

**F&K Consulting Engineers Sp. z o.o.**  
ul. Krakowskie Przedmieście 62 lok. 10  
00-321 Warszawa

fax.: 22 490 66 18  
tel.: 507 821 449 • 723 339 800  
[www.fkce.pl](http://www.fkce.pl) • [biuro@fkce.pl](mailto:biuro@fkce.pl)

Nazwa opracowania:	<b>Raport z symulacji CFD działania systemu wentylacji oddymiającej</b>
Obiekt:	<b>Parking i 2-poziomowy garaż podziemny</b>
Adres:	<b>Warszawa, ul. Madalińskiego 25, działka nr ew. 13 obręb 1-01-20</b>
Inwestor:	<b>Szpital Specjalistyczny im. Św. Rodziny Warszawa, ul. Madalińskiego 25</b>

**Wyniki analizy skuteczności działania projektowanego systemu wentylacji oddymiającej w garażu podziemnym zlokalizowanym przy ul. Madalińskiego w Warszawie**

Branża:	<b>Sanitarna / Ochrona przeciwpożarowa</b>
---------	--

Opracował:		Podpis:
	mgr inż. Maciej Sadowski	
Sprawdził:		
	mgr inż. Damian Kubera	

1.	Dane ogólne .....	4
1.1.	Przedmiot opracowania .....	4
1.2.	Cel opracowania .....	4
1.3.	Podstawa opracowania .....	4
1.4.	Zawartość opracowania .....	4
2.	Koncepcja oddymiania obiektu.....	5
2.1.	Ustalenia podstawowe .....	5
2.2.	Założenia do koncepcji zabezpieczenia przed zadymieniem .....	5
2.3.	Podział na strefy dymowe.....	8
2.4.	Podział na strefy detekcji dymu.....	11
2.5.	Obliczenia wentylacji pożarowej.....	12
2.5.1.	Wydajność wentylacji pożarowej .....	12
2.5.2.	Określenie wymaganej klasy temperaturowej wentylatorów wyciągowych .....	12
2.5.3.	Określenie wymaganej temperatury wentylatorów strumieniowych.....	13
3.	Przewidywany czas ewakuacji użytkowników obiektu .....	15
4.	Przewidywany czas do interwencji ekip ratowniczo-gaśniczych .....	17
5.	Symulacje CFD .....	18
5.1.	Charakterystyka użytego programu CFD .....	18
5.1.1.	Nazwa programu, wersja, producent.....	18
5.1.2.	Rodzaj i gęstość siatki obliczeniowej .....	18
5.1.3.	Model turbulencji.....	18
5.1.4.	Model spalania .....	19
5.1.5.	Model promieniowania .....	19
5.2.	Niepewności obliczeniowe i zastosowane współczynniki bezpieczeństwa .....	19
5.3.	Warunki początkowe i brzegowe .....	20
5.3.1.	Początkowa temperatura wewnętrzna i zewnętrzna.....	20
5.3.2.	Materiały elementów budowlanych .....	20
5.3.3.	Materiał palny .....	20
5.3.4.	Zastosowane schematy i ustawienia numeryczne .....	20
5.3.5.	Czas symulacji .....	21
5.4.	Analizowane parametry pożaru .....	21
5.5.	Założenia dla wentylatorów strumieniowych.....	21
5.6.	Analizowane scenariusze pożarowe .....	22
6.	Wyniki symulacji CFD .....	27
6.1.	Sprawdzenie warunków ewakuacji oraz bezpieczeństwa ekip ratowniczych .....	27
6.1.1.	Krzywa mocy pożaru .....	27

6.1.2.	Zasięg widzialności na wysokości 1.8 m w czasie ewakuacji .....	28
6.1.3.	Temperatura na wysokości 1.8 m w czasie ewakuacji.....	36
6.1.4.	Temperatura na wysokości 1.5 m po czasie interwencji ekip ratowniczych .....	44
6.2.	Temperatura na wysokości wentylatorów strumieniowych po czasie interwencji ekip ratowniczych.....	48
6.3.	Określenie wymaganej klasy temperaturowej wentylatorów wyciągowych.....	52
7.	Wnioski .....	53
8.	Bibliografia .....	55

## **1. DANE OGÓLNE**

### **1.1. PRZEDMIOT OPRACOWANIA**

Niniejsze opracowanie stanowi raport z symulacji CFD zawierający analizę skuteczności działania projektowanego bezkanałowego systemu wentylacji oddymiającej w garażu podziemnym zlokalizowanym pod parkingiem szpitala im. Św. Rodziny przy ul. Madalińskiego w Warszawie.

### **1.2. CEL OPRACOWANIA**

Celem opracowania jest sprawdzenie warunków ewakuacji użytkowników garażu oraz bezpieczeństwa ekip ratowniczych w czasie trwania pożaru poprzez wykonanie obliczeń empirycznych oraz komputerowej analizy rozwoju pożaru.

### **1.3. PODSTAWA OPRACOWANIA**

Podstawą opracowania są:

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

### **1.4. ZAWARTOŚĆ OPRACOWANIA**

Opracowanie zawiera część opisową przedstawiającą ogólną zasadę funkcjonowania bezkanałowego systemu wentylacji oddymiającej, uproszczony scenariusz pożarowy oraz obliczenia empiryczne parametrów pożaru i systemu wentylacji. Ponadto opracowanie zawiera obliczenia czasu ewakuacji ludzi z garażu oraz szacunkowy czas dojazdu i interwencji ekip ratowniczo-gaśniczych. Kolejne rozdziały dokumentu przedstawiają opis programu wykorzystanego do wykonania obliczeń numerycznych, wyniki oraz wnioski i zalecenia dodatkowe z przeprowadzonej analizy.

## **2. KONCEPCJA ODDYMIANIA OBIEKTU**

### **2.1. USTALENIA PODSTAWOWE**

Zgodnie z założeniami do projektu budowlanego przyjęto, że oddymianiu będzie podlegał garaż podziemny pod parkingiem szpitala im. Św. Rodziny przy ul. Madalińskiego w Warszawie. Garaż swą powierzchnią obejmuje dwie kondygnacje. W projekcie budowlanym przewidziano rozwiązania architektoniczno-instalacyjne, stanowiące podstawę do określenia zasad funkcjonowania systemu zabezpieczenia przed zadymieniem, takie jak:

- a) w garażu podziemnym znajdować się będzie strumieniowa instalacja wentylacji oddymiającej,
- b) każda kondygnacja podziemna garażu stanowi oddzielną strefę pożarową,
- c) w garażu nie projektuje się instalacji tryskaczowej,
- d) komunikacja pomiędzy strefami pożarowymi realizowana jest poprzez przejazd zamykany bramą przeciwpożarową,
- e) pomieszczenia techniczne i klatki schodowe zostały wydzielone pożarowo od części garażu przeznaczonej na parkowanie samochodów,
- f) z garażu możliwa jest ewakuacja do 2 obudowanych klatek schodowych,
- g) do garażu podziemnego prowadzi jeden wjazd,
- h) na terenie będzie znajdowała się całodobowa ochrona.

### **2.2. ZAŁOŻENIA DO KONCEPCJI ZABEZPIECZENIA PRZED ZADYMIENIEM**

W garażu podziemnym przewiduje się zastosowanie strumieniowego systemu wentylacji mechanicznej oddymiającej, opartego na zespole wentylatorów o łącznej wydajności oddymiania  $150\,000\text{ m}^3/\text{h}$ . Nawiew świeżego powietrza do garażu podczas pożaru będzie realizowany mechanicznie poprzez wentylatory o wydajności  $75\,000$  (poziom -1) lub  $150\,000\text{ m}^3/\text{h}$  (poziom -2). Pozostała ilość powietrza (na poziomie -1) będzie uzupełniana grawitacyjnie poprzez bramę wjazdową. Dodatkowo, w celu lepszego ukierunkowania przepływu dymu, wykorzystano 8 wentylatorów strumieniowych – po 4 na każdej kondygnacji. Wydajności wentylatorów wynoszą  $6444\text{ m}^3/\text{h}$ . Rozmieszczenie urządzeń oraz oznaczenia użyte w raporcie są zgodne z projektem wentylacji oddymiającej.

W celu zapobieżenia rozprzestrzeniania się dymu na całą strefę pożarową, każda z nich zostanie podzielona na dwie strefy dymowe. Strefy dymowe będą równocześnie stanowiły strefy detekcji dymu. Zakłada się, że w momencie wykrycia pożaru w garażu podziemnym zostanie zamknięta brama przeciwpożarowa, tak aby uniemożliwić przedostanie się pożaru do sąsiednich stref pożarowych. Brama wjazdowa będzie otwierać się lub zamykać w zależności od miejsca wystąpienia pożaru.

Zakłada się, że pożar samochodu może jednocześnie powstać tylko w jednej strefie dymowej.

Zakłada się, że czas detekcji pożaru w omawianym garażu 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, w strefie, w której wystąpiła detekcja dymu lub uruchomienie pierwszej czujki, która określa strefę detekcji i dowolnego ręcznego ostrzegacza pożarowego) oraz uruchomienie

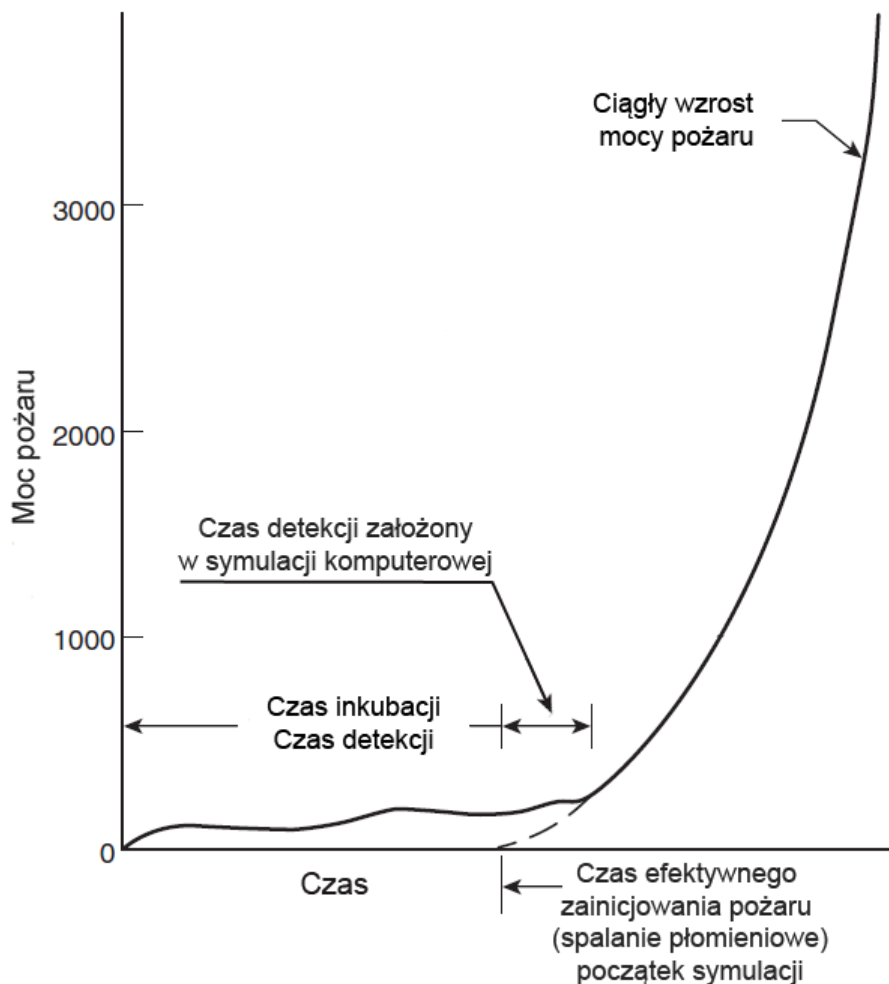
wentylacji wyciągowej dla strefy dymowej, w której wystąpi detekcja dymu. Wentylatory strumieniowe uruchomione zostaną po 180 sekundach od momentu detekcji pożaru. Wystąpienie alarmu II stopnia spowoduje również zamknięcie klap przeciwpożarowych w instalacji wentylacji bytowej oraz uruchomienie akustycznych i wizualnych sygnalizatorów pożaru.

W momencie wystąpienia alarmu I stopnia wentylatory strumieniowe pracujące w trybie wentylacji bytowej (uruchomione na pierwszym biegu) zostaną wyłączone. Ponadto klapy przeciwpożarowe odcinające przeznaczone do wentylacji pożarowej tj. zamontowane na wyciągach oraz nawiewach zostaną odpowiednio wysterowane tj. zamknięte lub otwarte, w tryb, w jakim będą pracować w przypadku uruchomienia wentylacji pożarowej (wystąpienia alarmu II stopnia).

W przypadku, gdy alarm II stopnia występuje natychmiast po alarmie I stopnia, w Systemie Sygnalizacji Pożarowej należy zachować zwłokę 15 sekund pomiędzy uruchomieniem poszczególnych elementów instalacji w alarmie I stopnia i II stopnia. Działanie to ma zapobiec sytuacji, w której ciąg wentylatorów wyciągowych spowoduje zablokowanie klap przeciwpożarowych. Matryca zadziałania poszczególnych urządzeń znajduje się w rozdziale 2.4.

Wykrycie dymu przez pierwszą czujkę Systemu Sygnalizacji Pożarowej bezpośrednio wskazuje strefę dymową, w której wystąpiła detekcja dymu. Zdarzenie to ma zmniejszyć prawdopodobieństwo wystąpienia blokady w Systemie Sygnalizacji Pożarowej w przypadku zadziałania dwóch czujek w dwóch różnych strefach dymowych.

Poniższy wykres przedstawia schematyczny przebieg pożaru. Czas detekcji przyjęty w analizie numerycznej (60 sekund) jest czasem liczonym od momentu efektywnego zainicjowania pożaru (początek spalania płomieniowego). W rzeczywistości spalanie płomieniowe poprzedzone będzie inkubacją pożaru (tj. spalanie bezpłomieniowe), podczas której generowany będzie dym, który może spowodować wcześniejszą detekcję pożaru.



Scenariusz zdarzeń na wypadek pożaru znajduje się w tabeli nr 1:

Tabela 1. Scenariusz zdarzeń w czasie pożaru.

Czas [sek.]	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.
Alarm I stopnia	Wentylatory strumieniowe uruchomione w trybie wentylacji bytowej przestają działać.
Alarm I stopnia	Otwarcie/zamknięcie klap przeciwpożarowych odcinających w instalacji wentylacji pożarowej.
Alarm II stopnia	Zachowana zwłoka czasowa 15 pomiędzy alarmami I i II stopnia (w przypadku jednoczesnego lub czasu krótszego niż 15 pomiędzy alarmami)
60	Detekcja pożaru przez drugą czujkę dymu. System Sygnalizacji Pożarowej wchodzi w alarm II stopnia.
60	Uruchomienie wyciągów pożarowych.
60	Zamknięcie/otwarcie bramy przeciwpożarowej/wjazdowej.
60	Zamknięcie klap przeciwpożarowych odcinających w instalacji wentylacji bytowej.
60	Uruchomienie akustycznych oraz wizualnych sygnalizatorów pożaru.
150	Maksymalny czas, po którym wyciągi osiągną 100% swojej wydajności.

240	Uruchomienie wentylatorów strumieniowych w trybie pożarowym.
300	Maksymalny czas, po którym wentylatory strumieniowe osiągną 100% swojej wydajności.

Omówione powyżej czasy zostały przyjęte do obliczeń numerycznych. Ponadto przyjęto, że w zależności od strefy detekcji dymu uruchomione zostaną odpowiednie urządzenia systemu wentylacji oddymiającej, zgodnie z opisem w rozdziale 2.4.

### **2.3. PODZIAŁ NA STREFY DYMOWE**

Zakłada się podział garażu podziemnego na 4 strefy dymowe:







Do stref dymowych nie wlicza się powierzchni klatek schodowych, szybów windowych oraz pomieszczeń pomocniczych. Zakłada się, że wymienione pomieszczenia będą wydzielone pożarowo od części garażu przewidzianej na parkowanie samochodów zgodnie z projektem budowlanym.

#### 2.4. PODZIAŁ NA STREFY DETEKCJI DYMU

Garaż podziemny zostanie podzielony na 4 strefy detekcji dymu. Strefy detekcji dymu powierzchniowo będą odpowiadać strefom dymowym.

W tabeli nr 2 przedstawiona została matryca zdarzeń na wypadek pożaru w garażu. W matrycy uwzględniono jedynie urządzenia występujące w symulacji komputerowej. Pozostałe urządzenia systemu wentylacji (klapy przeciwpożarowe odcinające) powinny zostać uruchomione zgodnie z tabelą zdarzeń w rozdziale 2.2.

##### Legenda:

+ urządzenie włącza się

– urządzenie nie włącza się

0 s – Czas detekcji pożaru – alarm II stopnia.

Tabela 2. Czas aktywacji poszczególnych urządzeń.

	Strefa pożarowa 1		Strefa pożarowa 2	
	SD 1	SD 2	SD 3	SD 4
Wyciąg mechaniczny W-1	+ (0 s) 150 000 m <sup>3</sup> /h klapy otwarte w strefie 1	+ (0 s) 150 000 m <sup>3</sup> /h klapy otwarte w strefie 2	-	-
Nawiew mechaniczny N-1	+ (0 s) 75 000 m <sup>3</sup> /h	+ (0 s) 75 000 m <sup>3</sup> /h	-	-
Wyciąg mechaniczny W-2	-	-	+ (0 s) 150 000 m <sup>3</sup> /h klapy otwarte w strefie 3	+ (0 s) 150 000 m <sup>3</sup> /h klapy otwarte w strefie 4
Nawiew mechaniczny N-2	-	-	+ (0 s) 150 000 m <sup>3</sup> /h	+ (0 s) 150 000 m <sup>3</sup> /h
Brama ppoż.	+ (0 s) zamknięcie	+ (0 s) zamknięcie	+ (0 s) zamknięcie	+ (0 s) zamknięcie
Brama wjazdowa	+ (0 s) otwarcie	+ (0 s) otwarcie	+ (0 s) zamknięcie	+ (0 s) zamknięcie
JetFan-1	+ (180 s)	+ (180 s)	-	-
JetFan-2	+ (180 s)	+ (180 s)	-	-
JetFan-3	+ (180 s)	+ (180 s)	-	-
JetFan-4	+ (180 s)	+ (180 s)	-	-
JetFan-5	-	-	+ (180 s)	+ (180 s)

JetFan-6	-	-	+(180 s)	+(180 s)
JetFan-7	-	-	+(180 s)	+(180 s)
JetFan-8	-	-	+(180 s)	+(180 s)

## 2.5. OBLICZENIA WENTYLACJI POŻAROWEJ

### 2.5.1. WYDAJNOŚĆ WENTYLACJI POŻAROWEJ

Na podstawie przeprowadzonych symulacji CFD ustalono, że minimalna wydajność wentylatorów wyciągowych zapewniająca akceptowalne warunki bezpieczeństwa pożarowego powinna wynosić minimum 150 000 m<sup>3</sup>/h.

### 2.5.2. OKREŚLENIE WYMAGANEJ KLASY TEMPERATUROWEJ WENTYLATORÓW WYCIĄGOWYCH

Średnie temperatury gazów pożarowych wprowadzanych do kanałów wyciągowych zależą od objętości powietrza usuwanego przez wentylatory oraz maksymalnej konwekcyjnej mocy pożaru, zgodnie z poniższymi wzorami [12]:

$$M = \frac{V\rho T_0}{T} \quad T = T_0 + \frac{Q}{M \cdot C_{pow}}$$

V – objętość usuwanych gazów pożarowych [m<sup>3</sup>]

Q – moc konwekcyjna [kW]

T<sub>0</sub> – początkowa temperatura danej objętości powietrza [°C]

T – temperatura usuwanej masy gazów pożarowych [°C]

C<sub>pow</sub> – ciepło właściwe powietrza = 1,01 [J/kg °C]

M – masa usuwanych gazów pożarowych [kg]

ρ – gęstość powietrza w danej temperaturze [kg/m<sup>3</sup>]

Masa usuwanego powietrza i jego temperatura są ze sobą związane. Z uwagi na powyższe do ich jednoczesnego obliczenia wykorzystano iteracyjną metodę kolejnych przybliżeń, przyjmując w pierwszym kroku gęstość i temperaturę chłodnego powietrza. W każdym kolejnym kroku stopniowo korygowano wyniki do otrzymania dwóch kolejnych różniących się maksymalnie o 1 %.

W tabeli nr 3 przedstawiono wyniki kolejnych iteracji dla maksymalnej mocy 8000 kW [10] oraz objętości 150 000 m<sup>3</sup>/h powietrza oraz gazów pożarowych usuwanych przez wentylatory wyciągowe w danej strefie pożarowej.

Tabela 3. Wartości temperatur usuwanej masy gazów pożarowych.

Temperatura usuwanych gazów pożarowych [°C]	Masa usuwanego powietrza [kg]
20.0	50.0
146.7	34.9
201.5	30.9
225.3	29.4
235.5	28.8
240.0	28.6
241.9	28.5
242.7	28.4
243.1	28.4

Na podstawie obliczeń można określić wymaganą klasę wentylatorów wyciągowych jako F<sub>400</sub>120.

### 2.5.3. OKREŚLENIE WYMAGANEJ TEMPERATURY WENTYLATORÓW STRUMIENIOWYCH

Ze względu na lokalny charakter oddziaływania pożaru, możliwe jest sprawdzenie temperatury strumienia podsufitowego w funkcji odległości od osi pożaru dla zadanej mocy. Oszacowanie takie pozwala uzyskać orientacyjne informacje o zasięgu oddziaływania niezakłóconego przez działanie wentylacji pożaru. W rzeczywistości, w warunkach przepływu powietrza wywołanego przez działanie wentylacji strumieniowej, zasięg ten może być większy w kierunku przepływu powietrza, będzie natomiast mniejszy w kierunku do niego prostopadłym. Temperaturę strumienia podsufitowego w funkcji odległości wyznaczono na podstawie zależności Alperta [8]:

$$t = t_{\infty} + \frac{5,38 \cdot (Q/r)^{2/3}}{H}$$

gdzie:

$t$  – temperatura strumienia podsufitowego [°C]

$t_{\infty}$  – wartość temperatury otoczenia [°C]

$Q$  – moc pożaru [kW]

$H$  – wysokość od podstawy pożaru do sufitu [m]

$r$  – odległość od osi pożaru [m]

Dla maksymalnej mocy pożaru wynoszącej 8000 kW wartości temperatur w funkcji odległości od osi pożaru przy różnych poziomach wysokości garażu podane są w tabeli nr 4.

Tabela 4. Wartości temperatur strumienia podsufitowego w funkcji odległości.

r [m]	1	3	5	7	10
t [°C] dla h =2,70 m	817	403	293	238	192

Na podstawie obliczeń analitycznych można przyjąć, że możliwe jest zastosowanie wentylatorów strumieniowych w klasie F<sub>400</sub>120.

### 3. PRZEWIDYWANY CZAS EWAKUACJI UŻYTKOWNIKÓW OBIEKTU

Przewidywany czas ewakuacji użytkowników obiektu został obliczony na podstawie brytyjskiej normy [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.

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	A2. 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	
Poziom budynku	B1. Jednokondygnacyjny obiekt (wydzielone strefy pożarowe garażu), 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. Personel przeszkolony do wysokiego poziomu zarządzania bezpieczeństwem, praktyka w zabezpieczeniu przeciwpożarowym, właściwy nadzór nad utrzymaniem urządzeń, dobrze opracowana instrukcja bezpieczeństwa pożarowego.

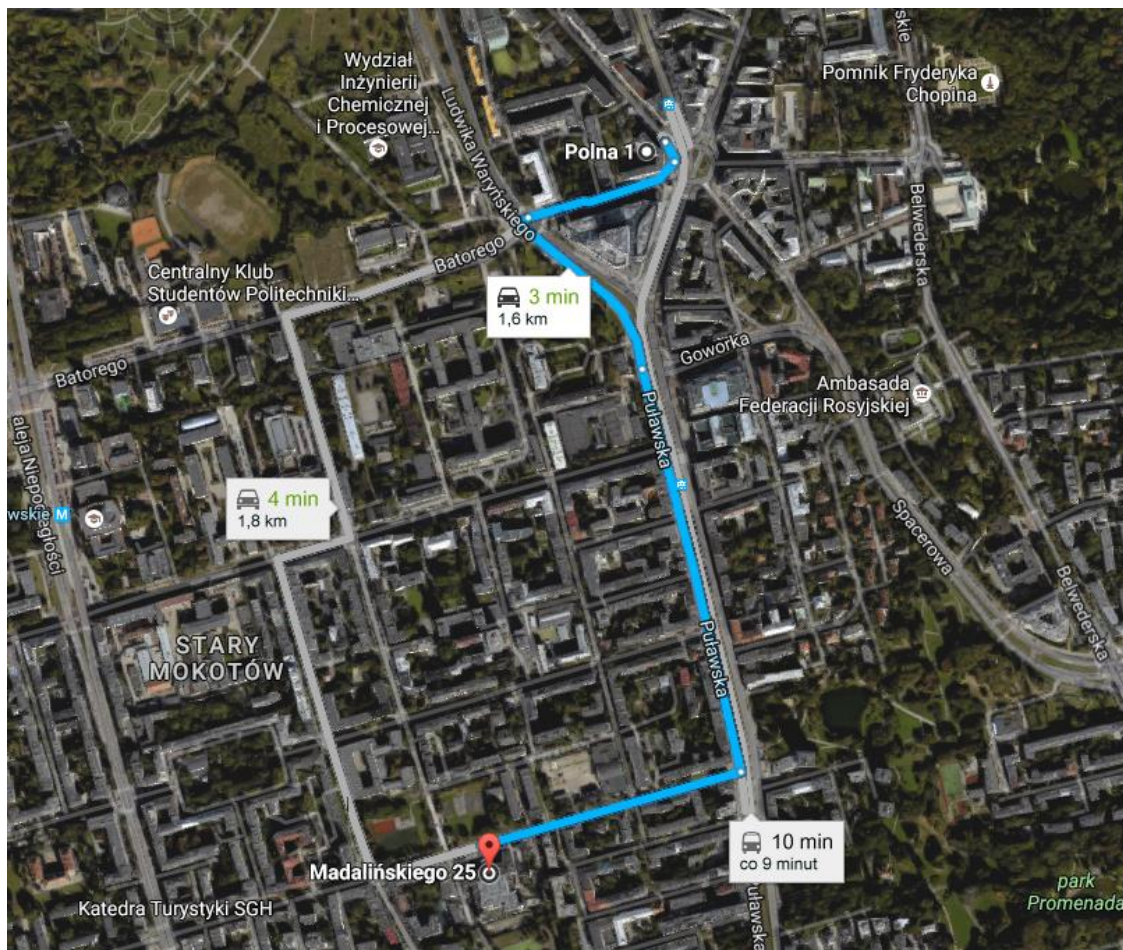
Obliczenie Wymaganego Bezpiecznego Czasu Ewakuacji	
Obliczenie czasu detekcji pożaru	Dane producentów i normowe: td – czas detekcji pożaru (wystąpienie alarmu II stopnia): <u>60 s</u>
Obliczenie czasu alarmowania	ta – czas alarmowania: <u>0 s</u> Obiekt jest wyposażony w system sygnalizacji pożaru.
Obliczenie czasu pierwszych-wstępnych reakcji	Kategoria scenariuszy i modyfikacje: Czuwający, zaznajomieni – M2 B1 A2. tp-wr - czas reakcji: <u>120 s</u> (99%)
Obliczenie czasu przejścia	<p><u>1. Ewakuacja do klatki schodowej z najdalszego miejsca:</u></p> <p>a) czas dojścia do wyjścia z najdalszego punktu</p> <p>prędkość na drodze poziomej – 1,2 m/s</p> <p>maksymalna długość drogi w poziomie – 40 m</p> <p>czas pokonania drogi: <math>40 : 1,2 + 0 = \underline{33 s}</math></p> <p>zakłada się niezakłóconą prędkość poruszania się</p> <p>b) czas przechodzenia przez wyjście</p> <p>Nie przewiduje się tworzenia kolejki przy wyjściach ewakuacyjnych, ze względu na wystarczającą ilość dostępnych wyjść ewakuacyjnych.</p> <p><math>WCBE = 60 + 0 + 120 + 33 = 213 \text{ sekund}</math></p> <p><u><math>WCBE \pm 20 = 233 \text{ sekundy}</math></u></p>
<b><math>WCBE = td+ta+tp-wr+tp \approx 240 \text{ sekund (4 minuty)}</math></b>	

Zakłada się, że czas ewakuacji dla analizowanego garażu podziemnego nie powinien przekroczyć **4 minut**.



#### 4. PRZEWIDYWANY CZAS DO INTERWENCJI EKIP RATOWNICZO-GAŚNICZYCH

Najbliższa Jednostka Ratowniczo-Gaśnicza Państwowej Straży Pożarnej znajduje się przy ul. Polnej 1 (JRG 3) w Warszawie. Od projektowanego budynku znajduje się w odległości ok. 1,6 km. Poniżej przedstawiona została jedna z możliwych dróg dojazdu do omawianego budynku (źródło: <http://google.maps.pl>).



Na szacowany czas dojazdu składają się:

- czas detekcji (wystąpienie alarmu II stopnia): 60 s
- czas transmisji i powiadamiania jednostki ratowniczo-gaśniczej: 60 s
- czas wyjazdu 1 samochodu gaśniczego (w nocy): 120 s
- czas dojazdu (prędkość średnia - 40 km/h): 144 s
- czas na rozpoznanie oraz przygotowanie linii gaśniczych: 180 s
- czas dotarcia do źródła pożaru: 180 s

Łączny czas do momentu rozpoczęcia gaszenia pożaru samochodów: **744 s**

W związku z powyższym można założyć, że po ok. 12-13 minutach ekipy ratownicze powinny rozpocząć działania gaśnicze. Jednakże zgodnie z wytycznymi PSP oraz faktem, iż pożar osiąga swoją moc projektową po czasie 15 minut jako czas do rozpoczęcia działań gaśniczych przyjęto czas **15 minut (900 s)**. Zdarzenie to uniemożliwi dalszy rozwój pożaru.

## **5. SYMULACJE CFD**

### **5.1. CHARAKTERYSTYKA UŻYTEGO PROGRAMU CFD**

#### **5.1.1. NAZWA PROGRAMU, WERSJA, PRODUCENT**

Do przeprowadzenia szczegółowej analizy oraz otrzymania wyników zawartych w raporcie wykorzystany został program Fire Dynamics Simulator wersja 5.5.3, 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.

#### **5.1.2. RODZAJ I GĘSTOŚĆ SIATKI OBLICZENIOWEJ**

Użyto siatki regularnej sześcienniej o boku 15/30 cm. Domena obliczeniowa została podzielona na 8 siatek obliczeniowych. Rozmiar siatki dobrano w oparciu o:

- a) wytyczne Health and Safety Laboratory [1],
- b) wytyczne NUREG, publikowane również w instrukcji użytkownika FDS5 User's Guide [2],
- c) w taki sposób, by bok siatki odpowiadał średnicy hydraulicznej wentylatora strumieniowego.

#### **5.1.3. MODEL TURBULENCJI**

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

#### 5.1.4. MODEL SPALANIA

Użyto modelu Mixture Fraction. Model ten przyjmuje następujące uproszczenia:

- a) skład stechiometryczny mieszaniny palnej jest definiowany przez ułamek molowy gazów palnych i produktów spalania (równy 1 dla czystego paliwa) i powietrza (równy 0 dla czystego 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.

#### 5.1.5. 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, stosowanych w samochodach osobowych.

### 5.2. NIEPEWNOŚCI OBLICZENIOWE I ZASTOSOWANE WSPÓLCZYNNIKI BEZPIECZEŃSTWA

W tabeli nr 5 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

### 5.3. WARUNKI POCZĄTKOWE I BRZEGOWE

#### 5.3.1. POCZĄTKOWA TEMPERATURA WEWNĘTRZNA I ZEWNĘTRZNA

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

#### 5.3.2. 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 <sup>3</sup> ]	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

#### 5.3.3. 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 <sup>2</sup> /kg]	8700

#### 5.3.4. ZASTOSOWANE SCHEMATY I USTAWIENIA NUMERYCZNE

W symulacji użyto domyślnych ustawień programu z wyjątkiem sposobu obliczania kroku czasowego. Krok czasowy jest obliczany z zachowaniem kryterium CFL, tzn:

$$CFL = \delta t \frac{\|\bar{u}\|}{\delta x} < 1$$

Krok czasowy obliczany jest automatycznie zgodnie z jednym z trzech schematów, odnoszących się do sposobu normalizacji wektora prędkości. Domyślnym schematem dla użytej wersji 5.5.0 jest schemat  $L_{\infty}$ :

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

### 5.3.5. CZAS SYMULACJI

Jako czas symulacji przyjęto czas 1200 sekund. Krok czasowy jest ustalany automatycznie na podstawie liczby CFL, przy użyciu schematu  $L_{\infty}$ .

## 5.4. 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,
- c) temperatura na wysokości 1,5 m od podłogi oddziałująca na ekipy ratownicze prowadzące działania wewnątrz obiektu – wartość krytyczna to 120 °C
- d) temperatura gazów pożarowych mających styczność z wentylatorami strumieniowymi, w celu ustalenia klasy temperaturowej dla wentylatorów strumieniowych; analizowana wartość 400 °C – po zastosowaniu współczynnika niepewności 343 °C.
- e) temperatura gazów pożarowych wyciąganych przez wentylatory oddymiające.

Dane wyjściowe zostały odczytane poprzez wizualizację w programie SmokeView, a także wcześniej zdefiniowane punkty pomiarowe.

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.

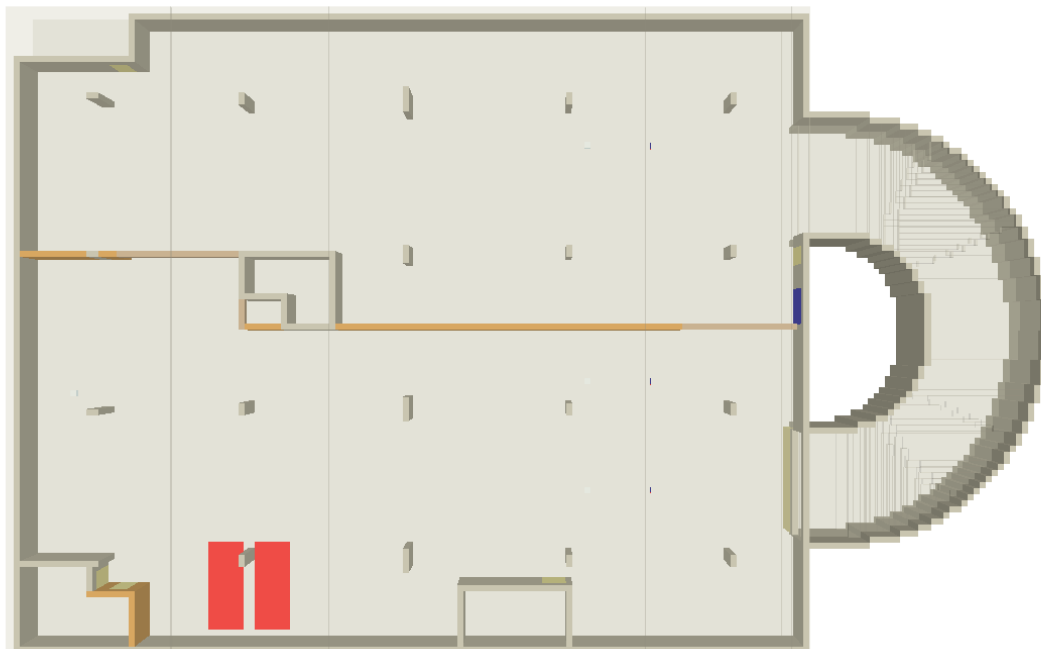
## 5.5. ZAŁOŻENIA DLA WENTYLATORÓW STRUMIENIOWYCH

Dla wszystkich przypadków założono, że wentylatory strumieniowe ulegają uszkodzeniu po przekroczeniu temperatury 400 °C, co w symulacji jest realizowane przez punkt pomiarowy zlokalizowany przy wentylatorze i powodujący jego eliminację przy temperaturze 343 °C, co uwzględnia niepewność modelu (rozd. 5.2).

## 5.6. ANALIZOWANE SCENARIUSZE POŻAROWE

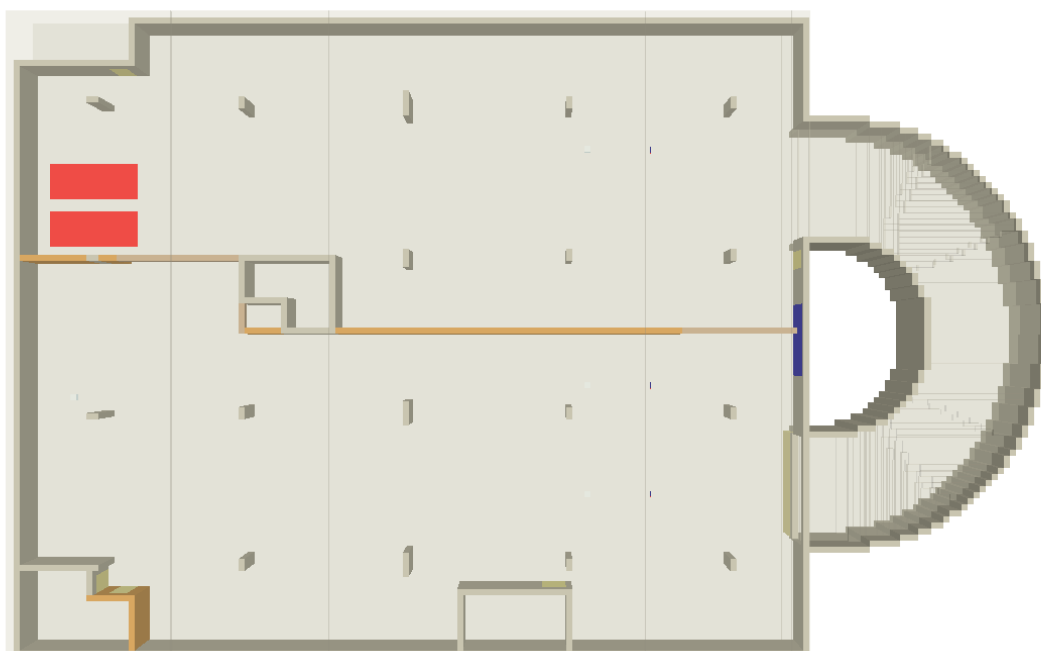
W analizowanym obiekcie wykonano 8 symulacji CFD. Wybrano miejsca względnie niekorzystne ze względu na bezpieczeństwo ewakuacji i ekip ratowniczych:

