



Consulting Engineers

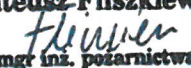
F&K Group Sp. z o.o.
ul. Romaszewskiego 6 lok. B-3
01-892 Warszawa

tel.: 22 740 32 32
tel.: 507 821 449 • 723 339 800
www.fkce.pl • biuro@fkce.pl

Nazwa opracowania:	Raport z symulacji CFD działania systemu wentylacji oddymiającej
Obiekt:	Budowa budynku laboratoryjno-dydaktycznego wraz z zapleczem technicznym i infrastrukturą towarzyszącą, ciągami komunikacyjnymi i zagospodarowaniem terenu.
Adres:	ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa, dz. nr e. 146513_08 dzielnica Ursynów, obręb ewidencyjny 1-10-12 dz. 114/2.
Inwestor:	Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa.

Wyniki analizy skuteczności działania projektowanego systemu mechanicznej wentylacji oddymiającej w sali konferencyjno-wystawowej oraz foyer -1.F01 w projektowanym budynku SGGW w Warszawie.

Branża:	Sanitarna / Ochrona przeciwpożarowa	Nr projektu: 816
----------------	--	-----------------------------

Opracował:		Podpis:
	mgr inż. Maciej Albrechtowicz	
Sprawdził		Podpis:
	mgr inż. Mateusz Fliszkiewicz	Mateusz Fliszkiewicz  mgr inż. pożarnictwa

Spis treści

1. Dane ogólne	4
1.1. Przedmiot opracowania	4
1.2. Podstawa opracowania	4
1.3. Zawartość opracowania	4
2. Koncepcja oddymiania obiektu.....	5
2.1. Ustalenia podstawowe dotyczące sali konferencyjnej oraz foyer	5
2.2. Założenia do koncepcji zabezpieczenia przed zadymieniem	5
3. Przewidywany czas ewakuacji użytkowników obiektu	7
4. Symulacje CFD	10
4.1. Charakterystyka użytego programu CFD	10
4.1.1. Nazwa programu, wersja, producent.....	10
4.1.2. Rodzaj i gęstość siatki obliczeniowej	10
4.1.3. Model turbulencji.....	10
4.1.4. Model spalania	11
4.1.5. Model promieniowania	11
4.2. Niepewności obliczeniowe i zastosowane współczynniki bezpieczeństwa	11
4.3. Warunki początkowe i brzegowe	12
4.3.1. Początkowa temperatura wewnętrzna i zewnętrzna.....	12
4.3.2. Materiały elementów budowlanych	12
4.3.3. Materiał palny	12
4.3.4. Zastosowane schematy i ustawienia numeryczne	13
4.3.5. Czas symulacji	13
4.4. Analizowane parametry pożaru	13
4.5. Analizowane scenariusze pożarowe	14
5. Wyniki symulacji CFD dla sali konferencyjnej	17
5.1. Sprawdzenie warunków ewakuacji	17
5.1.1. Krzywe mocy pożaru	17
5.1.2. Zasięg widzialności na wysokości 1.8 m w czasie ewakuacji	18
5.1.3. Temperatura na wysokości 1.8 m w czasie ewakuacji.....	27
6. Wnioski	33
7. Bibliografia	34

1. DANE OGÓLNE

1.1. PRZEDMIOT OPRACOWANIA

Niniejsze opracowanie stanowi analizę skuteczności działania systemu wentylacji mechanicznej oddymiającej w sali konferencyjno-wystawowej oraz foyer budynku laboratoryjno-dydaktycznego SGGW zlokalizowanym przy ul. Nowoursynowskiej 159 w Warszawie.

1.2. PODSTAWA OPRACOWANIA

Podstawą opracowania są:

- a) zlecenie inwestora,
- b) projekt wykonawczy architektoniczno-konstrukcyjny,
- c) obowiązujące przepisy przeciwpożarowe i techniczno-budowlane,
- d) obowiązujące normy,
- e) uzgodnienia branżowe.

1.3. ZAWARTOŚĆ OPRACOWANIA

Opracowanie zawiera część opisową, wyniki oraz wnioski z przeprowadzonych symulacji CFD. W dokumencie opisano system oddymiania, oszacowano czas ewakuacji ludzi.

2. KONCEPCJA ODDYMIANIA OBIEKTU

2.1. USTALENIA PODSTAWOWE DOTYCZĄCE SALI KONFERENCYJNEJ ORAZ FOYER

Zgodnie z projektem budowlanym, ustalono, że oddymianiu podlega sala konferencyjno-wystawowa wraz z przyległym do niej foyer budynku laboratoryjno-dydaktycznego SGGW w Warszawie. Zastosowano w nim rozwiązania architektoniczno-instalacyjne, stanowiące podstawę zasad funkcjonowania systemu zabezpieczenia przed zadymieniem, takie jak:

- a) w sali konferencyjnej znajduje się kanałowy system oddymiania mechanicznego o wydajność $60\,000\text{ m}^3/\text{h}$ - 8 punktów wyciągowych każdy o wydajności $7\,500\text{ m}^3/\text{h}$,
- b) w foyer znajduje się kanałowy system oddymiania mechanicznego o wydajność $48\,000\text{ m}^3/\text{h}$ - 6 krat wyciągowych o wydajności $7\,500\text{ m}^3/\text{h}$ oraz dwa o wydajności $1\,500\text{ m}^3/\text{h}$,
- c) w zależności od miejsca detekcji pożaru CSP uruchamia wentylację pożarową w sali konferencyjnej lub w foyer,
- d) w przypadku uruchomienia wentylacji pożarowej w foyer nawiew powietrza do celów oddymiania będzie odbywał się grawitacyjnie przez dwa szachty bezpośrednio do foyer, a w przypadku pożaru w sali konferencyjnej dodatkowo automatycznie otwarte zostaną drzwi wejściowe do sali konferencyjno-wystawowej,
- e) z sali konferencyjnej możliwa jest ewakuacja przez foyer do dwóch obudowanych klatek schodowych lub do innej strefy pożarowej na tej samej kondygnacji,
- f) nie przewiduje się stosowania instalacji tryskaczowej w części budynku objętej analizą CFD,
- g) w budynku znajdować się pracownicy, którzy zobowiązani będą m.in. czuwać nad bezpieczeństwem w obiekcie i w razie pożaru kierować ewakuacją w celu jej sprawnego przebiegu.

2.2. ZAŁOŻENIA DO KONCEPCJI ZABEZPIECZENIA PRZED ZADYMIENIEM

Sala konferencyjna wyposażona została w kanałowy system oddymiania mechanicznego o wydajności $60\,000\text{ m}^3/\text{h}$ (8 krat wyciągowych, każda o wydajności $7\,500\text{ m}^3/\text{h}$).

Napowietrzanie sali konferencyjnej podczas pożaru realizowane jest grawitacyjnie. Powietrze kompensacyjne doprowadzane jest dwoma szachtami do foyer, a następnie automatycznie otwieranymi drzwiami do sali konferencyjnej.

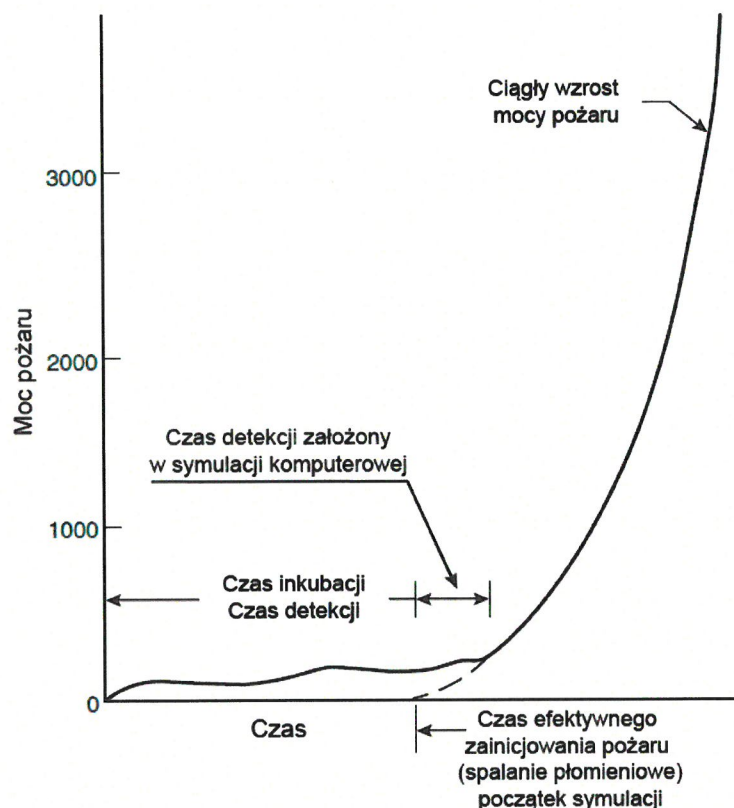
Foyer oddymianie realizowane jest przy pomocy kanałowego systemu oddymiania mechanicznego o wydajności $48\,000\text{ m}^3/\text{h}$ (6 krat wyciągowych, każda o wydajności $7\,500\text{ m}^3/\text{h}$ oraz 2 o wydajności $1\,500\text{ m}^3/\text{h}$).

Napowietrzanie grawitacyjne w przypadku foyer oparte zostało o dwa szachty, które dostarczają powietrze bezpośrednio do foyer.

Zakłada się, że pożar może jednocześnie powstać tylko w jednym miejscu. Zakłada się, że czas detekcji pożaru w omawianej części budynku nie przekroczy 60 sekund od momentu rozpoczęcia spalania płomieniowego zgodnie z przyjętą krzywą mocy pożaru. Zdarzenie to spowoduje wywołanie alarmu drugiego stopnia (wykrycie dymu przez dwie czujki lub

uruchomienie ręcznego ostrzegacza pożarowego albo uruchomienie pierwszej czujki i ręcznego ostrzegacza pożarowego) oraz uruchomienie wentylacji oddymiającej. Wystąpienie alarmu II stopnia spowoduje również zamknięcie klap przeciwpożarowych w instalacji wentylacji bytowej oraz uruchomienie dźwiękowych i wizualnych sygnalizatorów pożaru.

Poniższy wykres przedstawia schematyczny przebieg pożaru. Czas detekcji przyjęty w analizie numerycznej (60 sekund) jest czasem liczonym od efektywnego zainicjowania pożaru (początek spalania płomieniowego). W rzeczywistości spalanie płomieniowe poprzedzone będzie inkubacją pożaru (np. spalanie bezpłomieniowe).



Scenariusz zdarzeń na wypadek pożaru znajduje się w tabeli poniżej:

Tabela 1. Scenariusz zdarzeń w czasie pożaru

Czas [s]	Zdarzenie
-0	Czas inkubacji pożaru.
0	Czas efektywnego zainicjowania pożaru. Pożar rozwija się zgodnie z krzywą rozwoju pożaru.
0-60	Detekcja pożaru przez pierwszą czujkę dymu. System Sygnalizacji Pożarowej wchodzi w alarm I stopnia.
60	Detekcja pożaru przez drugą czujkę dymu. System Sygnalizacji Pożarowej wchodzi w alarm II stopnia.
60	Otwarcie drzwi napowietrzających.
60	Zamknięcie klap przeciwpożarowych w instalacji wentylacji bytowej.
60	Uruchomienie dźwiękowych oraz wizualnych sygnalizatorów pożaru.
90-120	Uruchomienie wyciągu mechanicznego z 100% zaprojektowaną wydajnością. (30 s zwłoki w uruchomieniu wentylatorów wyciągowych)

Omówione powyżej czasy zostały przyjęte do obliczeń numerycznych.

3. PRZEWIDYWANY CZAS EWAKUACJI UŻYTKOWNIKÓW OBIEKTU

Przewidywany czas ewakuacji użytkowników obiektu został obliczony na podstawie normy PD 7974-6:2019 [8].

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.

Czas ewakuacji został oszacowany na przykładzie jednoczesnej ewakuacji wszystkich użytkowników z sali konferencyjnej. Założono brak dostępnego jednego wyjścia ewakuacyjnego (do obudowanej klatki schodowej). Oszacowano liczbę osób do jednoczesnej ewakuacji na 150.

W obliczeniach założono, że dopiero w momencie wykrycia pożaru przez SSP i ogłoszenia alarmu w całym budynku użytkownicy rozpoczną ewakuację. W rzeczywistości, w tak niewielkiej sali, z prostokątnym rozkładem, bez dużych elementów wyposażenia utrudniających widoczność, zauważenie pożaru przez użytkowników może nastąpić dużo szybciej. Założono jednak najgorszy wariant w celu zachowania odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa.

Obliczenia dla sali konferencyjnej oraz foyer:

Projektowy scenariusz zachowań i rodzaj użytkowania:	
Kategoria	A
Gotowość użytkowników	Czuwający
Znajomość użytkowników	Zaznajomieni
Gęstość użytkowników	Niska
Wydzielenia / złożoność	Jedno lub wiele
Efekt jakości systemu alarmowego na pierwsze-wstępne reakcje	
Poziom systemu Alarmowego	A1. System sygnalizacji pożarowej obejmuje cały budynek, ogłoszony jest natychmiastowy alarm dla wszystkich użytkowników w zagrożonych pożarem przestrzeniach budynku.
Efekt złożoności budynku na czas ewakuacji	
Poziom budynku	B1. Wielokondygnacyjny obiekt, z kilkoma przegrodami wewnętrznymi, prosto rozplanowany z dobrą widzialnością, z krótkimi drogami przejścia, z odpowiednią ilością drzwi prowadzącymi bezpośrednio do innej strefy pożarowej lub obudowanej klatki schodowej.

Klasyfikacja systemu zarządzania bezpieczeństwem pożarowym i wpływ na czas ewakuacji	
Poziom zarządzania	M2. Użytkownicy (personel lub mieszkańcy) powinni zostać przeszkoleni do wysokiego poziomu zarządzania bezpieczeństwem z zapewnieniem praktyki w zabezpieczeniu przeciwpożarowym i utrzymywaniem urządzeń, dozorem na kondygnacji, dobrze opracowaną instrukcją bezpieczeństwa pożarowego i regularnymi ćwiczeniami oraz niezależnym audytem.
Obliczenie Wymaganego Bezpiecznego Czasu Ewakuacji	
Obliczenie czasu detekcji pożaru	Dane producentów i normowe: td – czas detekcji pożaru (wystąpienie alarmu II stopnia): <u>60 s</u>
Obliczenie czasu Alarmowania	ta – czas alarmowania: <u>0 s</u> Obiekt jest wyposażony w system sygnalizacji pożaru.
Obliczenie czasu pierwszych-wstępnych reakcji	Kategoria scenariuszy i modyfikacje: Czuwający, zaznajomieni: M2 B1 A1. tp-wr: czas reakcji: <u>60 s (1%)</u>
Obliczenie czasu opuszczenia sali konferencyjno-wystawowej	<u>Ewakuacja z najdalszego miejsca przy założeniu największej możliwej gęstości osób (założono brak dostępnego jednego wyjścia ewakuacyjnego):</u> a) czas dojścia do wyjścia z najdalszego punktu prędkość na drodze poziomej: 1,2 m/s maksymalna długość drogi w poziomie: 15 m czas pokonania drogi: $15 : 1,2 = \underline{13 \text{ s}}$ b) czas kolejki, przechodzenia przez wyjścia ewakuacyjne przewidywana maksymalna liczba osób: 150 szerokość wyjść ewakuacyjnych: 4,5 m przepustowość drzwi: 1,33 os/m s czas kolejki do wyjścia z sali konferencyjnej: $150 / (1,33 * 4,5) \approx \underline{25 \text{ s}}$ Czas przejścia: $13 + 25 = 38 \text{ s}$
WCBE = td+ta+tp-wr+tp = 60 + 0 + 60 + 38 = 158 sekund + 15% ≈ 182 sekundy	
Obliczenie czasu ewakuacji do obudowanych klatek schodowych lub do innej strefy pożarowej	<u>Ewakuacja z najdalszego miejsca przy założeniu największej możliwej gęstości osób do obudowanej klatki schodowej lub do innej strefy pożarowej (założono brak dostępnego wyjścia ewakuacyjnego do jednej klatki schodowej):</u>

	a) czas dojścia do wyjścia z najdalszego punktu prędkość na drodze poziomej: 1,2 m/s maksymalna długość drogi w poziomie: 40 m czas pokonania drogi: $40 : 1,2 = \underline{34 \text{ s}}$ b) czas kolejki, przechodzenia przez wyjścia ewakuacyjne przewidywana maksymalna liczba osób: 150 szerokość wyjść ewakuacyjnych: 2,8 m przepustowość drzwi: 1,33 os/m s czas kolejki do wyjścia z sali konferencyjnej: $150 / (1,33 * 2,8) \approx \underline{40 \text{ s}}$ Czas przejścia: $34 + 40 = 74 \text{ s}$
WCBE = $t_d + t_a + t_p - w_r + t_p = 60 + 0 + 60 + 74 = 194 \text{ sekundy} + 15\% \approx 223 \text{ sekundy}$	

Biorąc pod uwagę powyższe obliczenia można założyć, że czas ewakuacji sali konferencyjno-wystawowej do miejsca bezpiecznego nie powinien przekroczyć **3 minut 45 sekund** z uwzględnieniem 15% marginesu bezpieczeństwa. Samo opuszczenie sali konferencyjno-wystawowej nie powinno przekroczyć **3 minut i 2 sekund** z uwzględnieniem 15% marginesu bezpieczeństwa.

4. SYMULACJE CFD

4.1. CHARAKTERYSTYKA UŻYTEGO PROGRAMU CFD

4.1.1. NAZWA PROGRAMU, WERSJA, PRODUCENT

Do przeprowadzenia szczegółowej analizy oraz otrzymania wyników zawartych w raporcie wykorzystany został program Fire Dynamics Simulator wersja 6.5.3, który jest narzędziem opracowanym przez amerykański instytut naukowo-badawczy NIST (National Institute of Standards and Technology). Program jest znany oraz stosowany w środowisku inżynierów, pracowników i studentów wyższych uczelni technicznych na całym świecie, zajmujących się nowoczesną inżynierią bezpieczeństwa pożarowego. Aplikacja 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. Wykorzystują one zasady zachowania masy, pędu i energii. FDS jest narzędziem przeznaczonym do szczegółowej analizy zagrożeń pożarowych i rozwiązywania problemów związanych inżynierią bezpieczeństwa pożarowego. Zapewnia tym samym możliwość poznania dynamiki zjawiska pożaru oraz zachodzących tam procesów spalania. Program ten, w zakresie zagadnień związanych z bezpieczeństwem pożarowym, można stosować do modelowania transportu ciepła i produktów spalania powstałych na skutek pożaru, wymiany ciepła poprzez promieniowanie i konwekcję, pirolizy, rozprzestrzeniania się płomieni oraz rozwoju pożaru, aktywacji tryskaczy oraz czujek dymu i ciepła, czy też oddziaływania kropli wody na płomień [2]. Program FDS wykorzystuje technikę LES oraz, po wprowadzeniu odpowiednio gęstej siatki obliczeniowej, bezpośrednią symulację numeryczną (DNS). Model LES uwzględnia wiry o wielkości porównywalnej z wielkością komórek siatki. Metoda ta w ostatnich latach jest intensywnie rozwijana, ponieważ stanowi kompromis pomiędzy dokładnością odwzorowania dynamiki pożaru, a dostępnymi obecnie możliwościami obliczeniowymi. DNS traktuje turbulencję w sposób deterministyczny.

4.1.2. RODZAJ I GĘSTOŚĆ SIATKI OBLICZENIOWEJ

Użyto siatki regularnej sześcienniej o boku 20 cm. Domena obliczeniowa została podzielona na 12 siatek obliczeniowych. Rozmiar siatki dobrano w oparciu o:

- a) wytyczne Health and Safety Laboratory [1],
- b) wytyczne NUREG, publikowane również w instrukcji użytkownika FDS6 User's Guide [2].

4.1.3. MODEL TURBULENCJI

W przeprowadzonej symulacji został wykorzystany model Deardorff LES, odpowiedni dla wolnych przepływów dymu i gazów pożarowych pod wpływem termicznych sił wyporu.

4.1.4. MODEL SPALANIA

Użyto modelu mixing-controlled. Model ten przyjmuje następujące uproszczenia:

- a) skład stechiometryczny mieszaniny palnej jest definiowany przez ułamek masowy gazów palnych i produktów spalania oraz powietrza,
- b) spalanie następuje natychmiast po zmieszaniu,
- c) spalanie jest jednoetapowe i całkowite,
- d) procent powstającego tlenku węgla jest stały i wynika z początkowych założeń symulacji a nie z aktualnych warunków spalania.

Założenia te dają prawidłowe wyniki w przypadku pożarów kontrolowanych przez paliwo jak ma to miejsce w założonych scenariuszach.

4.1.5. MODEL PROMIENIOWANIA

Równanie transportu promieniowania dla gazu szarego, jest rozwiązywane metodą objętości skończonych (FVM – Finite Volume Method). Metoda ta dzieli całe widmo promieniowania na kilka przedziałów częstości (typowo 6) i korzysta w nich z całkowitej postaci równań transportu promieniowania. Przedziały te dobrane są tak, by pokrywały się z pasmami widma substancji występujących w układzie. Część strumienia mocy pożaru emitowana w postaci promieniowania jest stała i jest jednym z parametrów symulacji. Przyjęto ułamek promieniowania 34%, co odpowiada spalaniu większości tworzyw sztucznych.

4.2. NIEPEWNOŚCI OBLICZENIOWE I ZASTOSOWANE WSPÓLCZYNNIKI BEZPIECZEŃSTWA

W tabeli poniżej przedstawiono średnie procentowe niepewności obliczeniowe dla poszczególnych parametrów.

Tabela 5. Średnie błędy wyznaczania wielkości fizycznych w FDS

Źródło: [5]

Mierzona wielkość	Niepewność (%)
Temperatura warstwy podsufitowej dymu	15
Wysokość strefy wolnej od zadymienia	13
Temperatura strumienia podsufitowego	16
Temperatura płomienia	14
Stężenia gazów	9
Stężenie dymu i widzialność	33
Ciśnienie	40
Strumień ciepła	20
Temperatura powierzchni	14

4.3. WARUNKI POCZĄTKOWE I BRZEGOWE

4.3.1. POCZĄTKOWA TEMPERATURA WEWNĘTRZNA I ZEWNĘTRZNA

Przyjęto początkową temperaturę wewnątrz i na zewnątrz obiektu równą 20°C.

4.3.2. MATERIAŁY ELEMENTÓW BUDOWLANYCH

Właściwości materiałów budowlanych przyjęto w symulacji na podstawie normy PN-EN ISO 6946 [6].

Tabela 6. Właściwości materiałów budowlanych, wprowadzonych do programu FDS.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [6].

Material	Gęstość [kg/m³]	Ciepło właściwe [kJ/kg·K]	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/m·K]
Żelbet	2500	0,84	1,70
Błoczki betonowe	800	0,84	0,30
Płyta 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

4.3.3. MATERIAŁ PALNY

Jako materiał palny przyjęto piankę poliuretanową. Właściwości palne wg [8] zebrano w tabeli 7.

Tabela 7. Właściwości materiału spalanego użyte w symulacji.

Źródło: [8].

Ciepło spalania [kJ/kg]	26 200
Ułamek masowy dymu	0,13
Ułamek masowy tlenu węgla	0,01
Stosunek atomów węgla:wodoru:tlenu	1:1,75:0,25
Masowy współczynnik ekstynkcji K_m [m²/kg]	8700

4.3.4. ZASTOSOWANE SCHEMATY I USTAWIENIA NUMERYCZNE

Krok czasowy jest obliczany z zachowaniem kryterium CFL, tzn:

$$CFL = \delta t \frac{\|\bar{u}\|}{\delta x}, \text{ gdzie } CFL \in (0,8; 1)$$

Krok czasowy obliczany jest automatycznie zgodnie z jednym z trzech schematów, odnoszących się do sposobu normalizacji wektora prędkości. Domyślnym schematem dla użytej wersji 6.5.3 jest schemat L_∞ :

$$\frac{\|\bar{u}\|}{\delta x} = \max\left(\frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z}\right)$$

4.3.5. CZAS SYMULACJI

Jako czas symulacji przyjęto 1200 s. Krok czasowy jest ustalany automatycznie na podstawie liczby CFL, przy użyciu schematu L_∞ .

