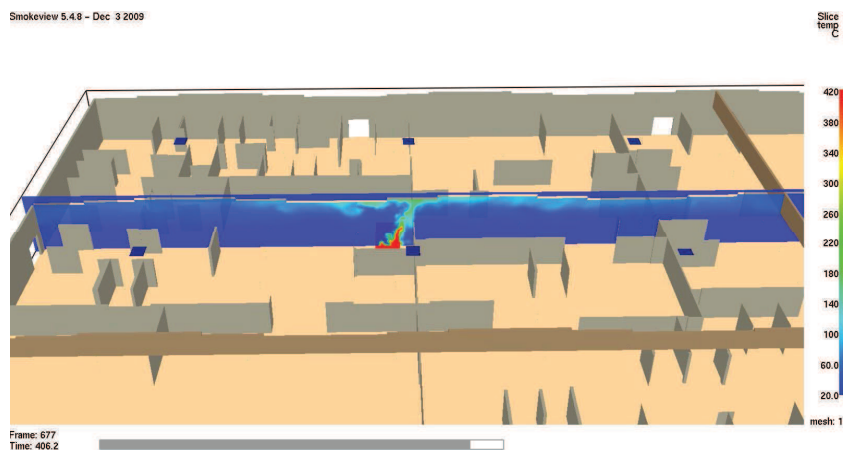
Ryc. 8. Rozkład temperatury dymu na wysokości warstwy dymu - 3,1 m, na poziomie antresoli.

(Źródło: Opracowanie własne)

Fig. 8. The temperature distribution of smoke in the smoke layer height - 3.1 m, on the mezzanine.

(Source: own work)

- Rozkład temperatury dymu w przekroju pionowym, na poziomie antresoli.



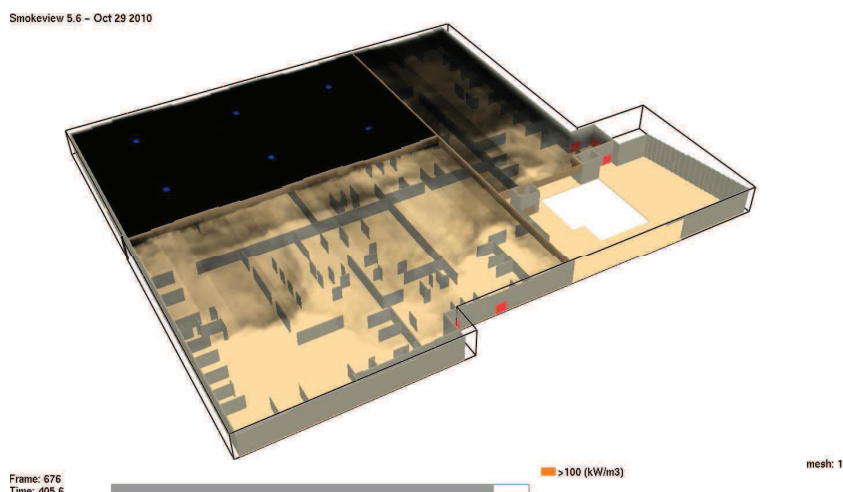
Ryc. 9. Rozkład temperatury dymu w przekroju pionowym, na poziomie antresoli.

(Źródło: Opracowanie własne)

Fig. 9. Smoke temperature distribution in vertical section, on the mezzanine.

(Source: own work)

Przenikanie dymów do sąsiednich stref dymowych po 406 sekundach (WCBE).



Ryc. 10. Przenikanie dymów do sąsiednich stref dymowych po 406 sekundach (WCBE)
(Źródło: Opracowanie własne)

Fig. 10. The penetration of smoke to adjacent smoke zones after 406 seconds (WCBE)
(Source: own work)

4. Podsumowanie

Na podstawie przyjętych założeń do określenia wymaganej wydajności instalacji wentylacji oddymiającej i dokonanej na ich podstawie symulacji komputerowej metodą **CFD** wynika, że obliczeniowa wydajność wentylacji oddymiającej wynosząca 92.000 m³/h jest wystarczająca do zapewnienia w wyliczonym czasie ewakuacji, równym 406 sekund, dostatecznego zasięgu widzialności na poziomie 1,8 metra co najmniej 10 m. Spadek zasięgu widzialności występuje wyłącznie punktowo, w niewielkim obszarze strefy dymowej, w której powstał pożar. W związku z powyższym dym nie będzie stanowił zagrożenia dla ludzi podczas ewakuacji. Rozpatrywana wentylacja oraz zastosowane tryskacze, zapewniają ponadto zachowanie bezpiecznych wartości temperatury na poziomie 1,8 metra i 2,5 metra. Uzyskano następujące wyniki:

- po przewidywanym czasie ewakuacji utrata zasięgu widzialności w strefie w której powstał pożar występuje wyłącznie punktowo w niewielkim obszarze,
- w sąsiednich strefach dymowych, warunki uważane za akceptowalne dla ewakuacji zostają zachowane,
- w obliczonym czasie ewakuacji dym na poziomie 1,8 m nie przekracza dopuszczalnej wartości temperatury, wynoszącej 60 °C (333 K),
- temperatura dymu na wysokości 2,5 m, po 406 sekundach osiąga najwyższą wartość wynoszącą 105 °C (378 K, w kolumnie konwekcyjnej),
- temperatura dymu na wysokości podstawy warstwy dymu na 3,1 m po obliczonym czasie ewakuacji wynosi maksymalnie 99,5 °C (372,5 K nad pożarem), natomiast

bezpośrednio pod stropem maksymalnie około 220 °C (493 K, w kolumnie konwekcyjnej).