Scenariusz nr 1 – poziom -1



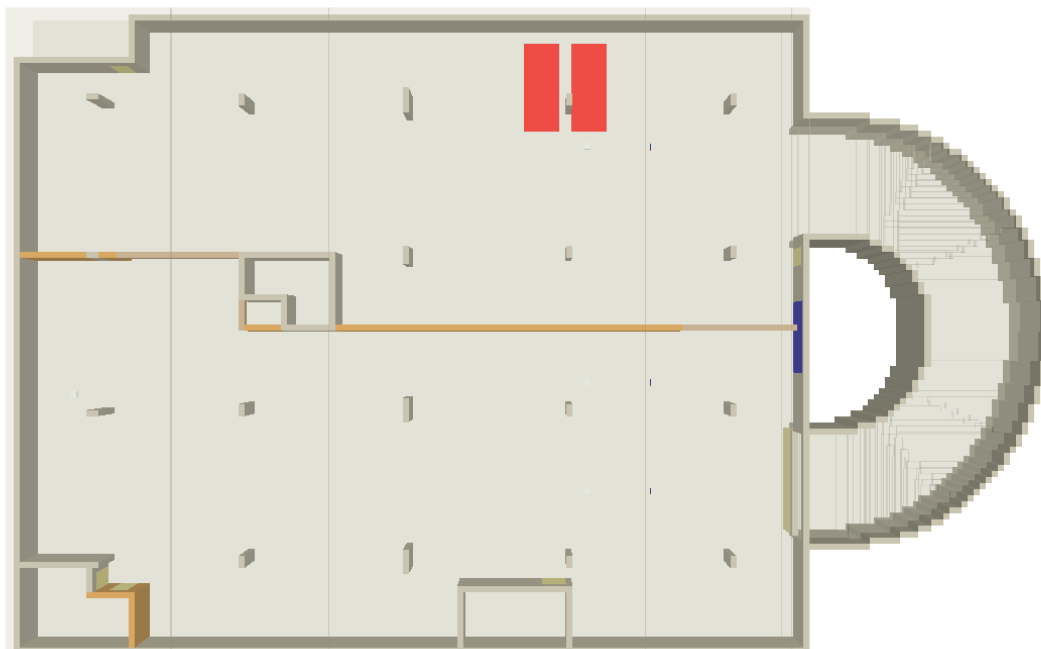
Time: 10.0

Scenariusz nr 2 – poziom -1



Time: 10.0

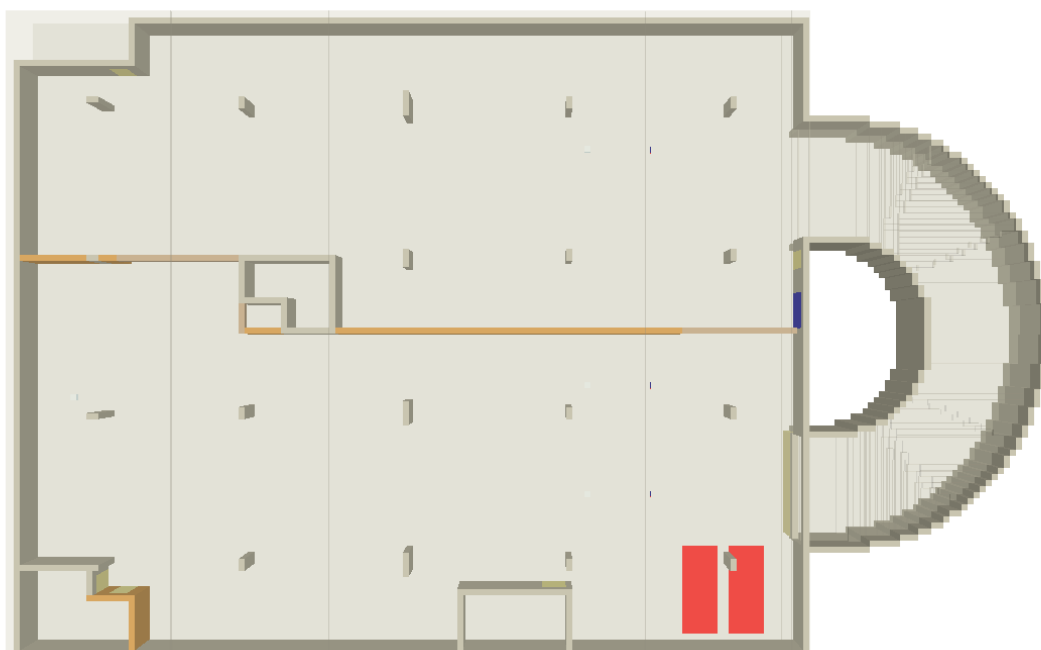
Scenariusz nr 3 – poziom -1



Time: 10.0



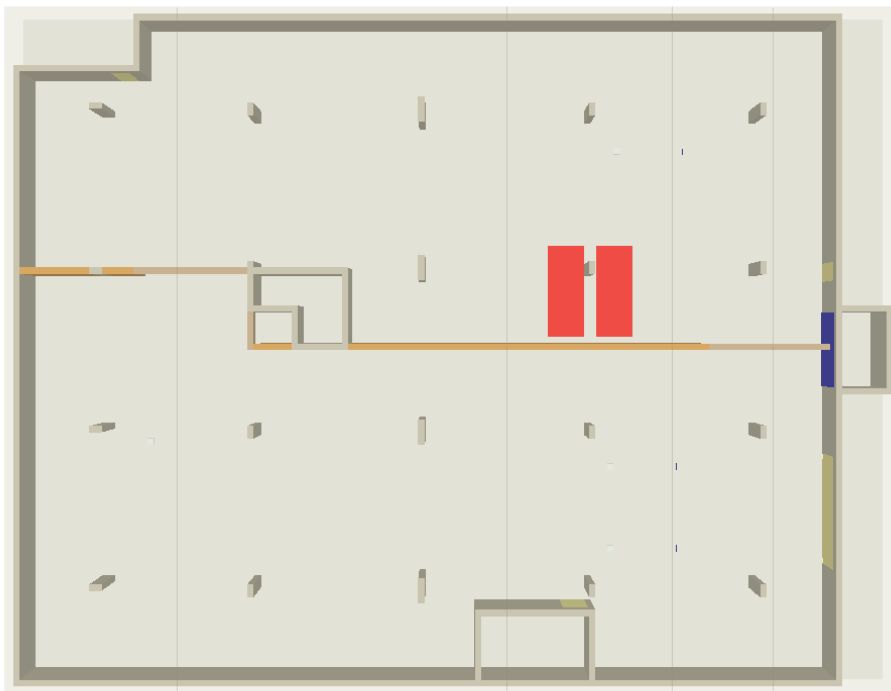
Scenariusz nr 4 – poziom -1



Time: 10.0



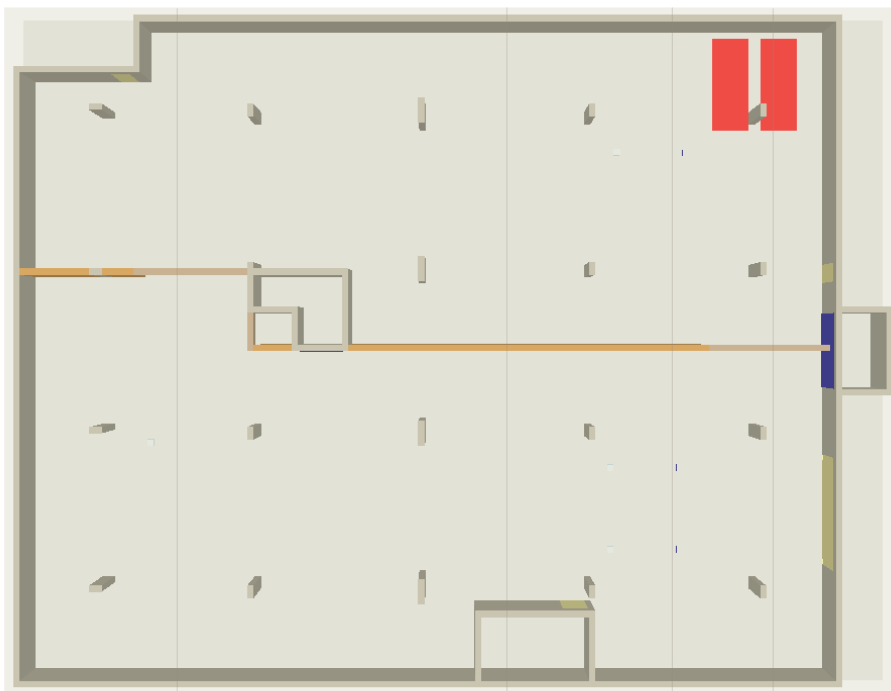
Scenariusz nr 5 – poziom -2



Time: 10.0



Scenariusz nr 6 – poziom -2

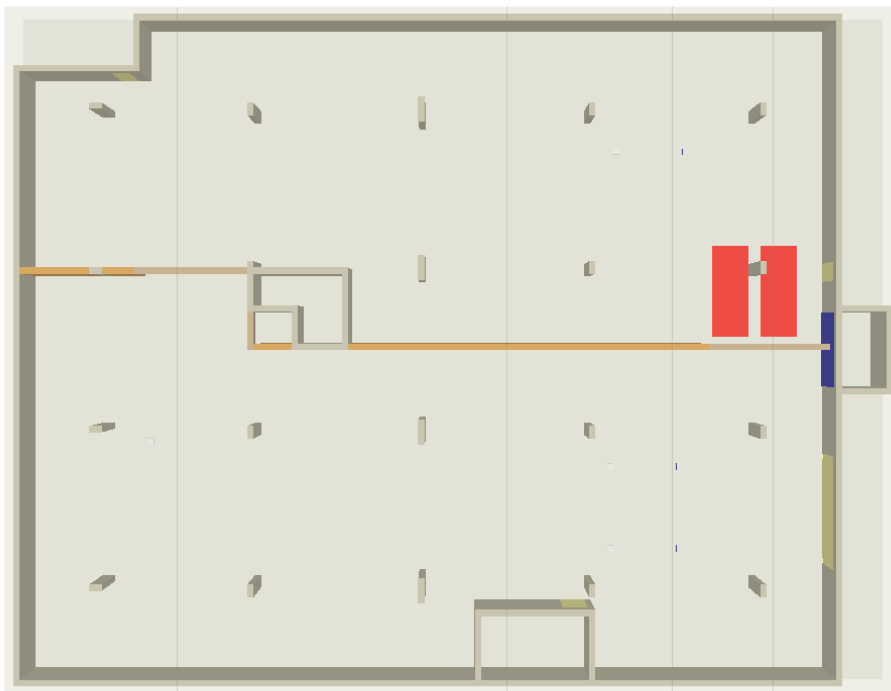


Time: 10.0





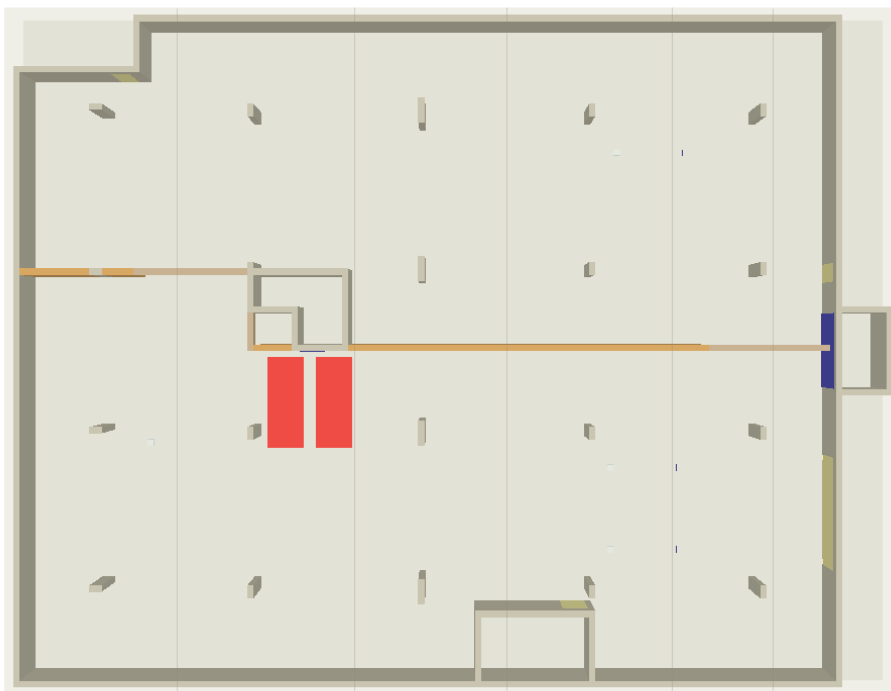
Scenariusz nr 7 – poziom -2



Time: 10.0



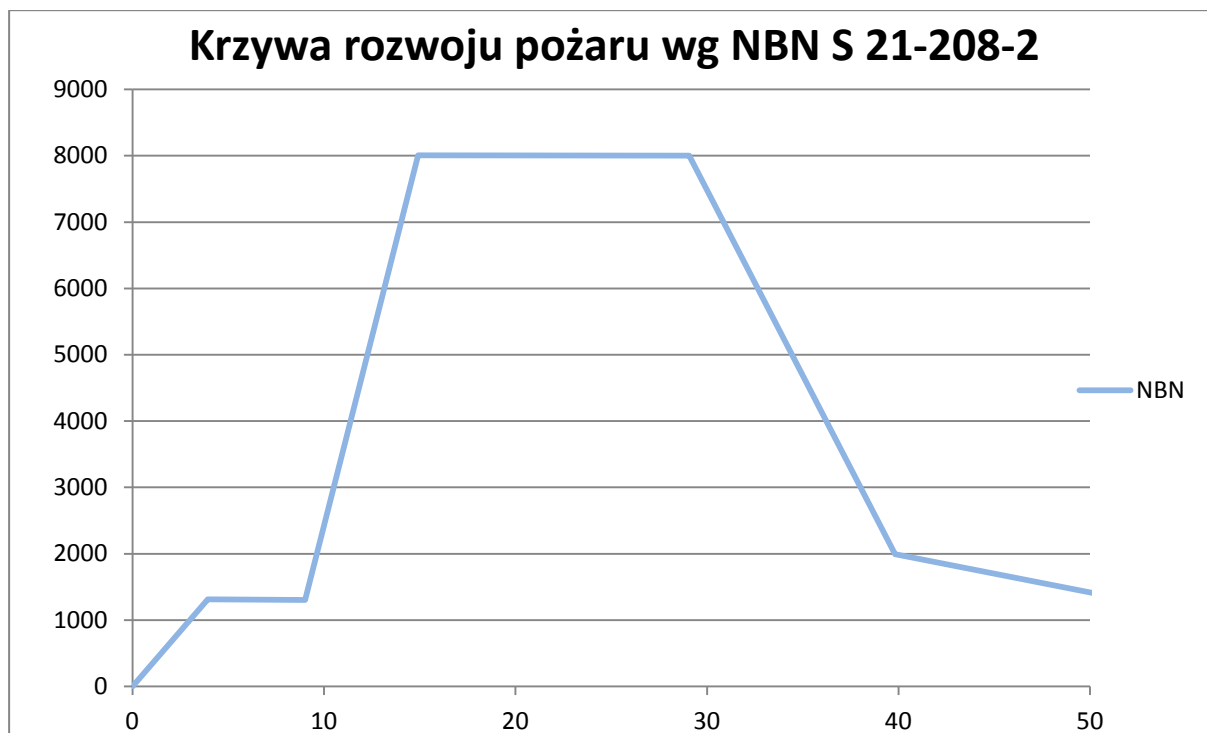
Scenariusz nr 8 – poziom -2



Time: 10.0



Dla wszystkich przypadków założono pożar dwóch samochodów, zgodnie z normą belgijską [7]. Pożar uzyskuje moc ok. 8000 kW po czasie 15 minut. Założoną krzywą mocy pożaru przedstawia poniższy wykres.



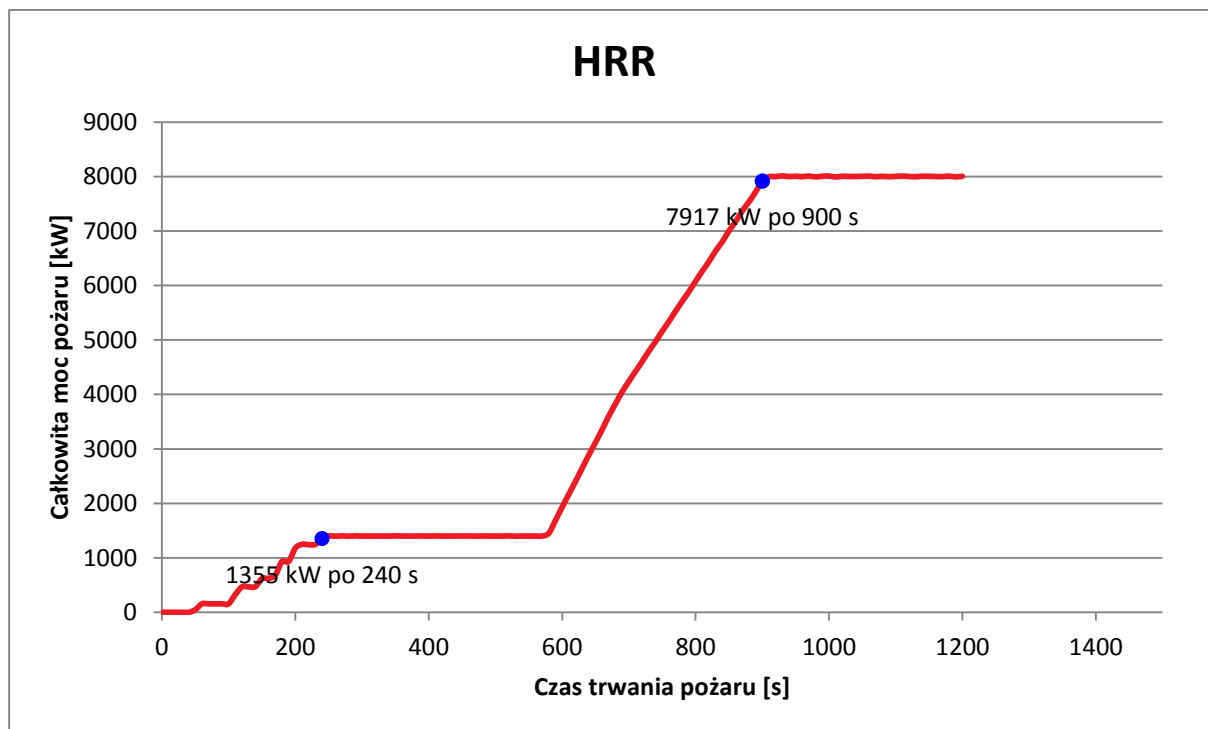
W przypadku wszystkich scenariuszy przeanalizowane zostały warunki ewakuacji z garażu oraz warunki pożarowe panujące po 900 sekundach, czyli po czasie dotarcia ekip ratowniczo-gaśniczych. Ponadto wyznaczono maksymalną temperaturę oddziałującą na wentylatory strumieniowe.

## 6. WYNIKI SYMULACJI CFD

### 6.1. SPRAWDZENIE WARUNKÓW EWAKUACJI ORAZ BEZPIECZEŃSTWA EKIP RATOWNICZYCH

#### 6.1.1. KRZYWA MOCY POŻARU

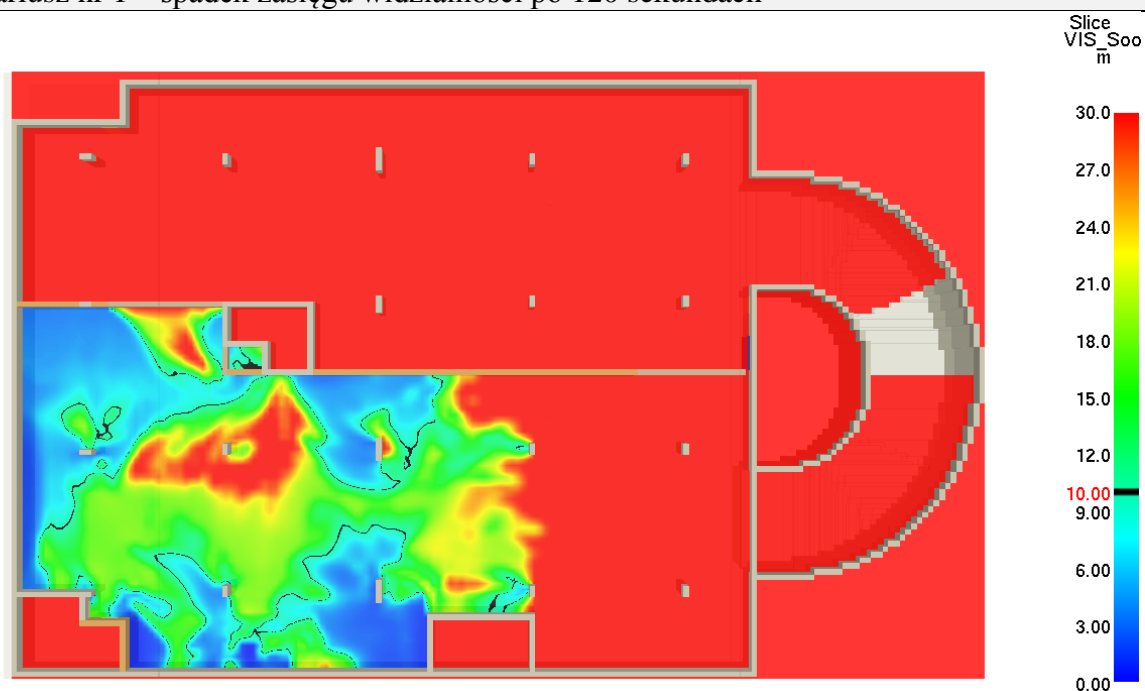
Poniżej przedstawiona została krzywa rozwoju pożaru, która została wygenerowana przez program FDS. Do czasu ewakuacji wszystkich osób z garażu pożar uzyskuje moc ok. 1355 kW. Po 900 sekundach pożar rozwija się do ok. 7920 kW.



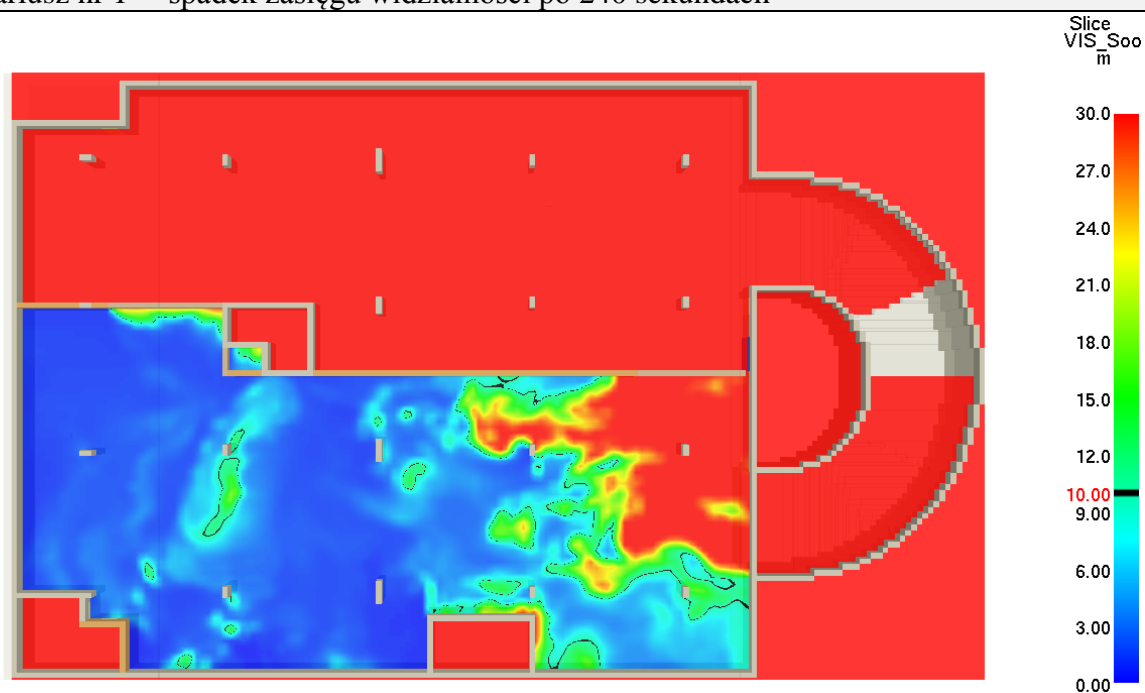
Otrzymana krzywa jest zgodna z krzywą założoną.

### 6.1.2. ZASIĘG WIDZIALNOŚCI NA WYSOKOŚCI 1.8 M W CZASIE EWAKUACJI

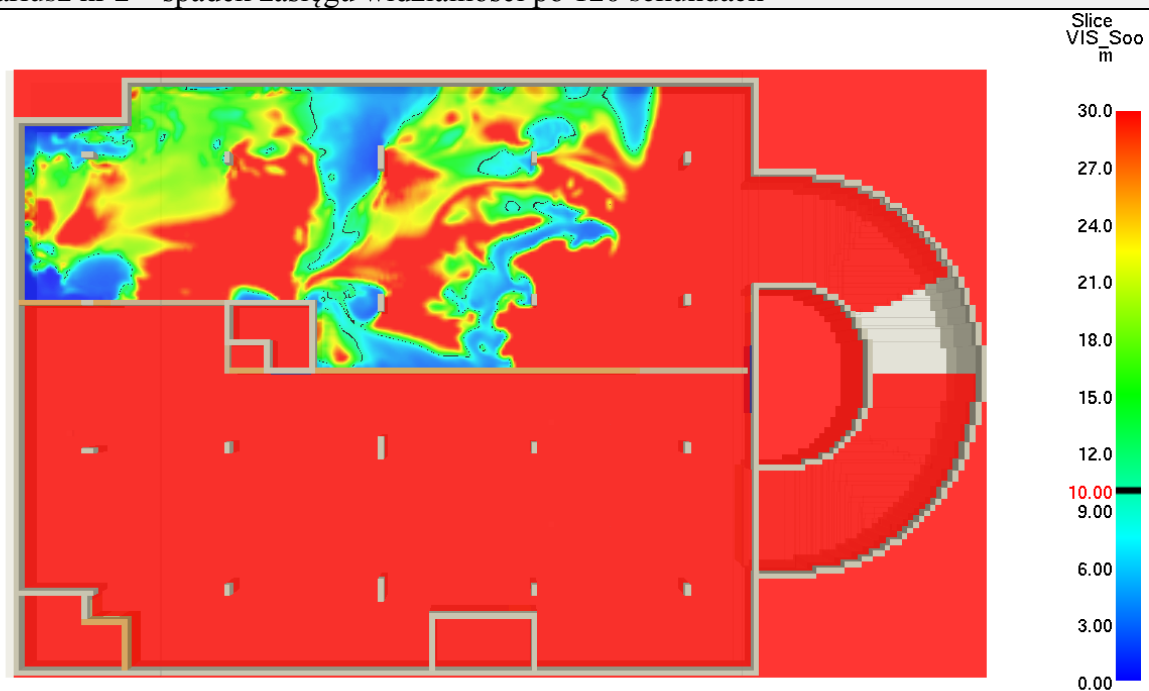
Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach



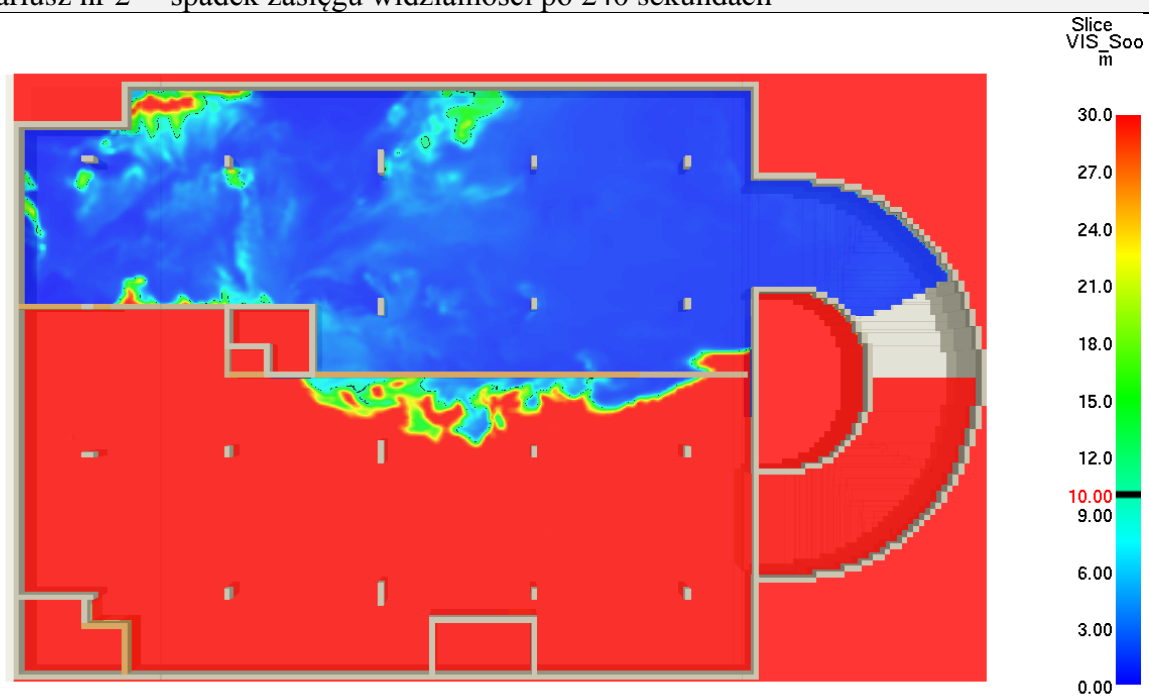
Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach



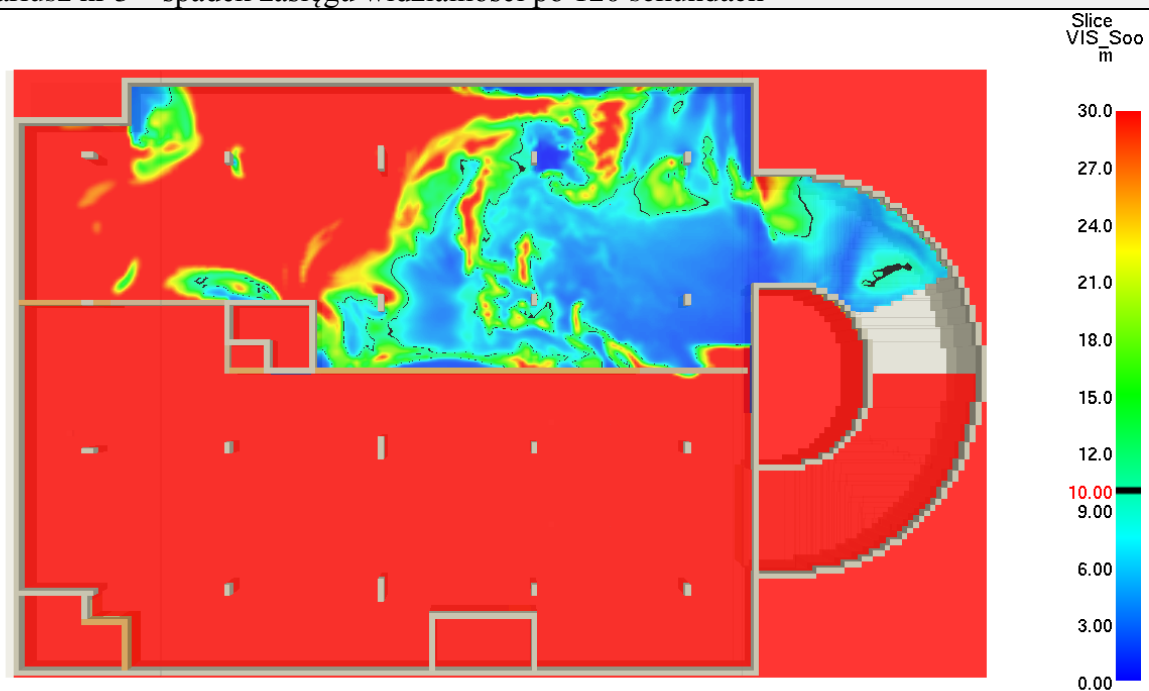
Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach



Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach

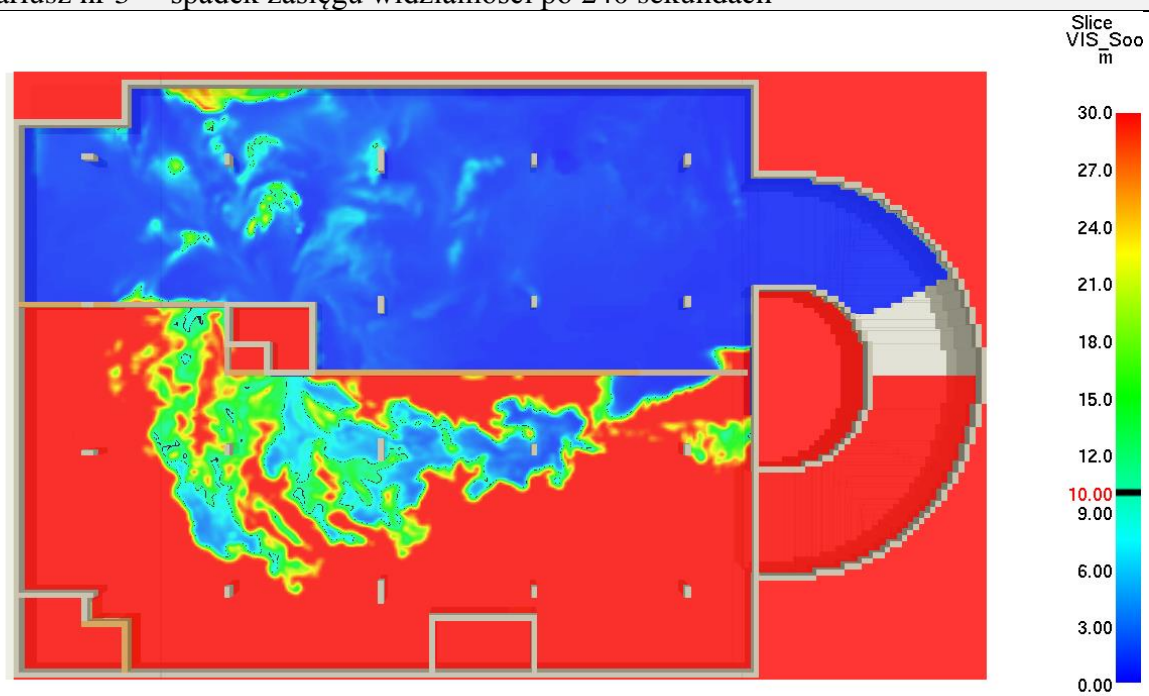


Scenariusz nr 3 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach



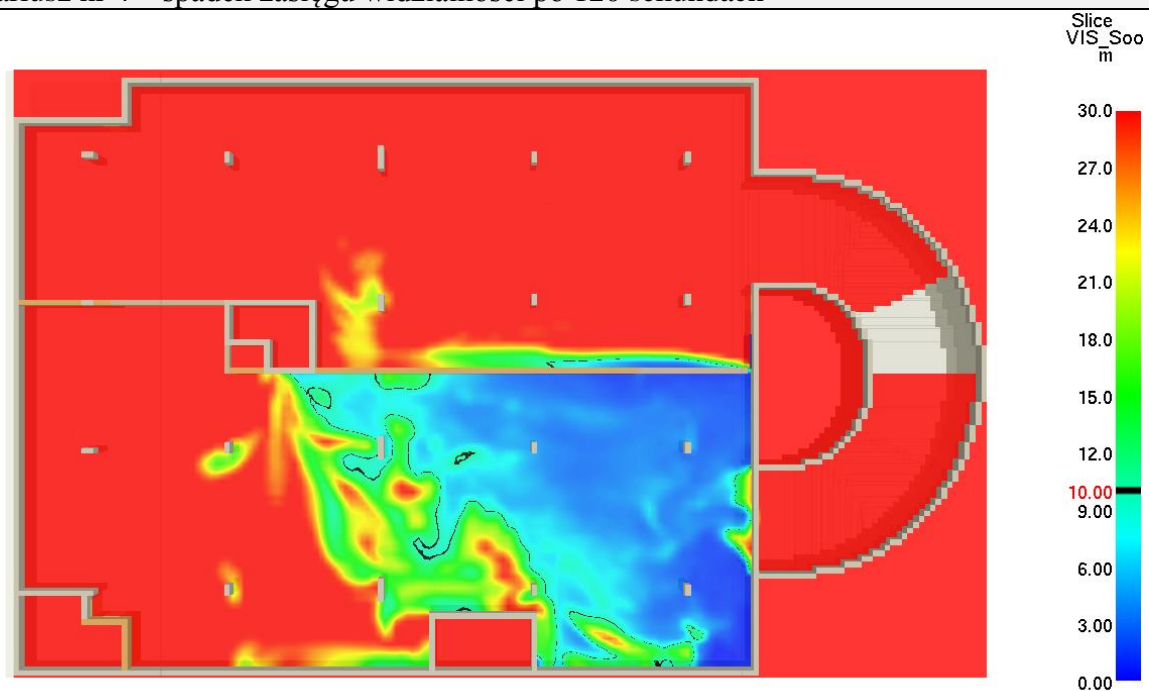
Time: 120.0

Scenariusz nr 3 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach



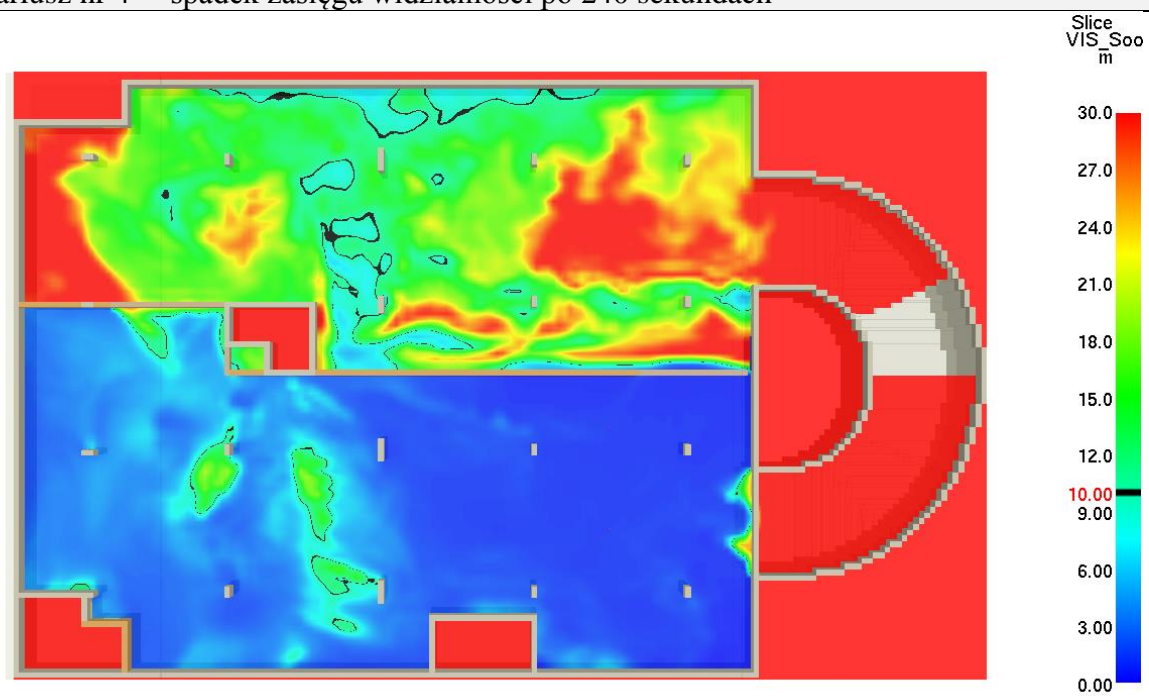
Time: 240.0

Scenariusz nr 4 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach



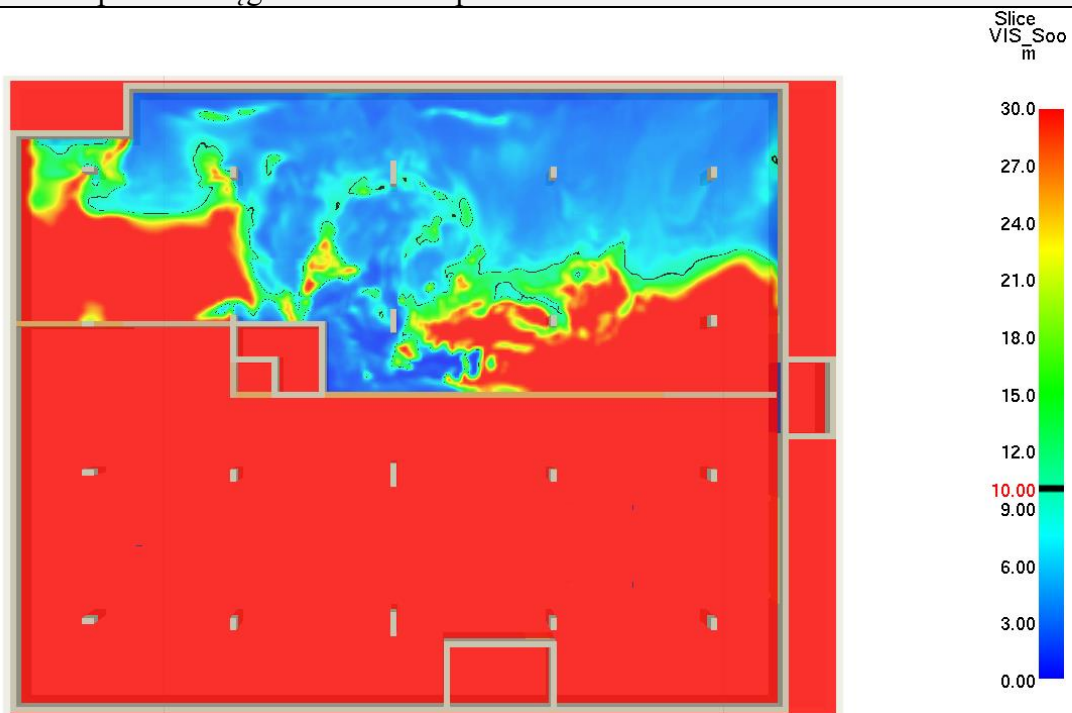
Time: 120.0

Scenariusz nr 4 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach

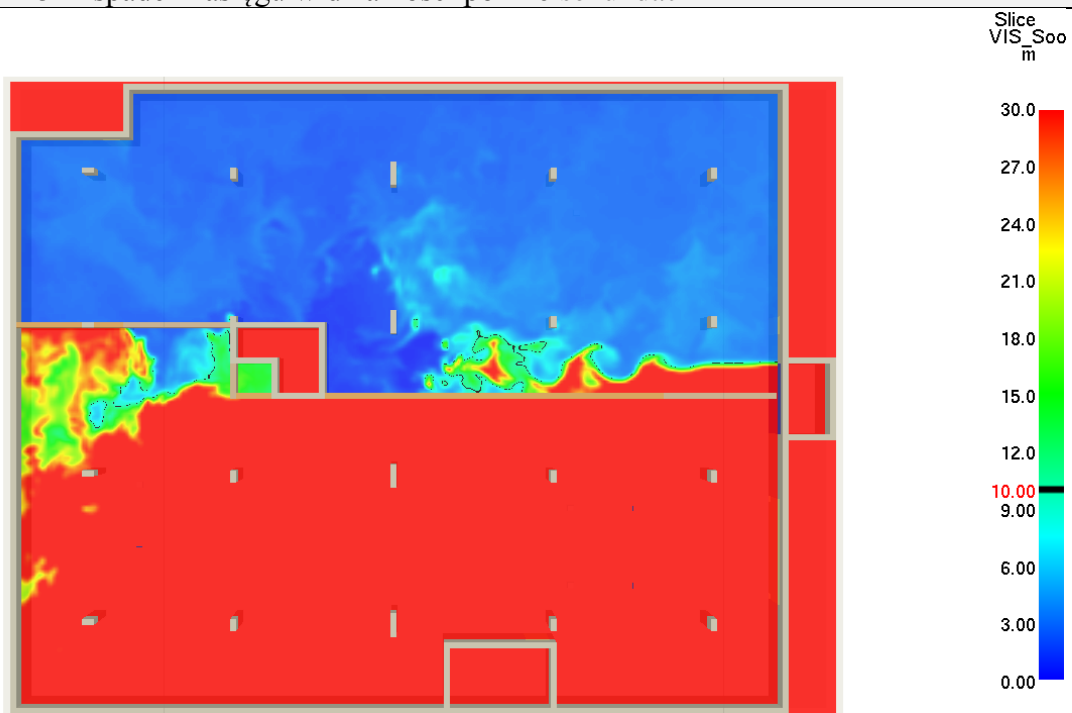


Time: 240.0

Scenariusz nr 5 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach

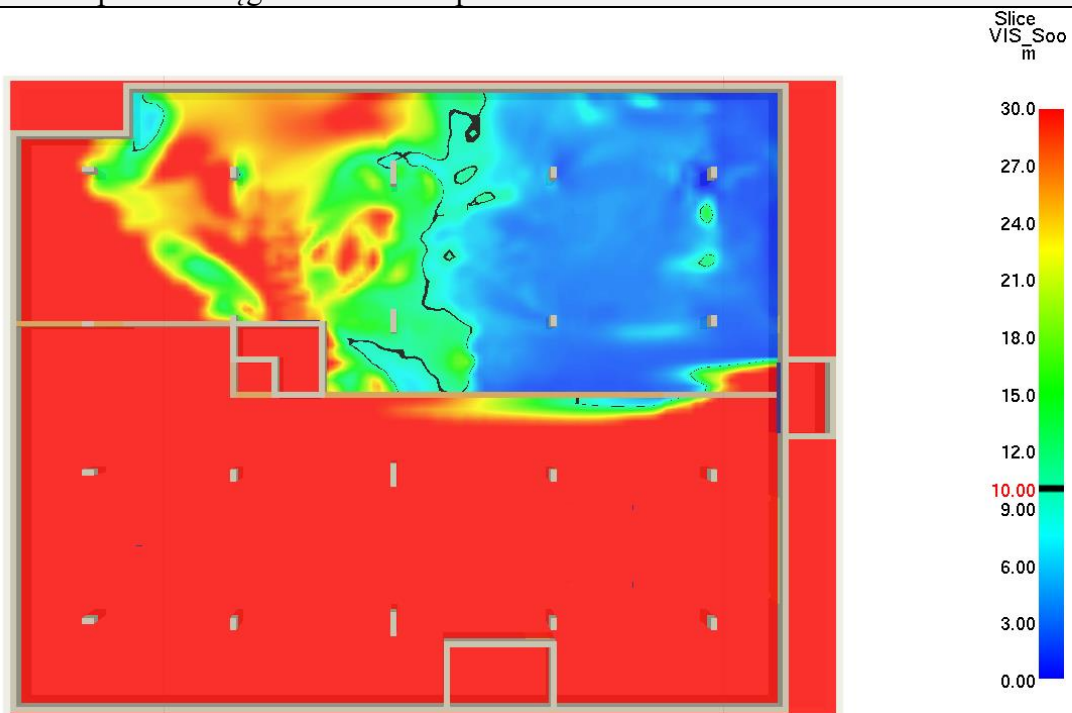


Scenariusz nr 5 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach

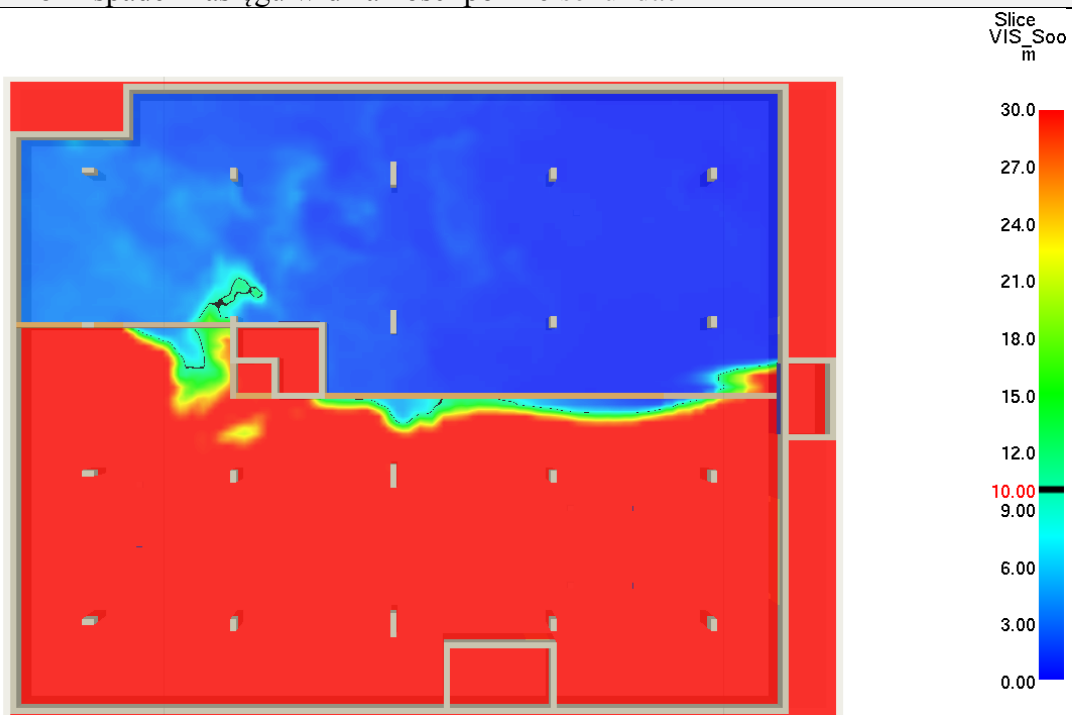




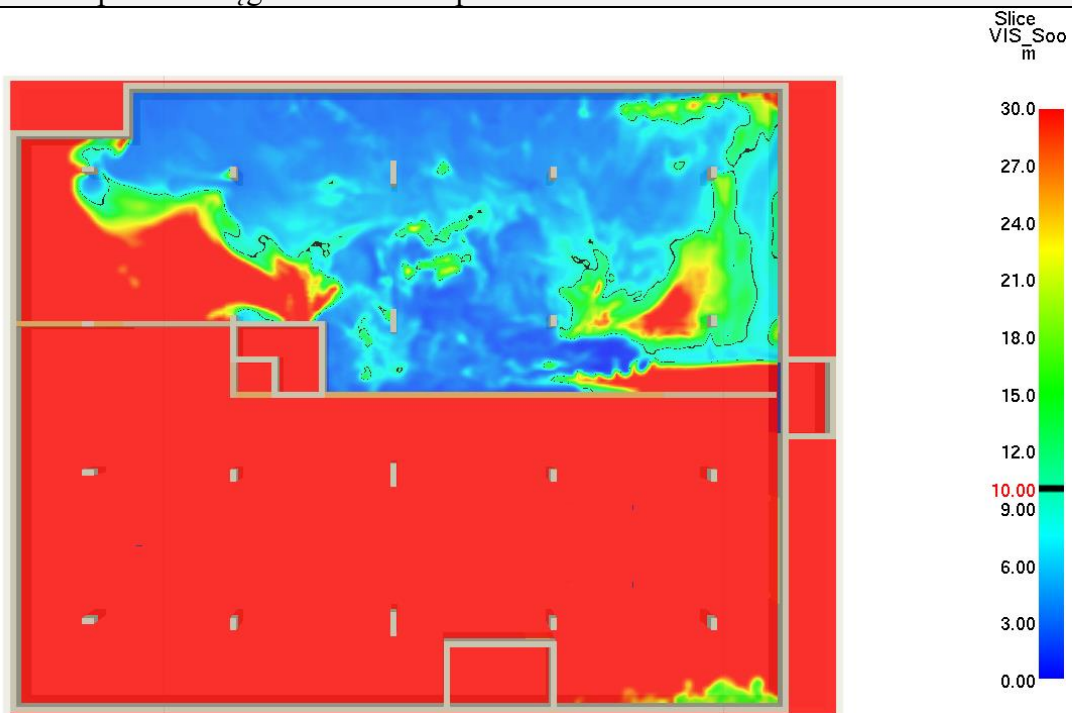
Scenariusz nr 6 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach



Scenariusz nr 6 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach

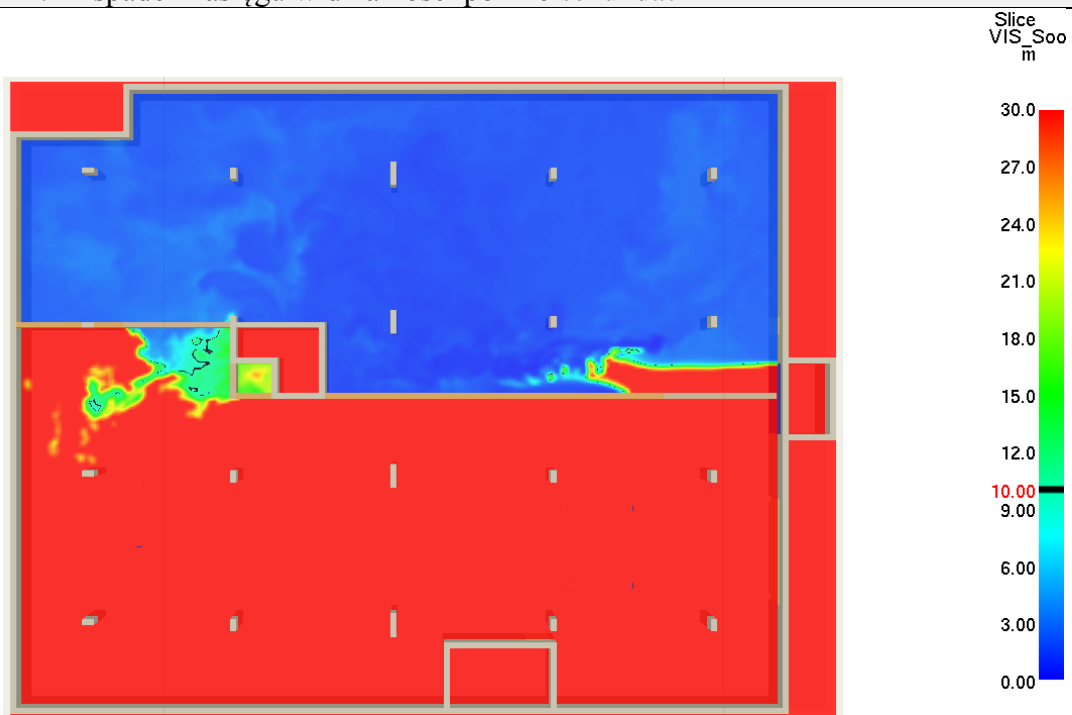


Scenariusz nr 7 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach



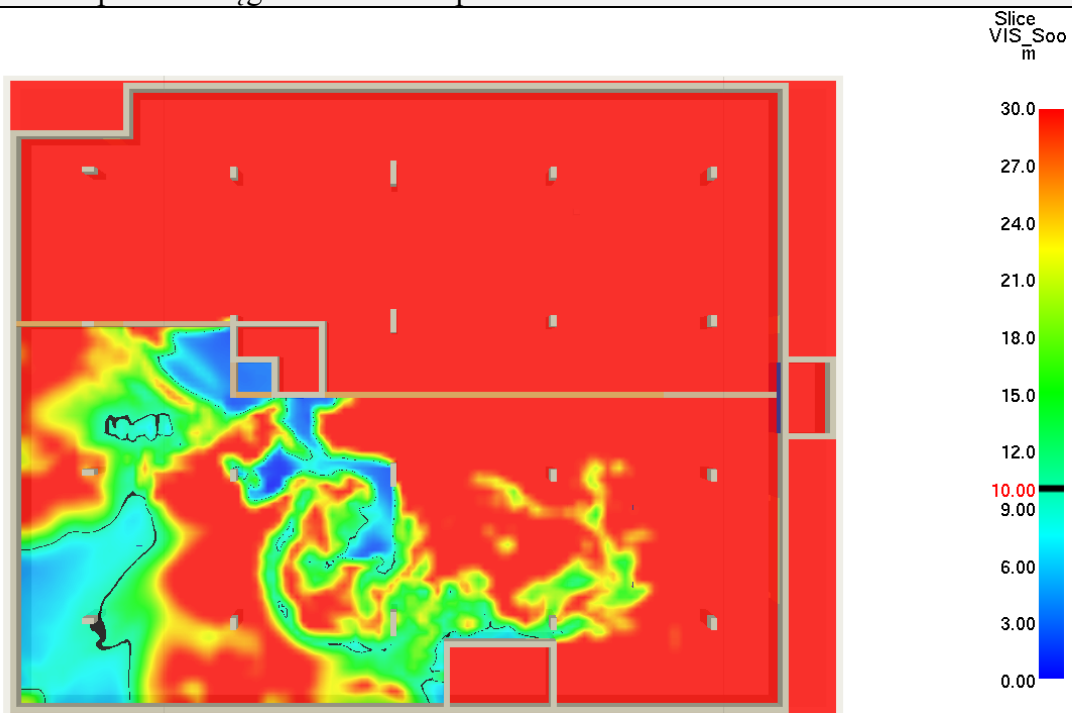
Time: 120.0

Scenariusz nr 7 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach



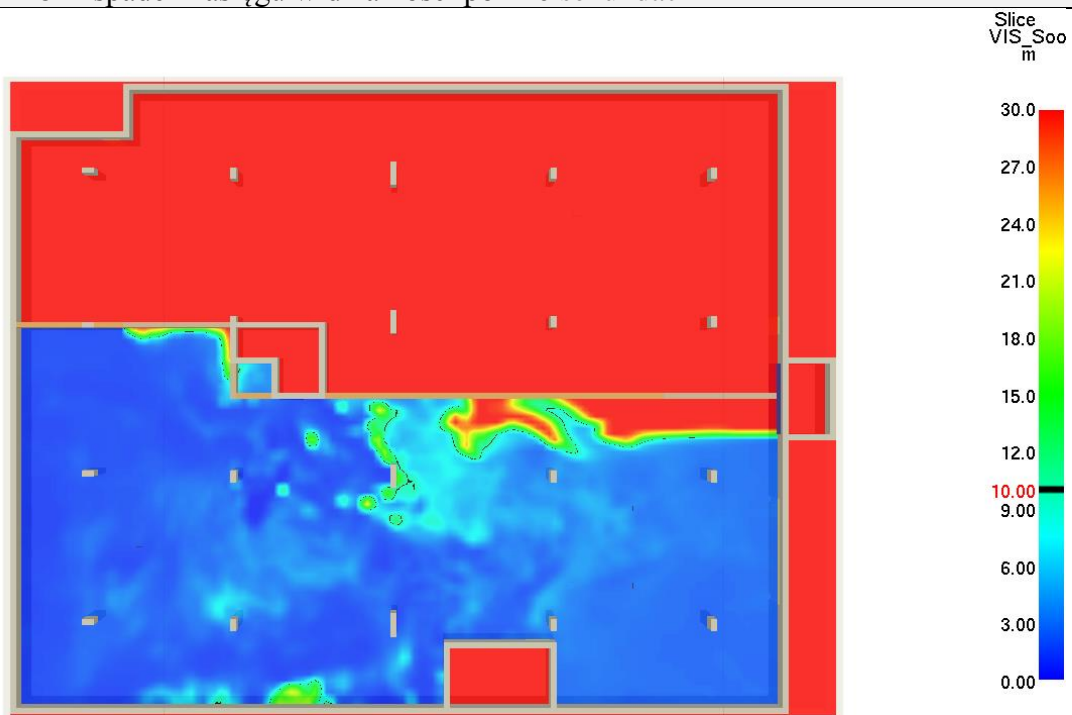
Time: 240.0

Scenariusz nr 8 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach



Time: 120.0

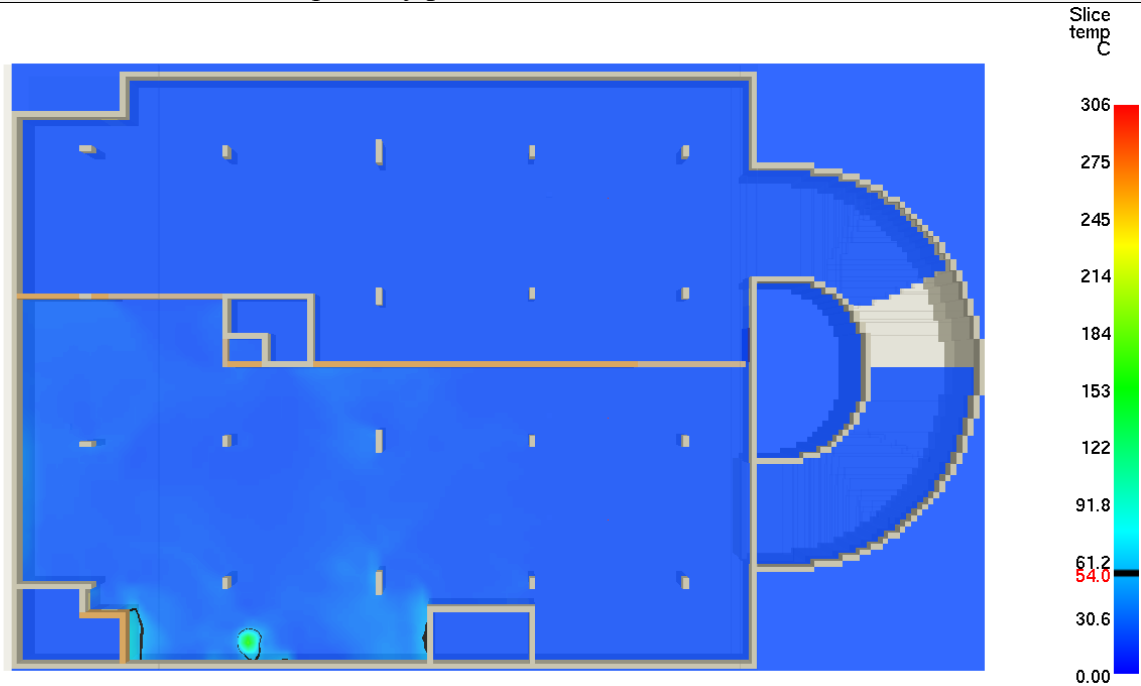
Scenariusz nr 8 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach



Time: 240.0

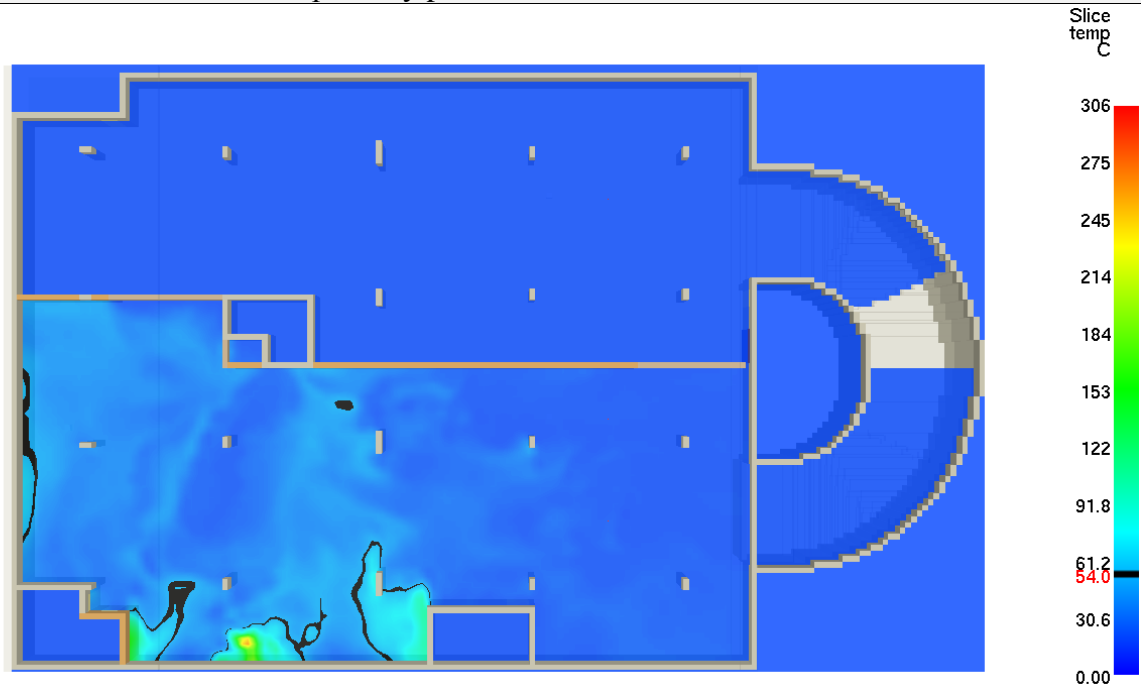
### 6.1.3. TEMPERATURA NA WYSOKOŚCI 1.8 M W CZASIE EWAKUACJI

Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 120 sekundach



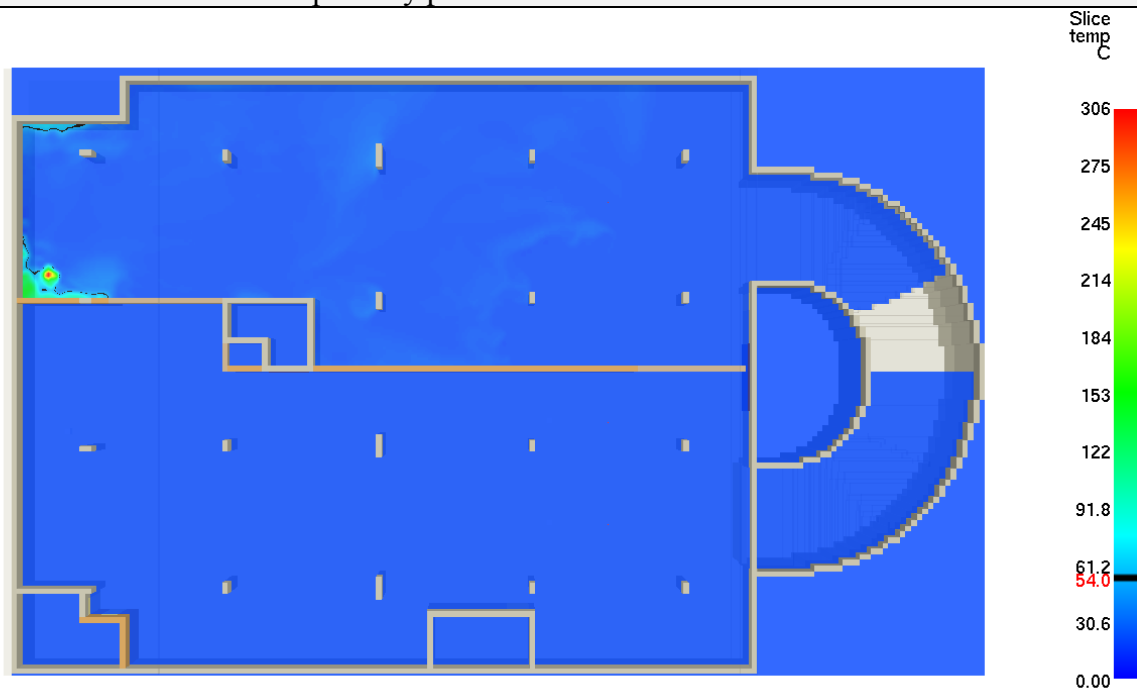
Time: 120.0

Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 240 sekundach

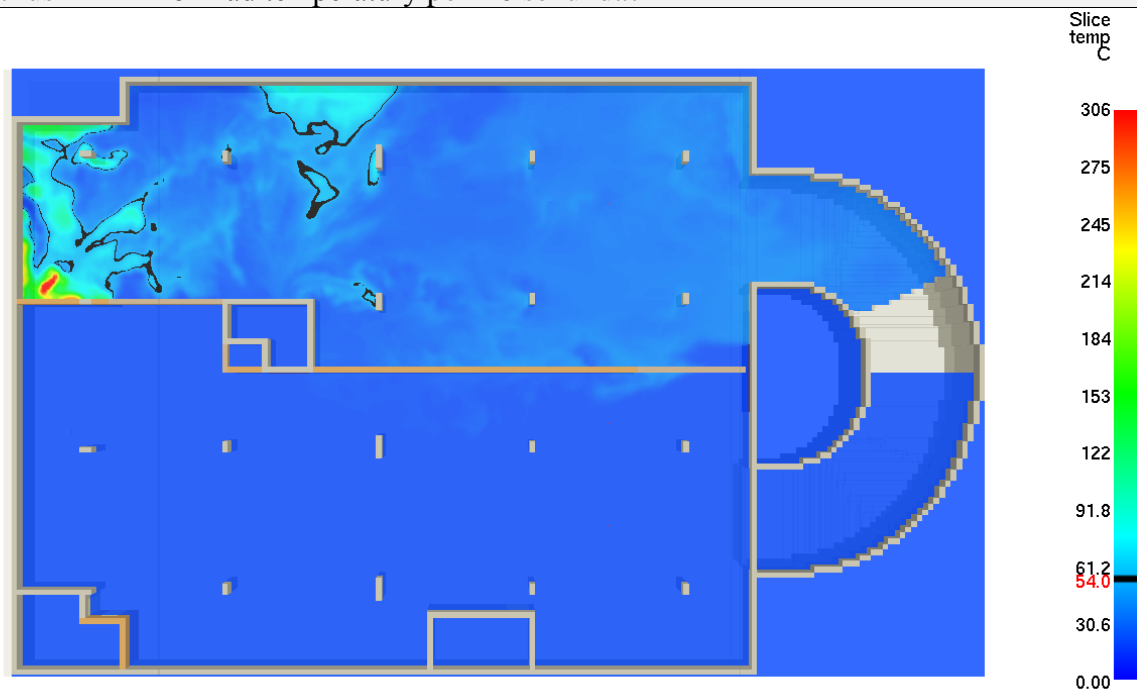


Time: 240.0

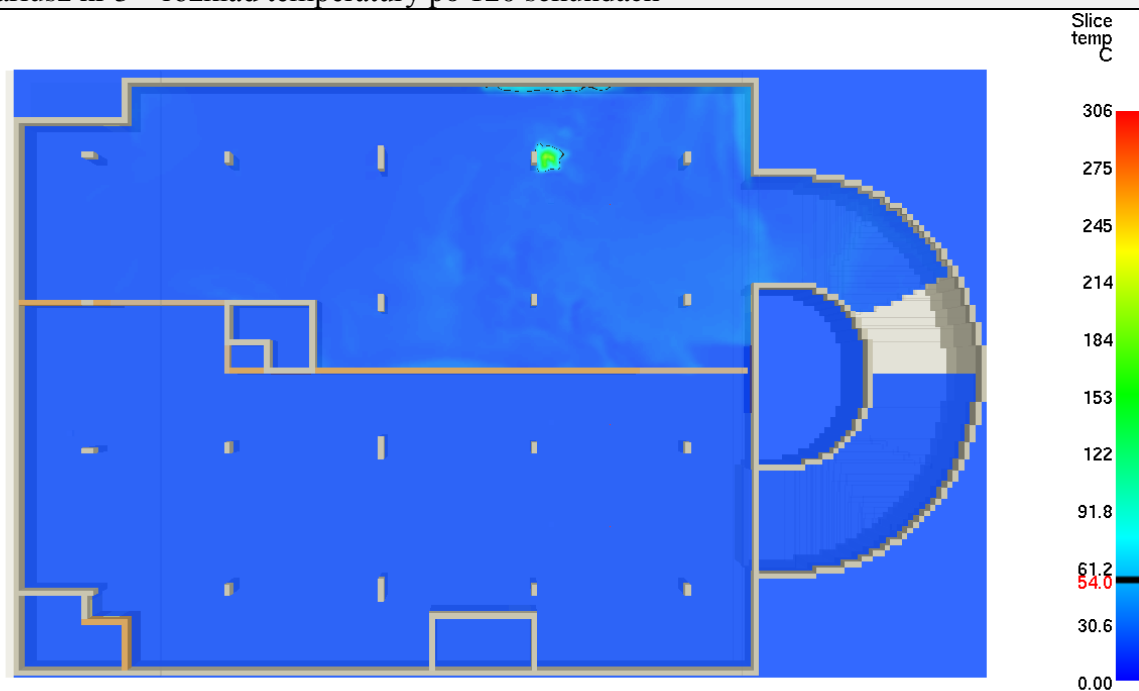
Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 120 sekundach



Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 240 sekundach

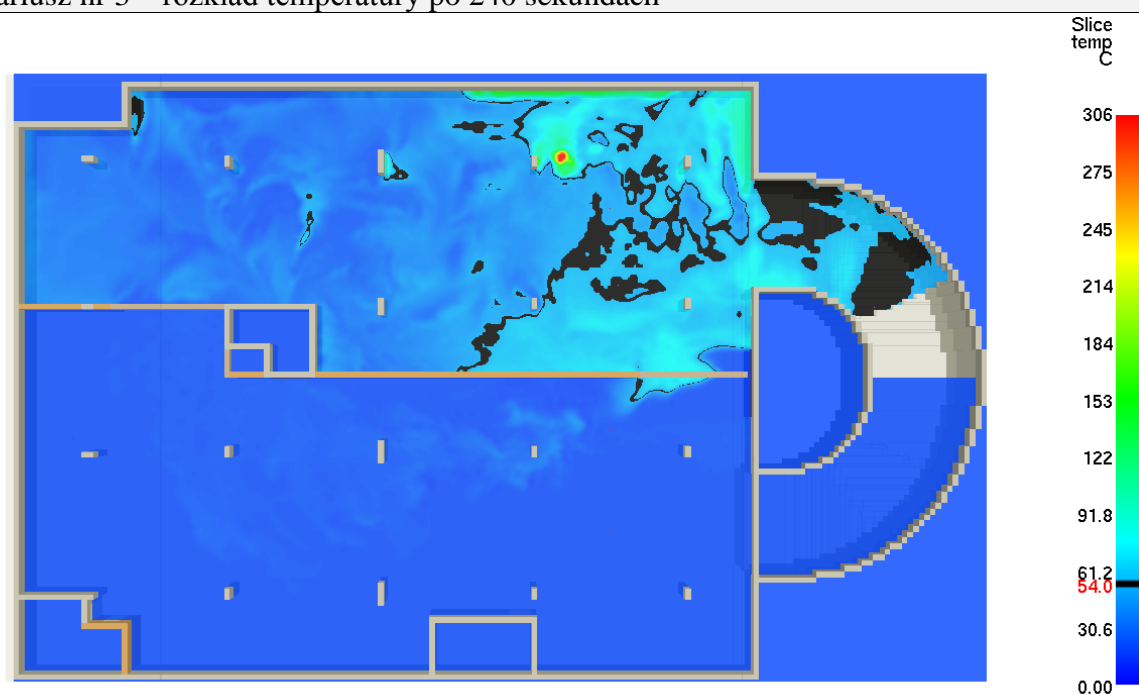


Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 120 sekundach



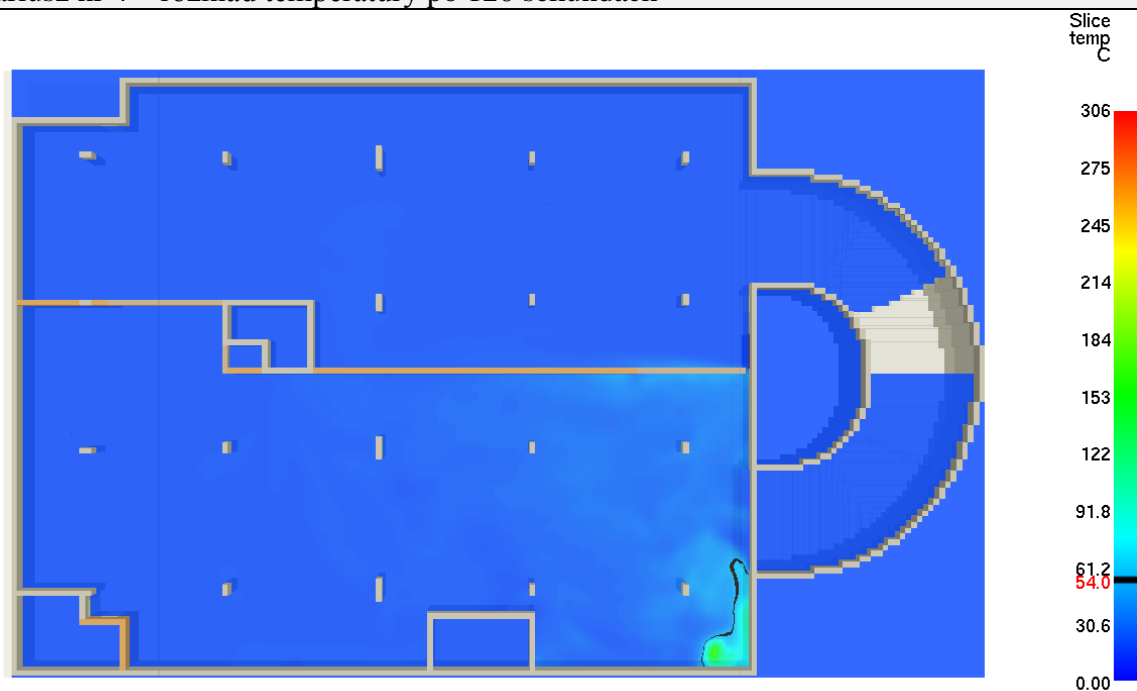
Time: 120.0

Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 240 sekundach



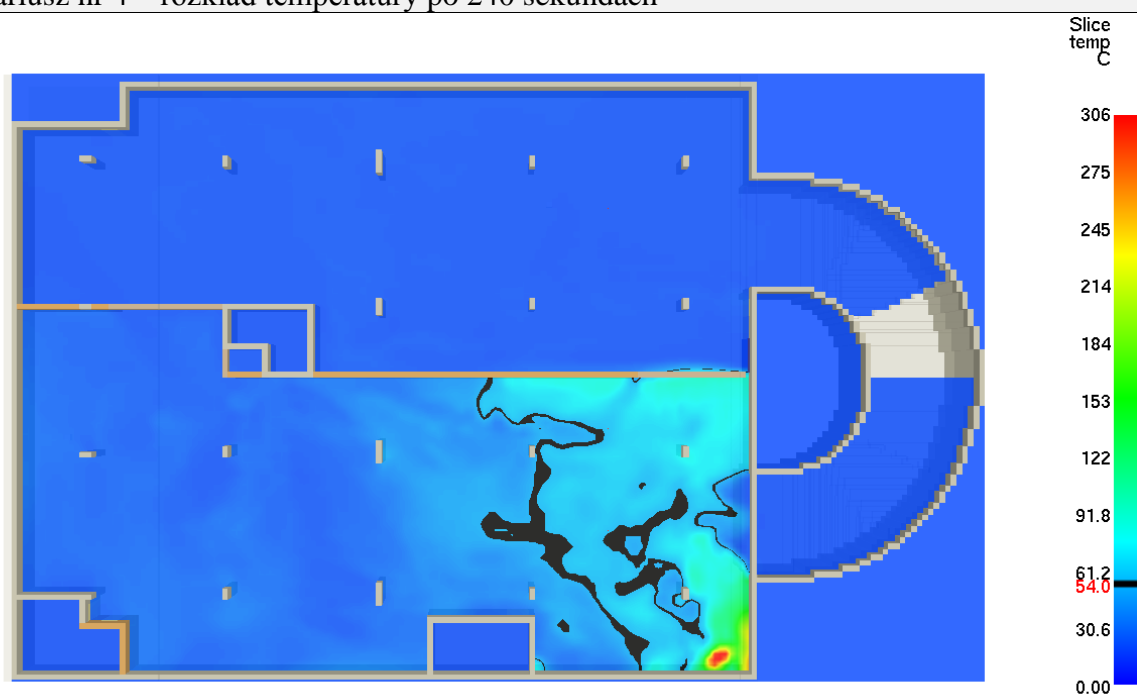
Time: 240.0

Scenariusz nr 4 – rozkład temperatury po 120 sekundach



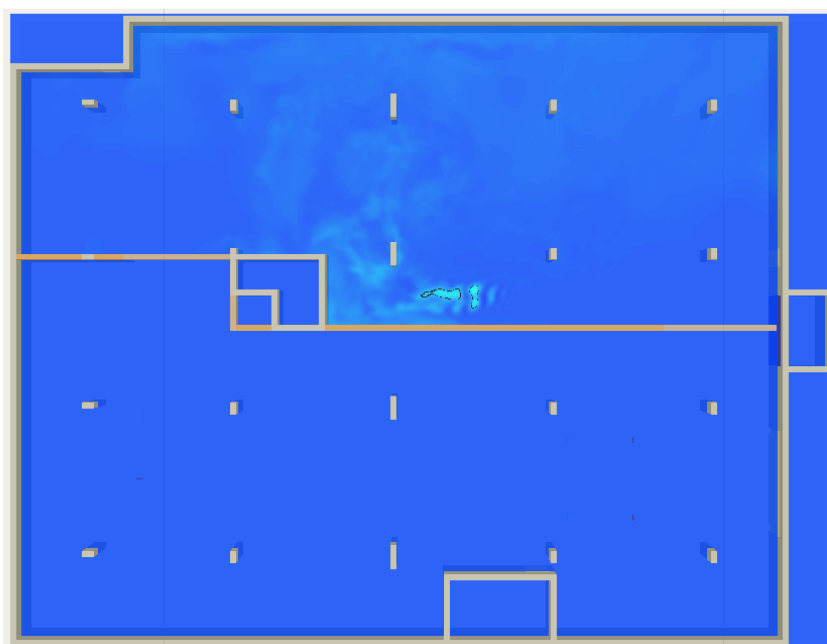
Time: 120.0

Scenariusz nr 4 – rozkład temperatury po 240 sekundach



Time: 240.0

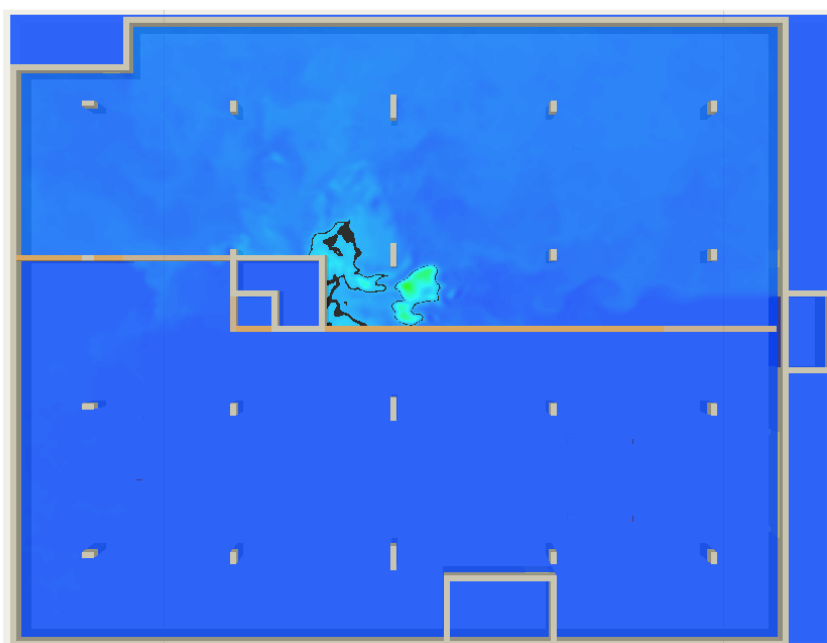
Scenariusz nr 5 – rozkład temperatury po 120 sekundach



Time: 120.0



Scenariusz nr 5 – rozkład temperatury po 240 sekundach

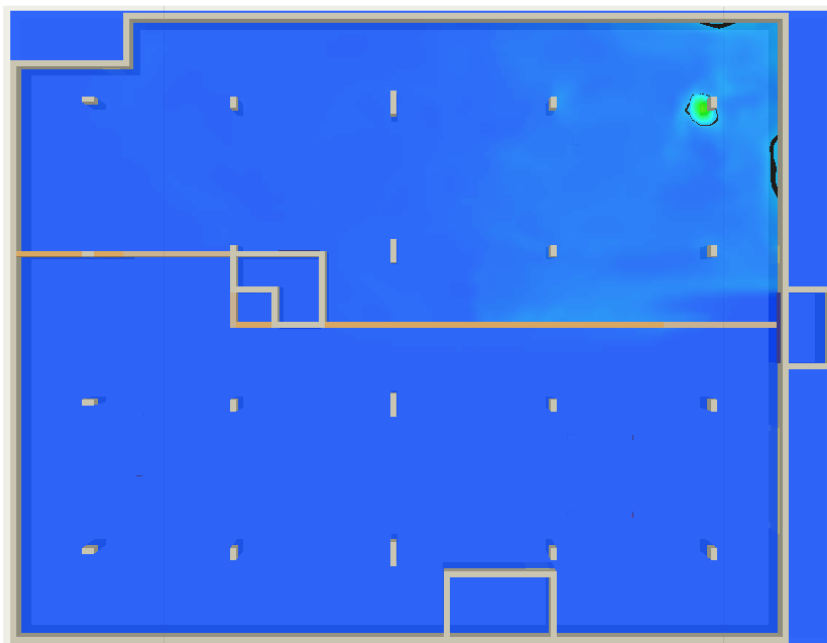


Time: 240.0





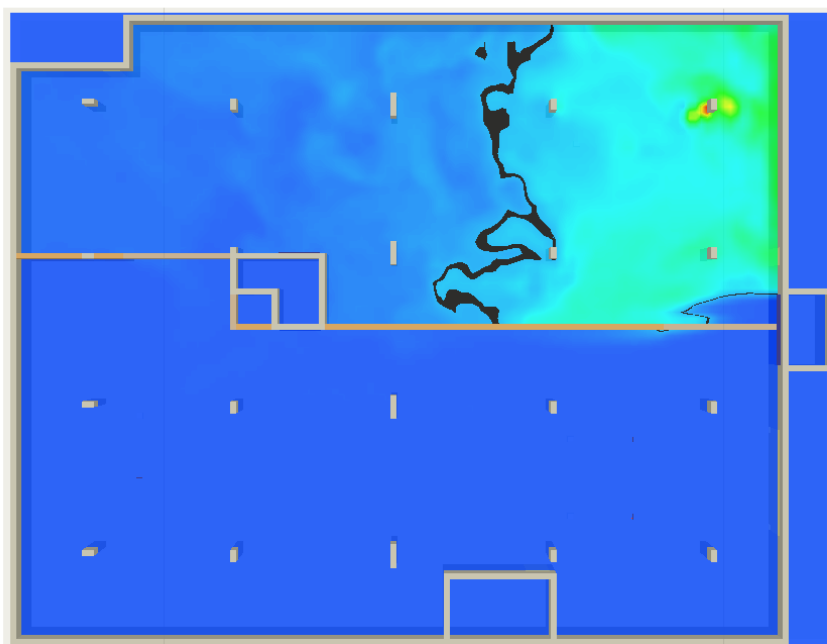
Scenariusz nr 6 – rozkład temperatury po 120 sekundach



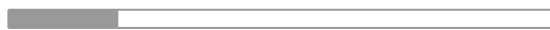
Time: 120.0



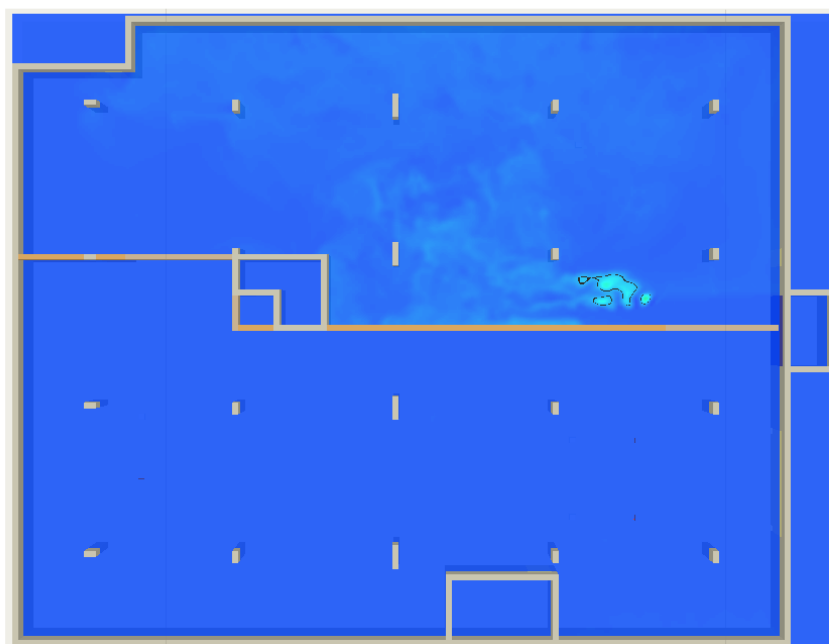
Scenariusz nr 6 – rozkład temperatury po 240 sekundach



Time: 240.0



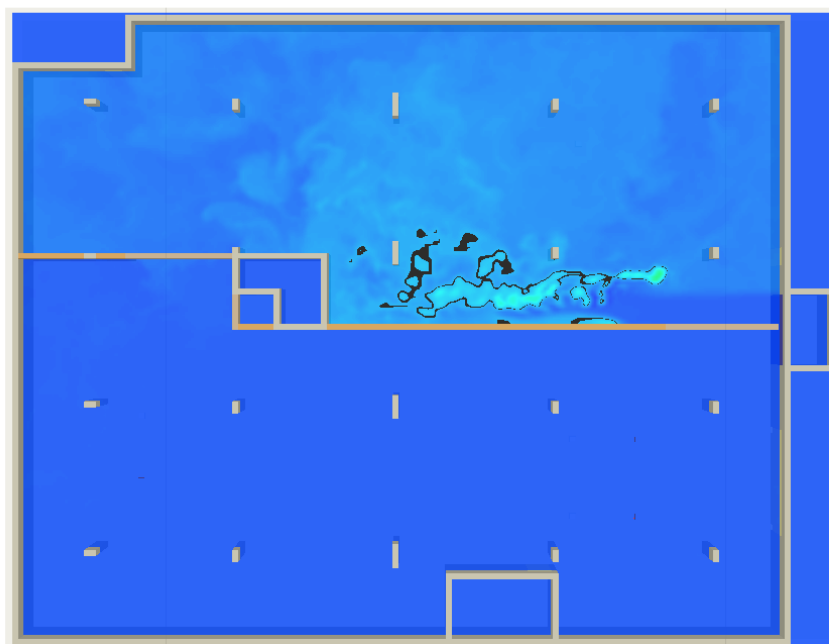
Scenariusz nr 7 – rozkład temperatury po 120 sekundach



Time: 120.0



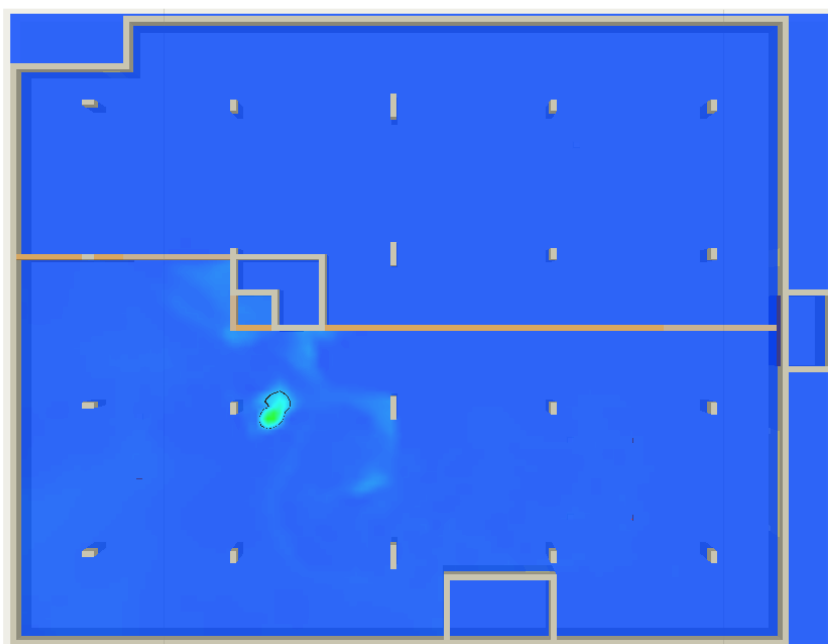
Scenariusz nr 7 – rozkład temperatury po 240 sekundach



Time: 240.0



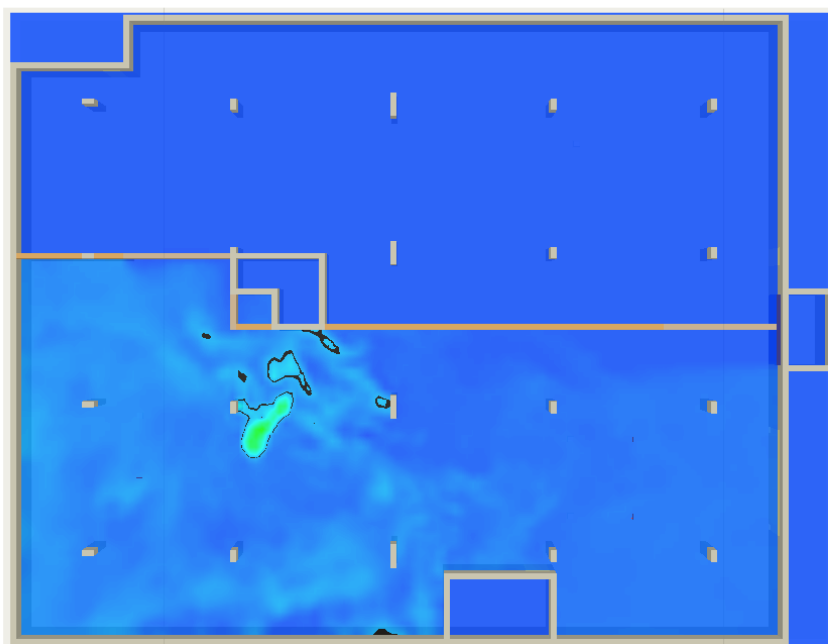
Scenariusz nr 8 – rozkład temperatury po 120 sekundach



Time: 120.0



Scenariusz nr 8 – rozkład temperatury po 240 sekundach

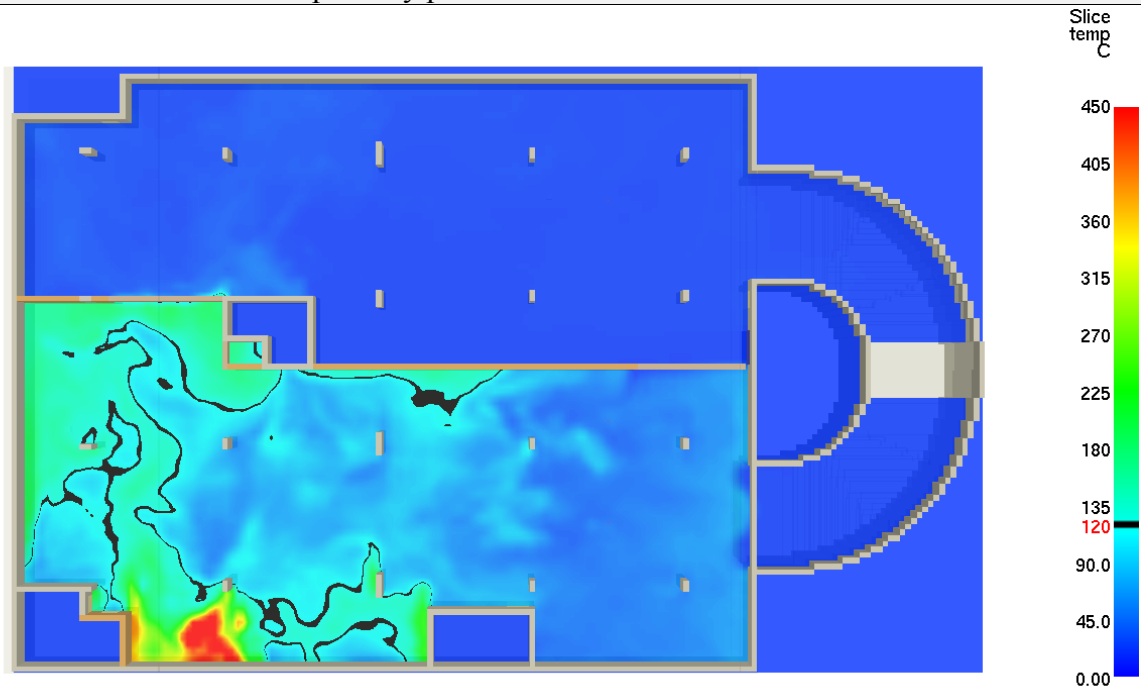


Time: 240.0



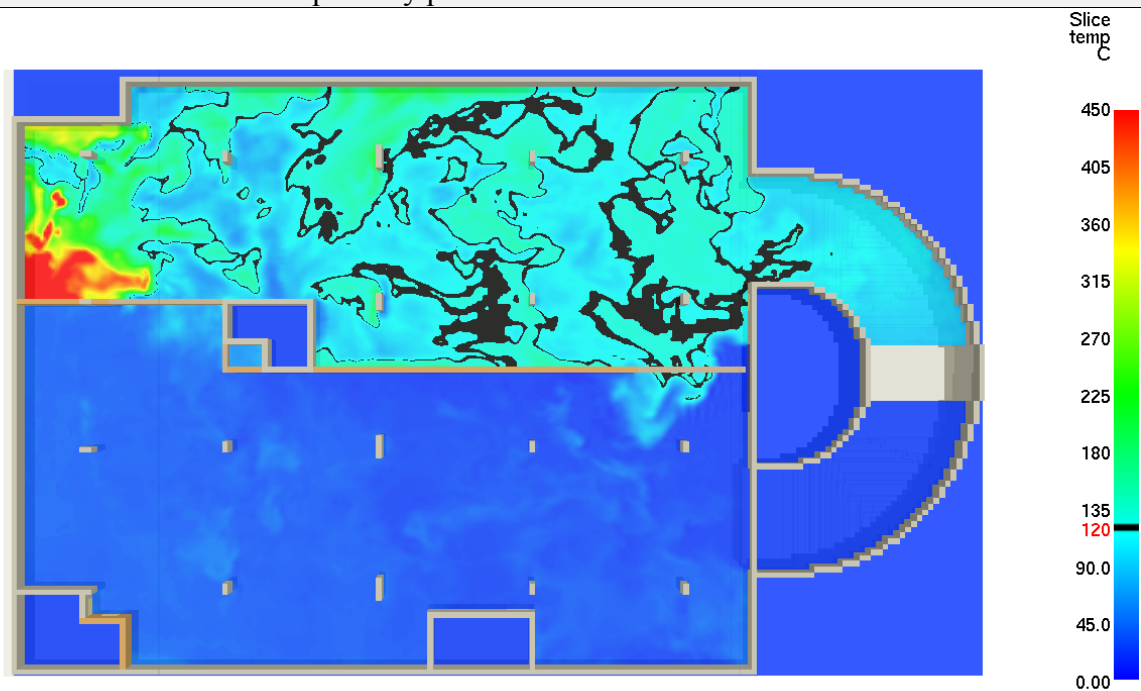
### 6.1.4. TEMPERATURA NA WYSOKOŚCI 1.5 M PO CZASIE INTERWENCJI EKIP RATOWNICZYCH

Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 900 sekundach



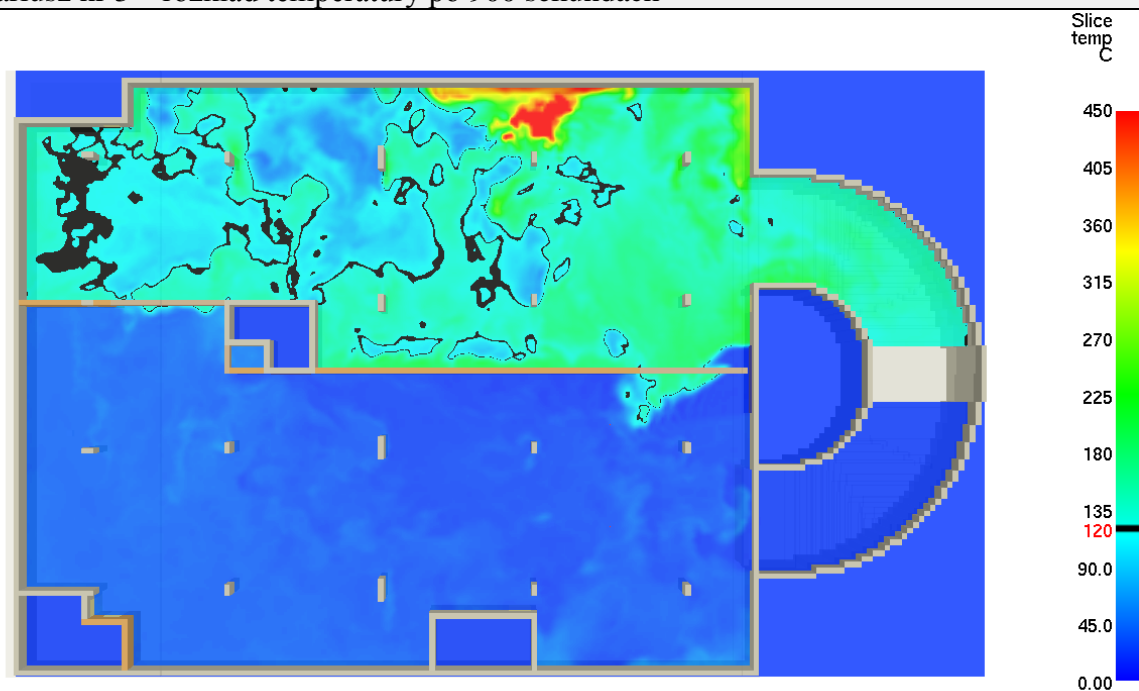
Time: 900.0

Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 900 sekundach



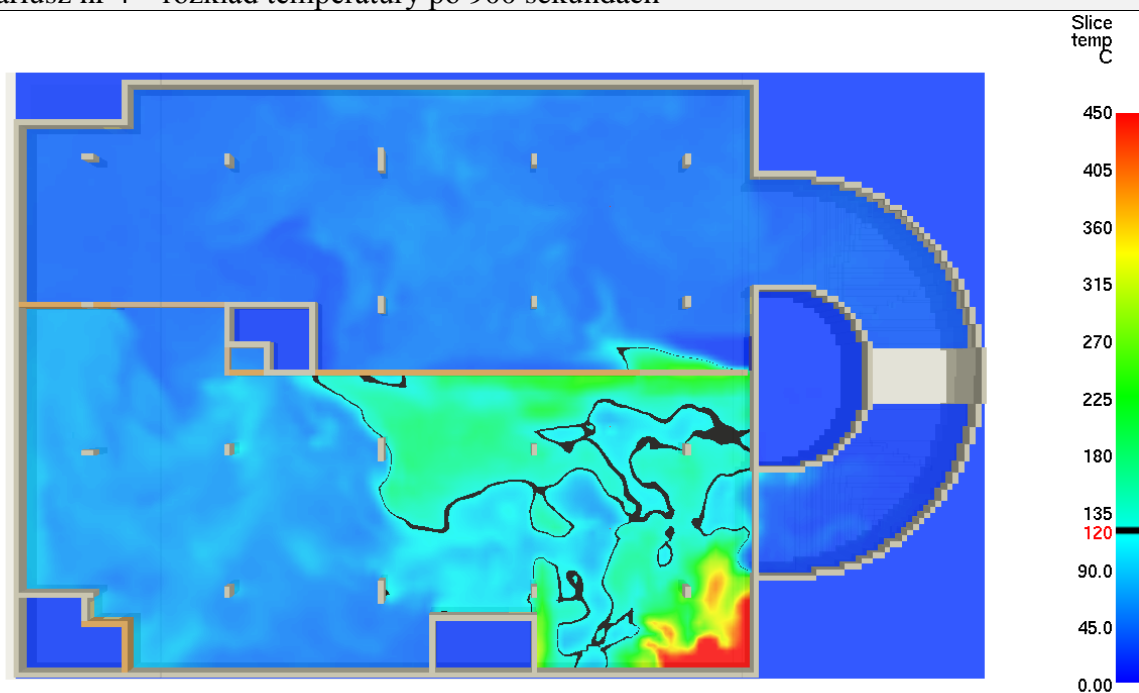
Time: 900.0

Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 900 sekundach



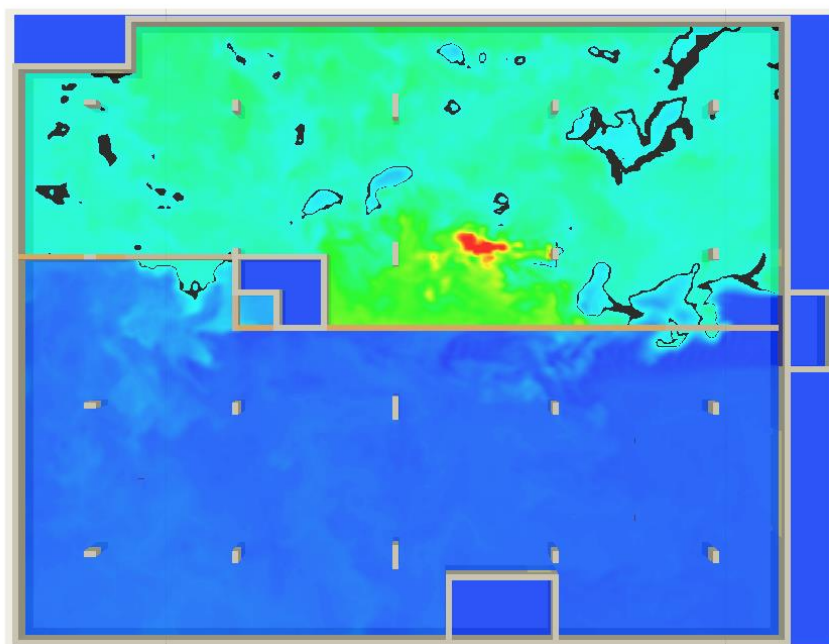
Time: 900.0

Scenariusz nr 4 – rozkład temperatury po 900 sekundach



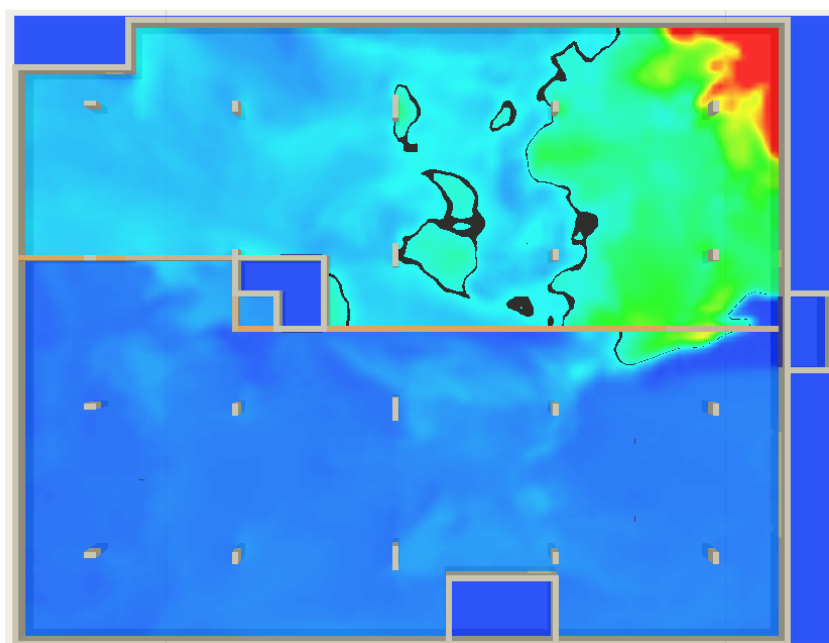
Time: 900.0

Scenariusz nr 5 – rozkład temperatury po 900 sekundach



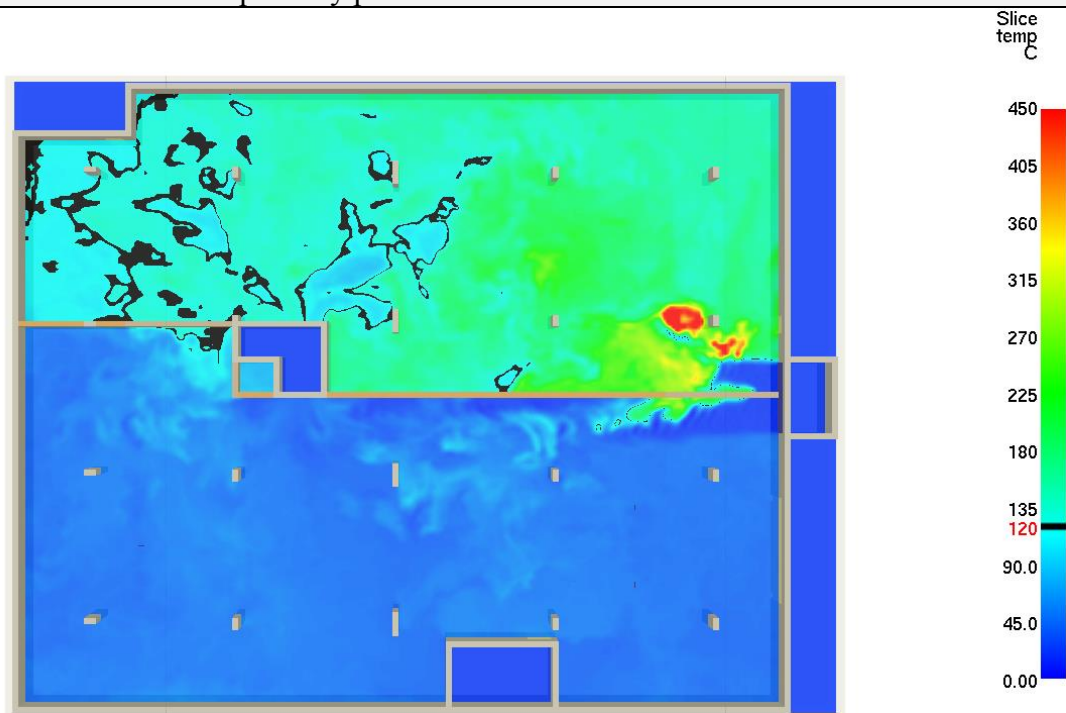
Time: 900.0

Scenariusz nr 6 – rozkład temperatury po 900 sekundach



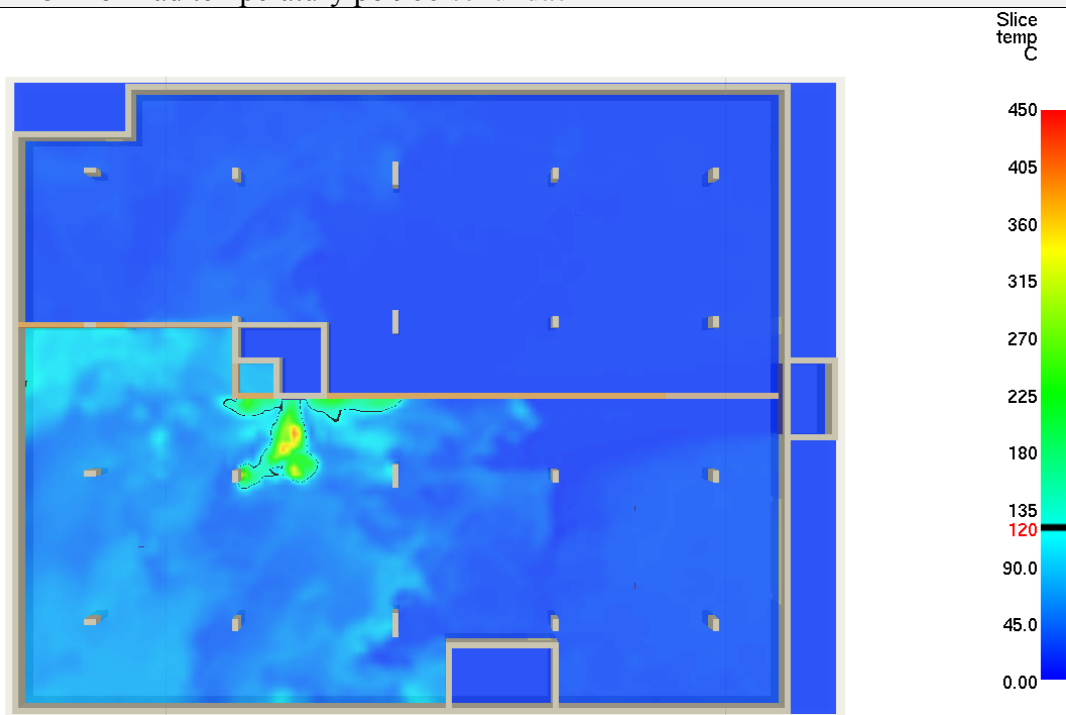
Time: 900.0

Scenariusz nr 7 – rozkład temperatury po 900 sekundach



Time: 900.0

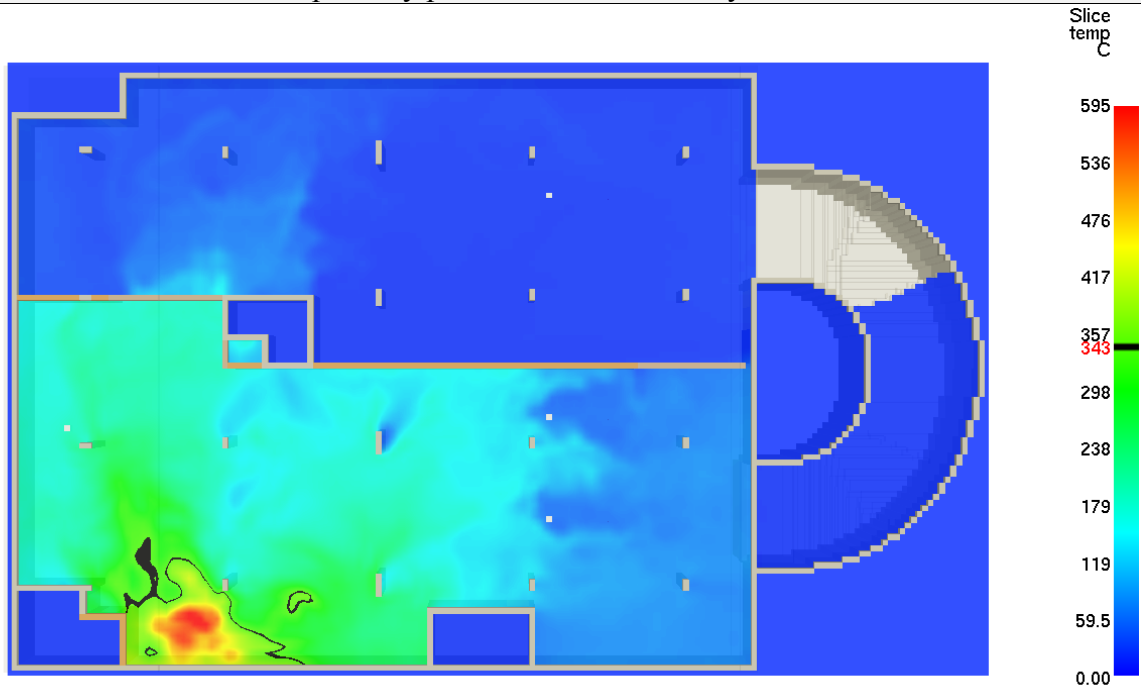
Scenariusz nr 8 – rozkład temperatury po 900 sekundach



Time: 900.0

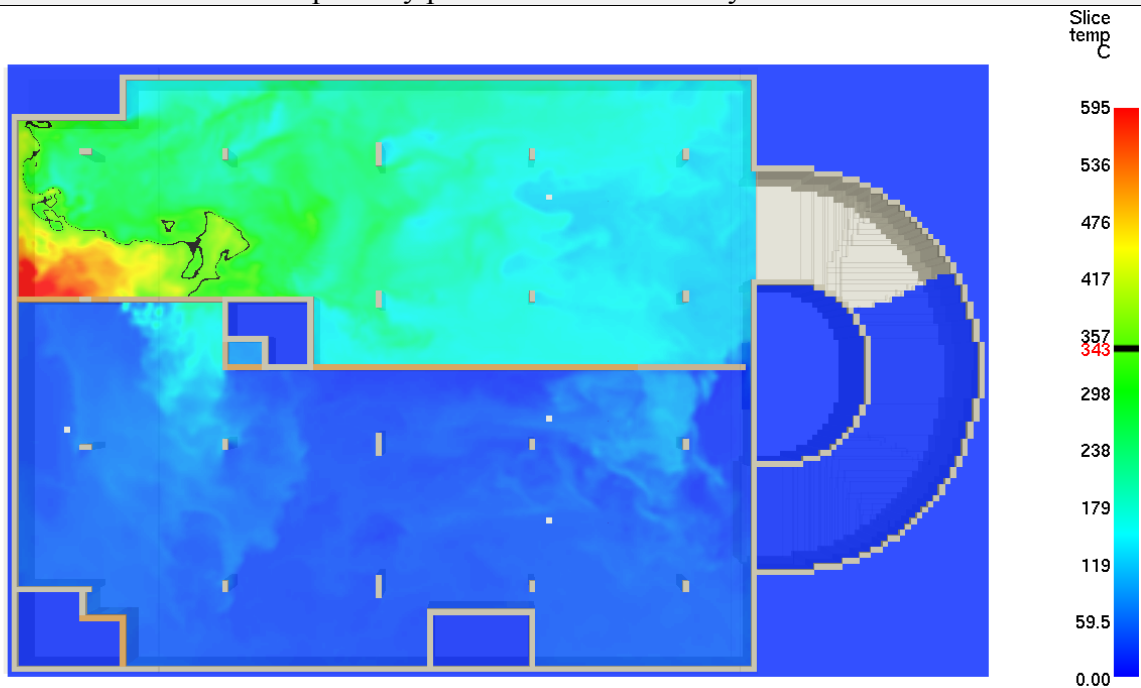
## 6.2. TEMPERATURA NA WYSOKOŚCI WENTYLATORÓW STRUMIENIOWYCH PO CZASIE INTERWENCJI EKIP RATOWNICZYCH

Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 900 sekundach na wysokości 2.4 m



Time: 900.0

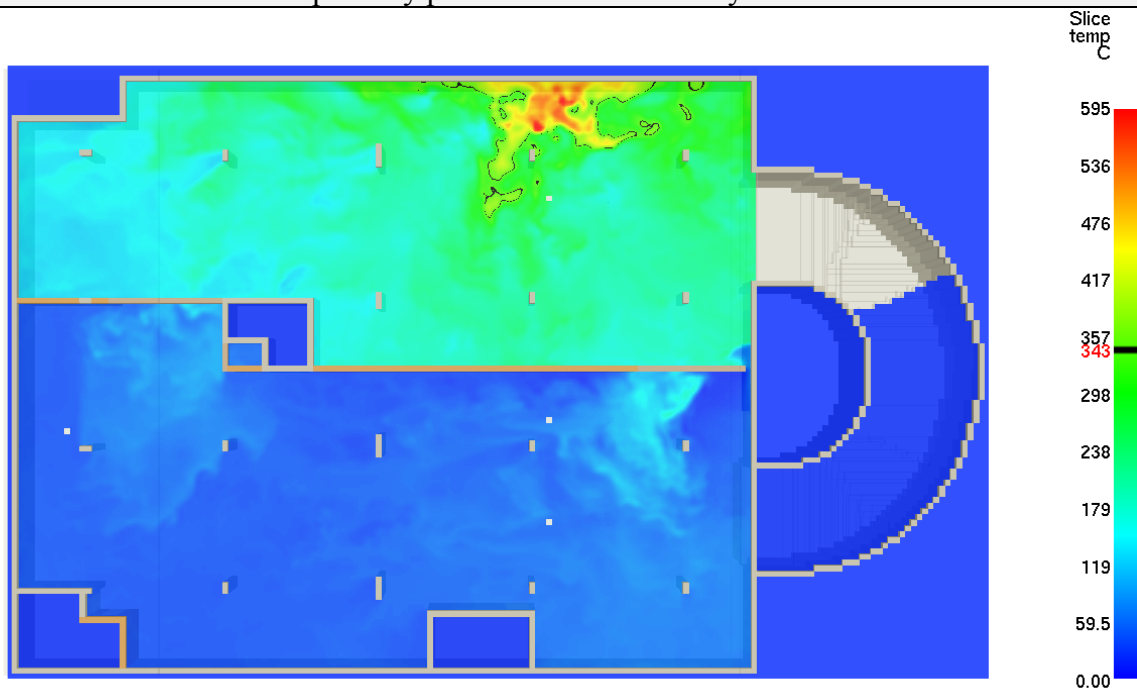
Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 900 sekundach na wysokości 2.4 m



Time: 900.0

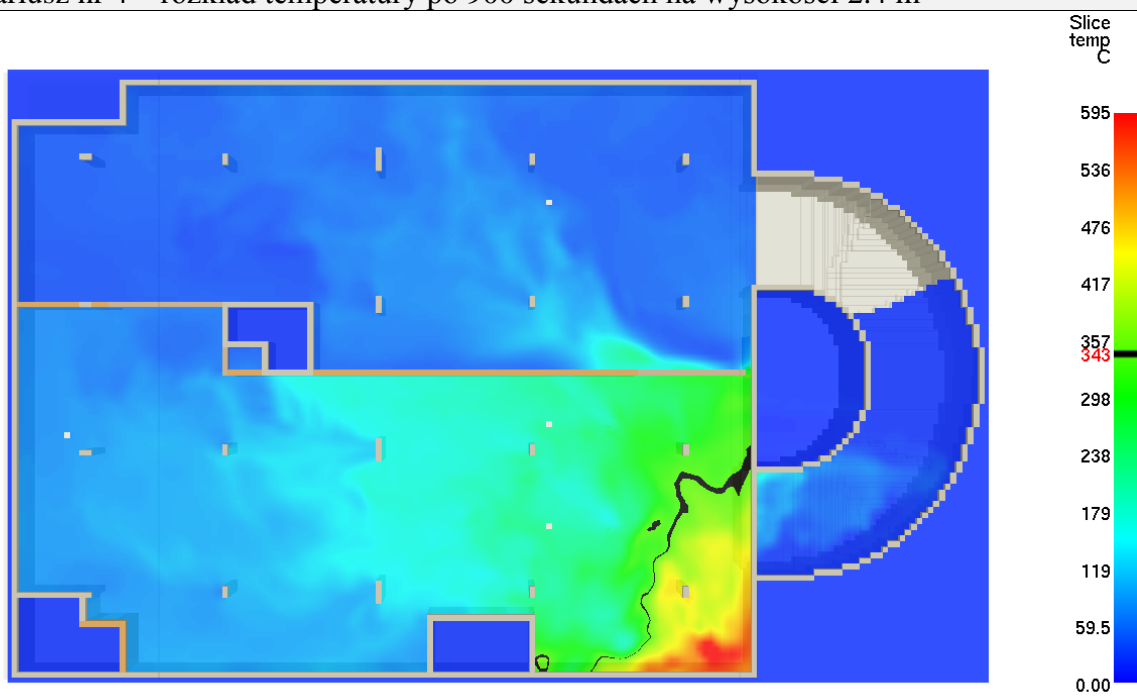


Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 900 sekundach na wysokości 2.4 m



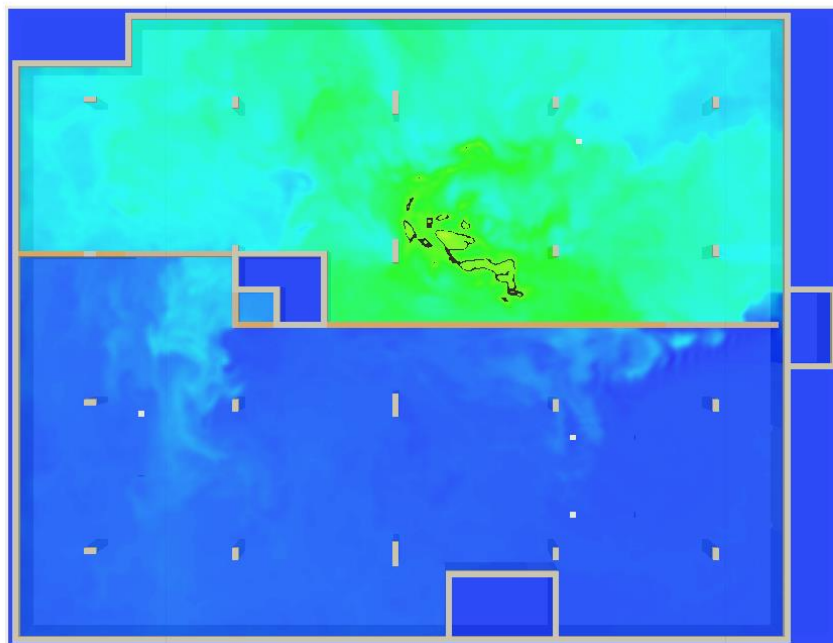
Time: 900.0

Scenariusz nr 4 – rozkład temperatury po 900 sekundach na wysokości 2.4 m



Time: 900.0

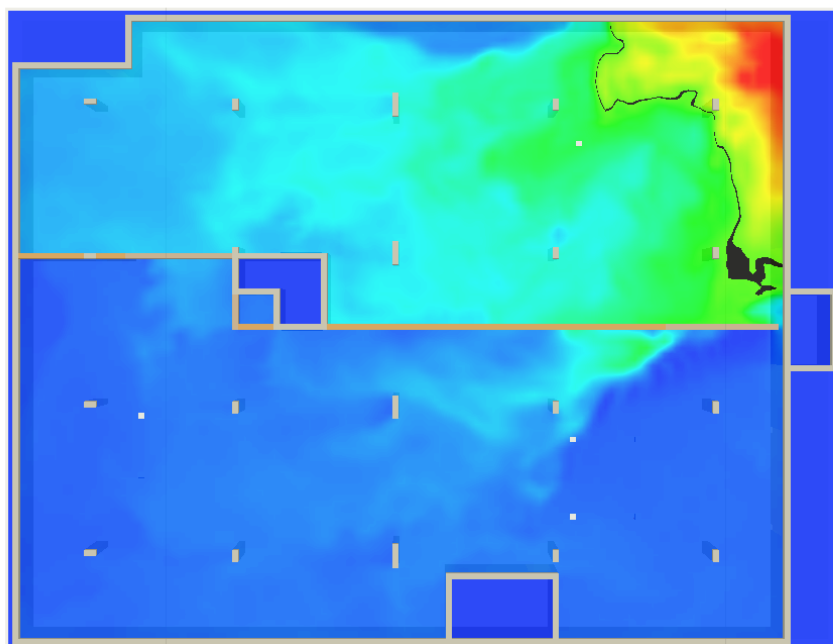
Scenariusz nr 5 – rozkład temperatury po 900 sekundach na wysokości 2.4 m



Time: 900.0



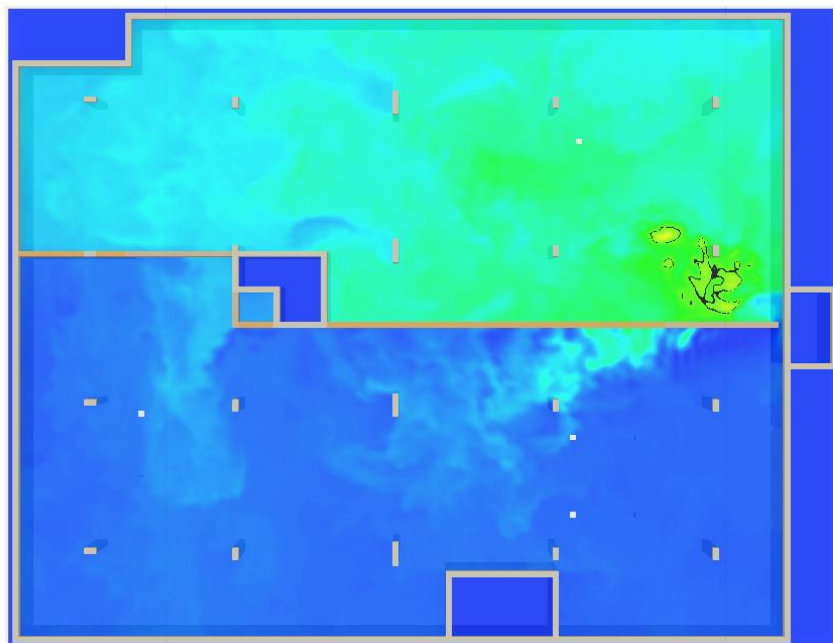
Scenariusz nr 6 – rozkład temperatury po 900 sekundach na wysokości 2.4 m



Time: 900.0



Scenariusz nr 7 – rozkład temperatury po 900 sekundach na wysokości 2.4 m



Slice temp C

595

536

476

417

357

345

298

238

179

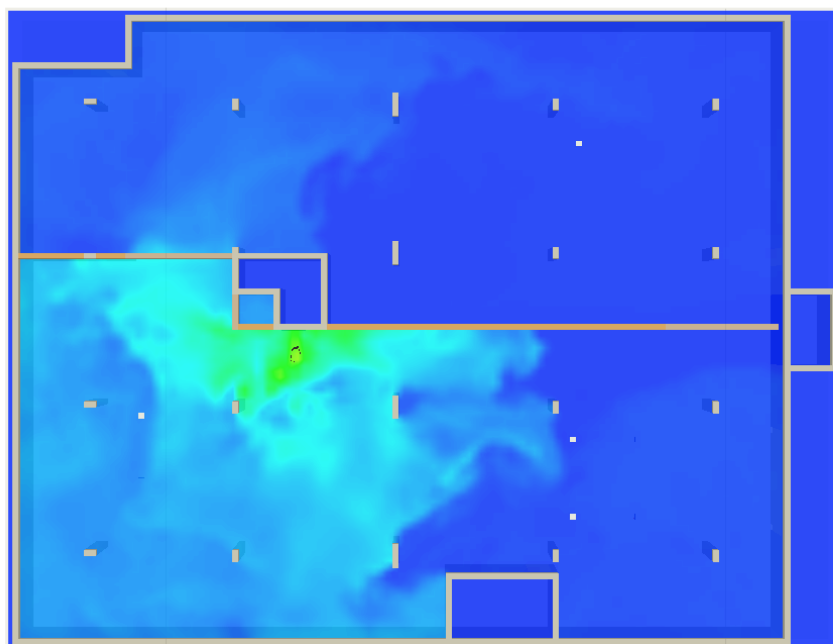
119

59.5

0.00

Time: 900.0

Scenariusz nr 8 – rozkład temperatury po 900 sekundach na wysokości 2.4 m



Slice temp C

595

536

476

417

357

345

298

238

179

119

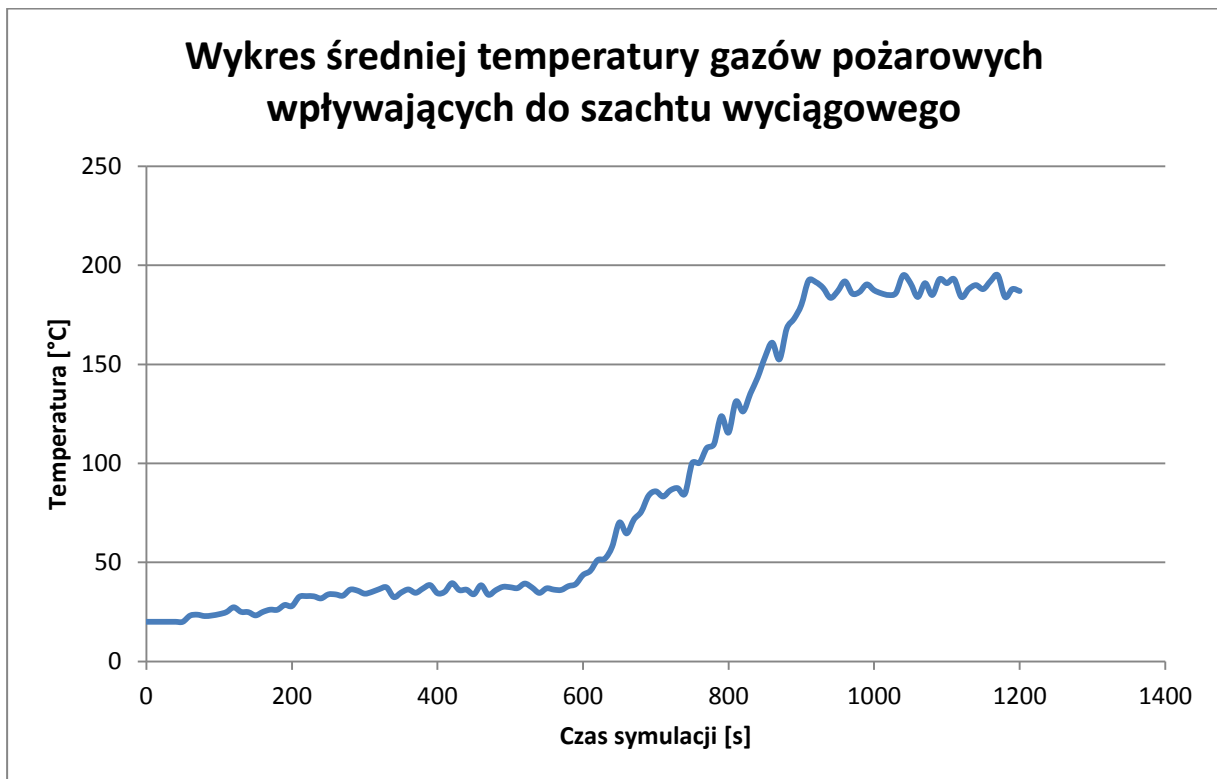
59.5

0.00

Time: 900.0

### 6.3. OKREŚLENIE WYMAGANEJ KLASY TEMPERATUROWEJ WENTYLATORÓW WYCIĄGOWYCH

W symulacjach komputerowych mierzono średnie temperatury gazów na kratkach wyciągowych. Po przeanalizowaniu wyników stwierdzono, że najbardziej niekorzystne temperatury zanotowano w scenariuszu nr 8, gdzie pożar założono w pobliżu szachtu wyciągowego. Poniżej przedstawiono wykres zależności temperatury od czasu dla kraty położonej najbliżej pożaru.



## 7. WNIOSKI

### **Bezpieczeństwo ewakuacji**

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji komputerowych należy stwierdzić, że proponowany system wentylacji pożarowej zapewni usuwanie dymu z wydajnością wystarczającą dla zapewnienia warunków bezpiecznej ewakuacji. System skutecznie ogranicza przepływ dymu do sąsiedniej strefy dymowej, dzięki czemu przez cały czas wymagany dla bezpiecznej ewakuacji możliwa jest ewakuacja do sąsiednich stref dymowych. Jednocześnie temperatura krytyczna po czasie ewakuacji, czyli 240 sekundach, jest przekroczona jedynie na niewielkim obszarze w pobliżu miejsca pożaru. Ponadto trzeba zauważyć, iż osoby, które będą znajdowały się w strefie dymowej objętej pożarem ewakuują się znacznie szybciej niż po 240 sekundach. Wyznaczony czas ewakuacji określa moment opuszczenia garażu przez ostatnią osobę np. z sąsiedniej strefy dymowej, gdzie zauważenie realnego zagrożenia jest utrudnione.

Biorąc pod uwagę wyniki symulacji CFD przedstawione powyżej należy uznać, że projektowany system wentylacji strumieniowej zapewnia wymagany poziom bezpieczeństwa pożarowego dla osób przebywających w garażu, a zatem spełnione zostaną zapisy §270 ust. 1 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. Nr 75, poz. 690 z późn. zm.)

### **Bezpieczeństwo ekip ratowniczo - gaśniczych**

Na podstawie przeprowadzonych symulacji można stwierdzić, że zaproponowany system wentylacji oddymiającej umożliwi bezpieczny dostęp ekip ratowniczych. Jedynie w scenariuszach nr 5 oraz 7 zasięg niekorzystnych warunków pożarowych obejmował praktycznie całą strefę dymową, jednak wówczas podjęcie działań możliwe jest z sąsiedniej strefy bez narażenia na wysoką temperaturę. Trzeba także zauważyć, iż wejście do garażu, zbudowanie stanowiska gaśniczego oraz podjęcie działań gaśniczych będzie możliwe z sąsiednich stref dymowych przez cały czas trwania pożaru. Dzięki ograniczeniu powierzchni granicy stref dymowych pełnymi ścianami oraz obniżeniem do wysokości 2,2 (w miejscu przejazdów) dym przez większość czasu utrzymuje się jedynie w strefie dymowej objętej pożarem. Dodatkowo w celu poprawienia warunków działań ekip ratowniczo-gaśniczych zaleca się, aby drzwi prowadzące z przedsiionka przeciwpożarowego do garażu były w części przeszklone.

Biorąc pod uwagę wyniki symulacji CFD przedstawione powyżej należy uznać, że projektowany system wentylacji strumieniowej zapewnia wymagany poziom bezpieczeństwa dla interweniujących ekip ratowniczo – gaśniczych, co jest spełnieniem zapisu §207 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. Nr 75, poz. 690 z późn. zm.), dotyczącego bezpieczeństwa ekip ratowniczych, a także spełni wymagania Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/ 2011 załącznik 1 pkt. 2.

## Klasa temperaturowa wentylatorów

Analizie poddana została również wymagana klasa temperaturowa wentylatorów wyciągowych oraz strumieniowych. Wyniki symulacji komputerowej oraz obliczeń analitycznych pozwalają sformułować następujące wnioski. W przypadku wentylatorów wyciągowych można zastosować wentylatory w klasie  $F_{400}120$ . Średnia temperatura gazów pożarowych wyciąganych przez wentylator po uzyskaniu przez pożar maksymalnej mocy nie powinna przekroczyć 243 st. C. Wszystkie wentylatory strumieniowe powinny wykonane być w klasie  $F_{400}120$ . Zasięg strumienia podsufitowego o temperaturze 400 stopni wyznaczony obliczeniami oraz symulacją komputerową jest mniejszy niż połowa odległości pomiędzy najbliższymi położonymi wentylatorami. Ponadto we wszystkich wentylatorach strumieniowych należy rozpatrzyć potrzebę wyposażenia ich w kierownice, w celu ewentualnego ukierunkowania wypływu powietrza w dół w miejscach położonych blisko belek stropowych lub innych instalacji mogących ograniczać przepływ lub zaburzać swobodny strumień powietrza.

## Zalecenia ogólne

Przed oddaniem garażu do użytkowania zaleca się wykonanie próby odbiorowej z użyciem gorącego/ciepłego dymu. Autorzy nie narzucają metodologii wykonywanych testów. Zaleca się jednak, żeby wytworzony dym stworzył wyraźną warstwę unoszącą się pod stropem w danym garażu.



Próba ma na celu sprawdzenie poprawności zadziałania systemu wentylacji oddymiającej oraz weryfikację zaproponowanych rozwiązań. Szczególną uwagę należy zwrócić na kierunek oraz prędkość przepływu powietrza/dymu na granicy stref dymowych. Należy również rozpatrzyć możliwość wyłączenia/włączenia części wentylatorów strumieniowych w przypadku uzyskania niesatysfakcjonujących pomiarów prędkości.

W przypadku znaczącej modyfikacji architektury lub zmiany rozmieszczenia wyciągów/nawiewów/wentylatorów strumieniowych zaleca się wykonanie ponownej analizy CFD przed oddaniem garażu do użytkowania.

## 8. 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 1019-5. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide. 2010.

[3] K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd, NIST Special Publication 1018-5. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide. Volume 3: Validation. 2010.

[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 7974-6:2004. 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] 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.