4.4. ANALIZOWANE PARAMETRY POŻARU

Podczas analizy numerycznej sprawdzeniu podlegają następujące parametry:

- a) zasięg widzialności na wysokości 1,8 m od podłogi – przyjęta wartość krytyczna to 10 m,
- b) temperatura na wysokości 1,8 m od podłogi oddziałująca na użytkowników obiektu w czasie ewakuacji – wartość krytyczna to 60°C, lecz ze względu na 15%-owy współczynnik niepewności dla przyrostu temperatury powyżej temperatury początkowej dla górnej warstwy dymu, przyjęto wartość krytyczną równą 54°C,

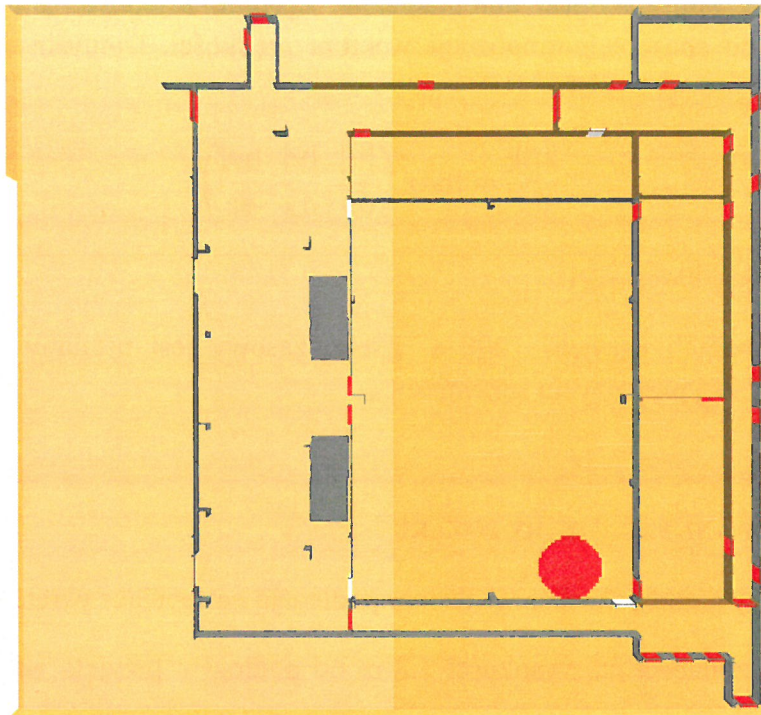
Dane wyjściowe zostały odczytane poprzez zdefiniowane punkty pomiarowe oraz wizualizację w programie SmokeView.

Domyślnie program Smokeview na wizualizacji wyników odcina wartości poniżej 1 centyla i powyżej 99 centyla, tak aby graficzne odwzorowanie wyników w całej rozpatrywanej przestrzeni było bardziej czytelne. Dlatego w raporcie nie pokazano najwyższej temperatury nad pożarem, ale obszar powyżej rozpatrywanej temperatury granicznej.

4.5. ANALIZOWANE SCENARIUSZE POŻAROWE

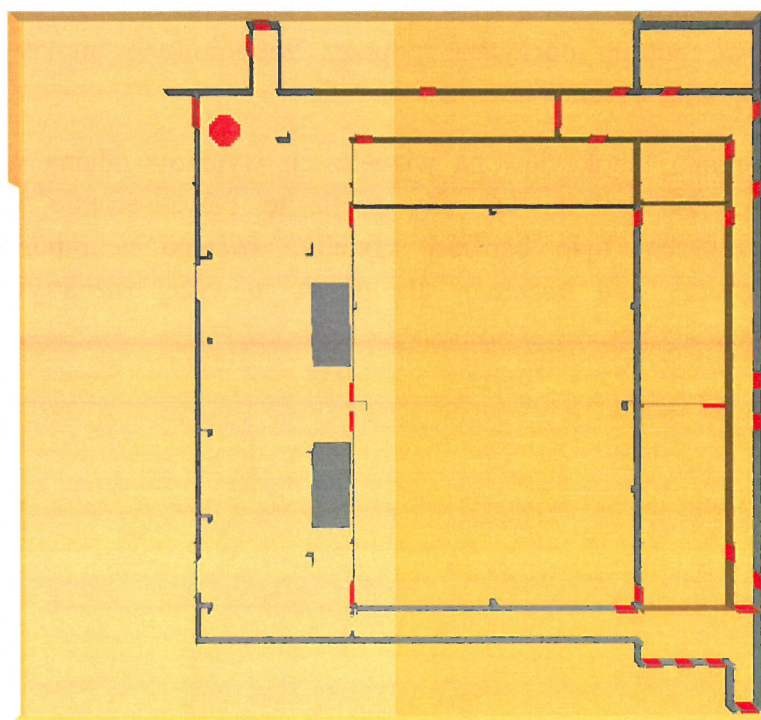
W analizowanej części obiektu wykonano 1 symulację pożaru w obrębie sali konferencyjnej oraz 2 symulacje pożaru w obrębie foyer:

- a) scenariusz nr 1 – pożar w obrębie sali konferencyjno-wystawowej,



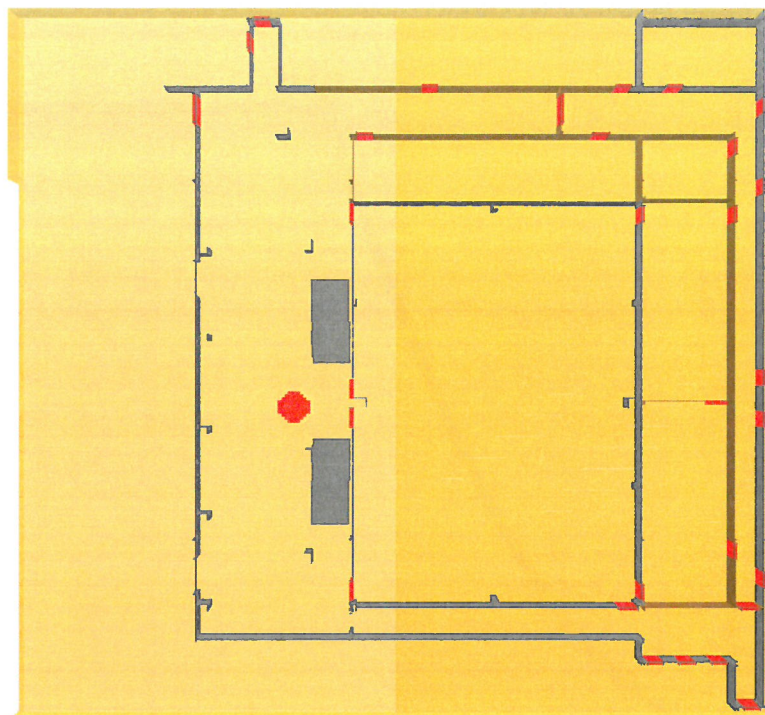
Time: 20.0

- b) scenariusz nr 2 – pożar w obrębie foyer,



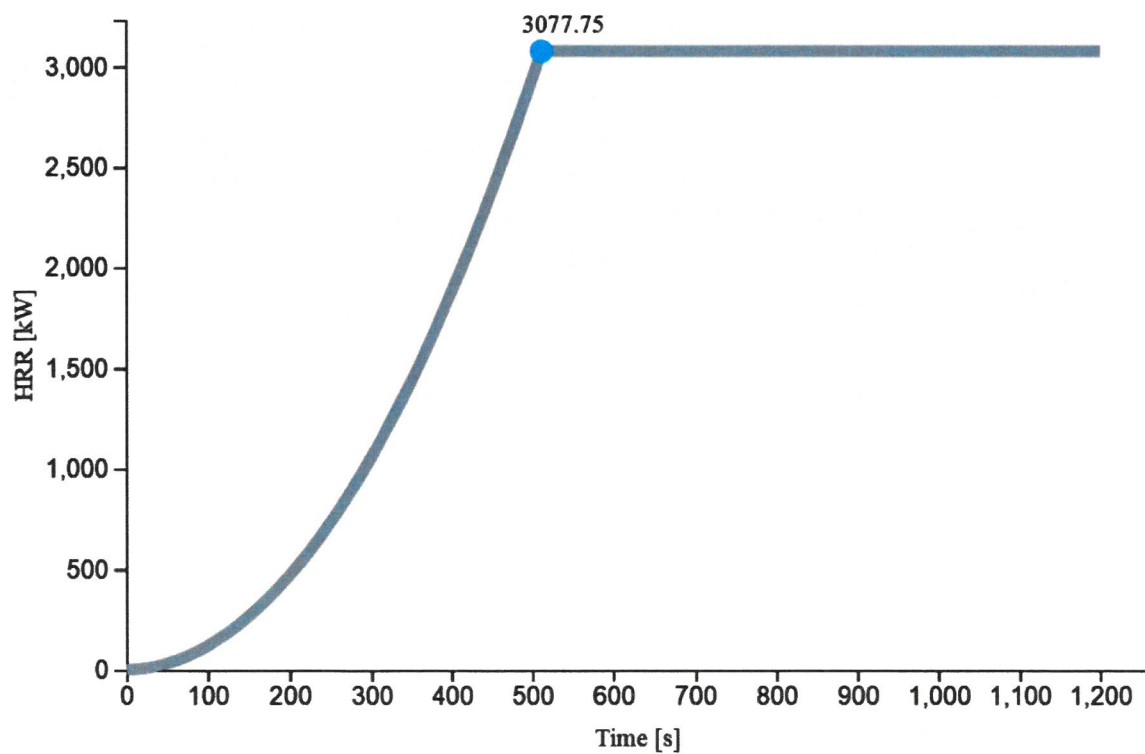
Time: 20.0

c) scenariusz nr 3 - pożar w obrębie foyer.

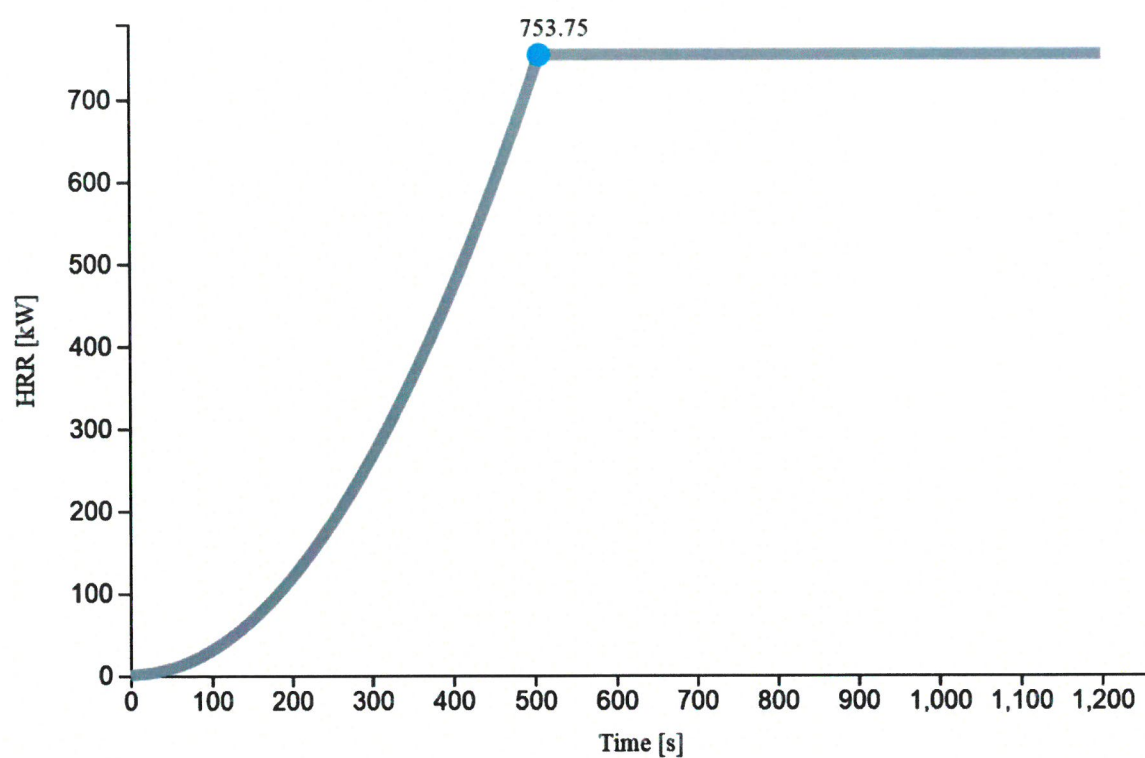


Time: 20.0

W scenariuszu nr 1 założono pożar typu "spread fire", który rozwija się z średnią szybkością (rozwój średni) przez cały czas zakładanej ewakuacji. Założoną krzywą mocy pożaru przedstawia poniższy wykres.



W scenariuszu nr 2 oraz 3 założono pożar typu "spread fire", który rozwija się z małą szybkością (rozwój wolny) przez cały czas zakładanej ewakuacji. Założoną krzywą mocy pożaru przedstawia poniższy wykres.

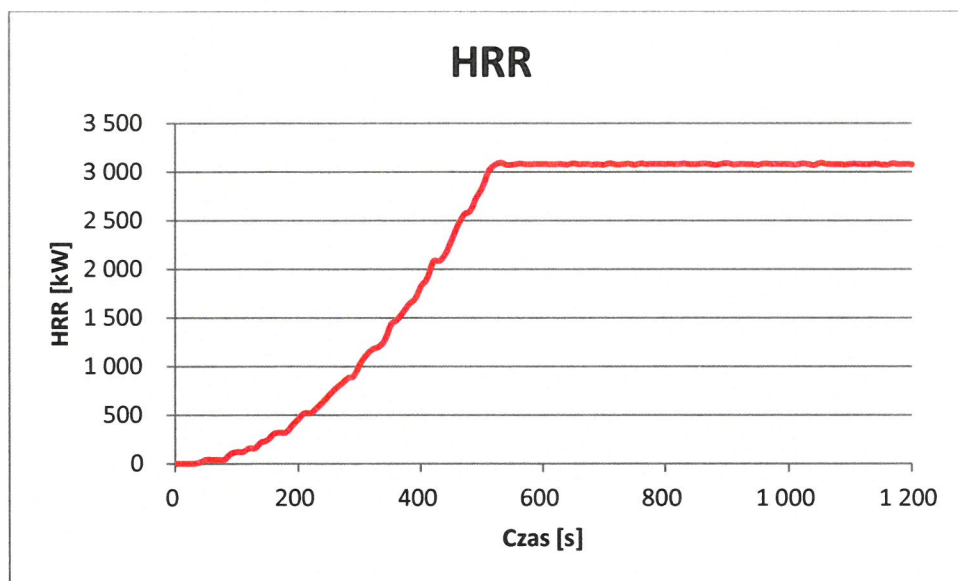


5. WYNIKI SYMULACJI CFD DLA SALI KONFERENCYJNEJ

5.1. SPRAWDZENIE WARUNKÓW EWAKUACJI

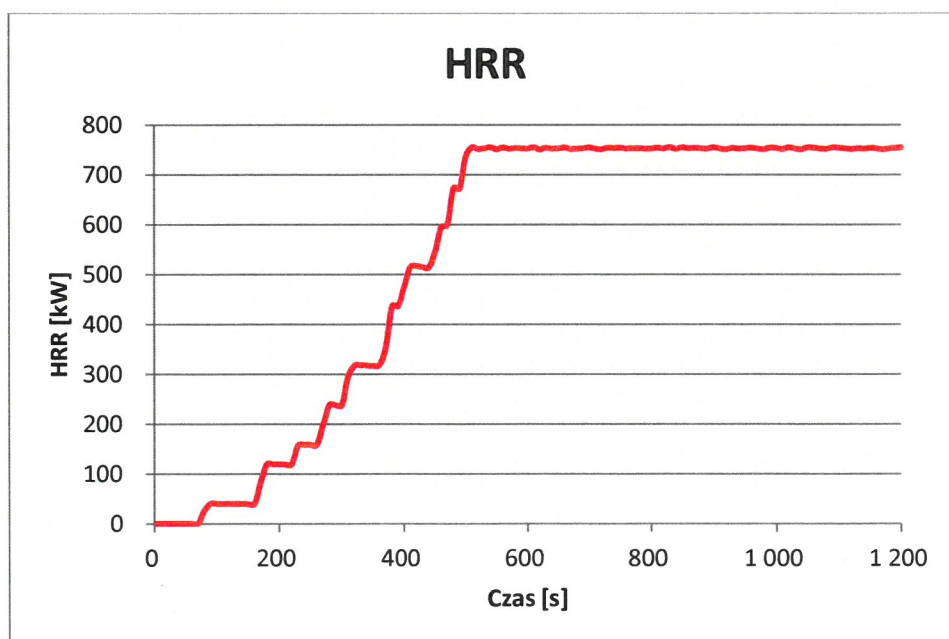
5.1.1. KRZYWE MOCY POŻARU

Poniżej przedstawiona została krzywa rozwoju pożaru, która została wygenerowana przez program FDS. Do czasu ewakuacji pożar uzyskuje moc około 580 kW.



Otrzymana krzywa jest zgodna z krzywą założoną dla scenariusza nr 1.

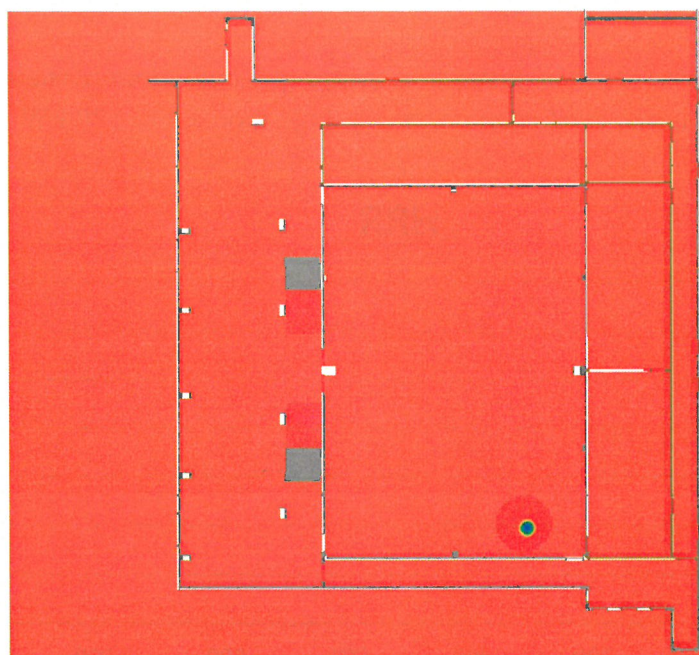
Poniżej przedstawiona została krzywa rozwoju pożaru, która została wygenerowana przez program FDS. Do czasu ewakuacji pożar uzyskuje moc około 160 kW.



Otrzymana krzywa jest zgodna z krzywą założoną dla scenariusza nr 2 i 3.

5.1.2. ZASIĘG WIDZIALNOŚCI NA WYSOKOŚCI 1.8 M W CZASIE EWAKUACJI

Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 60 sekundach

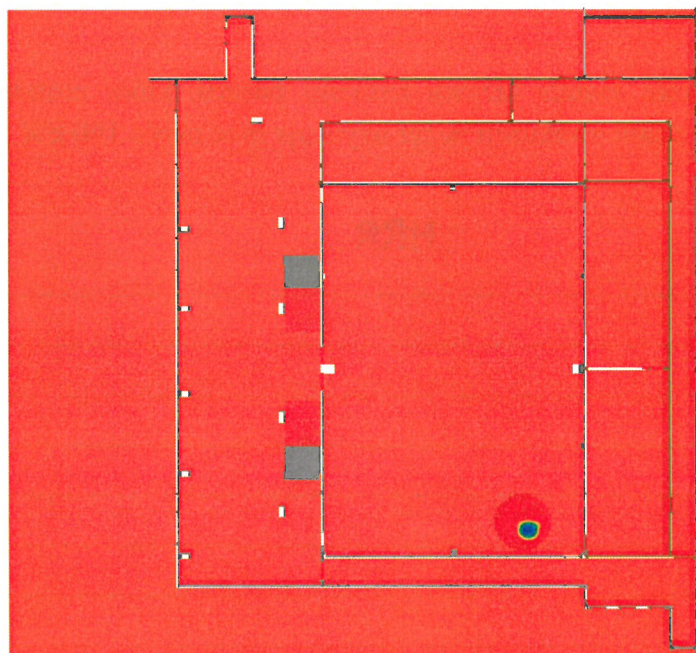


Slice
VIS_C0.9H
m

31.0
27.9
24.9
21.9
18.8
15.8
12.7
10.7
6.60
3.55
0.50

Time: 60.0

Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach

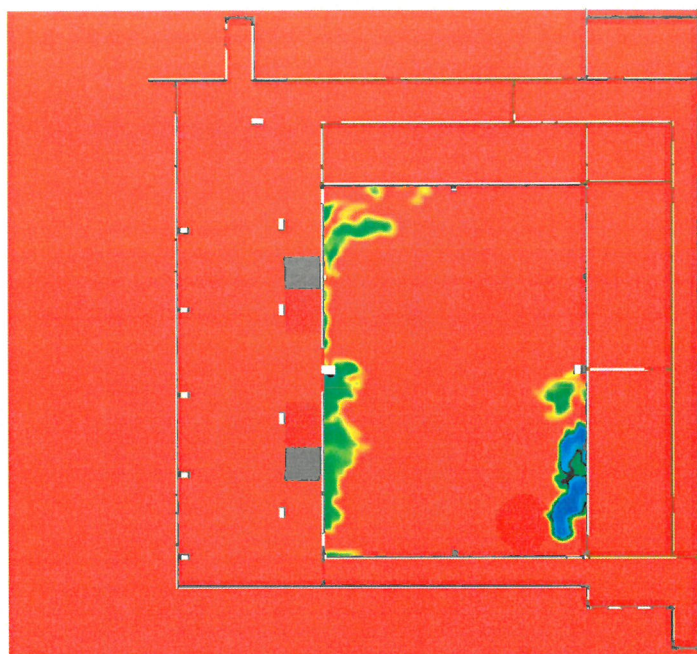


Slice
VIS_C0.9H
m

31.0
27.9
24.9
21.9
18.8
15.8
12.7
10.7
6.60
3.55
0.50

Time: 120.0

Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 180 sekundach

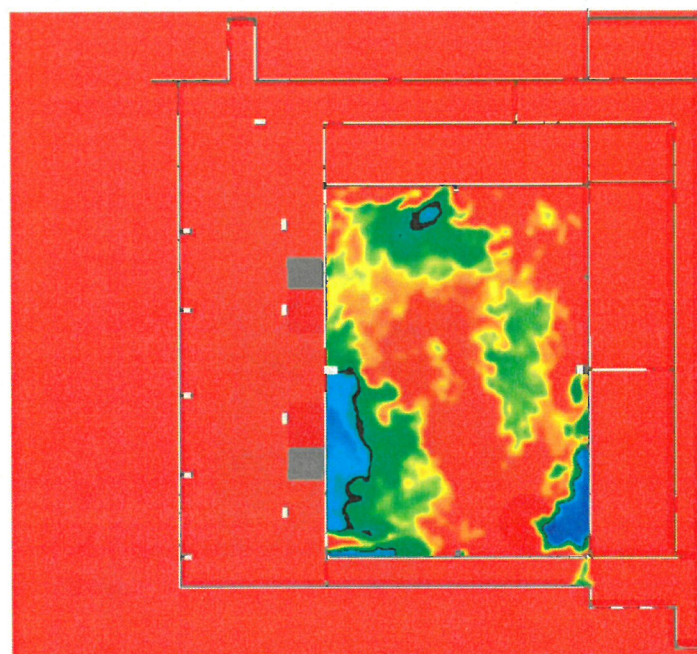


Slice
VIS_C0.9H
m

31.0
27.9
24.9
21.9
18.8
15.8
12.7
10.7
6.60
3.55
0.50

Time: 180.0

Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach

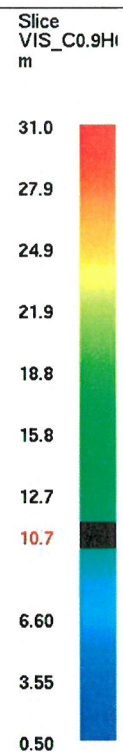
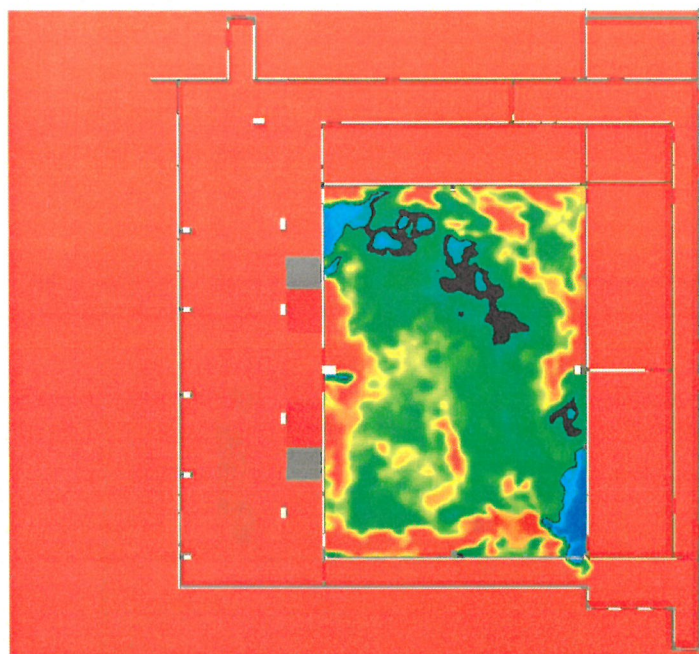


Slice
VIS_C0.9H
m

31.0
27.9
24.9
21.9
18.8
15.8
12.7
10.7
6.60
3.55
0.50

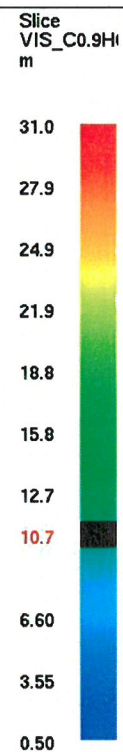
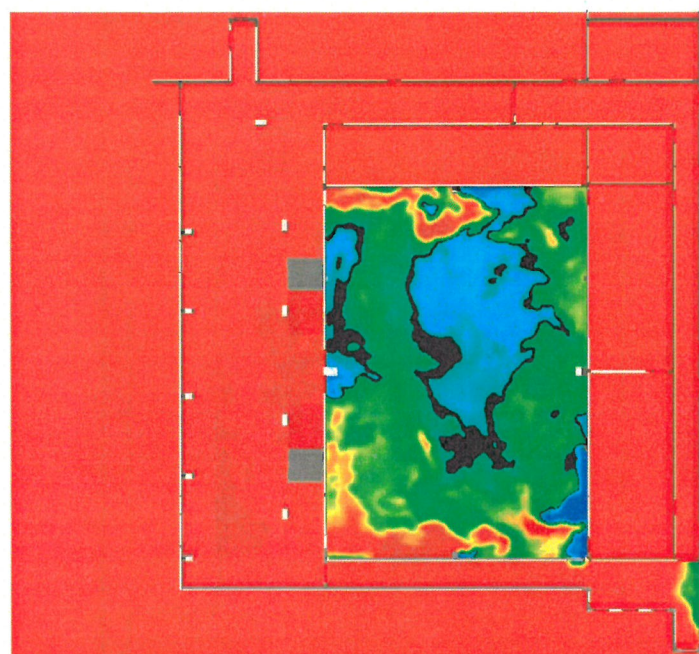
Time: 240.0

Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 270 sekundach



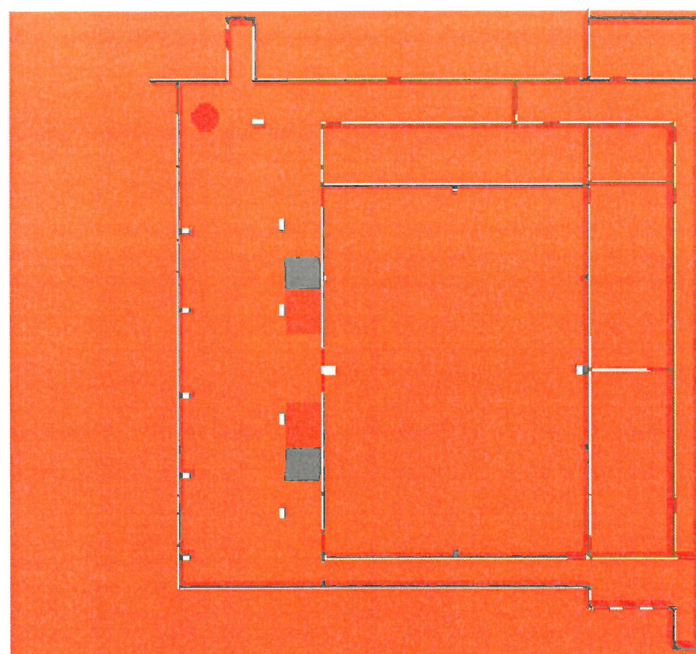
Time: 270.0

Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 300 sekundach



Time: 300.0

Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 60 sekundach

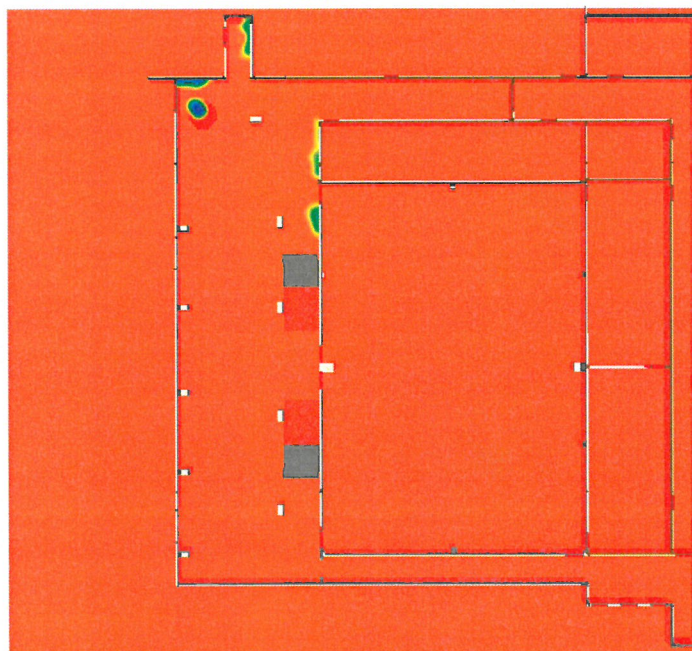


Slice
VIS_C0.9H
m

32.0
28.9
25.9
22.9
19.8
16.8
13.7
11.7
7.60
4.55
1.50

Time: 60.0

Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach

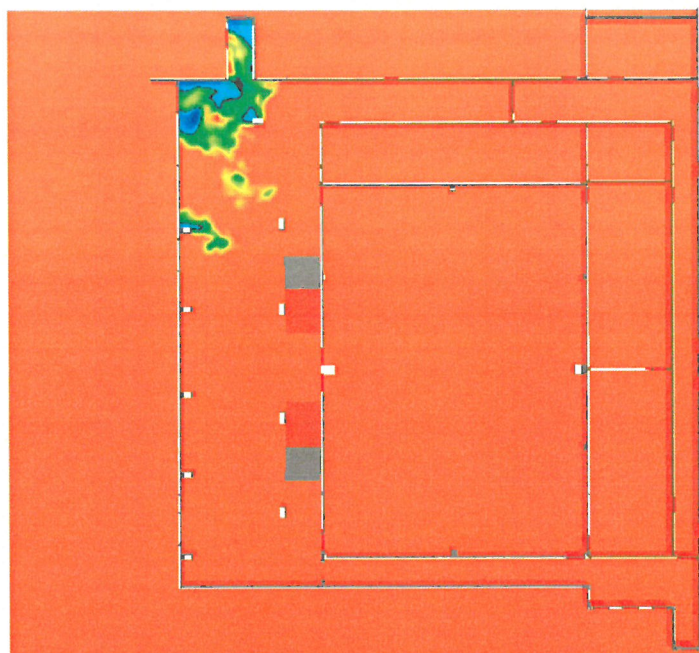


Slice
VIS_C0.9H
m

32.0
28.9
25.9
22.9
19.8
16.8
13.7
11.7
7.60
4.55
1.50

Time: 120.0

Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 180 sekundach



Slice
VIS_C0.9H
m

32.0

28.9

25.9

22.9

19.8

16.8

13.7

11.7

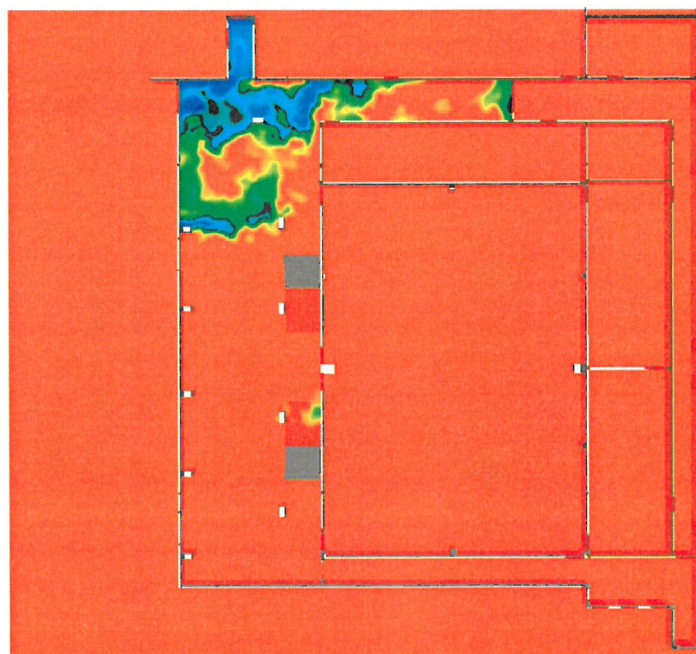
7.60

4.55

1.50

Time: 180.0

Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach



Slice
VIS_C0.9H
m

32.0

28.9

25.9

22.9

19.8

16.8

13.7

11.7

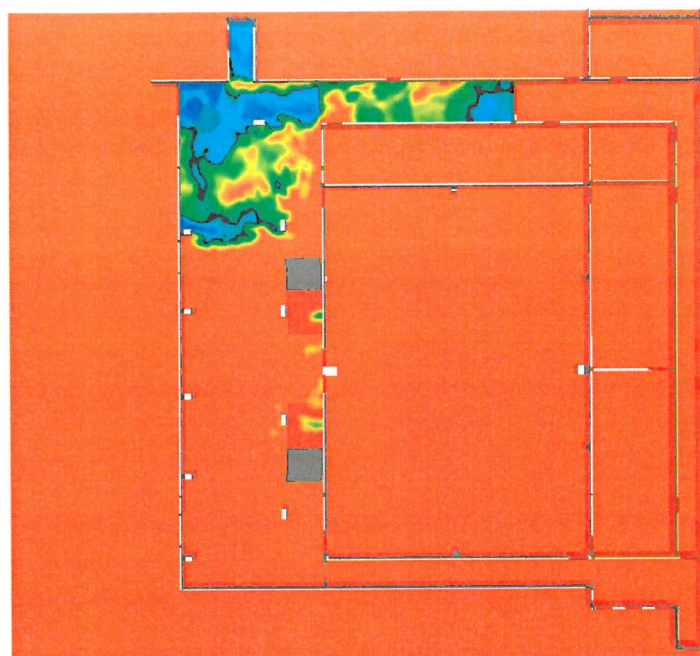
7.60

4.55

1.50

Time: 240.0

Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 270 sekundach

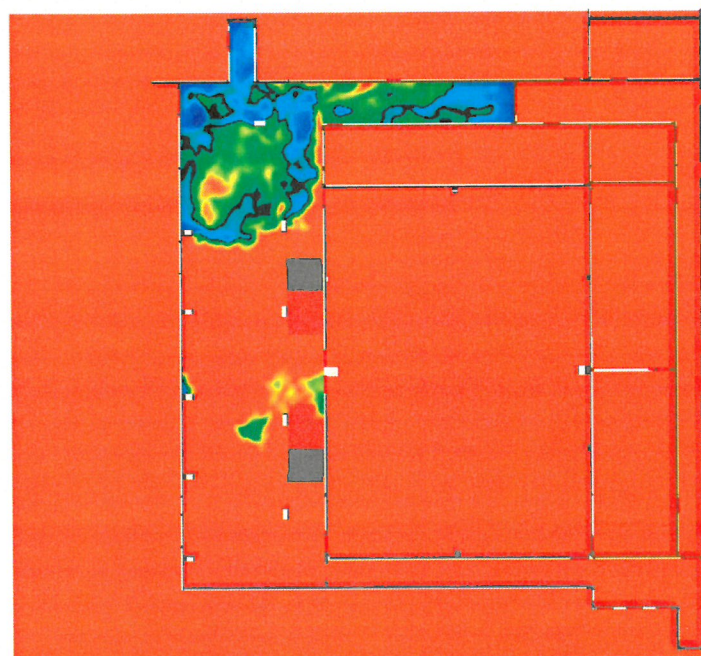


Slice
VIS_C0.9H
m

32.0
28.9
25.9
22.9
19.8
16.8
13.7
11.7
7.60
4.55
1.50

Time: 270.0

Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 300 sekundach

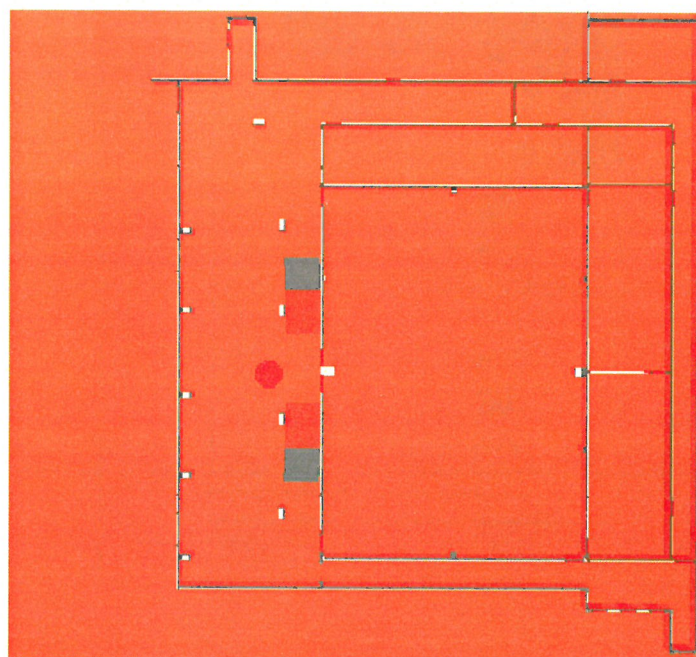


Slice
VIS_C0.9H
m

32.0
28.9
25.9
22.9
19.8
16.8
13.7
11.7
7.60
4.55
1.50

Time: 300.0

Scenariusz nr 3 – spadek zasięgu widzialności po 60 sekundach



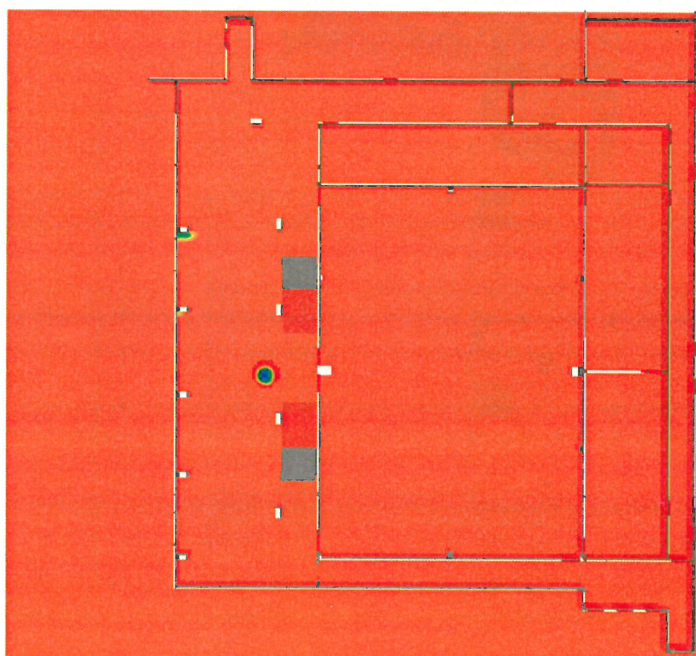
Slice
VIS_C0.9H
m

32.0
28.9
25.8
22.7
19.6
16.5
13.4
11.3
7.20
4.10
1.00



Time: 60.0

Scenariusz nr 3 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach



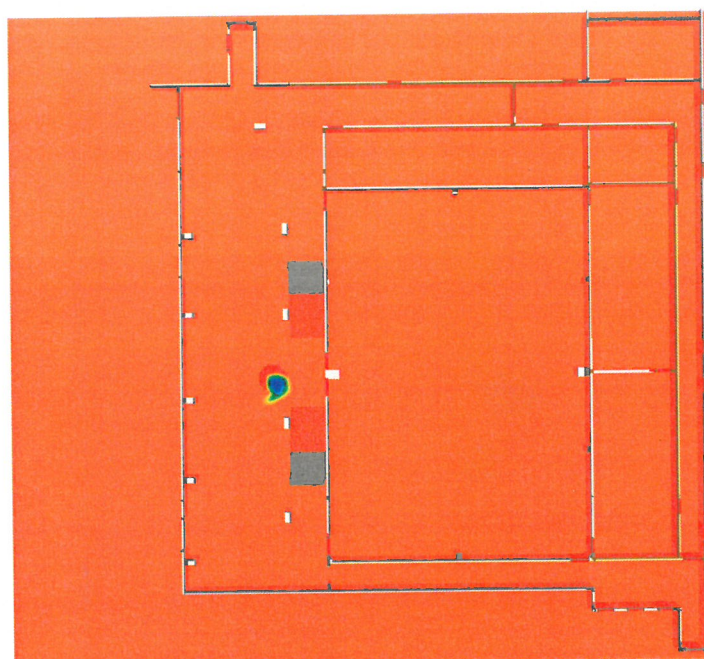
Slice
VIS_C0.9H
m

32.0
28.9
25.8
22.7
19.6
16.5
13.4
11.3
7.20
4.10
1.00



Time: 120.0

Scenariusz nr 3 – spadek zasięgu widzialności po 180 sekundach

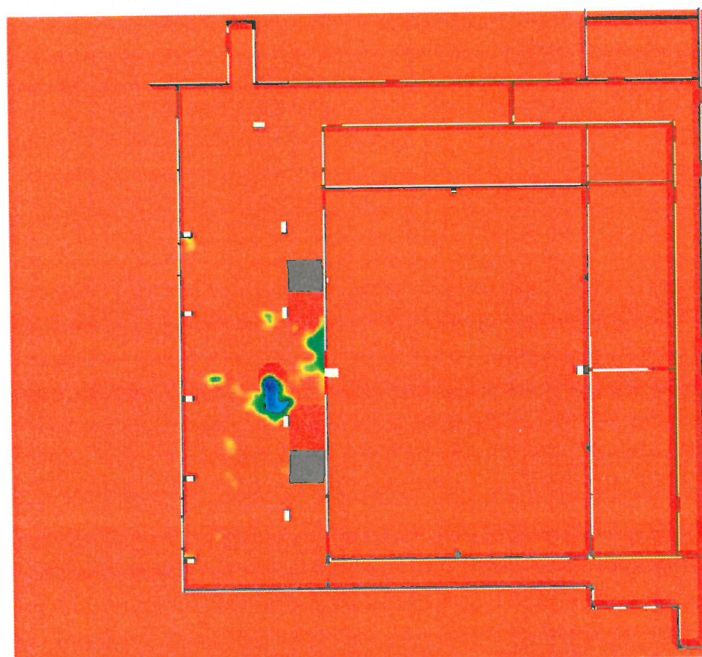


Slice
VIS_C0.9H
m

32.0
28.9
25.8
22.7
19.6
16.5
13.4
11.3
7.20
4.10
1.00

Time: 180.0

Scenariusz nr 3 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach

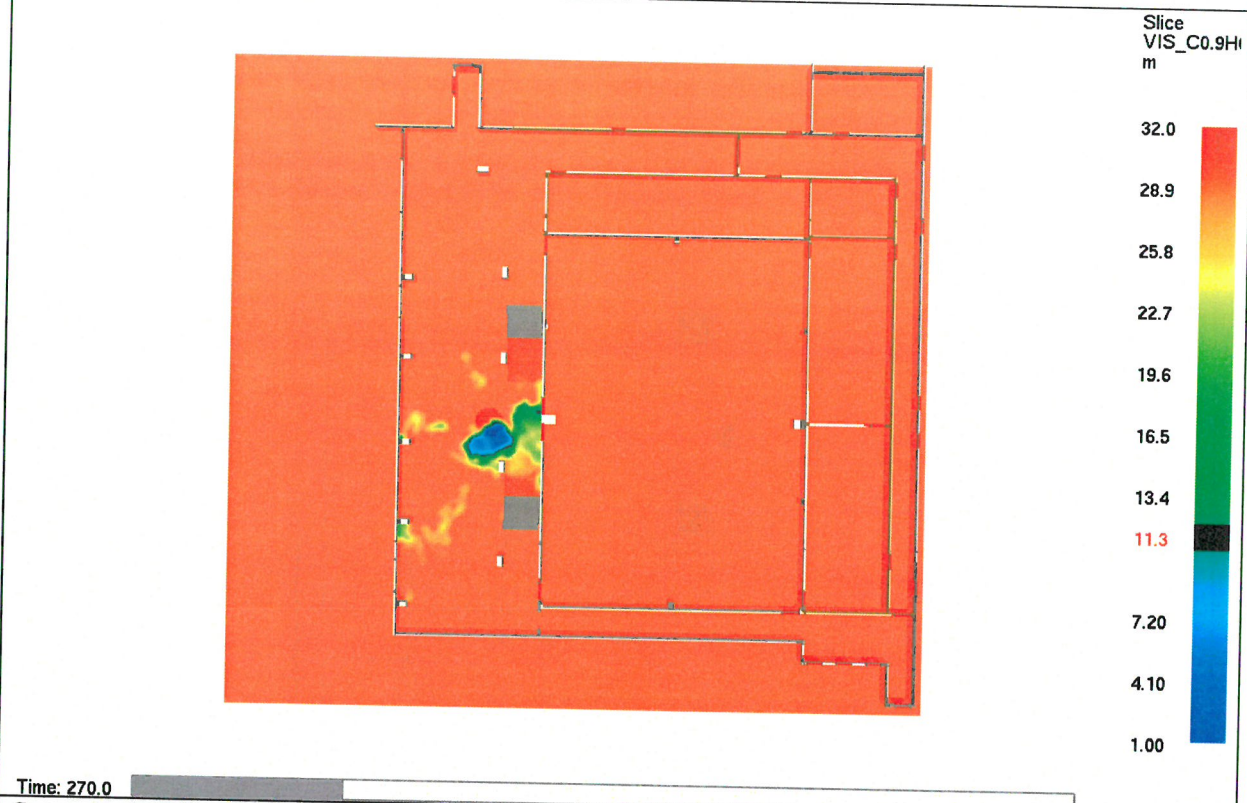


Slice
VIS_C0.9H
m

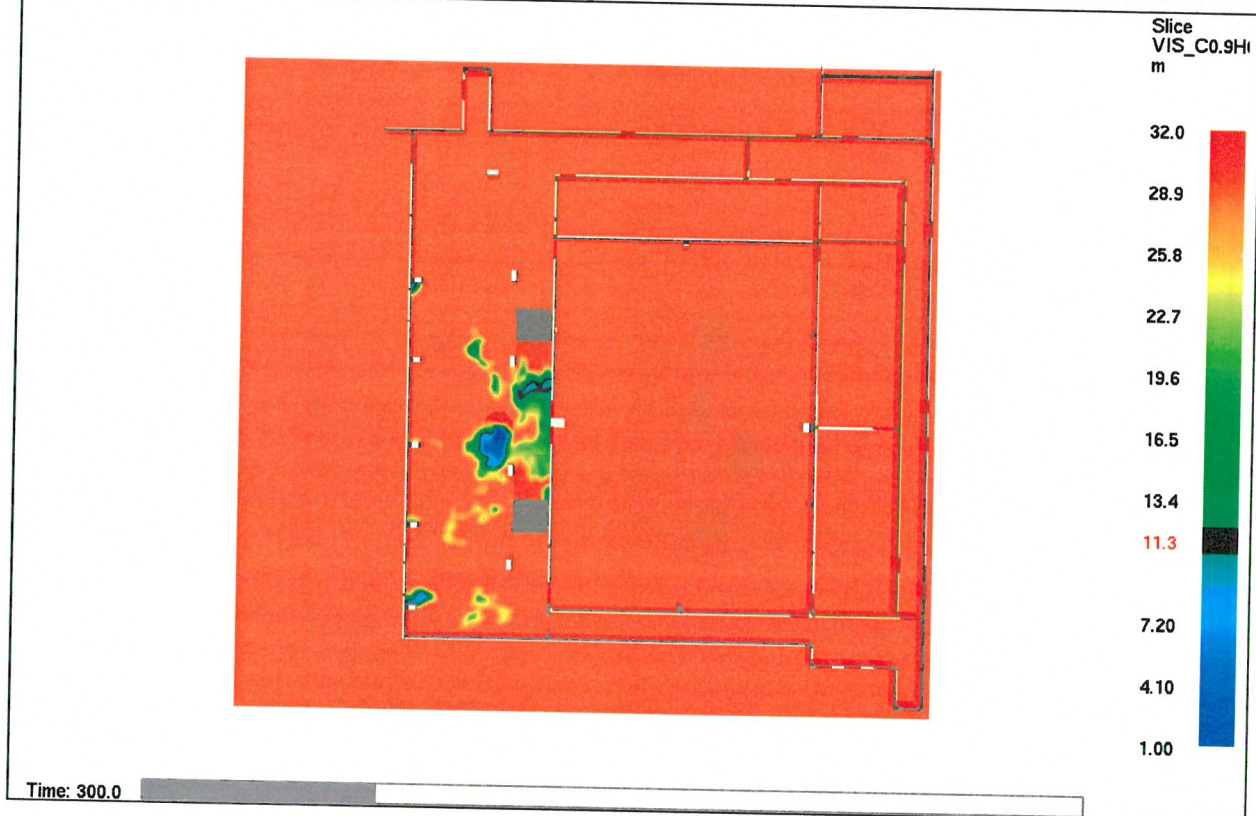
32.0
28.9
25.8
22.7
19.6
16.5
13.4
11.3
7.20
4.10
1.00

Time: 240.0

Scenariusz nr 3 – spadek zasięgu widzialności po 270 sekundach

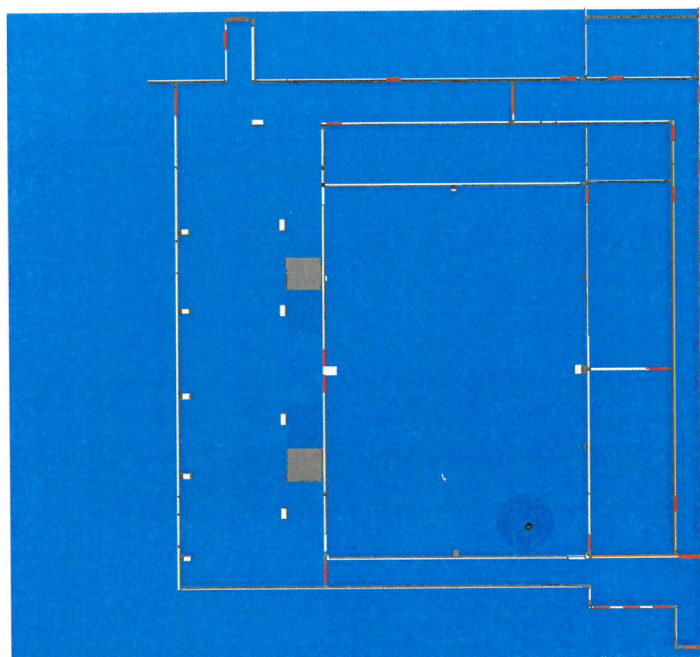


Scenariusz nr 3 – spadek zasięgu widzialności po 300 sekundach



5.1.3. TEMPERATURA NA WYSOKOŚCI 1.8 M W CZASIE EWAKUACJI

Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 60 sekundach

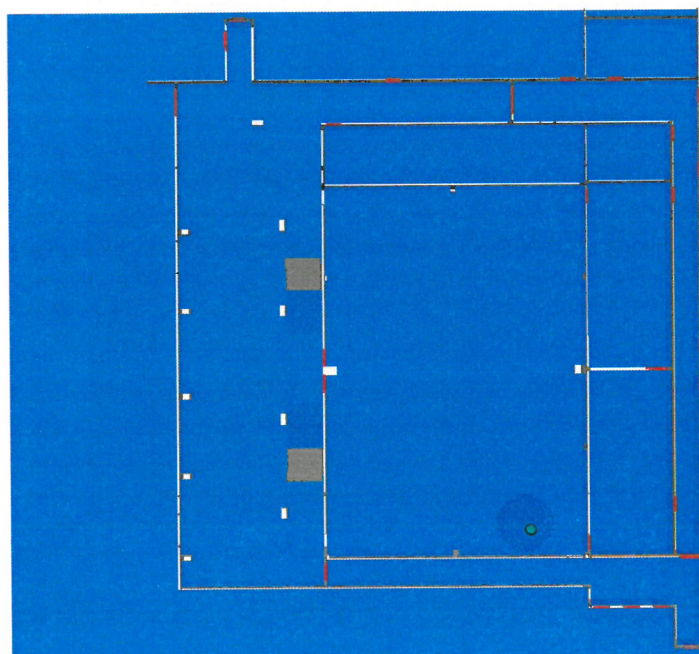


Slice
temp
°C

306
275
245
214
184
153
122
91.8
61.2
54.0
0.00

Time: 60.0

Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 120 sekundach

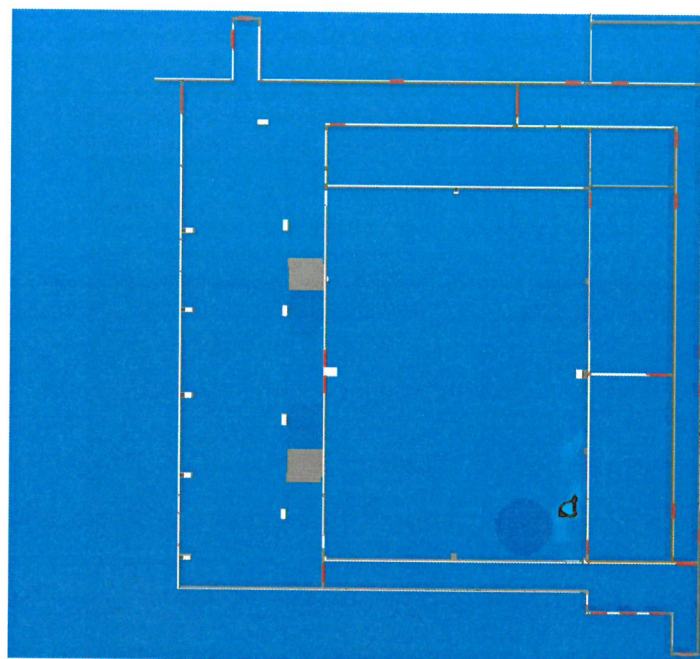


Slice
temp
°C

306
275
245
214
184
153
122
91.8
61.2
54.0
0.00

Time: 120.0

Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 180 sekundach



Slice
temp
°C

306

275

245

214

184

153

122

91.8

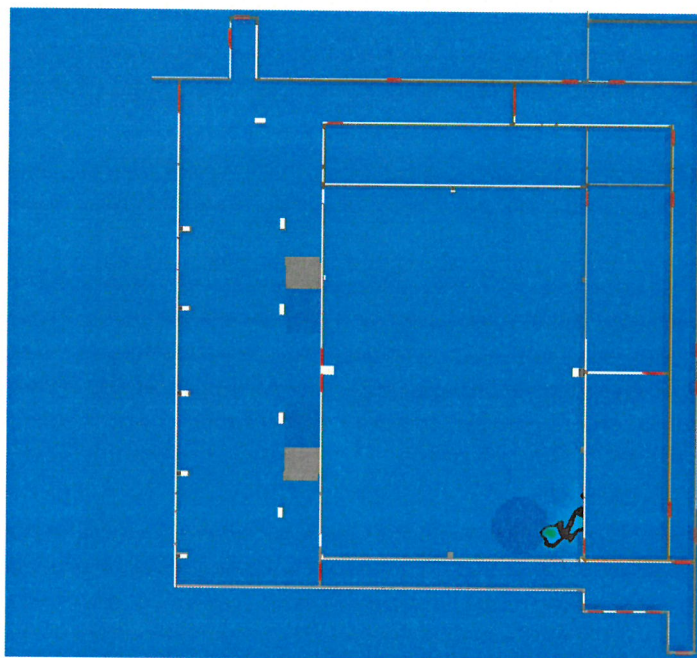
61.2

54.0

0.00

Time: 180.0

Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 240 sekundach



Slice
temp
°C

306

275

245

214

184

153

122

91.8

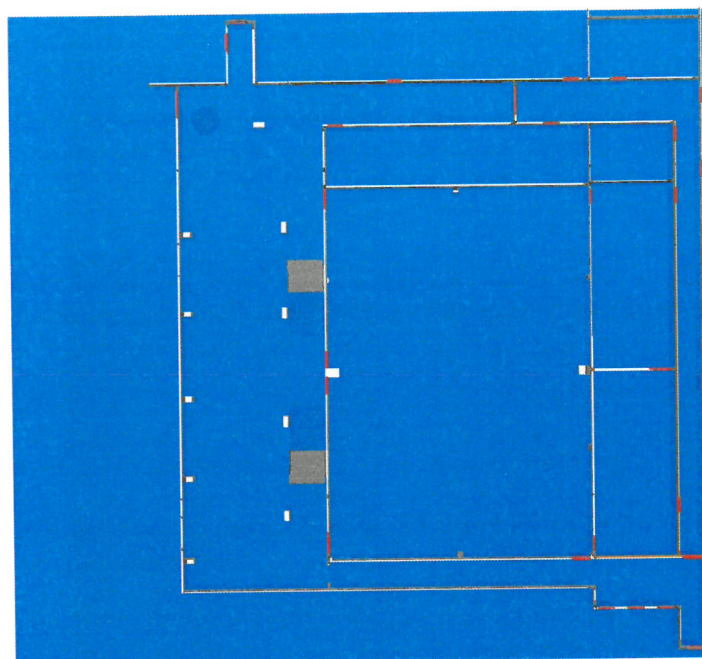
61.2

54.0

0.00

Time: 240.0

Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 60 sekundach



Slice
temp
°C

306

275

245

214

184

153

122

91.8

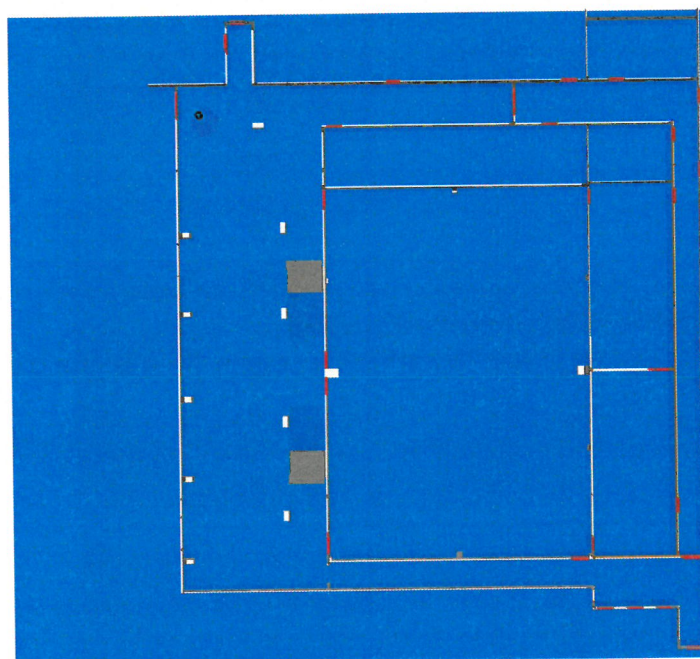
61.2

54.0

0.00

Time: 60.0

Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 120 sekundach



Slice
temp
°C

306

275

245

214

184

153

122

91.8

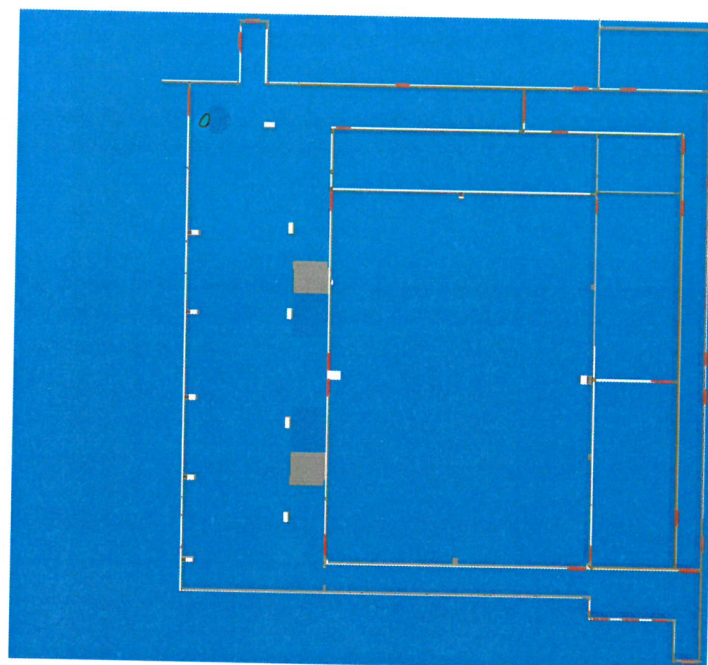
61.2

54.0

0.00

Time: 120.0

Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 180 sekundach



Slice
temp
°C

306

275

245

214

184

153

122

91.8

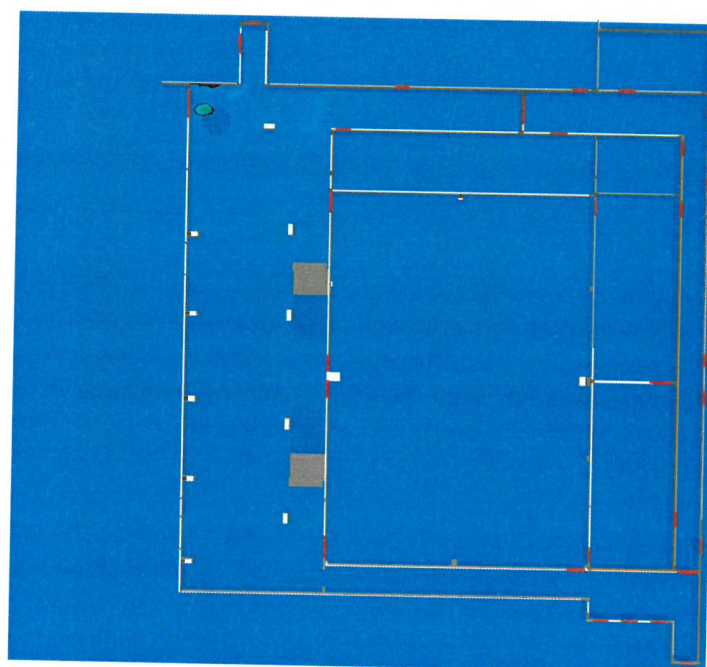
61.2

54.0

0.00

Time: 180.0

Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 240 sekundach



Slice
temp
°C

306

275

245

214

184

153

122

91.8

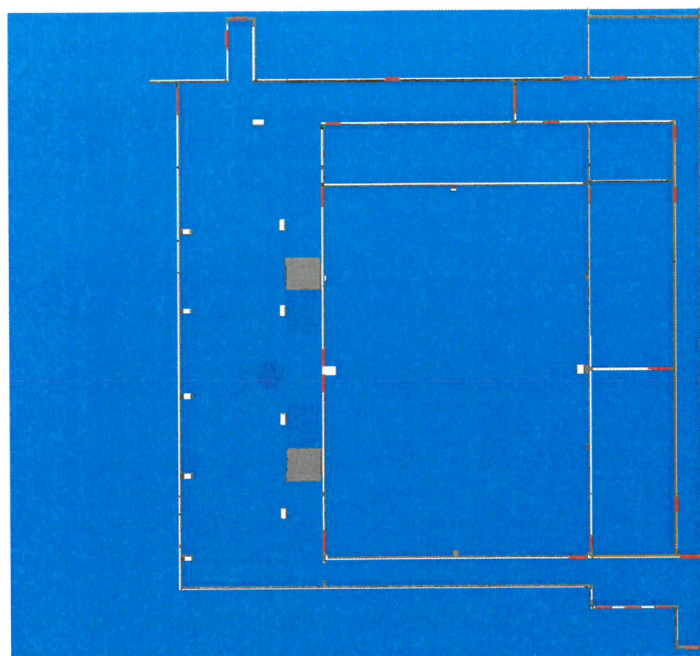
61.2

54.0

0.00

Time: 240.0

Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 60 sekundach



Slice
temp
°C

306

275

245

214

184

153

122

91.8

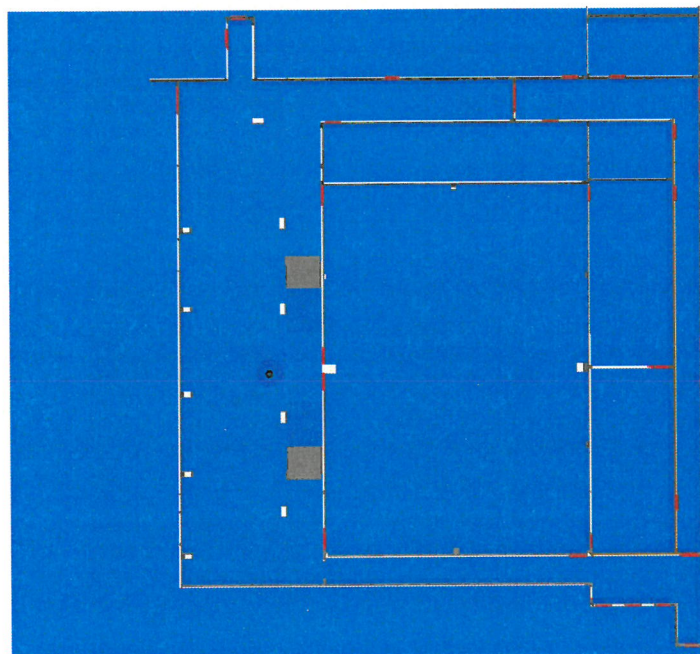
61.2

54.0

0.00

Time: 60.0

Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 120 sekundach



Slice
temp
°C

306

275

245

214

184

153

122

91.8

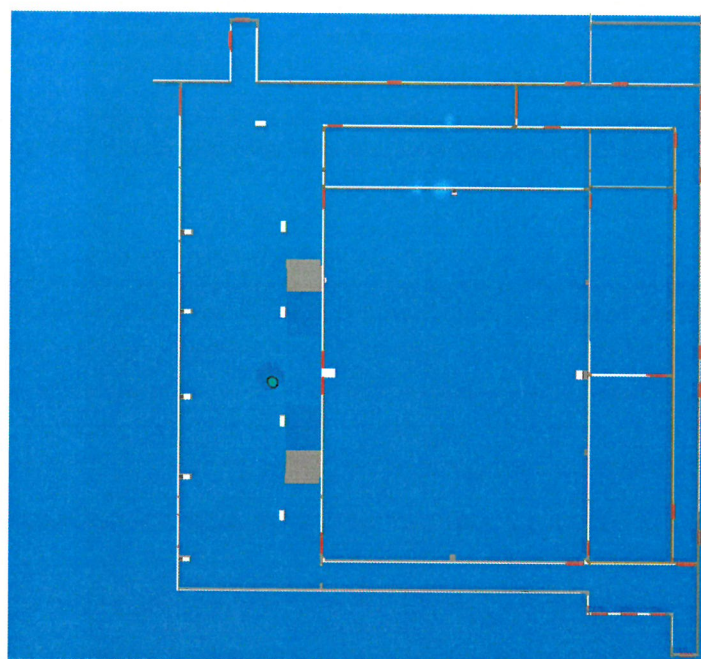
61.2

54.0

0.00

Time: 120.0

Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 180 sekundach



Slice
temp
°C

306

275

245

214

184

153

122

91.8

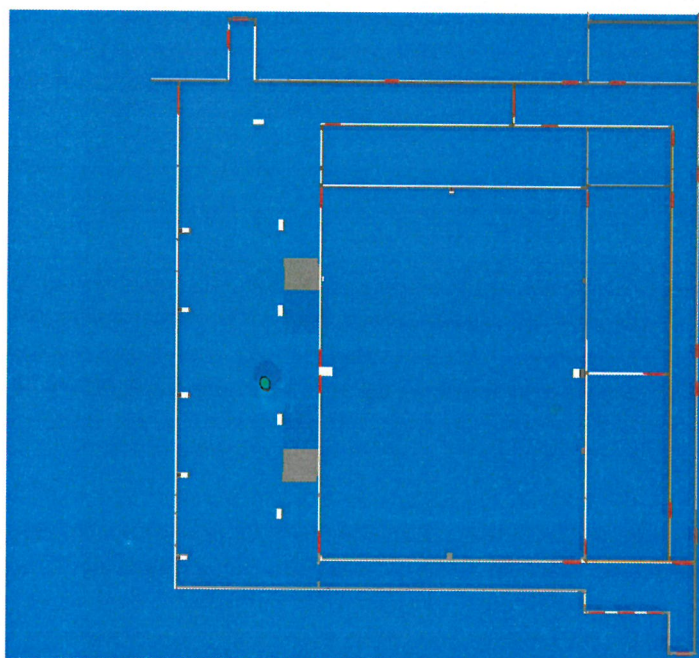
61.2

54.0

0.00

Time: 180.0

Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 240 sekundach



Slice
temp
°C

306

275

245

214

184

153

122

91.8

61.2

54.0

0.00

Time: 240.0

6. WNIOSKI

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji komputerowych należy stwierdzić, że wykorzystany system wentylacji pożarowej zapewni usuwanie dymu z wydajnością wystarczającą dla zapewnienia warunków bezpiecznej ewakuacji z sali konferencyjnej oraz foyer. Po czasie 240 s na poziomie 1,8 m widoczne są tylko lokalne przekroczenia parametru widzialności.

Podczas zakładanego pożaru w sali konferencyjno-wystawowej nawet po 60 s od czasu wymaganego na ewakuację dostępne są co najmniej dwa wyjścia ewakuacyjne.

W przypadku foyer tylko pożar zlokalizowany w bezpośredniej bliskości dwóch wyjść ewakuacyjnych (scenariusz nr 2) może spowodować, że już po 3 minutach warunki ewakuacji mogą być utrudnione. Jednak parametr zasięgu widzialności na wysokości 1,8 m nad poziomem posadzki jest przekroczony tylko lokalnie w pobliżu miejsca pożaru i ciągle dostępne jest jeszcze jedno wyjście ewakuacyjne. Nawet po czasie 60 s od czasu zakończenia ewakuacji

Symulacje pokazały również, że przekroczenia dopuszczalnej temperatury na wysokości 1,8 m nad posadzką występują jedynie w pobliżu miejsca pożaru w czasie dostępnym na ewakuację.

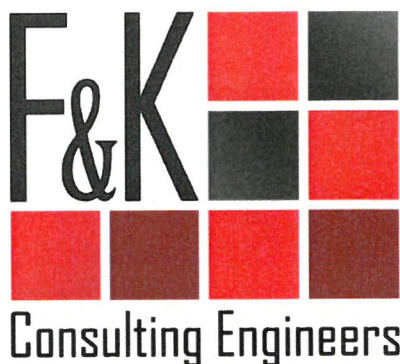
Zaleca się wykonanie próby z użyciem gorącego/ciepłego dymu. Autorzy nie narzucają metodologii wykonywanych testów. Zaleca się jednak, żeby wytworzony dym stworzył wyraźną warstwę unoszącą się pod stropem/zadaszeniem w tej części obiektu. Próba ma na celu sprawdzenie poprawności zadziałania systemu wentylacji oddymiającej oraz weryfikację zaproponowanych rozwiązań.

W przypadku znaczącej modyfikacji architektury lub zmiany systemu wentylacji pożarowej, zaleca się wykonanie ponownej analizy CFD.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Health and Safety Laboratory: Gobeau N., Ledin H.S, Lea C.J. Guidance for HSE Inspectors: Smoke movement in complex enclosed spaces - Assessment of Computational Fluid Dynamics. HSL, 2002.
- [2] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott. NIST Special Publication 1019-6. Fire Dynamics Simulator (Version 6) User's Guide. 2017.
- [3] K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd, NIST Special Publication 1018-1. Fire Dynamics Simulator (Version 6) Technical Reference Guide. Volume 3: Validation. 2017.
- [4] 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. 2008.
- [5] 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.
- [6] PN-EN ISO 6946. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- [7] NBN S 21-208-2 Fire protection in buildings – Design and calculation of smoke and heat extraction installations – Part 2: Covered car parking buildings.
- [8] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition. 2002.
- [9] Published Document PD 7974-6:2019. 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] BS 7346-7:2006 Components for smoke and heat control systems – Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks.
- [11] Foster J. A., Roberts G. V.: Research Report Number 61/1994: „Measurements of the Firefighting Environment”.
- [12] PD 7346-4:2003 Components for smoke and heat control systems – Part 4: Functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems, employing steady-state design fires – Code of practice.
- [13] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 12 kwietnia 2002 r. (Dz.U. Nr 75, poz. 690) z późn. zm.
- [14] DFES BEB GUIDLINE No GL-15: Fire Safety Engineered Alternative Solutions.

[15] Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej, Zasady Organizacji Ratownictwa Technicznego w Krajowym Systemie Ratowniczo-Gaśniczym. 2013.



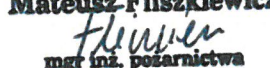
F&K Group Sp. z o.o.
 ul. Romaszewskiego 6 lok. B-3
 01-892 Warszawa

tel.: 22 740 32 32
 tel.: 507 821 449 • 723 339 800
www.fkce.pl • biuro@fkce.pl

Nazwa opracowania:	Raport z symulacji CFD działania systemu wentylacji oddymiającej
Obiekt:	Budowa budynku laboratoryjno-dydaktycznego wraz z zapleczem technicznym i infrastrukturą towarzyszącą, ciągami komunikacyjnymi i zagospodarowaniem terenu.
Adres:	ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa, dz. nr e. 146513_08 dzielnica Ursynów, obręb ewidencyjny 1-10-12 dz. 114/2.
Inwestor:	Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa.

Wyniki analizy skuteczności działania projektowanego systemu grawitacyjnej wentylacji oddymiającej w foyer 0.F02 w projektowanym budynku SGGW w Warszawie.

Branża:	Sanitarna / Ochrona przeciwpożarowa	Nr projektu: 816
----------------	--	-----------------------------

Opracował:		Podpis:
	mgr inż. Maciej Albrechtowicz	
Sprawdził		Podpis:
	mgr inż. Mateusz Fliszkiewicz	Mateusz Fliszkiewicz  mgr inż. pożarnictwa

Spis treści

1. Dane ogólne	5
1.1. Przedmiot opracowania	5
1.2. Podstawa opracowania	5
1.3. Zawartość opracowania	5
2. Koncepcja oddymiania obiektu.....	6
2.1. Ustalenia podstawowe dotyczące sali konferencyjnej oraz foyer	6
2.2. Założenia do koncepcji zabezpieczenia przed zadymieniem	6
3. Przewidywany czas ewakuacji użytkowników obiektu	8
4. Symulacje CFD	10
4.1. Charakterystyka użytego programu CFD	10
4.1.1. Nazwa programu, wersja, producent.....	10
4.1.2. Rodzaj i gęstość siatki obliczeniowej	10
4.1.3. Model turbulencji.....	10
4.1.4. Model spalania	11
4.1.5. Model promieniowania	11
4.2. Niepewności obliczeniowe i zastosowane współczynniki bezpieczeństwa	11
4.3. Warunki początkowe i brzegowe	12
4.3.1. Początkowa temperatura wewnętrzna i zewnętrzna.....	12
4.3.2. Materiały elementów budowlanych	12
4.3.3. Materiał palny	12
4.3.4. Zastosowane schematy i ustawienia numeryczne	13
4.3.5. Czas symulacji	13
4.4. Analizowane parametry pożaru	13
4.5. Analizowane scenariusze pożarowe	14
5. Wyniki symulacji CFD dla sali konferencyjnej.....	16
5.1. Sprawdzenie warunków ewakuacji	16
5.1.1. Krzywe mocy pożaru	16
5.1.2. Zasięg widzialności na wysokości 1.8 m na poziomie 0 w czasie ewakuacji	17
5.1.3. Zasięg widzialności na wysokości 1.8 m na poziomie +1 w czasie ewakuacji	19
5.1.4. Zasięg widzialności na wysokości 1.8 m na poziomie +2 w czasie ewakuacji	23
5.1.5. Spadek zasięgu widzialności - przekrój	27
5.1.6. Temperatura na wysokości 1.8 m na poszczególnych kondygnacjach w czasie ewakuacji	28
6. Wnioski	31

7. Bibliografia	32
-----------------------	----

1. DANE OGÓLNE

1.1. PRZEDMIOT OPRACOWANIA

Niniejsze opracowanie stanowi analizę skuteczności działania systemu grawitacyjnej wentylacji oddymiającej w foyer budynku laboratoryjno-dydaktycznego SGGW zlokalizowanym przy ul. Nowoursynowskiej 159 w Warszawie.

1.2. PODSTAWA OPRACOWANIA

Podstawą opracowania są:

- a) zlecenie inwestora,
- b) projekt wykonawczy architektoniczno-konstrukcyjny,
- c) obowiązujące przepisy przeciwpożarowe i techniczno-budowlane,
- d) obowiązujące normy,
- e) uzgodnienia branżowe.

1.3. ZAWARTOŚĆ OPRACOWANIA

Opracowanie zawiera część opisową, wyniki oraz wnioski z przeprowadzonych symulacji CFD. W dokumencie opisano system oddymiania, oszacowano czas ewakuacji ludzi.

2. KONCEPCJA ODDYMIANIA OBIEKTU

2.1. USTALENIA PODSTAWOWE DOTYCZĄCE SALI KONFERENCYJNEJ ORAZ FOYER

Zgodnie z projektem budowlanym, ustalono, że oddymianiu podlega foyer budynku laboratoryjno-dydaktycznego SGGW w Warszawie. Zastosowano w nim rozwiązania architektoniczno-instalacyjne, stanowiące podstawę zasad funkcjonowania systemu zabezpieczenia przed zadymieniem, takie jak:

- a) oddymianie foyer 0.F02 realizowane będzie grawitacyjnie poprzez otwarcie klap oddymiających w świetliku nad najwyższą kondygnacją,
- b) zakłada się powierzchnię czynną klap oddymiających 12 m^2 ,
- c) ze względu na projektowany dwuspadowy świetlik należy zapewnić klapy oddymiające o wymaganej powierzchni czynnej na każdej stronie świetlika oraz stację meteo w celu realizacji oddymiania tylko z jednej strony w zależności od kierunku wiatru,
- d) nawiew powietrza kompensacyjnego realizowany będzie wszystkimi drzwiami wejściowymi na poziomie 0 (powierzchnia czynna 12 m^2),
- e) na poziomie +1 znajdować się będzie okno o powierzchni czynnej 1 m^2 w celu uzupełnienia odpowiedniej ilości powietrza kompensującego,
- f) na poziomie +1 oraz +2 przewiduje się zastosowanie kurtyny dymowej opadającej do balustrady otaczającej otwory w stropach,
- g) kurtyna dymowa opadać będzie do poziomu balustrady z wyjątkiem wejść na schody - w tym miejscu kurtyna opuszczona zostanie do wysokości 2,2 m nad poziomem posadzki,
- h) kurtyna dymowa nie zostanie opuszczona na kondygnacji, na której nastąpiła detekcja pożaru,
- i) ewakuacja z pomieszczeń w obrębie analizowanej przestrzeni możliwa jest na każdej kondygnacji do obudowanej klatki schodowej zlokalizowanej w obrębie foyer lub do innej klatki schodowej w przestrzeni oddzielonej drzwiami klasy S20 wyposażonymi w samozamykacz,
- j) nie przewiduje się stosowania instalacji tryskaczowej w części budynku objętej analizą CFD,
- k) w budynku znajdować się pracownicy, którzy zobowiązani będą m.in. czuwać nad bezpieczeństwem w obiekcie i w razie pożaru kierować ewakuacją w celu jej sprawnego przebiegu.

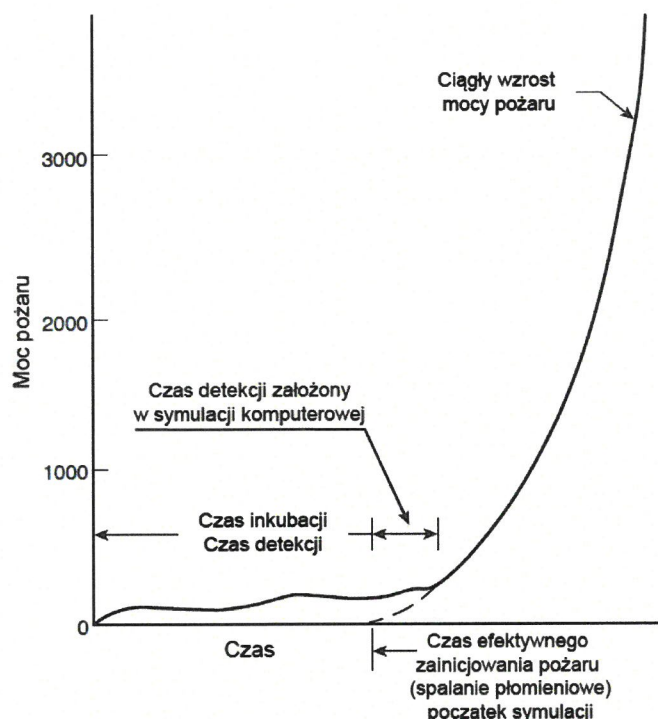
2.2. ZAŁOŻENIA DO KONCEPCJI ZABEZPIECZENIA PRZED ZADYMIENIEM

Oddymianie grawitacyjne analizowanego foyer realizowane będzie grawitacyjnie zgodnie z ustaleniami zawartymi w rozdziale 2.1. Zakłada się opad kurtyny dymowej w każdej sytuacji detekcji pożaru w obrębie samego foyer, ale także w przypadku detekcji pożaru w pomieszczeniach przyległych, z których co najmniej jedne drzwi prowadzą do przestrzeni foyer. Kurtyna dymowa opuszczane jest z zastrzeżeniem podpunktu h) rozdziału 2.1.

Zakłada się, że pożar może jednocześnie powstać tylko w jednym miejscu. Zakłada się, że czas detekcji pożaru w omawianej części budynku nie przekroczy 60 sekund od momentu

rozpoczęcia spalania płomieniowego zgodnie z przyjętą krzywą mocy pożaru. Zdarzenie to spowoduje wywołanie alarmu drugiego stopnia (wykrycie dymu przez dwie czujki lub uruchomienie ręcznego ostrzegacza pożarowego albo uruchomienie pierwszej czujki i ręcznego ostrzegacza pożarowego) oraz otwarcie klap oddymiających i okna/drzwi napowietrzających. Wystąpienie alarmu II stopnia spowoduje również zamknięcie klap przeciwpożarowych w instalacji wentylacji bytowej oraz uruchomienie dźwiękowych i wizualnych sygnalizatorów pożaru.

Poniższy wykres przedstawia schematyczny przebieg pożaru. Czas detekcji przyjęty w analizie numerycznej (60 sekund) jest czasem liczonym od efektywnego zainicjowania pożaru (początek spalania płomieniowego). W rzeczywistości spalanie płomieniowe poprzedzone będzie inkubacją pożaru (np. spalanie bezpłomieniowe).



Scenariusz zdarzeń na wypadek pożaru znajduje się w tabeli poniżej:

Tabela 1. Scenariusz zdarzeń w czasie pożaru

Czas [s]	Zdarzenie
-0	Czas inkubacji pożaru.
0	Czas efektywnego zainicjowania pożaru. Pożar rozwija się zgodnie z krzywą rozwoju pożaru.
0-60	Detekcja pożaru przez pierwszą czujkę dymu. System Sygnalizacji Pożarowej wchodzi w alarm I stopnia.
60	Detekcja pożaru przez drugą czujkę dymu. System Sygnalizacji Pożarowej wchodzi w alarm II stopnia.
60	Otwarcie okna i drzwi napowietrzających.
60	Zamknięcie klap przeciwpożarowych w instalacji wentylacji bytowej.
60	Uruchomienie dźwiękowych oraz wizualnych sygnalizatorów pożaru.
60	Otwarcie klap oddymiających w świetliku.

Omówione powyżej czasy zostały przyjęte do obliczeń numerycznych.

3. PRZEWIDYWANY CZAS EWAKUACJI UŻYTKOWNIKÓW OBIEKTU

Przewidywany czas ewakuacji użytkowników obiektu został obliczony na podstawie normy PD 7974-6:2019 [8].

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.

Czas ewakuacji został oszacowany na przykładzie jednoczesnej ewakuacji wszystkich użytkowników z foyer oraz pomieszczeń przyległych, z których jedyna droga ewakuacji prowadzi przez analizowaną przestrzeń. Założono brak dostępnego jednego wyjścia ewakuacyjnego (jedno z przejść w kierunku klatki schodowej K2). Oszacowano liczbę osób do jednoczesnej ewakuacji na podstawie współczynnika zależnego od powierzchni użytkowej - 285 użytkowników [13].

Obliczenia dla foyer:

Projektowy scenariusz zachowań i rodzaj użytkowania:	
Kategoria	A
Gotowość użytkowników	Czuwający
Znajomość użytkowników	Zaznajomieni
Gęstość użytkowników	Niska
Wydzielenia / złożoność	Jedno lub wiele
Efekt jakości systemu alarmowego na pierwsze-wstępne reakcje	
Poziom systemu Alarmowego	A1. System sygnalizacji pożarowej obejmuje cały budynek, ogłoszony jest natychmiastowy alarm dla wszystkich użytkowników w zagrożonych pożarem przestrzeniach budynku.
Efekt złożoności budynku na czas ewakuacji	
Poziom budynku	B2. Wielokondygnacyjny obiekt, z kilkoma przegrodami wewnętrznymi, prosto rozplanowany z dobrą widzialnością, z krótkimi drogami przejścia, z odpowiednią ilością drzwi prowadzącymi bezpośrednio do innej strefy pożarowej lub obudowanej klatki schodowej.
Klasyfikacja systemu zarządzania bezpieczeństwem pożarowym i wpływ na czas ewakuacji	
Poziom zarządzania	M2. Użytkownicy (personel lub mieszkańcy) powinni zostać przeszkoleni do wysokiego poziomu zarządzania bezpieczeństwem z zapewnieniem praktyki w zabezpieczeniu

	przeciwpozarowym i utrzymywaniem urządzeń, dozorem na kondygnacji, dobrze opracowaną instrukcją bezpieczeństwa pożarowego i regularnymi ćwiczeniami oraz niezależnym audytem.
Obliczenie Wymaganego Bezpiecznego Czasu Ewakuacji	
Obliczenie czasu detekcji pożaru	Dane producentów i normowe: td – czas detekcji pożaru (wystąpienie alarmu II stopnia): <u>60 s</u>
Obliczenie czasu Alarmowania	ta – czas alarmowania: <u>0 s</u> Obiekt jest wyposażony w system sygnalizacji pożaru.
Obliczenie czasu pierwszych-wstępnych reakcji	Kategoria scenariuszy i modyfikacje: Czuwający, zaznajomieni: M2 B2 A1. tp-wr: czas reakcji: <u>60 s</u> (1%)
Obliczenie czasu opuszczenia foyer i sal przyległych, z których jedyna droga ewakuacyjna prowadzi prze foyer.	<u>Ewakuacja z najdalszego miejsca przy założeniu największej możliwej gęstości osób (założono brak dostępnego jednego wyjścia ewakuacyjnego):</u> a) czas dojścia do wyjścia z najdalszego punktu prędkość na drodze poziomej: 1,2 m/s maksymalna długość drogi w poziomie: 35 m czas pokonania drogi: $35 : 1,2 = \underline{30\text{ s}}$ b) czas kolejki, przechodzenia przez wyjścia ewakuacyjne przewidywana maksymalna liczba osób: 285 szerokość wyjść ewakuacyjnych: 2,4 m przepustowość drzwi: 1,33 os/m s czas kolejki do wyjścia z sali konferencyjnej: $285 / (1,33 * 2,4) \approx \underline{90\text{ s}}$ Czas przejścia: $30 + 90 = 120\text{ s}$
WCBE = td+ta+tp-wr+tp = 60 + 0 + 60 + 120 = 240 sekund + 15% ≈ 276 sekund	

Biorąc pod uwagę powyższe obliczenia można założyć, że czas ewakuacji sali konferencyjno-wystawowej do miejsca bezpiecznego nie powinien przekroczyć **4 minut 40 sekund** z uwzględnieniem 15% marginesu bezpieczeństwa.

4. SYMULACJE CFD

4.1. CHARAKTERYSTYKA UŻYTEGO PROGRAMU CFD

4.1.1. NAZWA PROGRAMU, WERSJA, PRODUCENT

Do przeprowadzenia szczegółowej analizy oraz otrzymania wyników zawartych w raporcie wykorzystany został program Fire Dynamics Simulator wersja 6.5.3, który jest narzędziem opracowanym przez amerykański instytut naukowo-badawczy NIST (National Institute of Standards and Technology). Program jest znany oraz stosowany w środowisku inżynierów, pracowników i studentów wyższych uczelni technicznych na całym świecie, zajmujących się nowoczesną inżynierią bezpieczeństwa pożarowego. Aplikacja 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. Wykorzystują one zasady zachowania masy, pędu i energii. FDS jest narzędziem przeznaczonym do szczegółowej analizy zagrożeń pożarowych i rozwiązywania problemów związanych inżynierią bezpieczeństwa pożarowego. Zapewnia tym samym możliwość poznania dynamiki zjawiska pożaru oraz zachodzących tam procesów spalania. Program ten, w zakresie zagadnień związanych z bezpieczeństwem pożarowym, można stosować do modelowania transportu ciepła i produktów spalania powstałych na skutek pożaru, wymiany ciepła poprzez promieniowanie i konwekcję, pirolizy, rozprzestrzeniania się płomieni oraz rozwoju pożaru, aktywacji tryskaczy oraz czujek dymu i ciepła, czy też oddziaływania kropli wody na płomień [2]. Program FDS wykorzystuje technikę LES oraz, po wprowadzeniu odpowiednio gęstej siatki obliczeniowej, bezpośrednią symulację numeryczną (DNS). Model LES uwzględnia wiry o wielkości porównywalnej z wielkością komórek siatki. Metoda ta w ostatnich latach jest intensywnie rozwijana, ponieważ stanowi kompromis pomiędzy dokładnością odwzorowania dynamiki pożaru, a dostępnymi obecnie możliwościami obliczeniowymi. DNS traktuje turbulencję w sposób deterministyczny.

4.1.2. RODZAJ I GĘSTOŚĆ SIATKI OBLICZENIOWEJ

Użyto siatki regularnej sześcienniej o boku 20 cm. Domena obliczeniowa została podzielona na 12 siatek obliczeniowych. Rozmiar siatki dobrano w oparciu o:

- a) wytyczne Health and Safety Laboratory [1],
- b) wytyczne NUREG, publikowane również w instrukcji użytkownika FDS6 User's Guide [2].

4.1.3. MODEL TURBULENCJI

W przeprowadzonej symulacji został wykorzystany model Deardorff LES, odpowiedni dla wolnych przepływów dymu i gazów pożarowych pod wpływem termicznych sił wyporu.

4.1.4. MODEL SPALANIA

Użyto modelu mixing-controlled. Model ten przyjmuje następujące uproszczenia:

- a) skład stechiometryczny mieszaniny palnej jest definiowany przez ułamek masowy gazów palnych i produktów spalania oraz powietrza,
- b) spalanie następuje natychmiast po zmieszaniu,
- c) spalanie jest jednoetapowe i całkowite,
- d) procent powstającego tlenku węgla jest stały i wynika z początkowych założeń symulacji a nie z aktualnych warunków spalania.

Założenia te dają prawidłowe wyniki w przypadku pożarów kontrolowanych przez paliwo jak ma to miejsce w założonych scenariuszach.

4.1.5. MODEL PROMIENIOWANIA

Równanie transportu promieniowania dla gazu szarego, jest rozwiązywane metodą objętości skończonych (FVM – Finite Volume Method). Metoda ta dzieli całe widmo promieniowania na kilka przedziałów częstości (typowo 6) i korzysta w nich z całkowitej postaci równań transportu promieniowania. Przedziały te dobrane są tak, by pokrywały się z pasmami widma substancji występujących w układzie. Część strumienia mocy pożaru emitowana w postaci promieniowania jest stała i jest jednym z parametrów symulacji. Przyjęto ułamek promieniowania 34%, co odpowiada spalaniu większości tworzyw sztucznych.

4.2. NIEPEWNOŚCI OBLICZENIOWE I ZASTOSOWANE WSPÓŁCZYNNIKI BEZPIECZEŃSTWA

W tabeli poniżej przedstawiono średnie procentowe niepewności obliczeniowe dla poszczególnych parametrów.

Tabela 5. Średnie błędy wyznaczania wielkości fizycznych w FDS
Źródło: [5]

Mierzona wielkość	Niepewność (%)
Temperatura warstwy podsufitowej dymu	15
Wysokość strefy wolnej od zadymienia	13
Temperatura strumienia podsufitowego	16
Temperatura płomienia	14
Stężenia gazów	9
Stężenie dymu i widzialność	33
Ciśnienie	40
Strumień ciepła	20
Temperatura powierzchni	14

4.3. WARUNKI POCZĄTKOWE I BRZEGOWE

4.3.1. POCZĄTKOWA TEMPERATURA WEWNĘTRZNA I ZEWNĘTRZNA

Przyjęto początkową temperaturę wewnątrz i na zewnątrz obiektu równą 20°C.

4.3.2. MATERIAŁY ELEMENTÓW BUDOWLANYCH

Właściwości materiałów budowlanych przyjęto w symulacji na podstawie normy PN-EN ISO 6946 [6].

Tabela 6. Właściwości materiałów budowlanych, wprowadzonych do programu FDS.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [6].

Material	Gęstość [kg/m ³]	Ciepło właściwe [kJ/kg·K]	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/m·K]
Żelbet	2500	0,84	1,70
Błoczki betonowe	800	0,84	0,30
Płyta 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

4.3.3. MATERIAŁ PALNY

Jako materiał palny przyjęto piankę poliuretanową. Właściwości palne wg [8] zebrano w tabeli 7.

Tabela 7. Właściwości materiału spalanego użyte w symulacji.

Źródło: [8].

Ciepło spalania [kJ/kg]	26 200
Ułamek masowy dymu	0,13
Ułamek masowy tlenku węgla	0,01
Stosunek atomów węgla:wodoru:tleny	1:1,75:0,25
Masowy współczynnik ekstynkcji K_m [m ² /kg]	8700

4.3.4. ZASTOSOWANE SCHEMATY I USTAWIENIA NUMERYCZNE

Krok czasowy jest obliczany z zachowaniem kryterium CFL, tzn:

$$CFL = \delta t \frac{\|\bar{u}\|}{\delta x}, \text{ gdzie } CFL \in (0,8; 1)$$

Krok czasowy obliczany jest automatycznie zgodnie z jednym z trzech schematów, odnoszących się do sposobu normalizacji wektora prędkości. Domyślnym schematem dla użytej wersji 6.5.3 jest schemat L_∞ :

$$\frac{\|\bar{u}\|}{\delta x} = \max\left(\frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z}\right)$$

4.3.5. CZAS SYMULACJI

Jako czas symulacji przyjęto 1200 s. Krok czasowy jest ustalany automatycznie na podstawie liczby CFL, przy użyciu schematu L_∞ .

4.4. ANALIZOWANE PARAMETRY POŻARU

Podczas analizy numerycznej sprawdzeniu podlegają następujące parametry:

- a) zasięg widzialności na wysokości 1,8 m od podłogi na każdej kondygnacji – przyjęta wartość krytyczna to 10 m,
- b) temperatura na wysokości 1,8 m od podłogi na każdej kondygnacji oddziałująca na użytkowników obiektów czasie ewakuacji – wartość krytyczna to 60°C, lecz ze względu na 15%-owy współczynnik niepewności dla przyrostu temperatury powyżej temperatury początkowej dla górnej warstwy dymu, przyjęto wartość krytyczną równą 54°C,

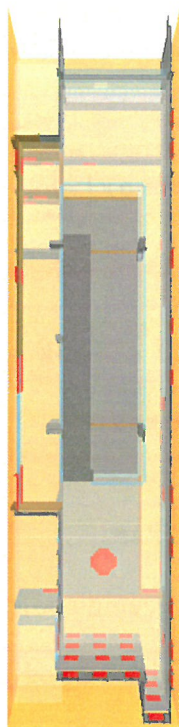
Dane wyjściowe zostały odczytane poprzez zdefiniowane punkty pomiarowe oraz wizualizację w programie SmokeView.

Domyślnie program Smokeview na wizualizacji wyników odcina wartości poniżej 1 centyla i powyżej 99 centyla, tak aby graficzne odwzorowanie wyników w całej rozpatrywanej przestrzeni było bardziej czytelne. Dlatego w raporcie nie pokazano najwyższej temperatury nad pożarem, ale obszar powyżej rozpatrywanej temperatury granicznej.

4.5. ANALIZOWANE SCENARIUSZE POŻAROWE

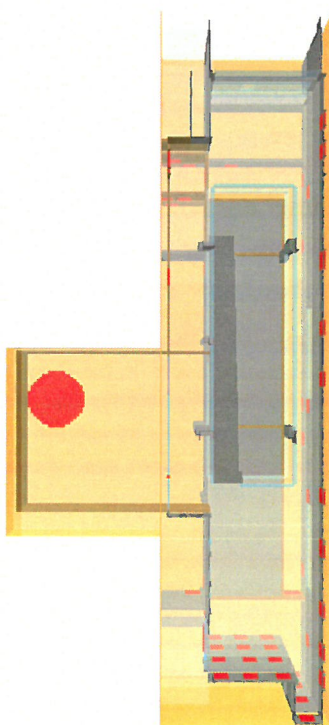
W analizowanej części obiektu wykonano 1 symulację pożaru w obrębie foyer oraz 1 symulację pożaru w pomieszczeniu przyległym:

- a) scenariusz nr 1 – pożar w obrębie foyer,



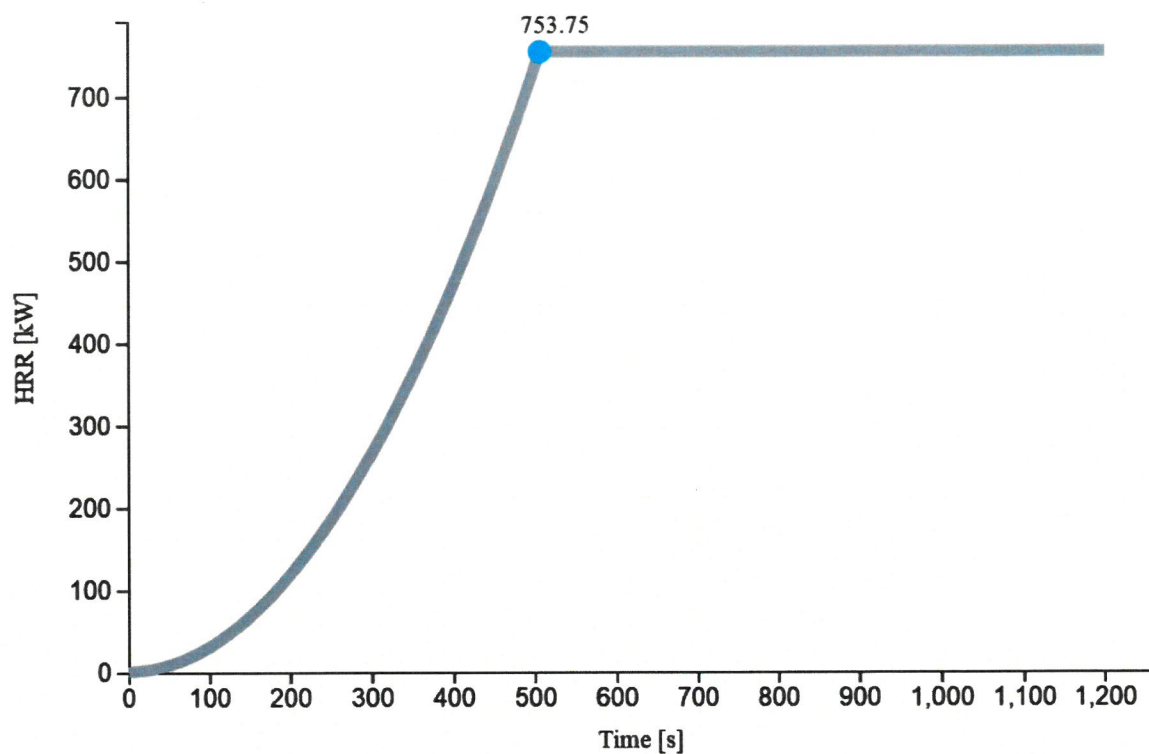
Time: 20.0

- b) scenariusz nr 2 – pożar w obrębie pomieszczenia przyległego na poziomie +1,

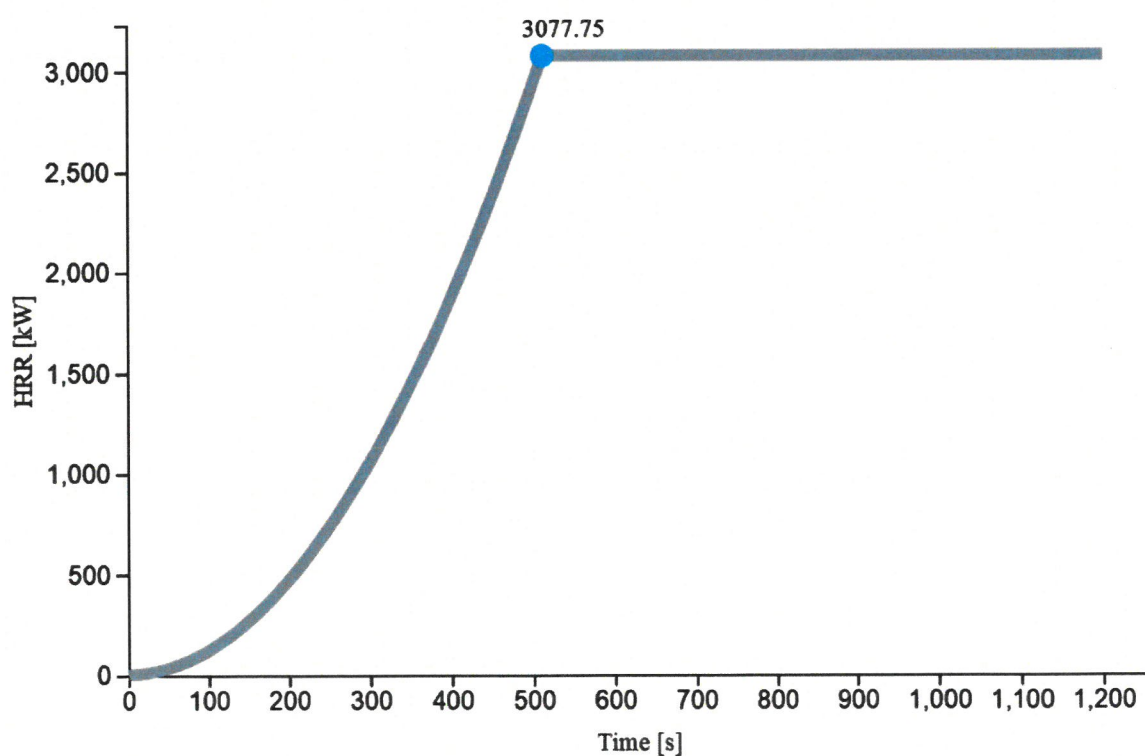


Time: 20.0

W scenariuszu nr 1 założono pożar typu "spread fire", który rozwija się z małą szybkością (rozwój wolny) przez cały czas zakładanej ewakuacji. Założoną krzywą mocy pożaru przedstawia poniższy wykres.



W scenariuszu nr 2 założono pożar typu "spread fire", który rozwija się z średnią szybkością (rozwój średni) przez cały czas zakładanej ewakuacji. Założoną krzywą mocy pożaru przedstawia poniższy wykres.

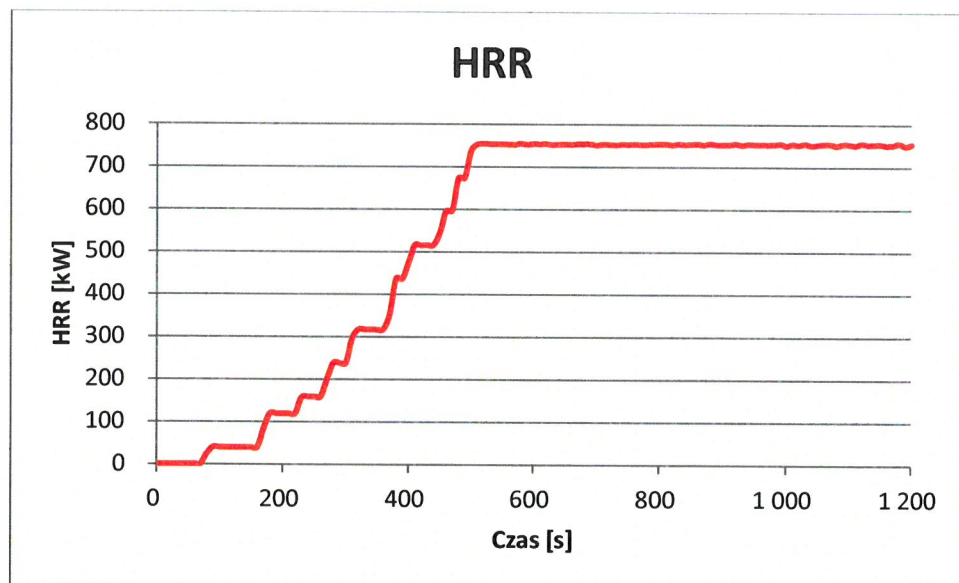


5. WYNIKI SYMULACJI CFD DLA SALI KONFERENCYJNEJ

5.1. SPRAWDZENIE WARUNKÓW EWAKUACJI

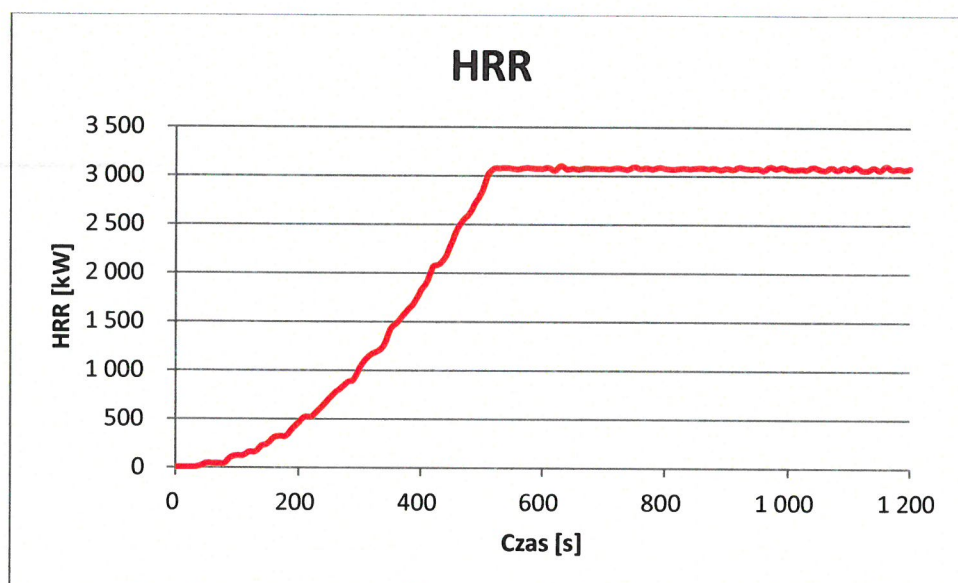
5.1.1. KRZYWE MOCY POŻARU

Poniżej przedstawiona została krzywa rozwoju pożaru, która została wygenerowana przez program FDS. Do czasu ewakuacji pożar uzyskuje moc około 240 kW.



Otrzymana krzywa jest zgodna z krzywą założoną dla scenariusza nr 1.

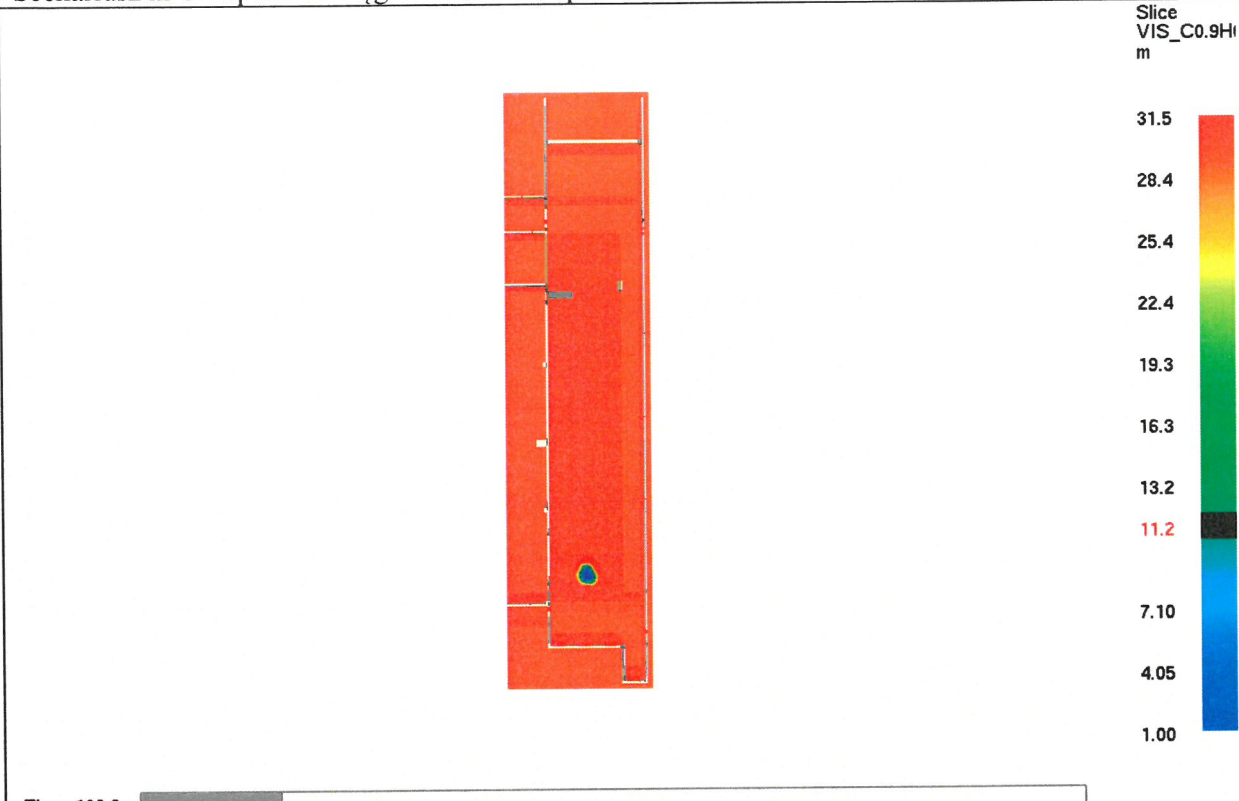
Poniżej przedstawiona została krzywa rozwoju pożaru, która została wygenerowana przez program FDS. Do czasu ewakuacji pożar uzyskuje moc około 880 kW.



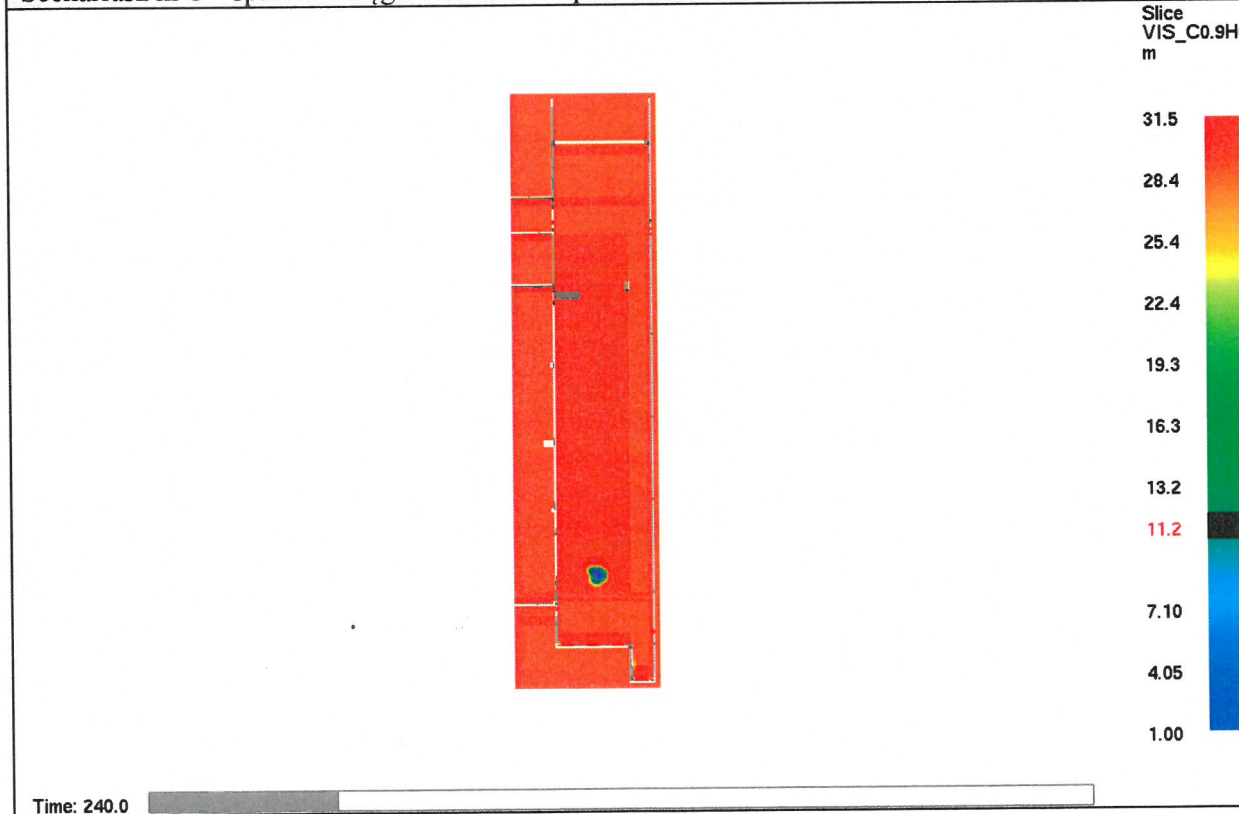
Otrzymana krzywa jest zgodna z krzywą założoną dla scenariusza nr 2.

5.1.2. ZASIĘG WIDZIALNOŚCI NA WYSOKOŚCI 1.8 M NA POZIOMIE 0 W CZASIE EWAKUACJI

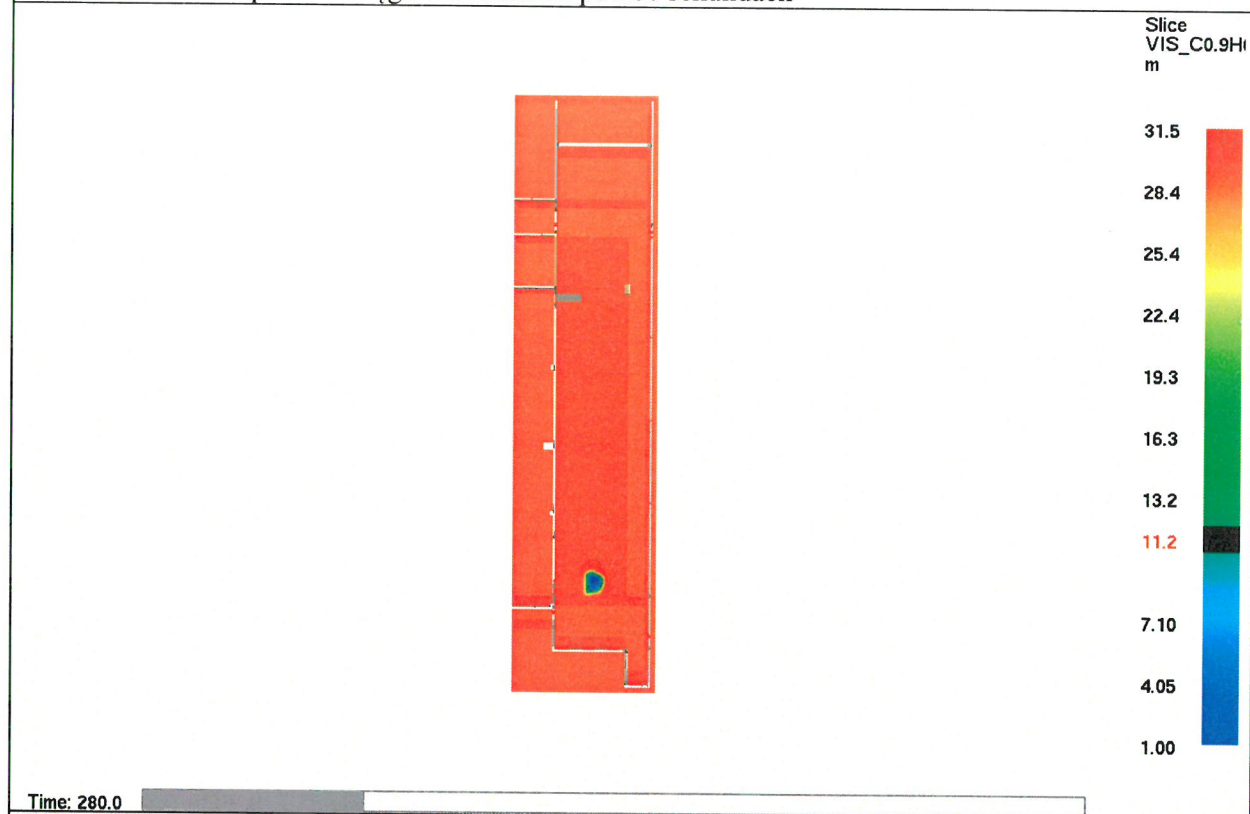
Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 180 sekundach



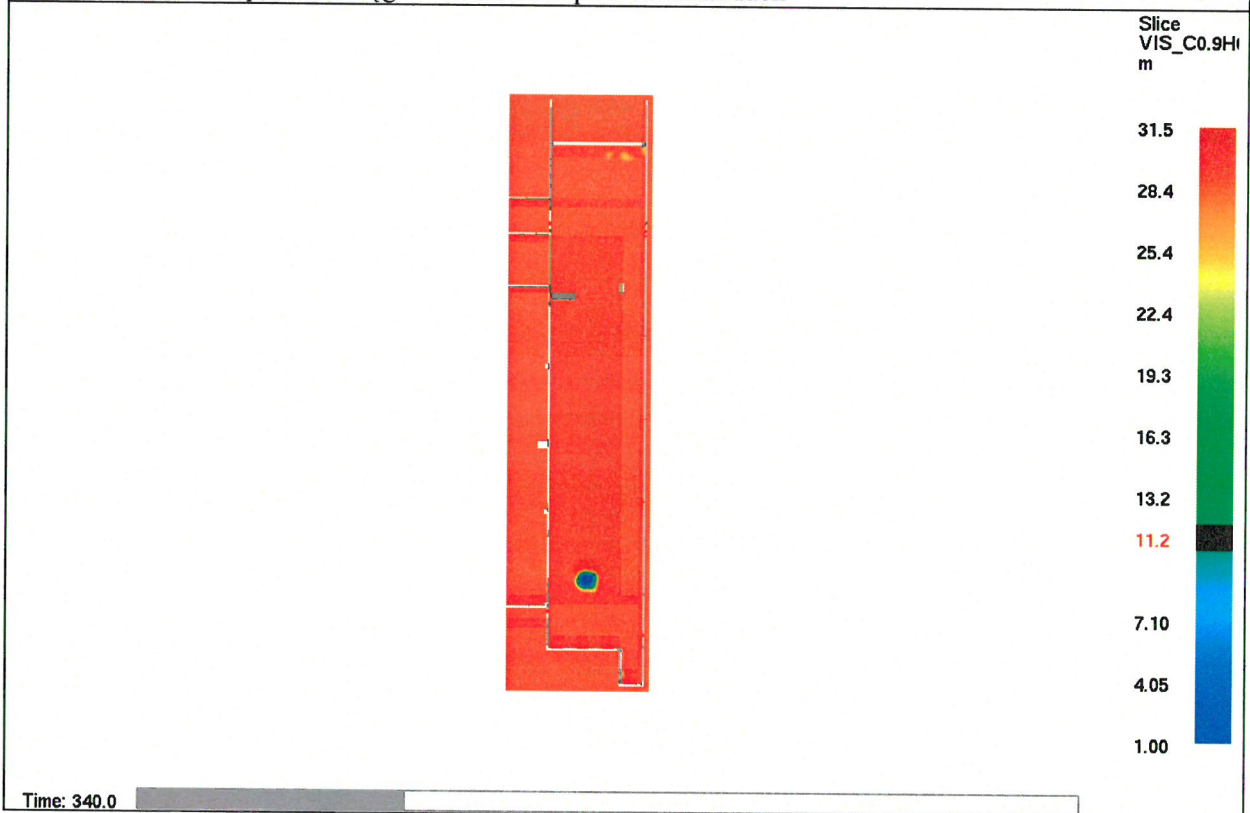
Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach



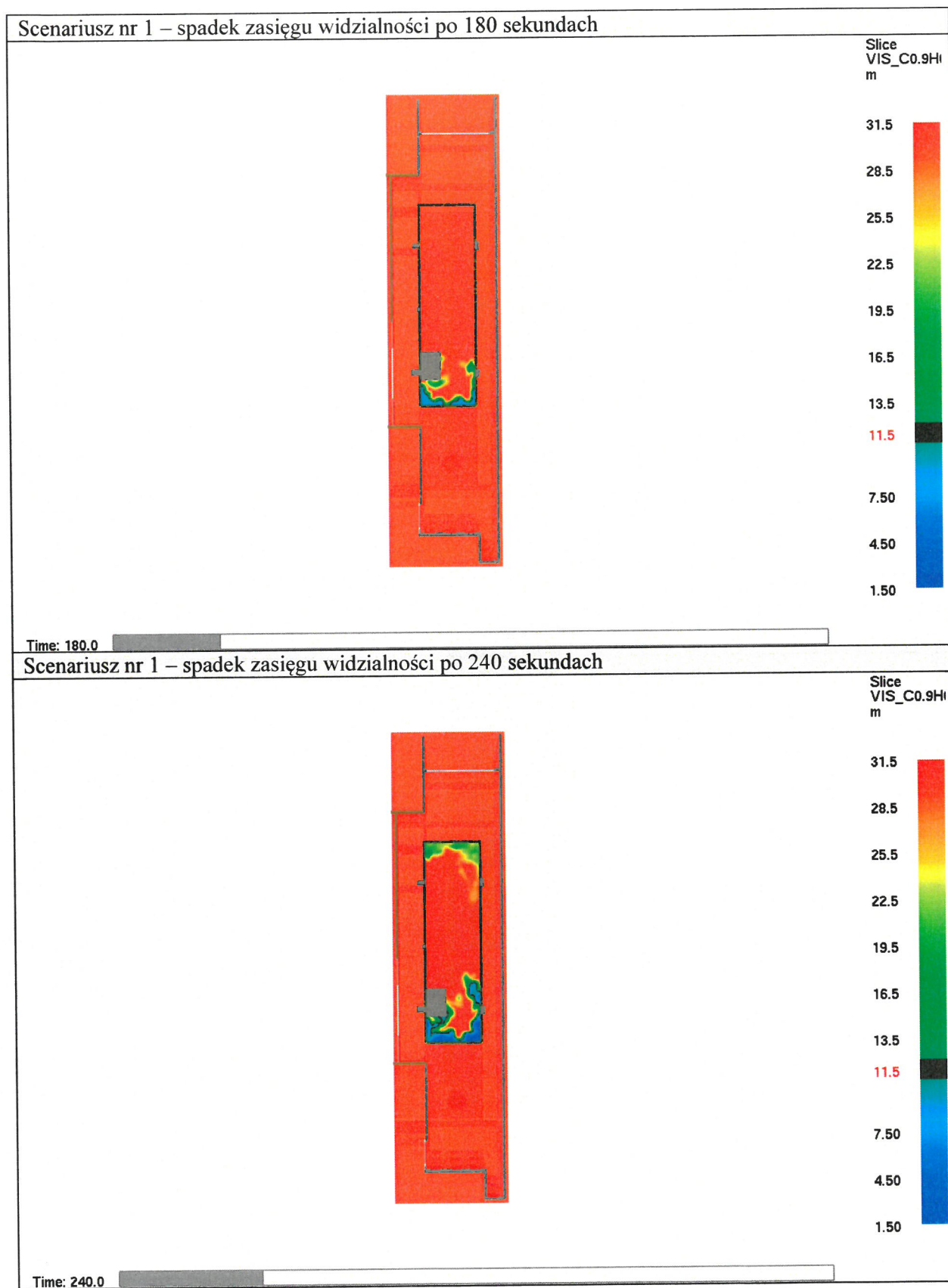
Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 280 sekundach



Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 340 sekundach



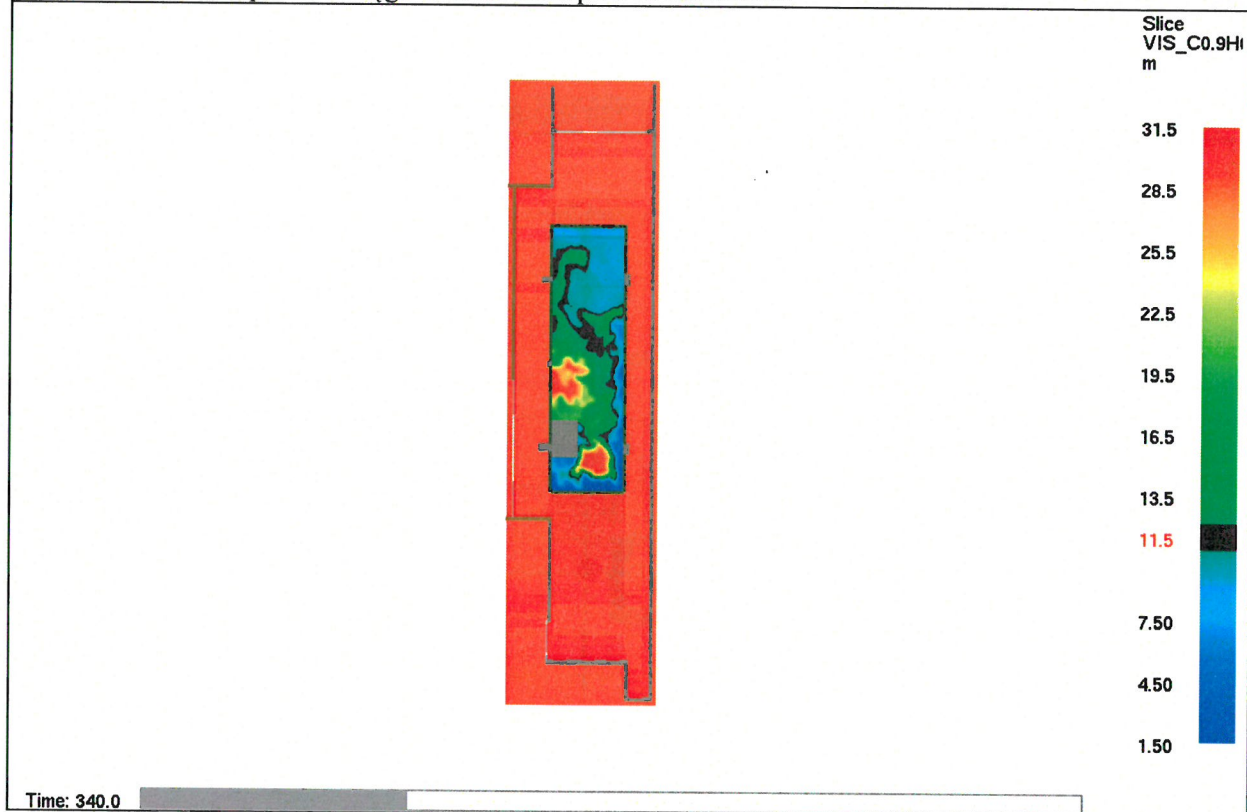
5.1.3. ZASIĘG WIDZIALNOŚCI NA WYSOKOŚCI 1.8 M NA POZIOMIE +1 W CZASIE EWAKUACJI



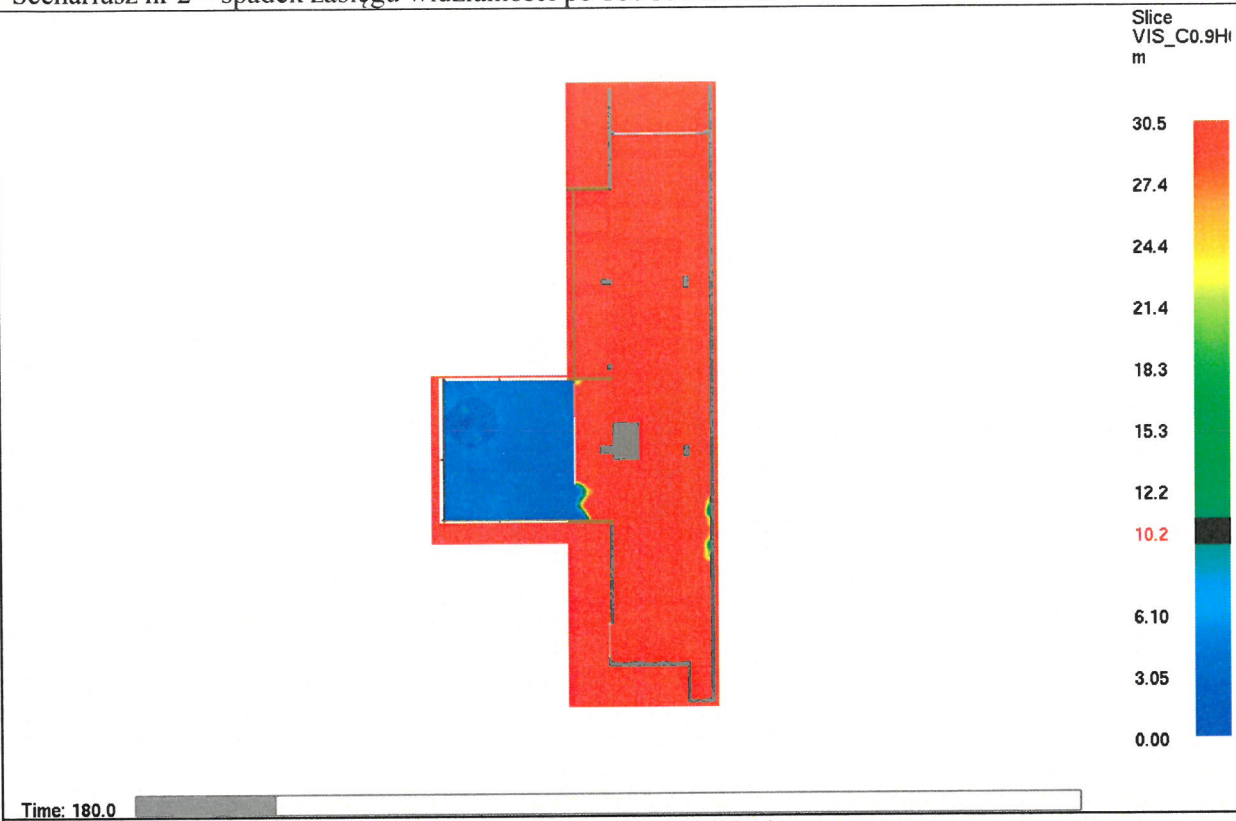
Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 280 sekundach



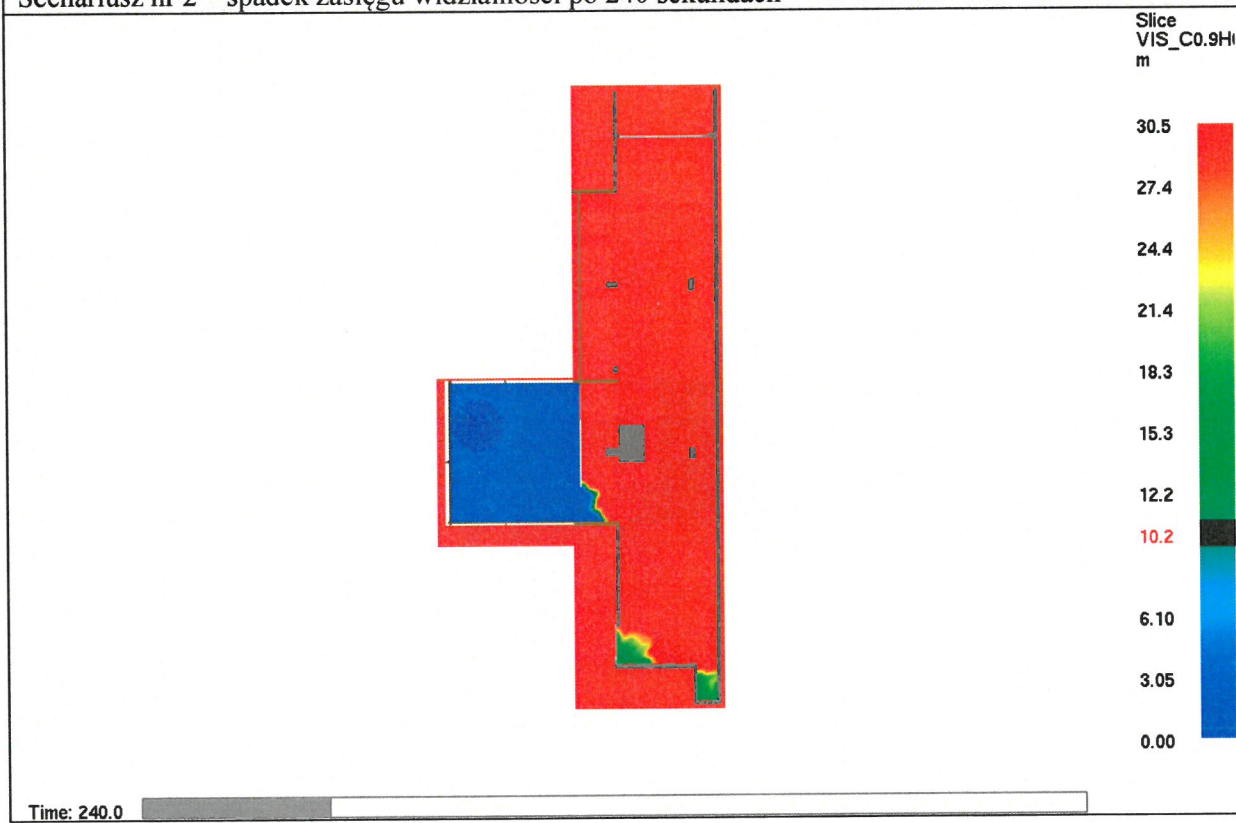
Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 340 sekundach



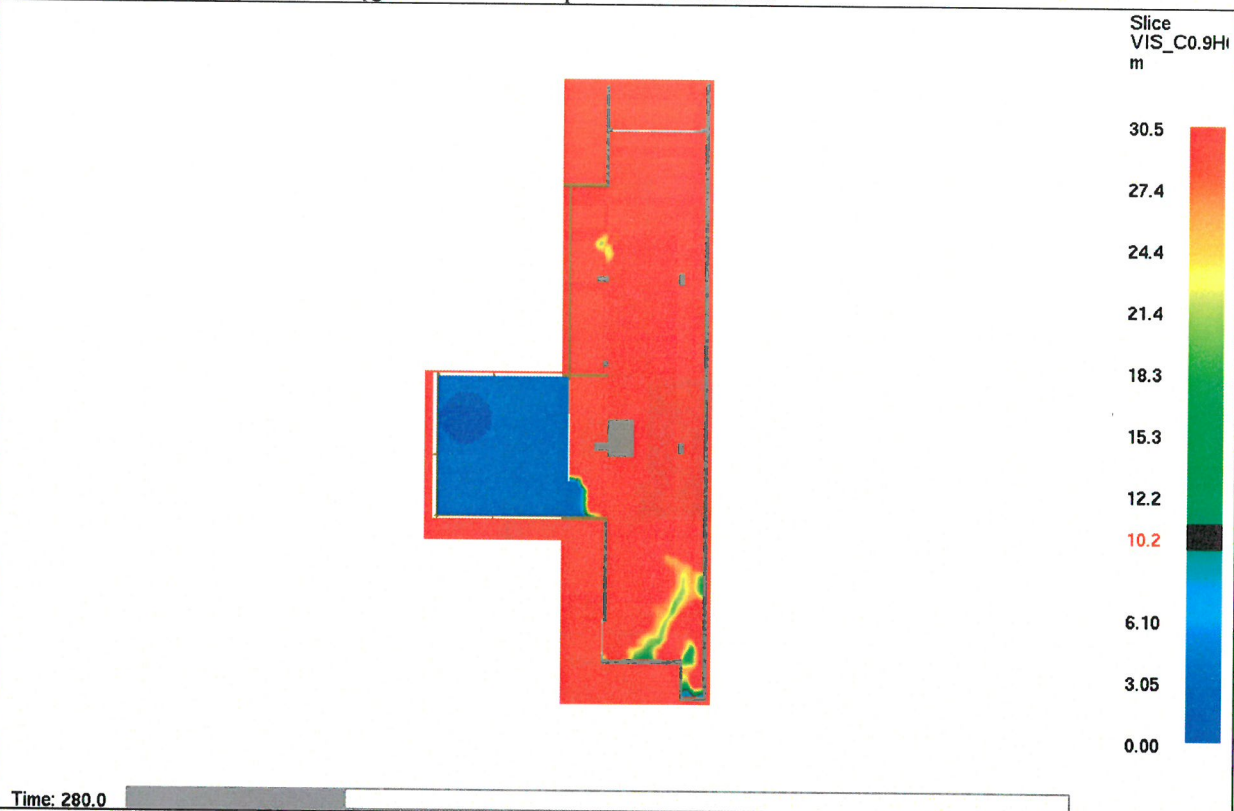
Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 180 sekundach



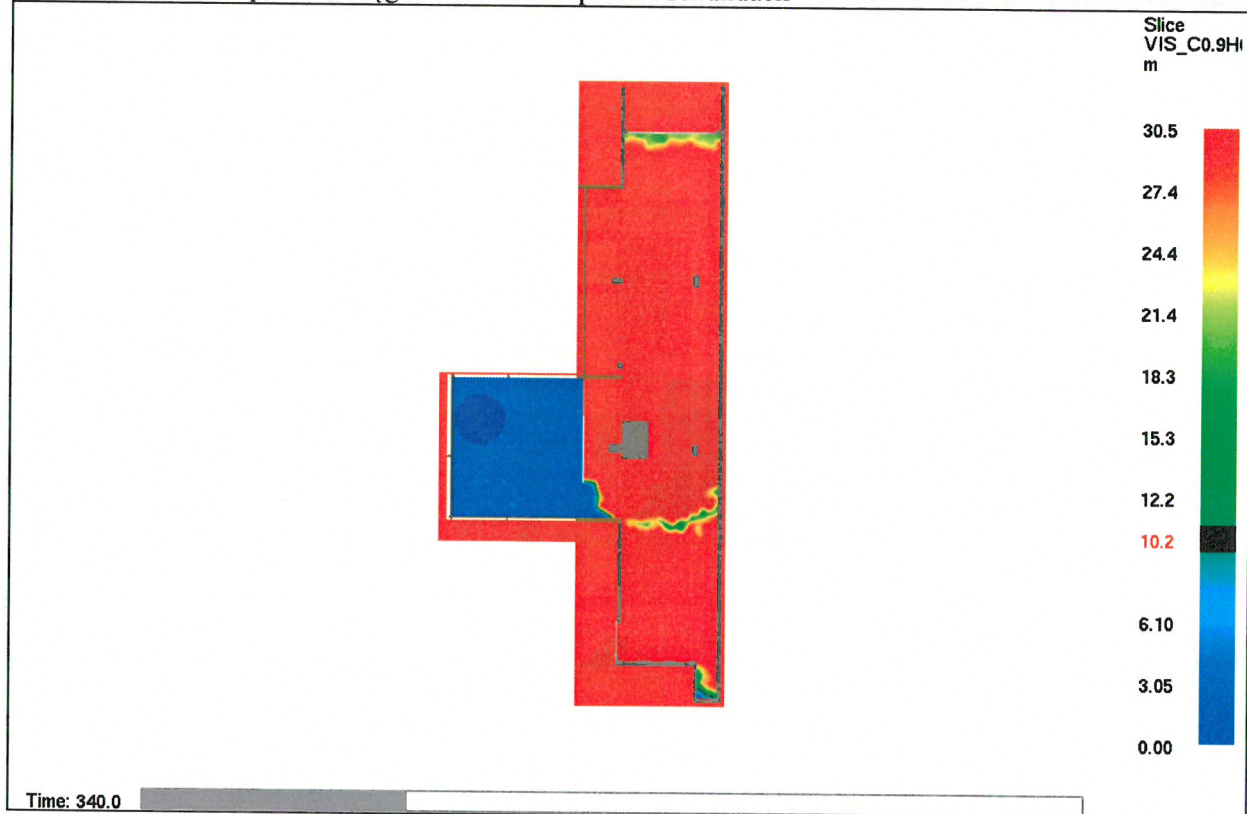
Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach



Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 280 sekundach

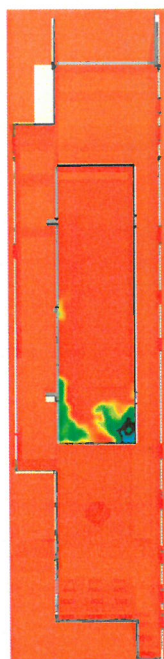


Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 340 sekundach



5.1.4. ZASIĘG WIDZIALNOŚCI NA WYSOKOŚCI 1.8 M NA POZIOMIE +2 W CZASIE EWAKUACJI

Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 180 sekundach

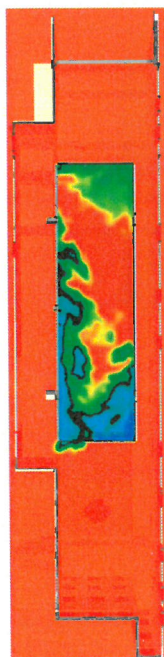


Slice
VIS_C0.9H
m

32.0
29.0
26.0
23.0
20.0
17.0
14.0
12.0
8.00
5.00
2.00

Time: 180.0

Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach

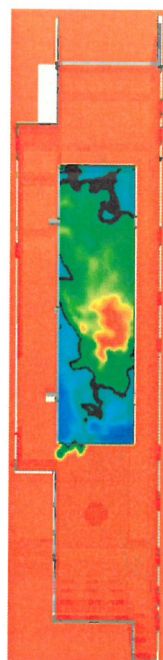


Slice
VIS_C0.9H
m

32.0
29.0
26.0
23.0
20.0
17.0
14.0
12.0
8.00
5.00
2.00

Time: 240.0

Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 280 sekundach

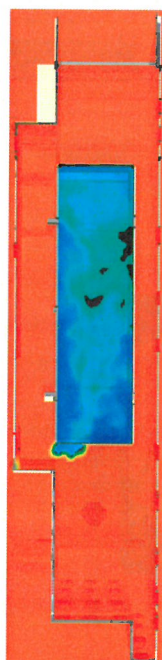


Slice
VIS_C0.9H
m

32.0
29.0
26.0
23.0
20.0
17.0
14.0
12.0
8.00
5.00
2.00

Time: 280.0

Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 340 sekundach

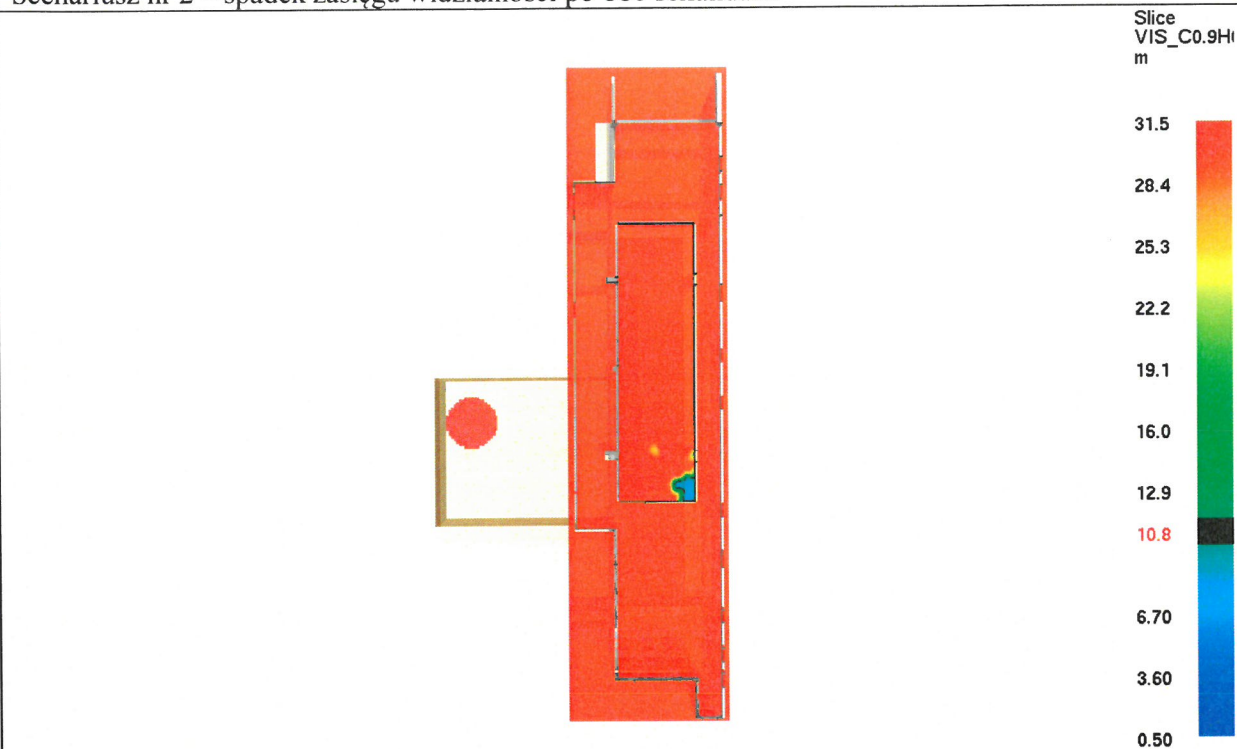


Slice
VIS_C0.9H
m

32.0
29.0
26.0
23.0
20.0
17.0
14.0
12.0
8.00
5.00
2.00

Time: 340.0

Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 180 sekundach



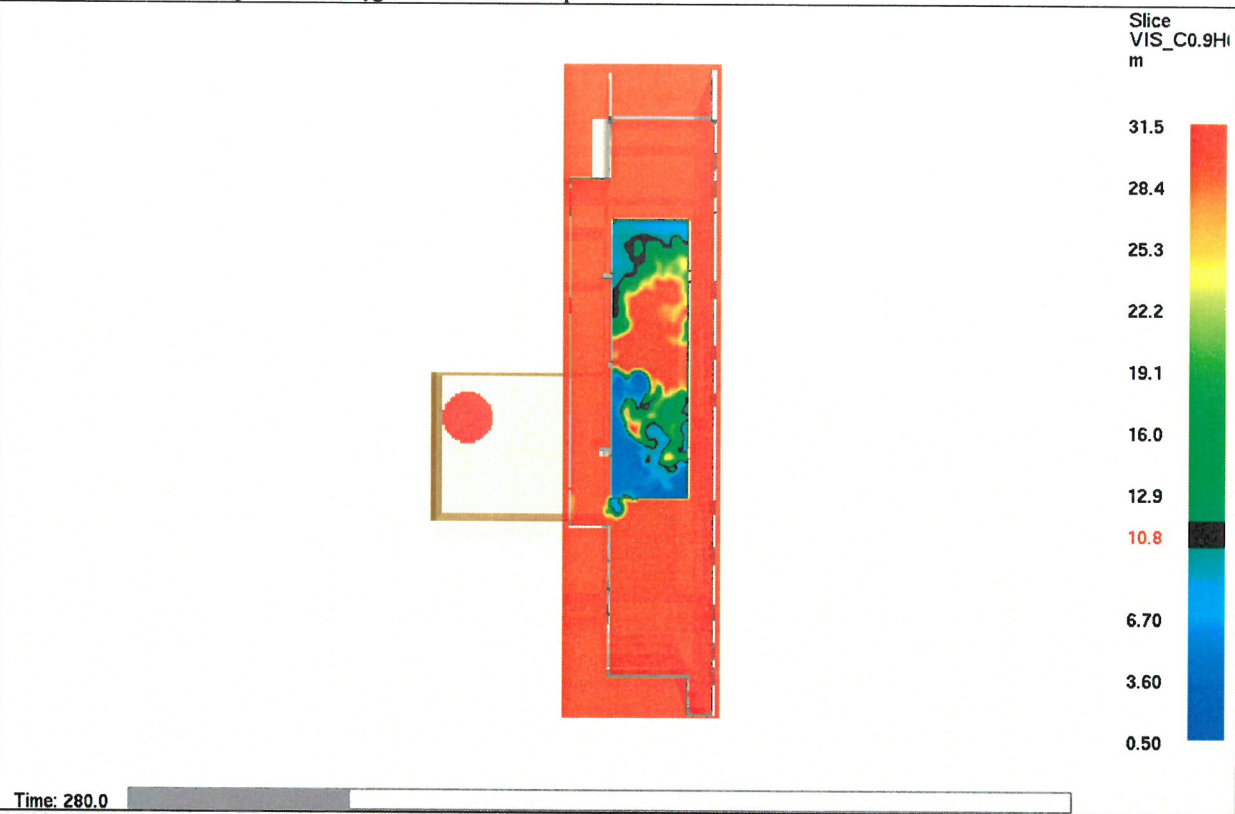
Time: 180.0

Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach

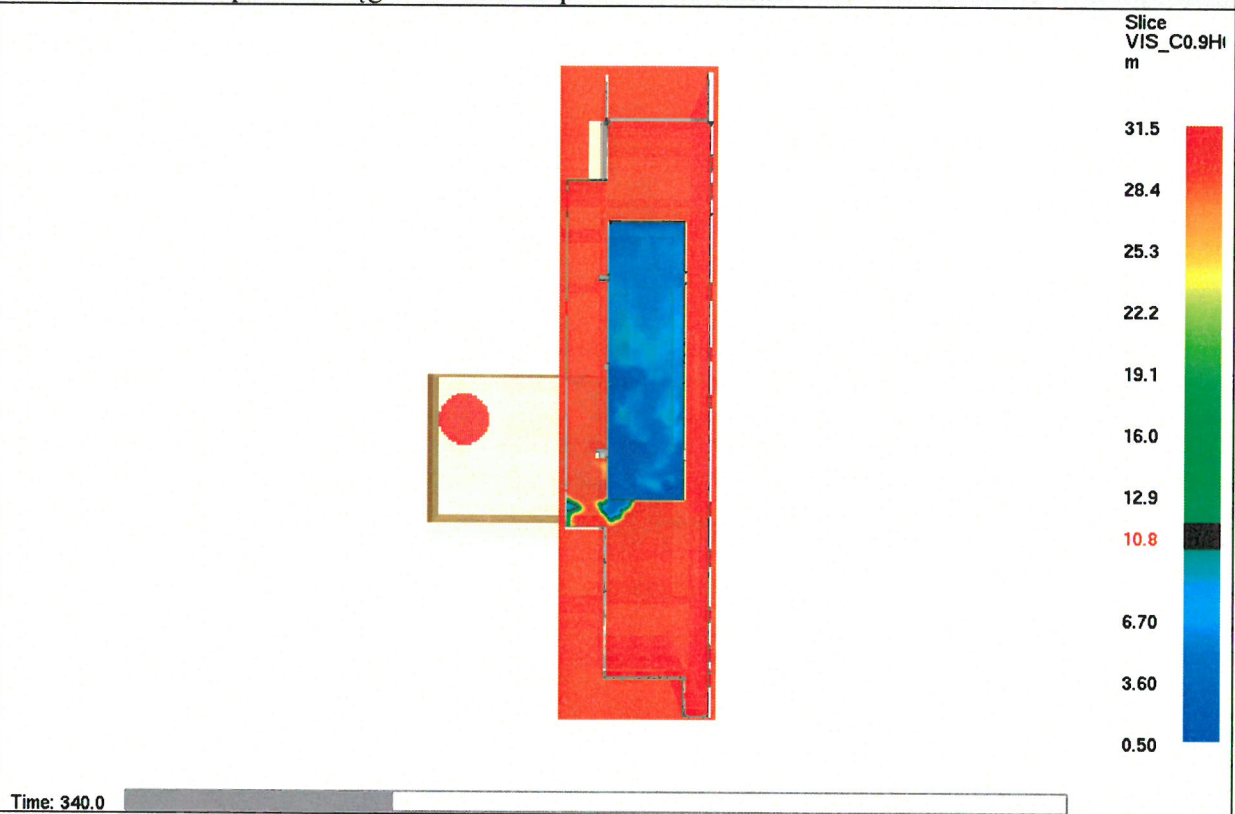


Time: 240.0

Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 280 sekundach

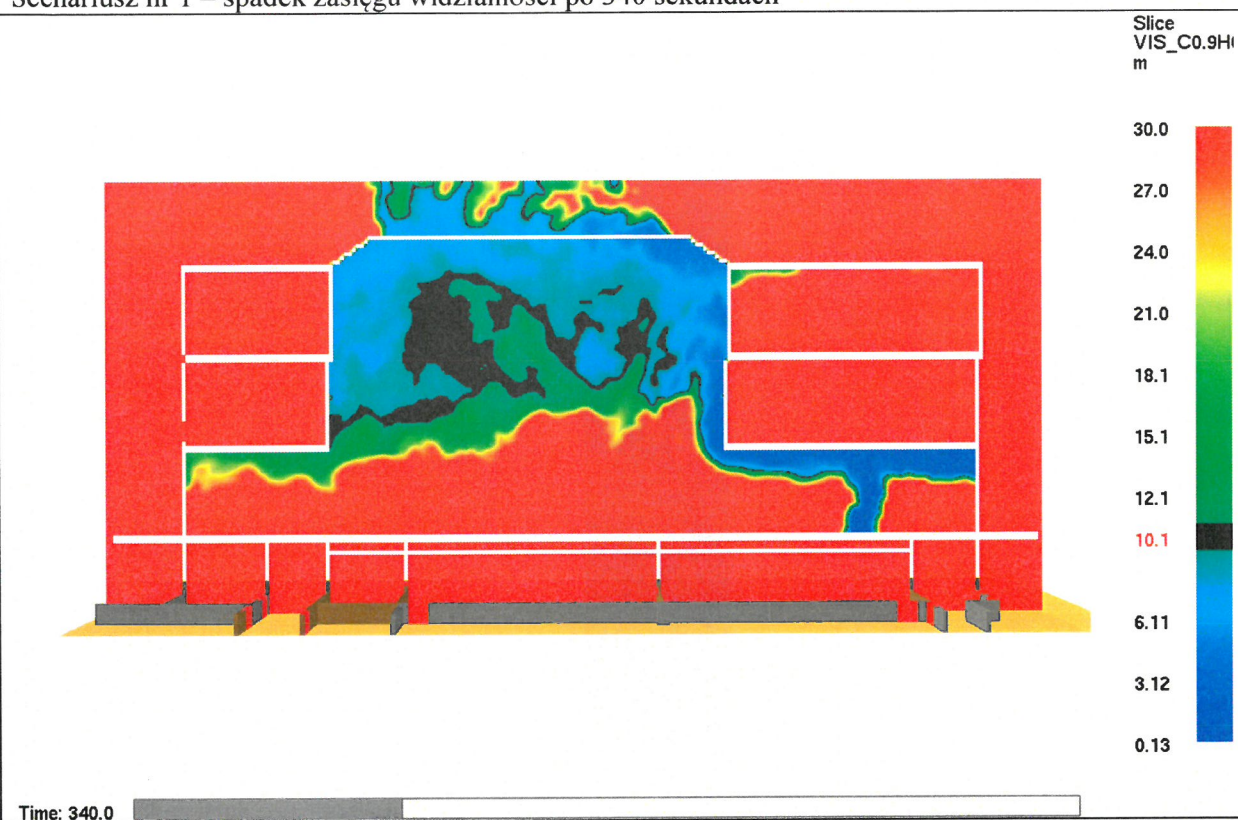


Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 340 sekundach

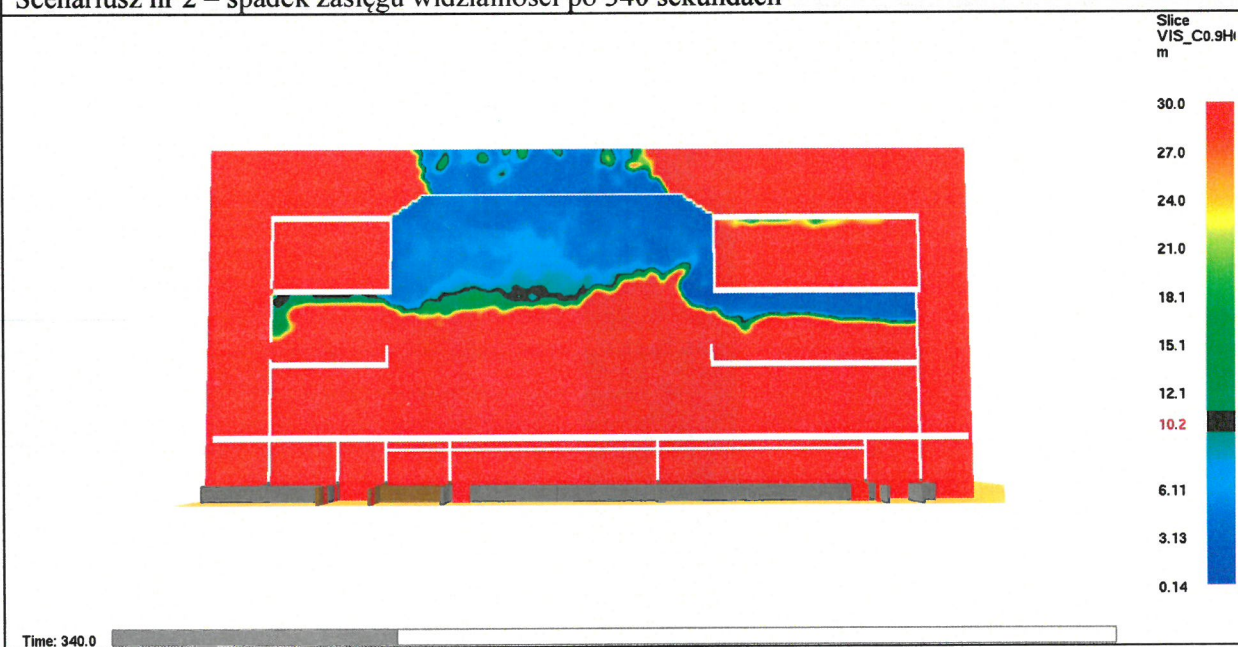


5.1.5. SPADEK ZASIĘGU WIDZIALNOŚCI - PRZĘKRÓJ

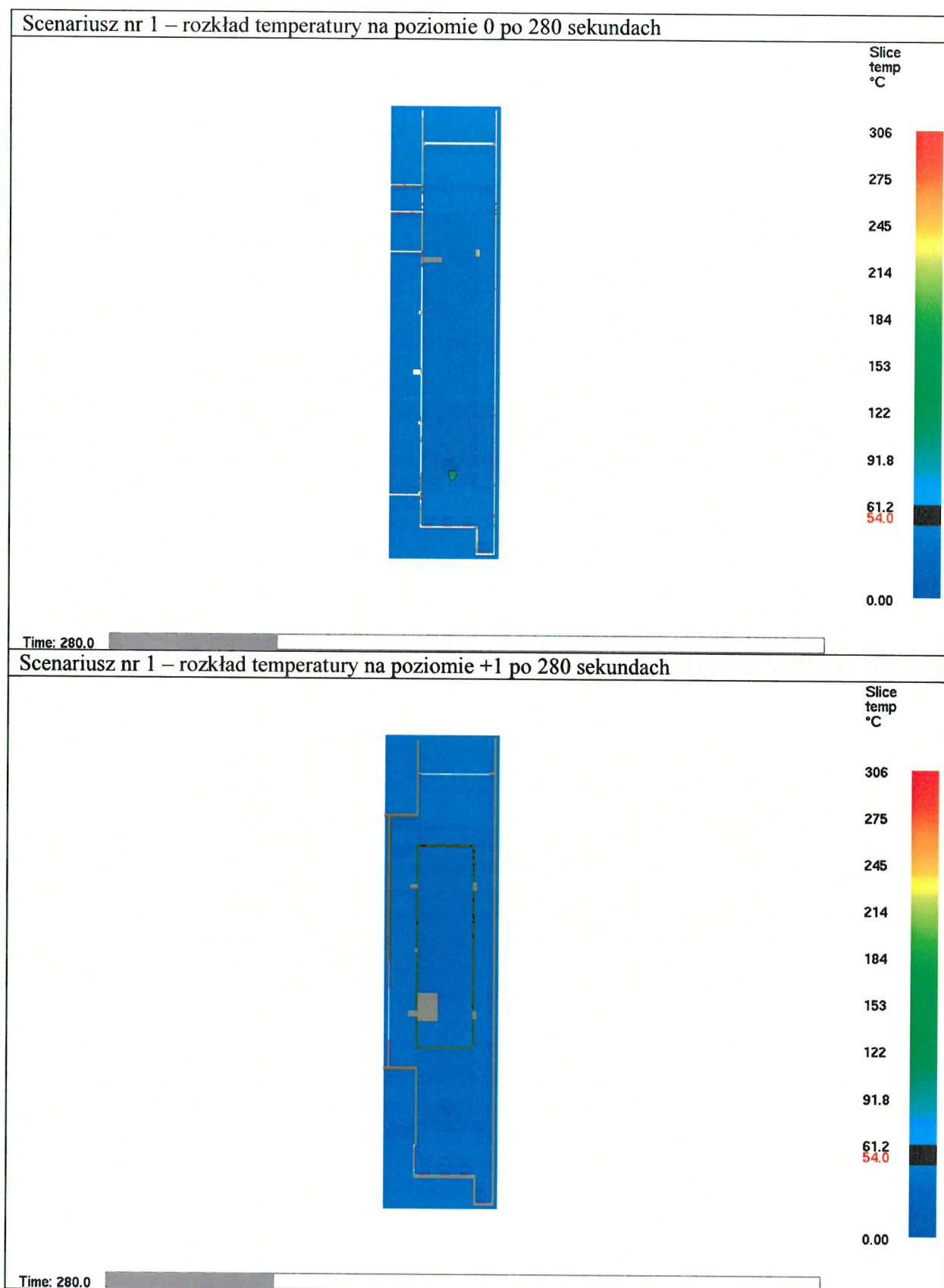
Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 340 sekundach



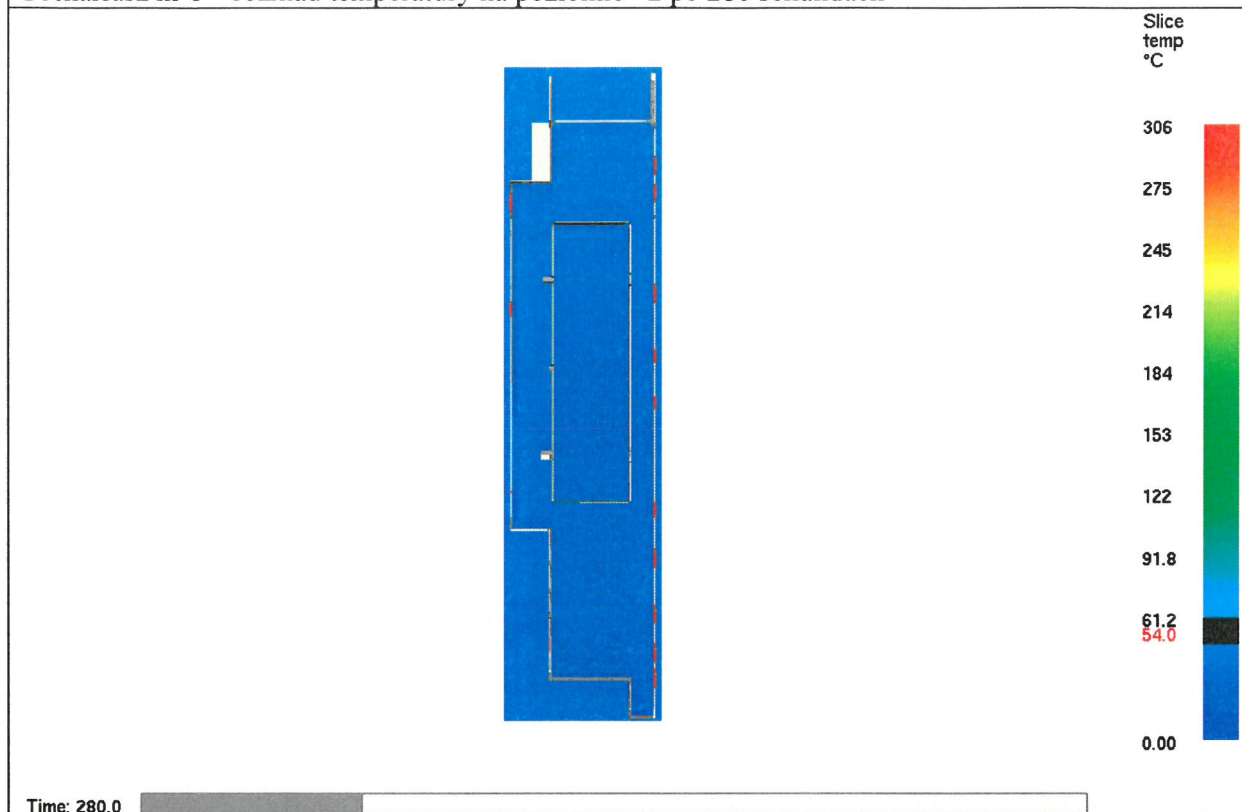
Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 340 sekundach



5.1.6. TEMPERATURA NA WYSOKOŚCI 1.8 M NA POSZCZEGÓLNYCH KONDYGNACJACH W CZASIE EWAKUACJI



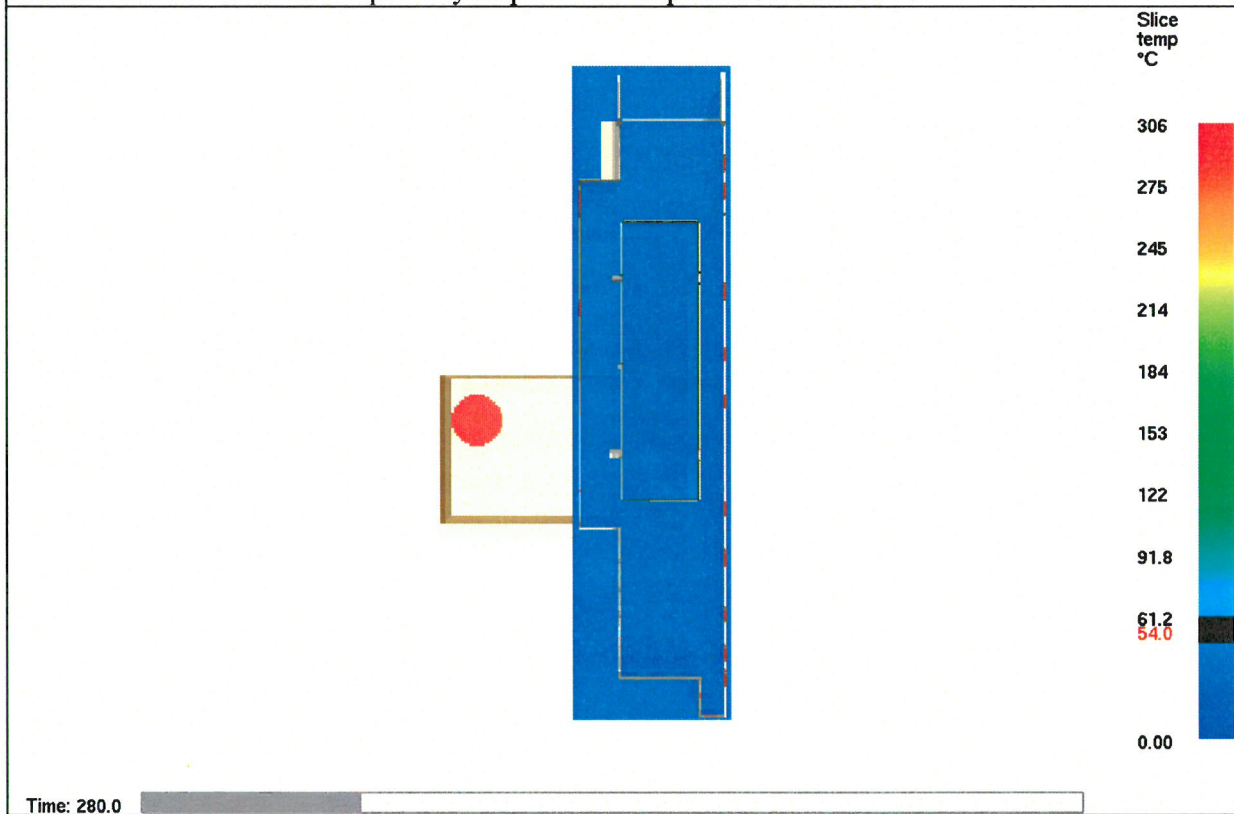
Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury na poziomie +2 po 280 sekundach



Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury na poziomie +1 po 280 sekundach



Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury na poziomie +2 po 340 sekundach



6. WNIOSKI

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji komputerowych należy stwierdzić, że wykorzystany system wentylacji pożarowej zapewni usuwanie dymu z wydajnością wystarczającą dla zapewnienia warunków bezpiecznej ewakuacji z foyer oraz pomieszczeń przyległych. Po czasie 280 s na każdej kondygnacji parametr widzialności i temperatury krytycznej na poziomie 1,8 m nad posadzką nie został przekroczony.

Podczas zakładanego pożaru nawet po 60 s od czasu wymaganego na ewakuację nie stwierdzono na tyle istotnego pogorszenia warunków, że miało by to znaczący wpływ na bezpieczeństwo użytkowników.

Zaleca się wykonanie próby z użyciem gorącego/ciepłego dymu. Autorzy nie narzucają metodologii wykonywanych testów. Zaleca się jednak, żeby wytworzony dym stworzył wyraźną warstwę unoszącą się pod stropem/zadaszeniem w tej części obiektu. Próba ma na celu sprawdzenie poprawności zadziałania systemu wentylacji oddymiającej oraz weryfikację zaproponowanych rozwiązań.

W przypadku znaczącej modyfikacji architektury lub zmiany systemu wentylacji pożarowej, zaleca się wykonanie ponownej analizy CFD.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Health and Safety Laboratory: Gobeau N., Ledin H.S, Lea C.J. Guidance for HSE Inspectors: Smoke movement in complex enclosed spaces - Assessment of Computational Fluid Dynamics. HSL, 2002.
- [2] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott. NIST Special Publication 1019-6. Fire Dynamics Simulator (Version 6) User's Guide. 2017.
- [3] K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd, NIST Special Publication 1018-1. Fire Dynamics Simulator (Version 6) Technical Reference Guide. Volume 3: Validation. 2017.
- [4] 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. 2008.
- [5] 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.
- [6] PN-EN ISO 6946. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- [7] NBN S 21-208-2 Fire protection in buildings – Design and calculation of smoke and heat extraction installations – Part 2: Covered car parking buildings.
- [8] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition. 2002.
- [9] Published Document PD 7974-6:2019. 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] BS 7346-7:2006 Components for smoke and heat control systems – Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks.
- [11] Foster J. A., Roberts G. V.: Research Report Number 61/1994: „Measurements of the Firefighting Environment”.
- [12] PD 7346-4:2003 Components for smoke and heat control systems – Part 4: Functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems, employing steady-state design fires – Code of practice.
- [13] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 12 kwietnia 2002 r. (Dz.U. Nr 75, poz. 690) z późn. zm.
- [14] DFES BEB GUIDLINE No GL-15: Fire Safety Engineered Alternative Solutions.

[15] Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej, Zasady Organizacji Ratownictwa Technicznego w Krajowym Systemie Ratowniczo-Gaśniczym. 2013.