Należy podkreślić, że do symulacji komputerowej przyjęto niekorzystne założenia, tj.:

- normowy, pożar pianki poliuretanowej (materiał wysoko dymotwórczy),
- po zadziałaniu tryskaczy, dalej rozwijający się pożar z małą prędkością.

Natomiast wykonana symulacja potwierdza, że przy założeniu wolnego rozwoju pożaru po zadziałaniu tryskaczy (co jest właściwe z uwagi na stosunkowo niskie usytuowanie tryskaczy – ok. 4,5 m od podłogi) nie występuje sytuacja w zakresie znacznego obniżania się warstwy dymów. Wskazuje na to m.in., tylko punktowe przenikanie dymów do sąsiednich stref dymowych. Reasumując powyższe ustalenia można przyjąć, że założona wydajność wentylacji pożarowej jest wystarczająca dla zapewnienia odpowiednich warunków ewakuacji z kondygnacji będącej przedmiotem analizy, na wypadek założonego scenariusza pożarowego.

Literatura

1. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J., *Fire Dynamics Simulator (Version 5)* Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018-5, 2010;
2. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., NIST Special Publication 1019-5. *Fire Dynamics Simulator (Version 5)* User's Guide. 2010;
3. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J., NIST Special Publication 1018-5, *Fire Dynamics Simulator (Version 5)* Technical Reference Guide. Volume 3: Validation. 2010;
4. BS 7346-4:2003. Komponenty systemów oddymiania i usuwania ciepła. Część 4: Zalecenia funkcjonalne i metody obliczeniowe dla systemów oddymiania i usuwania ciepła opartych na stabilnych pożarach projektowych. Wytyczne postępowania;
5. Fire Code Reform. Fire Safety in Shopping Centres, 1998, Final Research Report. Project 6. Australia;
6. NUREG 1824, United States Nuclear Regulatory Commission: Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant applications, Volume 6 Fire Dynamics Simulator. 2007.
7. Gobeau N., Ledin H.S., Lea C.J., *Guidance for HSE Inspectors: Smoke movement in complex enclosed spaces - Assessment of Computational Fluid Dynamics*, Health and Safety Laboratory, 2002;
8. PN-EN ISO 6946:2008. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania;
9. PD 7974-6:2004. The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings. Part 6: Human factors: Life safety strategies-Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6);
10. Check Scot and NI 5588-11 Approved Document B według British Standard code for building.
11. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 roku, w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z dnia 15 czerwca 2002 r., z późn. zm.);
12. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition. 2002;
13. Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej, Biuro Rozpoznawania Zagrożeń: Procedury organizacyjno-techniczne w sprawie spełnienia wymagań w zakresie

bezpieczeństwa pożarowego w inny sposób niż określono to w przepisach techniczno-budowlanych. 10.2008.

mł. kpt. mgr inż. Andrzej Krauze

absolwent SGSP, studiów dziennych dla strażaków w służbie kandydackiej, rok ukończenia studiów inżynierskich: 2009, studiów magisterskich: 2011.

Po ukończeniu studiów inżynierskich zatrudniony w JRG SGSP jako Dowódca Sekcji, od 10.2010 zatrudniony na stanowisku młodszego specjalisty w Zakładzie Informatyki i Łączności od 05.2011 zatrudniony na stanowisku Asystenta w Zakładzie Informatyki i Łączności

mł. kpt mgr inż. Mateusz Fliszkiewicz

absolwent SGSP, studiów dziennych dla strażaków w służbie kandydackiej, rok ukończenia studiów inżynierskich: 2009, studiów magisterskich: 2011.

Po ukończeniu studiów inżynierskich zatrudniony w JRG SGSP jako Dowódca Sekcji, od 03.2012 zatrudniony na stanowisku Asystenta w Zakładzie Informatyki i Łączności

Dr hab. inż. Tadeusz Maciak, prof. SGSP urodził się 1949 roku w Warszawie. Studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej ukończył w roku 1973. Po studiach rozpoczął pracę w Instytucie Technologii Elektronowej Politechniki Warszawskiej (obecnie Instytut Mikro i Optoelektroniki). Zajmował się problemami związanymi z optoelektroniką. Pracę doktorską obronił na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej w roku 1982. W roku 1991 rozpoczął pracę na Wydziale Informatyki Politechniki Białostockiej. W roku 1994 obronił pracę habilitacyjną na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. W roku 1998 równolegle podjął pracę w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. W latach 2001-2006 Dziekan specjalności „Systemy Informatyczne w Technice i Zarządzaniu” w Wyższej Szkole Ekonomiczno-Technicznej w Legionowie. W ostatnich latach jego zainteresowania koncentrują się na wykorzystaniu aparatu informatycznego w rozwiązywaniu zagadnień związanych z ogólnie pojętym bezpieczeństwem wewnątrz państwa. Prowadzi prace związane z problematyką procesu wspomaganie podejmowania decyzji w Państwowej Straży Pożarnej. W kręgu jego zainteresowań znajdują się również wszelkiego typu symulacje komputerowe zagrożeń pożarowych oraz problematyka ewakuacji ludności z zagrożonych obiektów.

Recenzenci

prof. dr hab. Inż. Mirosław Kosiorek

prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk