

Analiza CFD pożarowej instalacji wentylacyjnej dla projektowanego garażu podziemnego Nowej Filharmonii w Szczecinie

Zlecający:

STUDIO A4 spółka projektowa z o. o.
ul. Al. Wojska Polskiego 20/IIp., 70-470 Szczecin
tel. (091) 488 16 50, faks (091) 488 48 94
studioa4@macsimum.com.pl

Opracowali:

dr inż. Krzysztof Stawiarski
mgr inż. Przemysław Anosowicz

Konsultacja:

płk. poż. w st. sp. inż. Janusz Pałamar

Nr 4/4

Szczecin, lipiec 2008 r.

Spis treści

Spis treści	1
1. Przedmiot i cel analizy CFD	2
2. Zakres analizy	2
3. Opis analizowanego obiektu	3
4. Założenia przyjęte w symulacji numerycznej CFD	3
5. Scenariusze rozwoju pożaru – symulacje numeryczne CFD	7
• Scenariusz 1 (Sc1)	8
• Scenariusz 2 (Sc2)	8
• Scenariusz 3 (Sc3)	8
• Scenariusz 4 (Sc4)	8
• Scenariusz 5 (Sc5)	9
• Krzywa rozwoju pożaru	10
6. Model matematyczny	10
• Program FDS	11
• Modelowanie fazy ciągłej (płynu)	11
• Burzliwość	12
• Model spalania	12
• Promieniowanie	13
• Podstawowe parametry numeryczne	14
7. Analiza otrzymanych wyników	14
• Scenariusz 1 (Sc1)	14
• Scenariusz 2 (Sc2)	23
• Scenariusz 3 (Sc3)	35
• Scenariusz 4 (Sc4)	43
• Scenariusz 5 (Sc5)	51
8. Podsumowanie i wnioski	62
Literatura	63

1. *Przedmiot i cel analizy CFD*

Prezentowane opracowanie przedstawia analizę pracy pożarowej wentylacji oddymiającej w parkingu podziemnym budynku Nowej Filharmonii w Szczecinie.

Inwestor:

Urząd Miasta Szczecin

Inwestycja:

Nowa Filharmonia w Szczecinie przy ulicy Małopolskiej, róg Matejki.

Przedmiotem prezentowanej analizy jest system przeciwpożarowej wentylacji oddymiającej dla dwukondygnacyjnego parkingu.

Celem analizy jest:

1. określenie warunków występujących w garażu w zakresie temperatury i widzialności na przejściach ewakuacyjnych
2. zapewnienie pożądanych parametrów zasięgu widzialności i temperatury w czasie przewidzianym na ewakuację przy pracującej wentylacji oddymiającej
3. zapewnienie warunków bezpieczeństwa ekip ratowniczych w czasie prowadzonych działań

2. *Zakres analizy*

Parking podziemny będący przedmiotem poniższej analizy, składa się z dwóch kondygnacji oznaczonych odpowiednio '-1' i '-2'. Rozkład elementów systemu wentylacyjnego jest niesymetrycznych na obu kondygnacjach co powoduje konieczność wykonania osobnych symulacji i analiz dla każdej z nich z osobna. Dla obu kondygnacji został zbudowany trójwymiarowy model objętości uwzględniający wszystkie istotne elementy mające wpływ na ruch płynu (powietrza) takie jak: przeszkody (kolumny, ścianki działowe itp), otwory wentylacyjne, wentylatory, wjazd do garażu itp. Symulacje numeryczne CFD zostały wykonane dla różnych wariantów miejsca powstania pożaru, jak również różnych parametrów i konfiguracji pożarowej instalacji wentylacyjnej tak, by osiągnąć optymalne warunki pracy urządzeń.

Symulacje stworzyły możliwość weryfikacji przyjętego rozwiązania tak by zapewnić optymalne warunki ewakuacji, zgodnie z wytycznymi rzeczoznawcy ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych. Otrzymany dynamiczny obraz pożaru wykazał obszary, w których ewakuacja może być utrudniona, co z kolei pozwoliło w kolejnych krokach stopniowo ulepszać proponowane rozwiązanie projektowe. Podstawą oceny systemu wentylacyjnego były otrzymane rozkłady pól temperatur i zasięgu widzialności. Ze względu na obecność wentylatorów strumieniowych monitorowane były również pola prędkości powietrza. W niektórych scenariuszach monitorowana była koncentracja tlenu (O_2) i dwutlenku węgla (CO_2). Dla celów porównawczych wykonana została także symulacja pracy klasycznej instalacji przeciwpożarowej bazującej na wentylacji kanałowej i instalacji tryskaczowej.

Opracowanie obejmuje następujące zagadnienia projektowe:

- określenie rozkładu temperatur w badanym obiekcie dla założonych warunków projektowych pożaru
- oszacowanie zasięgu widzialności ze szczególnym uwzględnieniem przejść ewakuacyjnych

- ocenę efektywności instalacji wentylacji oddymiającej (składającej się z wentylatorów wyciągowych i wentylatorów strumieniowych) w trakcie ewakuacji i w czasie interwencji straży pożarnej
- określenie przewidywanej temperatury pod stropem w strefie objętej pożarem.

3. Opis analizowanego obiektu

Powierzchnia efektywna garażu na kondygnacji '-1' wynosi 2094 m² natomiast wysokość do stropu to 2.6m. Dla kondygnacji '-2' powierzchnia jest równa 2230 m² a wysokość do stropu to 2.5m. Wjazd do garażu znajduje się na poziomie '-1'. Ruch samochodów pomiędzy kondygnacjami odbywa się przez pochylnie. Wyjścia ewakuacyjne ze strefy pożarowej garażu stanowią dwie klatki schodowe łączące obie kondygnacje garażu (oznaczone na rys. 1 i rys. 2 jako E1 i E2) oraz wjazd do garażu na poziomie '-1'. Wentylacja oddymiająca dla każdej kondygnacji składa się z dwóch wentylatorów oddymiających (rewersyjnych) umieszczonych po przekątnej (oznaczone jako W1, W2). Na każdej kondygnacji, wzdłuż przejść ewakuacyjnych, umieszczone jest sześć rewersyjnych wentylatorów strumieniowych (oznaczone jako S1 do S6). W momencie powstania pożaru obie kondygnacje są oddzielane bramą przeciwpożarową na poziomie '-2', znajdującą się przed wjazdem na pochylnię. Prowadzi to do powstania dwóch osobnych stref pożarowych. W obiekcie nie występuje instalacja tryskaczowa. Wentylatory W1 i W2 charakteryzują się różną wydajnością gdy pracują w trybie nawiewu i wywiewu. Kompensacja różnicy wydajności odbywa się przez otwór kompensacyjny (kondygnacja '-2') i wjazd do garażu (kondygnacja '-1').

4. Założenia przyjęte w symulacji numerycznej CFD

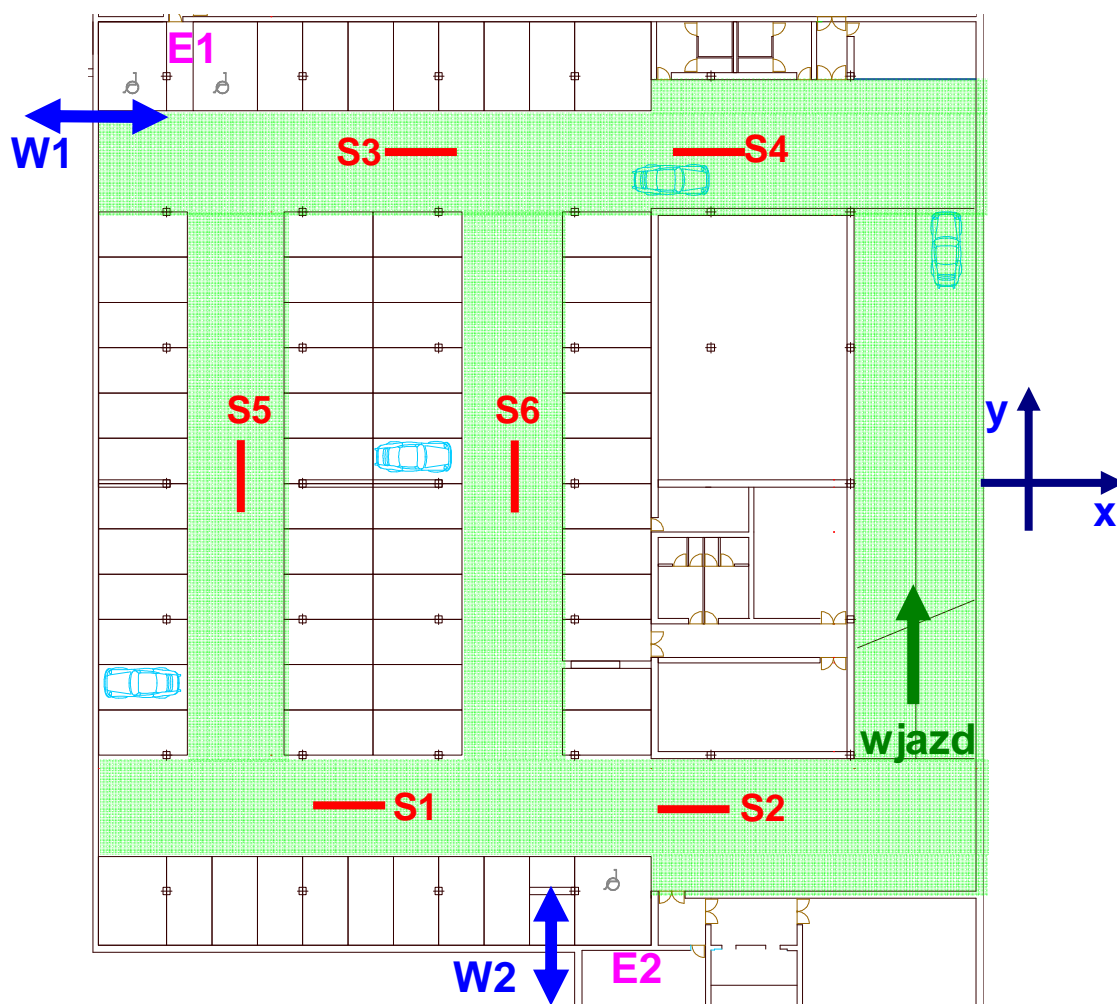
Celem symulacji CFD jest analiza efektywności instalacji wentylacji oddymiającej. Rozkład przeszkód dla obu kondygnacji garażu jest bardzo zbliżony różne są natomiast wysokości od stropu i rozmieszczenie otworów kompensacyjnych. Stwarza to konieczność przeprowadzenia osobnych analiz dla obu kondygnacji.

Założenia przyjęte w symulacjach są dwójakiego rodzaju. Pierwsze dotyczą metody wentylacji natomiast drugie związane są z rozwojem pożaru i ewakuacją.

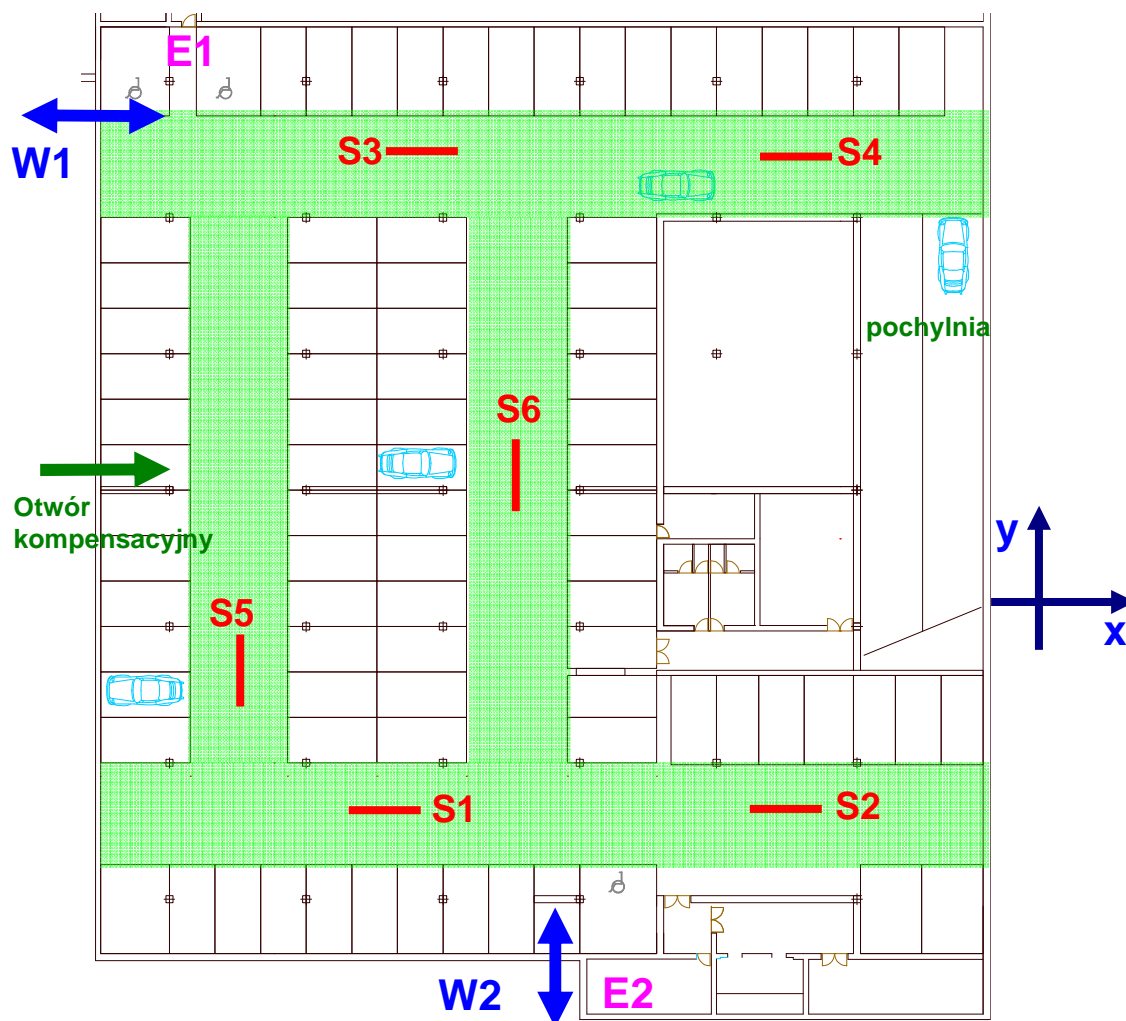
Główne założenia związane z wentylacją przeciwpożarową obiektu są następujące:

- Wentylacja przeciwpożarowa na obu kondygnacjach składa się z dwóch rewersyjnych wentylatorów wyciągowych W1 i W2 każdy zapewniający około 18 wymian powietrza na godzinę w trybie wyciągu. Taką ilość wymian zapewniają wentylatory o wydajności 100000 m³/h. W trybie nawiewu wentylatory osiągają 60 % swojej wydajności tj. nieco ponad 11 wymian. Tryb pracy wentylatora zależy od lokalizacji pożaru (rys. 3). Powierzchnia przekroju wlotu wentylatora to 2,25 m².
- Różnica wydajności pomiędzy wentylatorem nawiewnym i wywiewnym jest kompensowana przez otwór wjazdowy dla poziomu '-1' natomiast na poziomie '-2' przez otwór kompensacyjny.

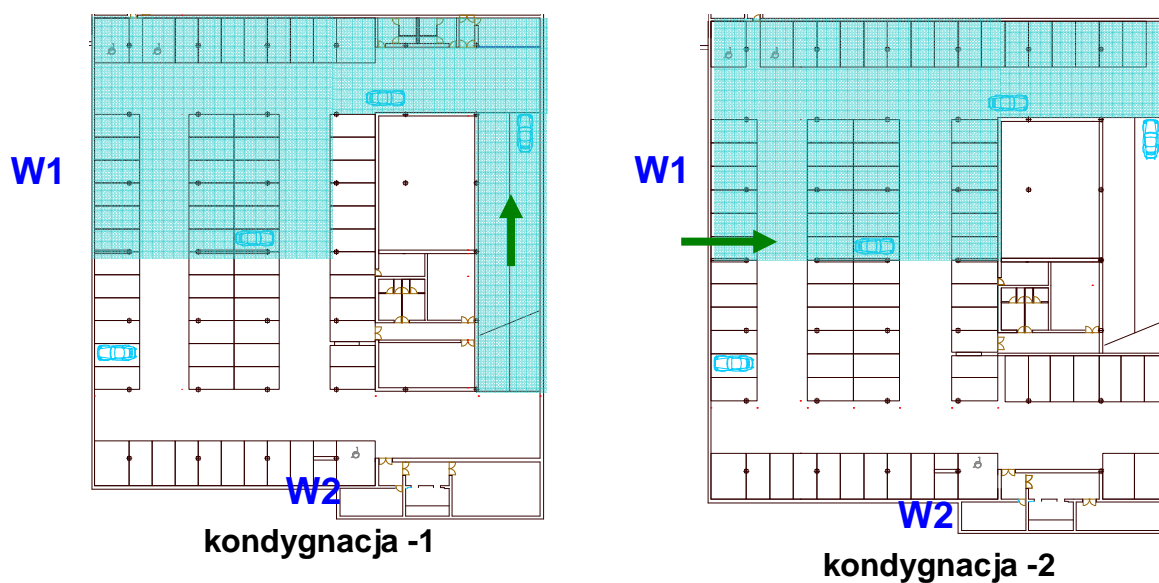
- Efektywność wentylacji jest dodatkowo zwiększona przez sześć rewersyjnych wentylatorów strumieniowych (S1-S6) rozmieszczonych wzdłuż przejść ewakuacyjnych (rys. 1 i rys. 2) każdy o wydajności 10000 m³/h i otworze wlotowym 0,13 m². Kierunek pracy wentylatora jest zależny od tego który z wentylatorów wyciągowych jest w danym momencie „wyciągiem” a który „nawiewem” oraz od lokalizacji pożaru (rys. 4).
- Kondygnacje garażu zostały podzielone na dwie strefy pracy dla każdego wentylatora (rys. 3) strefa „niebieska” – to strefa wentylatora W1, „biała” – W2; powstanie pożaru w strefie wentylatora oznacza, że będzie on pracował jako wentylator wyciągowy natomiast drugi wentylator na danej kondygnacji będzie wprowadzał powietrze świeże.
- Rozruch wentylatorów do biegu wentylacji pożarowej następuje natychmiastowo, natomiast moment ich rozruchu zależy od sposobu wykrycia pożaru (czujki dymowe lub człowiek uruchamiający ROP).
- Wentylacja klatek schodowych (E1-E4) nie jest przedmiotem analizy; zakłada się że pracuje ona poprawnie (wentylacja nadciśnieniowa).



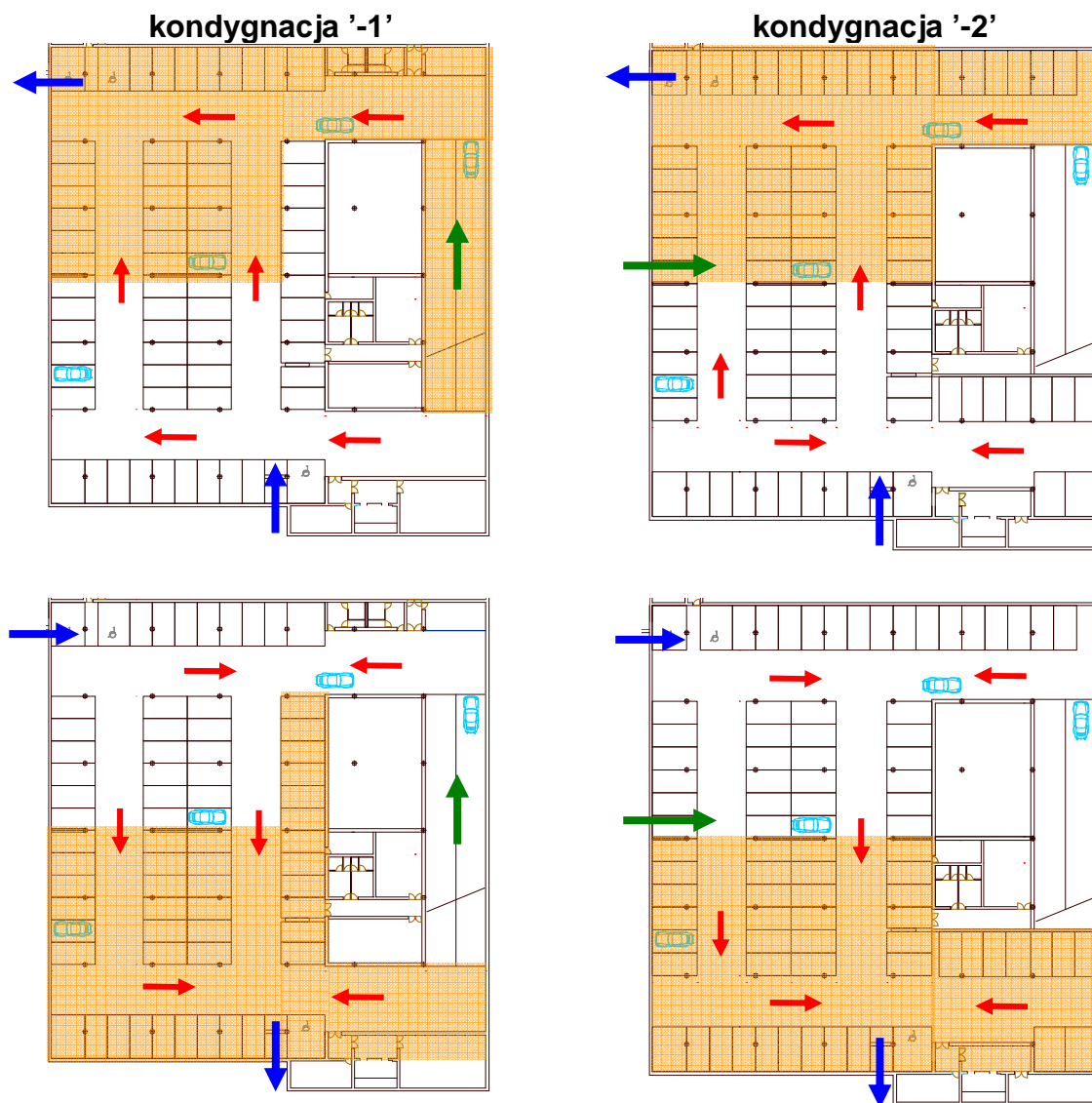
Rysunek 1 Drogi ewakuacyjne oraz rozmieszczenie urządzeń wentylacyjnych na kondygnacji '-1'.



Rysunek 2 Drogi ewakuacyjne oraz rozmieszczenie urządzeń wentylacyjnych na kondygnacji '-2'.



Rysunek 3 Strefy pracy wentylatorów nawiewno-wywiewnych w trybie wyciągu na poziomach '-1' i '-2'; strzałki zielone wskazują kierunek wprowadzania powietrza przez otwory kompensacyjne.



Rysunek 4 Kierunki pracy wentylatorów strumieniowych (strzałki czerwone) w zależności od lokalizacji pożaru (strefa pomarańczowa); strzałki zielone - kierunek wprowadzania powietrza przez otwory kompensacyjne; strzałki niebieskie – wentylatory nawiewno-wywiewne.

Przyjęto następujące założenia pożarowe:

- Realizacja sterowań przez centralę SAP następuje po upływie dwóch minut od alarmu pierwszego stopnia.
- W obiekcie nie występuje instalacja tryskaczowa.
- Po wykryciu pożaru przez system SAP kondygnacje są zamykane bramą przeciwpożarową.
- Na obu poziomach ewakuacja odbywa się przejściami ewakuacyjnymi prowadzącymi do klatek E1 i E2 .
- Na poziomie '-1' ewakuacja odbywa się dodatkowo przez pochylnie wjazdów na wyższą kondygnację.
- Zakłada się pełną ochronę garażu przez system sygnalizacji pożarowej.

- Prędkość poruszania się ludzi w trakcie ewakuacji przyjęto równą 1 m/s.
- Ludzie ewakuują się po przejściach ewakuacyjnych (przejazdach) – nie przemieszczają się po miejscach parkingowych.
- Maksymalna długość przejścia ewakuacyjnego na poziomie '-1' i '-2' wynosi 52 m (stąd czas potrzebny na ewakuację wynosi 52 sekundy).
- Przy najbardziej niekorzystnym scenariuszu pożaru, powodującym wyłączenie z użytku jednej z klatek ewakuacyjnych, droga ewakuacyjna do następnego wyjścia ewakuacyjnego nie przekracza 88 m (czas przejścia odpowiednio 88 sekund).
- Przyjęto założenie, że osoby znajdujące się w pobliżu palącego się samochodu ewakuują się po upływie 1 minuty od zauważenia pożaru. Osoby przebywające w garażu, które usłyszą sygnał alarmowy z ostrzegaczy akustycznych SAP, rozpoczynają ewakuację po upływie jednej minuty (270 sekunda od powstania pożaru).

Czas ewakuacji został oszacowany uwzględniając następujące założenia:

0 sekunda	powstanie pożaru
30 sekunda	uruchomienie czujki pożarowej
150 sekunda	włączenie wentylacji pożarowej i sygnalizatorów akustycznych SAP
210 sekunda	rozpoczęcie ewakuacji
262 sekunda	czas przejścia ewakuacyjnego gdy wszystkie klatki schodowe są dostępne
298 sekunda	czas przejścia ewakuacyjnego gdy tylko część klatek schodowych jest dostępna

Podsumowując, minimalny czas ewakuacji wynosi zatem **5 minut**, a po uwzględnieniu dodatkowego współczynnika bezpieczeństwa można przyjąć, że ewakuacja zostanie zakończona po **7 minutach** od powstania pożaru. Symulacje zostały wykonane dla **15 minut** (900 sekund) od rozpoczęcia pożaru (czyli **12.5 minuty** od załączenia się wentylacji i sygnalizatorów SAP). Jedną z symulacji dla instalacji strumieniowej oraz porównawczą symulację instalacji kanałowej zostały wykonane dla czasu **25 minut** (1500 sekund) w celu oszacowania warunków, w których będą pracowały jednostki straży pożarnej.

Warunki oczekiwane to utrzymanie na czas ewakuacji na przejściach ewakuacyjnych zasięgu widzialności dla obiektów odbijających światło (nie świecących) nie mniejszego niż **10 metrów** i temperatury poniżej **60 °C** na wysokości do **1,8 m** (wzrost człowieka).

5. Scenariusze rozwoju pożaru – symulacje numeryczne CFD

Pomimo symetrycznego rozkładu przeszkód na obu poziomach garażu, niesymetryczna konfiguracja urządzeń wentylacyjnych, wymusza konieczność przeprowadzenia osobnych symulacji dla obu kondygnacji. Wstępne porównanie kondygnacji pozwala na stwierdzenie, że bardziej niekorzystne warunki mogą powstać się na poziomie '-2'. Na kondygnacji '-1' istnieje dodatkowe wyjście ewakuacyjne (wjazd) oraz wysokość do stropu jest nieznacznie większa (2.6 metra na poziomie '-1' do 2.5 metra na poziomie '-2'). Ponadto, na kondygnacji '-1' korzystniejsze jest rozmieszczenie stanowisk samochodów, które są zgrupowane w centralnej części garażu. Natomiast na poziomie '-2' wentylacja stanowisk

znajdujących się w pobliżu wyjścia ewakuacyjnego E2 jest utrudniona. Z tych powodów większość prezentowanych symulacji analizuje rozwój pożaru na kondygnacji '-2' mając na względzie fakt, że na kondygnacji '-1' istnieje pewien dodatkowy margines bezpieczeństwa wynikający ze wspomnianych uwag. Liczba wyjść ewakuacyjnych jest relatywnie mała (dwa na kondygnacji '-2' i trzy na kondygnacji '-1'). Stąd kwestią priorytetową jest utrzymanie zawsze co najmniej jednego przejścia w warunkach dogodnych do ewakuacji. Należy jednak pamiętać, że jeżeli nawet dojdzie do odcięcia jednego z wyjść ewakuacyjnych, ewakuacja z obszarów w bezpośredniej bliskości źródła ognia i tak nastąpi najszybciej co w połączeniu z relatywnie prostymi dojazdami do klatek schodowych nie powinno skutkować znacznymi utrudnieniami ewakuacji. W testowanych scenariuszach kładzie się nacisk na utrzymanie założonych parametrów widzialności i temperatury w pobliżu pożaru, tak by zapewnić skuteczne jego ograniczenie przez czas dłuższy niż sama ewakuacja i ułatwić tym samym pracę jednostkom PSP. W scenariuszach, w pierwszym rzędzie zwraca się uwagę na granicę pracy poszczególnych urządzeń instalacji wentylacyjnej, wynikającą z ich zasięgu, rozmieszczenia i wydajności. Miejscami szczególnie niekorzystnymi z punktu widzenia wentylacji są obszary garażu w pobliżu klatek schodowych. Innym krytycznym aspektem systemu wentylacyjnego badanym w symulacjach są granice pracy głównych wentylatorów nawiewno-wywiewnych, wynikające z trybu ich pracy zgodnie z rysunkiem 3 i 4. Scenariusze Sc1 prezentuje rozwój pożaru na kondygnacji '-1' natomiast Sc2 – Sc5 na kondygnacji '-2'.

Scenariusz 1 (Sc1)

W scenariuszu 1 pożar zlokalizowany jest na kondygnacji '-1' na granicy pracy wentylatorów nawiewno-wywiewnych. Na rysunku 5 płonący samochód zaznaczony jest kolorem żółtym. Czas symulacji 900 sekund (15 minut).

Scenariusz 2(Sc2)

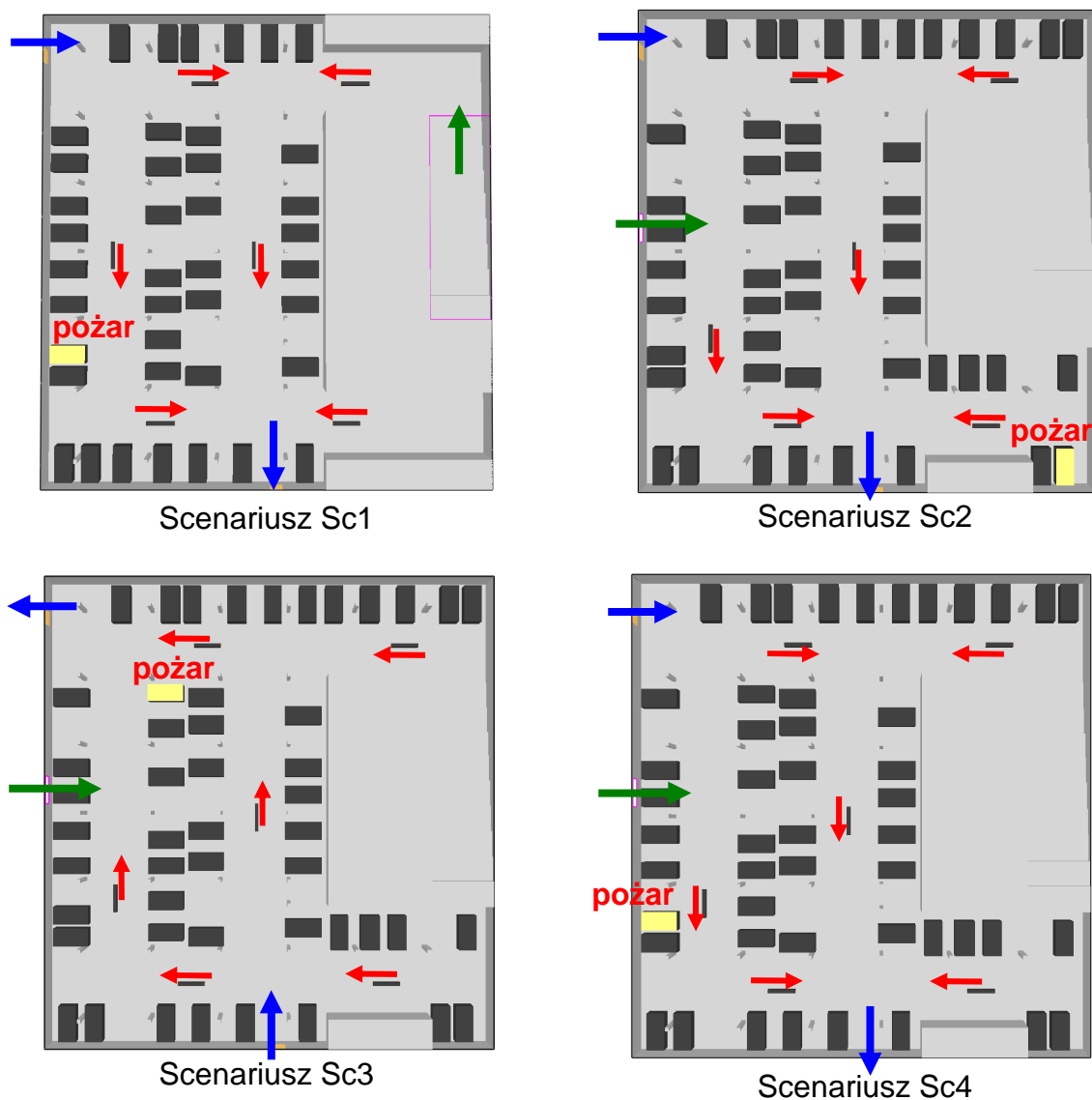
Scenariusz 2 przedstawia sytuację gdy pożar na kondygnacji '-2' rozwija się w części narożnej garażu, w której wentylacja jest szczególnie utrudniona. Źródło ognia zaznaczone jest kolorem żółtym (rys .5).Czas symulacji 1500 sekund (25 minut).

Scenariusz 3(Sc3)

W scenariuszu 3 pożar na kondygnacji '-2' powstaje w pobliżu wentylatora wyciągowego W1, i wyjścia ewakuacyjnego E1. Taka lokalizacja pożaru dodatkowo stwarza zagrożenie zadymienia przejść ewakuacyjnych prowadzących do E1. Płonący samochód zaznaczony jest kolorem żółtym (rys .5).Czas symulacji 900 sekund (15 minut).

Scenariusz 4(Sc4)

W scenariuszu 4 przedstawiono symulację sytuacji podobnej do Sc1 z tym, że pożar ma miejsce na kondygnacji '-2'. Źródło ognia zaznaczone jest kolorem żółtym (rys .5). Czas symulacji - 900 sekund (15 minut).



Rysunek 5 Lokalizacja pożaru w scenariuszach od 1 do 4 oraz kierunki pracy urządzeń wentylacyjnych.

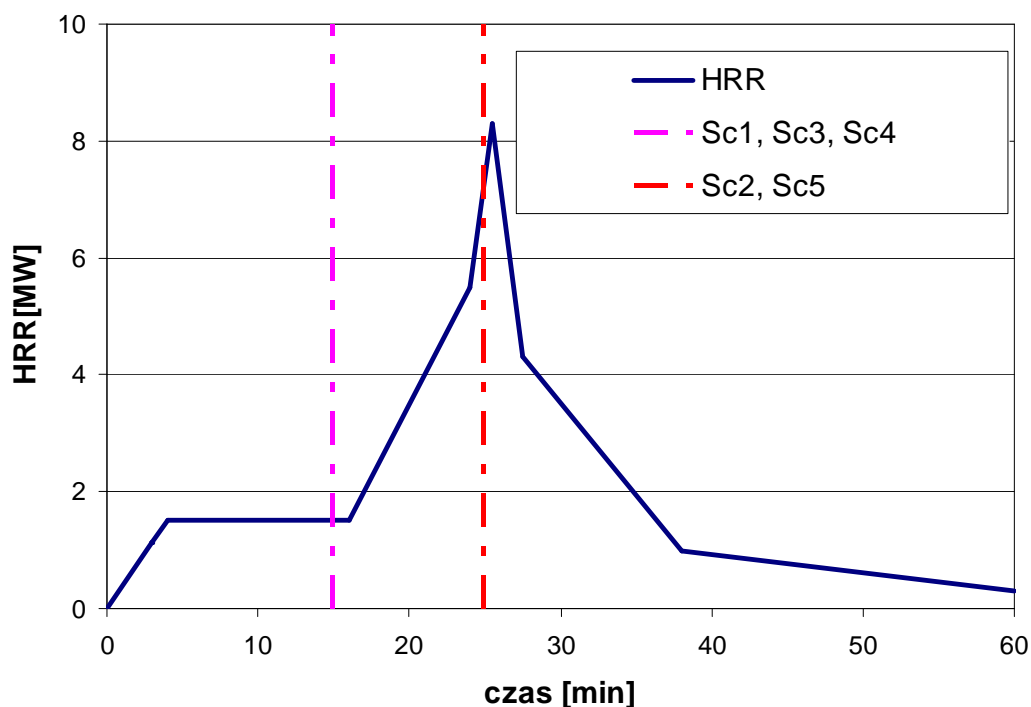
Scenariusz 5(Sc5)

Scenariusz 5 prezentuje rozwój pożaru zlokalizowanego jak w scenariuszu Sc2. W garażu zamiast wentylacji strumieniowej funkcjonuje wentylacja kanałowa współdziałająca z instalacją tryskaczową. Czas symulacji 1500 sekund. Założenia przyjęte w symulacji:

- rozruch wentylacji kanałowej następuje po 2.5 minutach od powstania pożaru (po 2 minutach od alarmu pierwszego stopnia);
- 10 wymian powietrza na godzinę zapewnione jest przez równomiernie rozmieszczoną sieć wylotów w suficie oddalonych od siebie około 10 metrów;
- dostarczenie świeżego powietrza następuje przez odpowiedni otwór kompensacyjny;
- temperatura aktywacji tryskacza – 67 °C; RTI – 110; K – 64 l/min/bar
- powierzchnia pracy pojedynczego tryskacza to 9 m²

Krzywa Rozwoju pożaru

We wszystkich scenariuszach pożar powstaje w chwili 'zero', natomiast wentylacja oddymiająca załącza się po czasie 150 sekund i natychmiastowo osiąga swoją maksymalną wydajność. Moc pożaru zmienia się zgodnie z krzywą rozwoju pożaru pojedynczego samochodu na rysunku rys.11 (HRR jest to heat release rate, - moc pożaru, [1], [7]). Na rysunku zaznaczono również symulowany czas w poszczególnych scenariuszach.



Rysunek 6 Krzywa rozwoju pożaru samochodu i wydajność wentylacji wyciągowej; Sc1-Sc5 czasy wykonanych symulacji

6. Model matematyczny symulacji.

Obliczeniowa Dynamika Płynów – (z ang. CFD - Computational Fluid Dynamics) jest pojęciem bardzo szerokim łączącym w sobie zagadnienia fizyki procesów transportu masy, pędu i energii w szeroko rozumianych płynach, jedno i wielofazowych. CFD uwzględnia także modelowanie przepływów laminarnych, burzliwych, procesów chemicznych zachodzących w mieszaninach i układach wielofazowych. Pojęcie to zawiera też w sobie metody numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych, dyskretyzacji i budowania numerycznych modeli rzeczywistych układów związanych z procesami przepływu oraz ich późniejszej wizualizacji ([3]). Metoda ta posiada szerokie zastosowanie w wentylacji i klimatyzacji. Narzędzia CFD dostarczają inżynierom dynamiczny obraz procesów przepływu, który pozostaje zwykle poza zasięgiem badań eksperymentalnych ([2], [8]).

Program FDS

Symulacje CFD wykonane zostały przy użyciu pakietu FDS (ang. Fire Dynamics Simulation), który jest przeznaczony do szeroko rozumianych symulacji pożarowych. Zakres stosowania tego oprogramowania obejmuje przepływy o relatywnie niskich prędkościach (t.j. mniejszych od prędkości dźwięku < 300 m/s) oraz płyny ściśliwe wzbudzone zmianami gęstości (dla których można założyć, że gęstość ρ nie jest stała i zależy np. od temperatury). Warunki te wykluczają zastosowanie FDS do przepływów takich jak eksplozje, przepływy w których występują bardzo gwałtowne przewężenia przepływu czy dławienie przez dysze. Pakiet FDS nadaje się natomiast do symulowania pożarów ich rozprzestrzeniania się, jak również pozwala na ocenę efektywności wentylacji, pożarowej (oddymiającej) czy też instalacji tryskaczowej ([2], [8]).

Modelowanie fazy ciągłej (płynu)

W pakiecie FDS rozwiązywany jest układ cząstkowych równań różniczkowych wyprowadzonych z zasad zachowania masy pędu i energii ([5], [6]):

- **zasada zachowania masy**

a. równanie ciągłości płynu

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0$$

b. równanie bilansu dla Y_n substancji w mieszaninie reakcji chemicznej

$$\frac{\partial \rho Y_n}{\partial t} + U_j \frac{\partial \rho Y_n}{\partial x_j} = S_Y + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_n \frac{\partial Y_n}{\partial x_i} \right)$$

- **zasada zachowanie pędu (równanie Naviera-Stokesa)**

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial \rho U_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

- **zasada zachowania energii:**

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + U_j \frac{\partial \rho H}{\partial x_j} = S_H + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial H}{\partial x_i} \right)$$

Gdzie

U_i - składowa prędkości

H - entalpia

P - ciśnienie

ρ - gęstość

μ - lepkość dynamiczna

Y_n - udział masowy n-tego składnika mieszaniny (gdzie, $\sum_{n=1}^N Y_n = 1$, N -liczba składników)

S_Y - wielkość produkcji /destrukcji n-tego składnika mieszaniny ($\sum_{n=1}^N S_n = 0$)

S_H , -człony źródłowe (np. źródła ciepła od promieniowania, reakcji chemicznych itp.)

F_i - człony źródłowe (np. efekty wynikające ze zmian gęstości i temperatury, siły zewnętrzne)

D_n - dyfuzyjność n-tego składnika mieszaniny

Burzliwość

W pakiecie FDS możliwe jest modelowanie burzliwości zarówno przy użyciu metody DNS (ang. direct numerical simulation) jak również symulacji wielkich wirów (ang. LES – large-eddy simulation). Podejście DNS z racji wymogów stawianych gęstościom siatek numerycznych (takich jak konieczność uchwycenia najmniejszych skal przepływu burzliwego) nie jest wykorzystywany w zastosowaniach inżynierskich, ze względu na bardzo duży koszt czasowy symulacji ([2], [3]). W praktycznych zastosowaniach powszechnie używane są metody z grupy LES ([3]) W metodzie LES zakłada się, że największe skale przepływu (wiry) mają dominujący wpływ na przepływ i stąd są wyliczane bezpośrednio z równań transportu. Natomiast udział małych skal może być modelowany przy użyciu tzw. modeli podsiatkowych (ang. sub-grid scale models). Większość modeli podsiatkowych (w tym w także w programie FDS) bazuje na koncepcie Boussinesq'a lepkości burzliwej. Modele te mają formę członu dyfuzyjnego, w którym pojawia się dodatkowa lepkość burzliwa μ_t modelująca wkład zakresu skal (wirów) nieuwzględnionych przez przyjętą dyskretyzację:

$$\mu_t = \rho(C_s \Delta)^2 |\bar{S}|$$

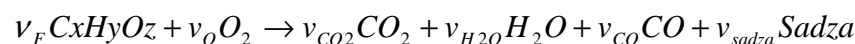
gdzie moduł tensora deformacji zdefiniowany jest jako $|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{0.5}$, C_s jest to stała Smagorinskiego, natomiast Δ to rozmiar siatki numerycznej w LES.

Odminną grupą podejścia do zagadnienia burzliwości są modele z grupy RANS, jednak te nie są dostępne w pakiecie FDS.

Model spalania.

Model spalania w pakiecie FDS bazuje na tzw. modelu spalania mieszaniny frakcji (Mixture Fraction Combustion Model). W modelu tym zakłada się że wielkoskalowe procesy, takie jak transport konwekcyjny i promieniowanie, mogą zostać zamodelowane bezpośrednio natomiast zjawiska zachodzące na małych skalach muszą zostać przybliżone. Zakłada się więc, że proces spalania jest w głównej mierze kontrolowany poprzez mieszanie się składników (w programie operuje się pojęciem mieszaniny frakcji zdefiniowanej na podstawie masowych udziałów substancji). Zakłada się przy tym, że sam proces spalania jest tak szybki, że tlen i paliwo nie mogą istnieć jednocześnie w komórce obliczeniowej. To z kolei pozwala na zdefiniowanie powierzchni płomienia.

Proces spalania dowolnego węglowodorowego paliwa jest reprezentowany przez następującą formułę:



Gdzie ν są to współczynniki stechiometryczne substratów i produktów spalania.

Mieszanina frakcji jest zdefiniowany jako funkcja udziałów masowych:

$$Z = \frac{sY_F - (Y_O - Y_O^\infty)}{sY_F^1 + Y_O^\infty} \quad \text{gdzie} \quad s = \frac{\nu_O M_O}{\nu_F M_F}$$

Y_F i Y_O - udziały masowe paliwa i tlenu w mieszaninie

Y_O^∞ - tlenu w otaczającym powietrzu

Y_F^1 - udziały masowe paliwa w strumieniu paliwa

M_F i M_O - masy molowe paliwa i tlenu

Z jest równe 1 gdy w rozpatrywanej objętości mieszaniny obecne jest tylko paliwo natomiast $Z=0$ gdy jest tylko czyste powietrze. Udział sadzy jest wykorzystywany przy określeniu zasięgu widzialności i jest zależny od rodzaju paliwa w rozpatrywanym scenariuszu pożaru ([5], teoria w [9]).

Poprawne zdefiniowanie modelu spalania wymaga bardzo dokładnych siatek numerycznych, z którymi z kolei związany jest bardzo duży koszt obliczeniowy. W symulacjach prezentowanych w tym raporcie jest wykorzystywana bardziej uproszczona wersja modelowania spalania. Założone są mianowicie rodzaj i moc źródła na podstawie której szacowany jest strumień masowy produktów spalania. Transport poszczególnych produktów odbywa się natomiast w sposób identyczny jak w modelu spalania mieszaniny frakcji. Jest to typowe rozwiązanie w sytuacji gdy rozmiar rozpatrywanej domeny jest duży a źródło ognia może być opisane przez wiarygodną charakterystykę.

Promieniowanie

Równanie transportu dla absorbującego/emitującego i rozpraszającego medium ma następującą postać:

$$s \cdot \nabla I_\lambda(\mathbf{x}, s) = -[\kappa(\mathbf{x}, \lambda) + \sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)] I_\lambda(\mathbf{x}, s) + B(\mathbf{x}, \lambda) + \frac{\sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s') I_\lambda(\mathbf{x}, s') d\Omega'$$

gdzie:

$I_\lambda(\mathbf{x}, s)$ - jest to natężenie promieniowania dla fali o długości λ

s - wektor kierunku natężenia

$\kappa(\mathbf{x}, \lambda)$ - lokalny współczynnik absorpcji

$\sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)$ - lokalny współczynnik rozproszenia

$B(\mathbf{x}, \lambda)$ - emisyjność źródła

Gdy mamy do czynienia z gazem nie rozpraszającym równanie transportu redukuje się do postaci:

$$s \cdot \nabla I_\lambda(\mathbf{x}, s) = \kappa(\mathbf{x}, \lambda) [I_b(\mathbf{x}) - I_\lambda(\mathbf{x}, s)]$$

gdzie $I_b(\mathbf{x})$ to człon źródłowy otrzymany z funkcji Plancka

W praktyce nie jest możliwe wyznaczenie pełnego widma promieniowania, dlatego też całe widmo je podzielone na pasma, dla których formułuje się osobne równania transportu (gdzie N jest to liczba pasm):

$$\mathbf{s} \cdot \nabla I_n(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = \kappa_n(\mathbf{x}, \lambda) [I_{b,n}(\mathbf{x}) - I_n(\mathbf{x}, \mathbf{s})] \quad n = 1 \dots N$$

I_n jest w takim przypadku natężeniem promieniowania dla n -tego pasma

$\kappa_n(\mathbf{x}, \lambda)$ - jest to lokalny współczynnik absorpcji n -tego pasma

Człon źródłowy jest zdefiniowany w następujący sposób

$$I_{b,n} = F_n(\lambda_{\min} \lambda_{\max}) \sigma T^4 / \pi$$

σ - stała Stefana Boltzmanna

Wyznaczone natężenia promieniowania dla każdego rozpatrywanego pasma są następnie sumowane:

$$I(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = \sum_{n=1}^N I_n(\mathbf{x}, \mathbf{s})$$

Podstawowe parametry numeryczne.

Na domenę obliczeniową nałożona została strukturalna siatka numeryczna składająca się 1 280 000 komórek. Liczba komórek w kierunkach x , y i z wynosiła odpowiednio 250, 256, 20 co dawało rozmiary podstawowej komórki obliczeniowej 0,2x0,2x0,12 m. Krok czasowy symulacji był automatycznie dostosowywany bazując na liczbie CFL i przy silnym wzroście prędkości wahał się w zakresie 0,009-0,04 sekundy symulowanego czasu. Całkowity czas rzeczywisty pojedynczej symulacji dwunastu minut pożaru wyniósł około 150 godzin, a 25 minut około 260 godzin pracy komputera z procesorem dwu-rdzeniowym Pentium 3,2GHz.

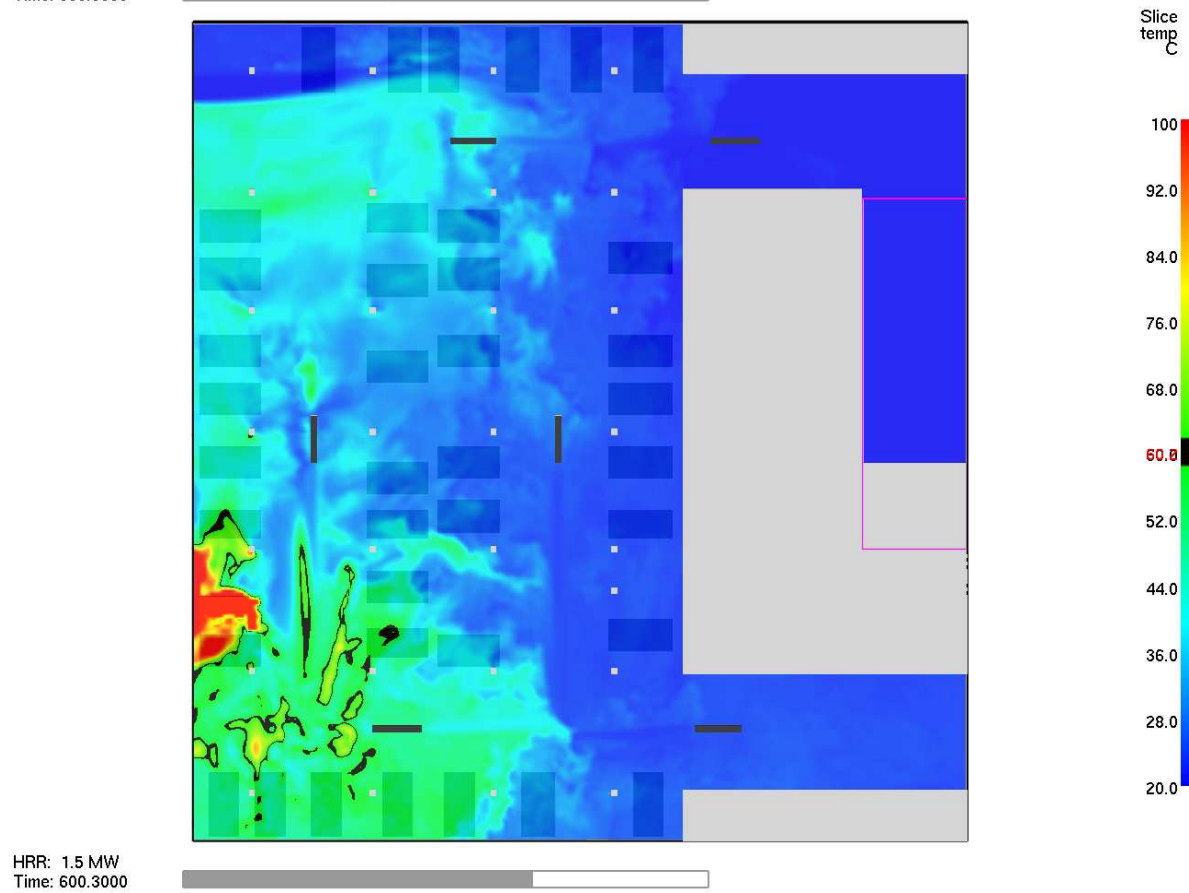
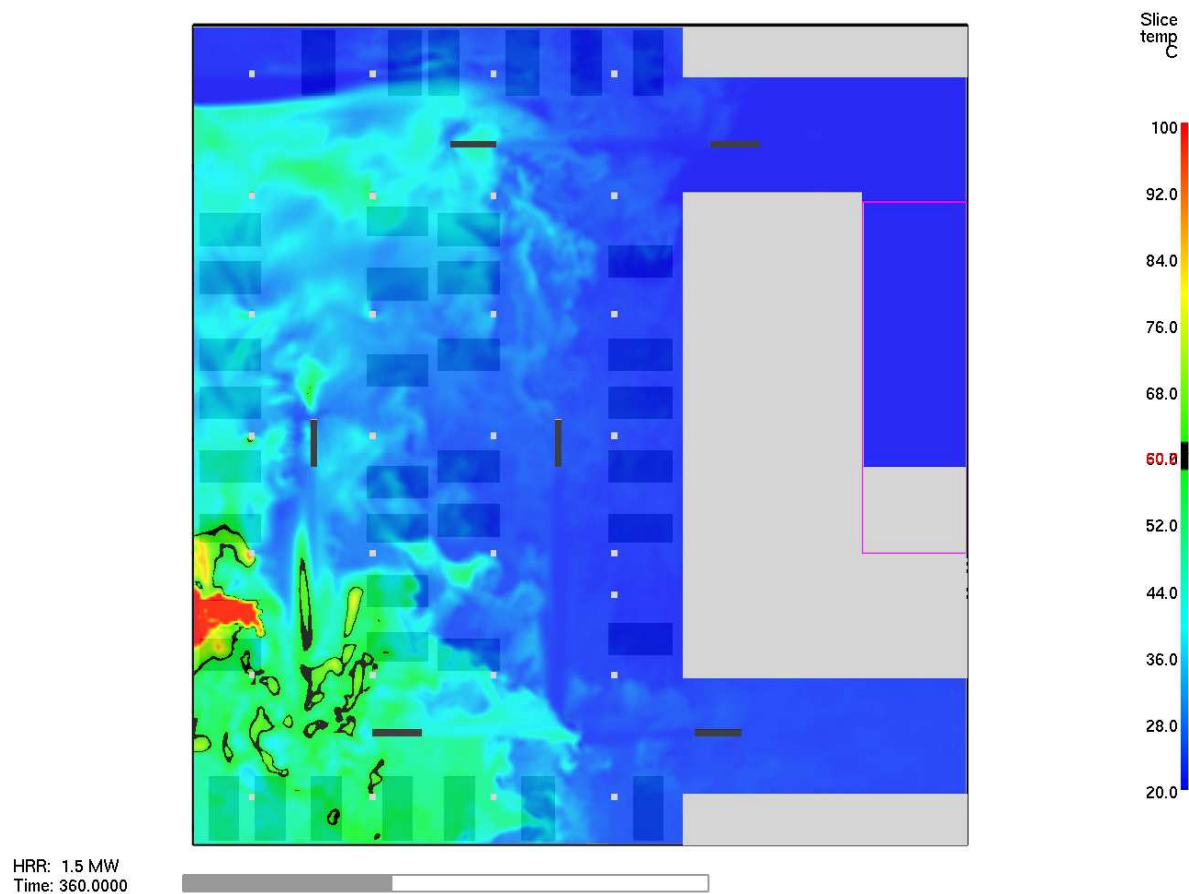
7. Analiza otrzymanych wyników.

Scenariusz 1 (Sc1)

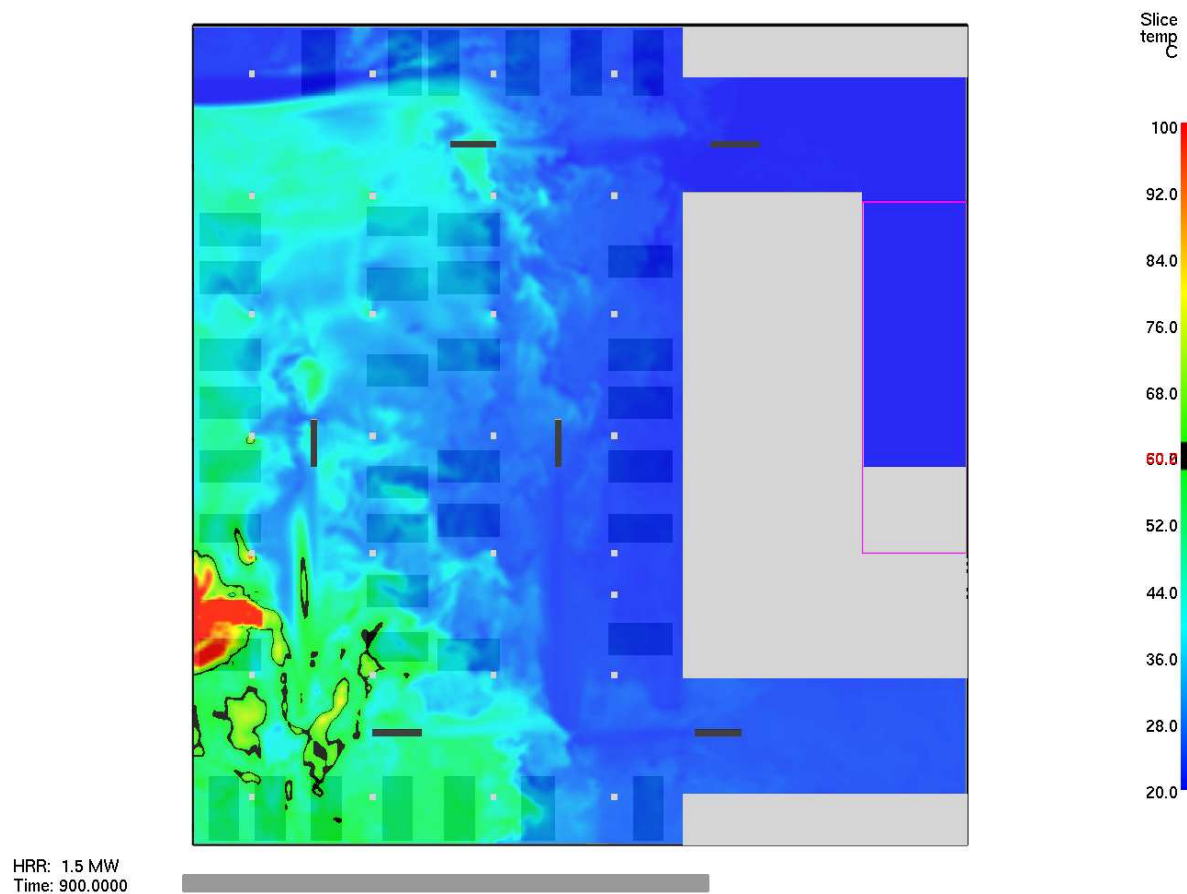
Rysunki od 7 do 16 ilustrują poszczególne fazy pożaru i pracę wentylatorów w scenariuszu Sc1. W scenariuszu tym pożar zlokalizowany jest na kondygnacji '-1' natomiast wentylator W1 pracuje jako wyciąg a W2 jako nawiew. Na każdym rysunku zaznaczona jest moc pożaru w konkretnej chwili (HRR). Wnioski z wykonanej symulacji są następujące:

- Przez pełny czas symulacji 900 sekund na przejściach prowadzących do wyjść ewakuacyjnych temperatura nie przekracza wartości dopuszczalnej tj. 60 °C (rys. 7, 8, 15).
- Konfiguracja urządzeń wentylacyjnych zapewnia ograniczenie zadymienia i jego akumulację w obszarze stanowisk samochodów w pobliżu źródła ognia. Jest to korzystne z punktu widzenia ekip straży pożarnej, gdyż ułatwia lokalizację pożaru. Zasięg widzialności utrzymuje się na założonym poziomie powyżej 10 metrów (rys. 9, 10 i 16).
- Żadna z klatek nie zostaje wyłączona z użytku przez pełny czas symulacji (dwa razy dłuższy niż czas ewakuacji)

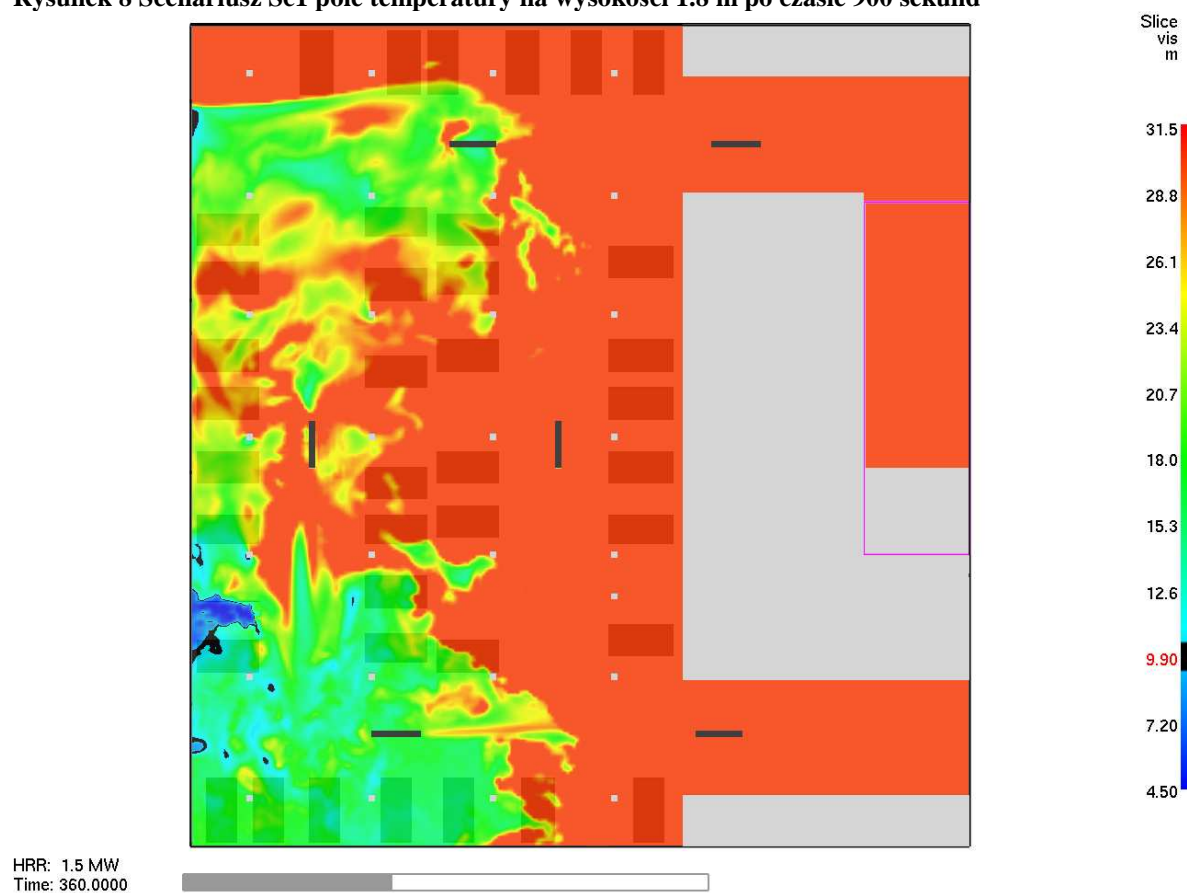
- Największa prędkość jest obserwowana w osi wentylatorów strumieniowych to około 8 m/s na dystansie 5m od wylotu. Na wysokości człowieka prędkość w pobliżu wentylatorów strumieniowych nie przekracza 5 m/s. Rysunek 11 przedstawia wartości składowych prędkości U_x i V_y w płaszczyźnie osiowej wentylatorów strumieniowych (2.2 metry od podłoża).
- Symulacja wykazała że spadek koncentracji tlenu ma miejsce w bezpośredniej bliskości źródła ognia (na poziomie 18% w pobliżu źródła ognia – rys. 12).
- Nie zarejestrowano też znaczącego wzrostu koncentracji CO_2 (około 1% bezpośrednio nad źródłem ognia; 0,28% do 5m od źródła) (rys. 13).
- Koncentracja CO w przeprowadzonej symulacji nie osiągnęła groźnego stężenia. Jednak ze względu na pewne ograniczenia związane z dokładnością modelowania reakcji chemicznych te dane należy traktować bardziej jako jakościową analizę pokazującą kierunki rozprzestrzeniania się CO niż analizę ilościową (rys. 14).
- Porównanie temperatur pod stropem bezpośrednio nad płonącym samochodem otrzymanych w różnych symulacjach ilustruje zbiorczy rysunek 64. Po 900 sekundach średnia temperatura pod stropem to około 220 °C jedynie lokalnie uzyskując 260°C.



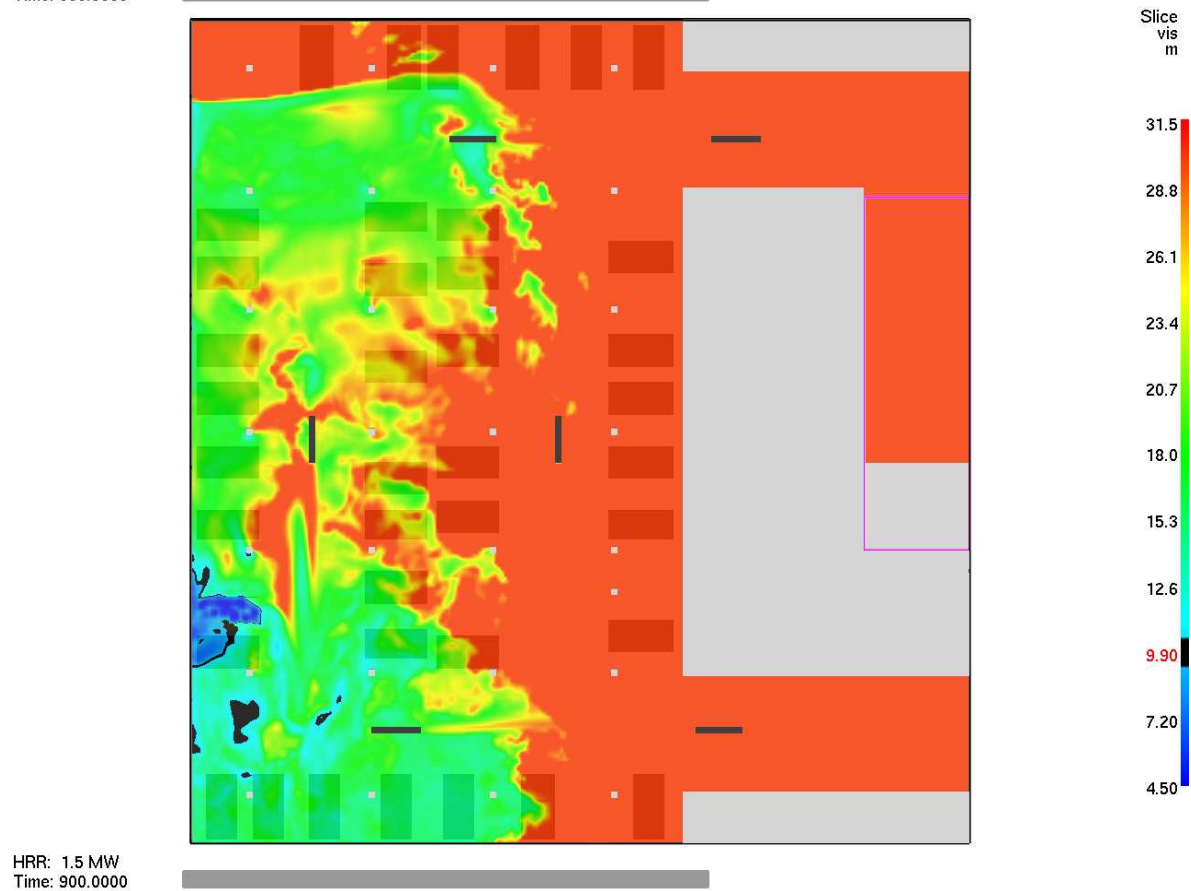
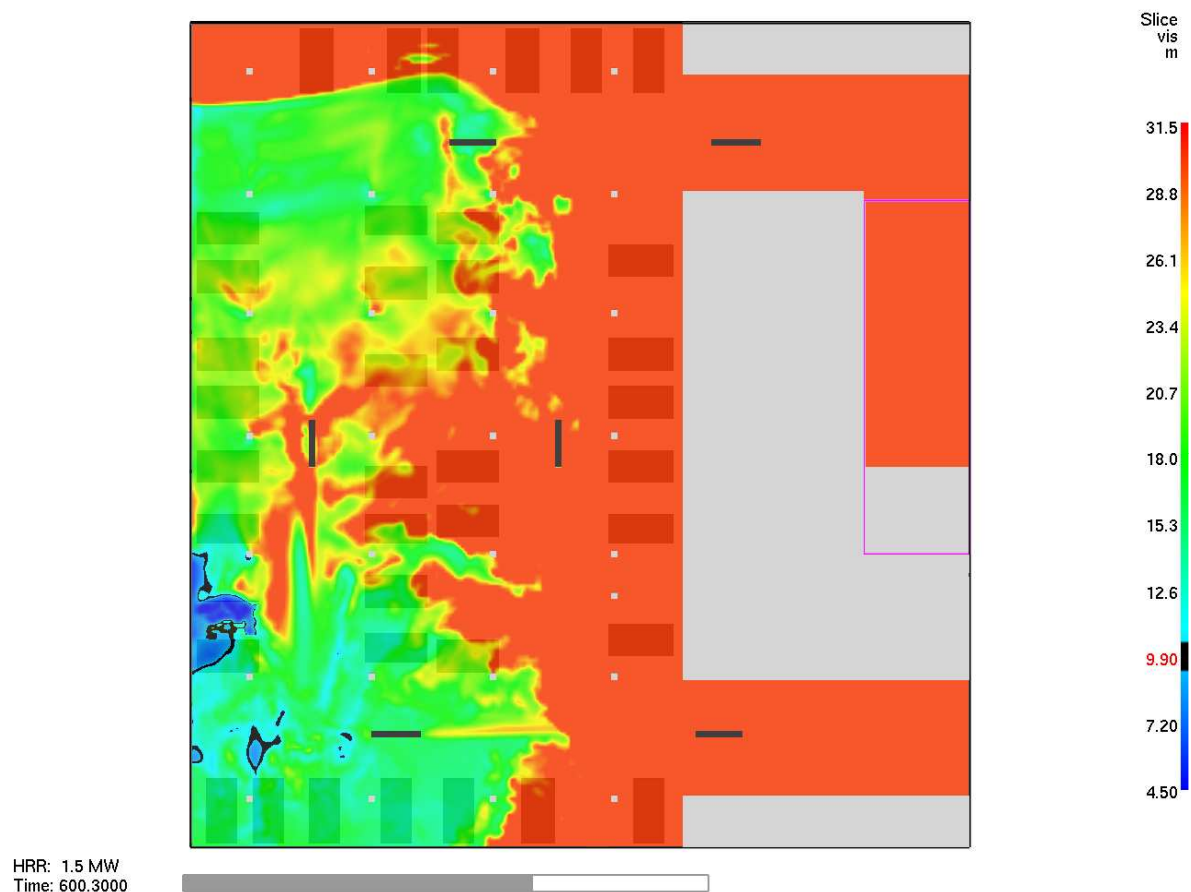
Rysunek 7 Scenariusz Sc1 pole temperatury na wysokości 1.8 m po czasie 360 i 600 sekund



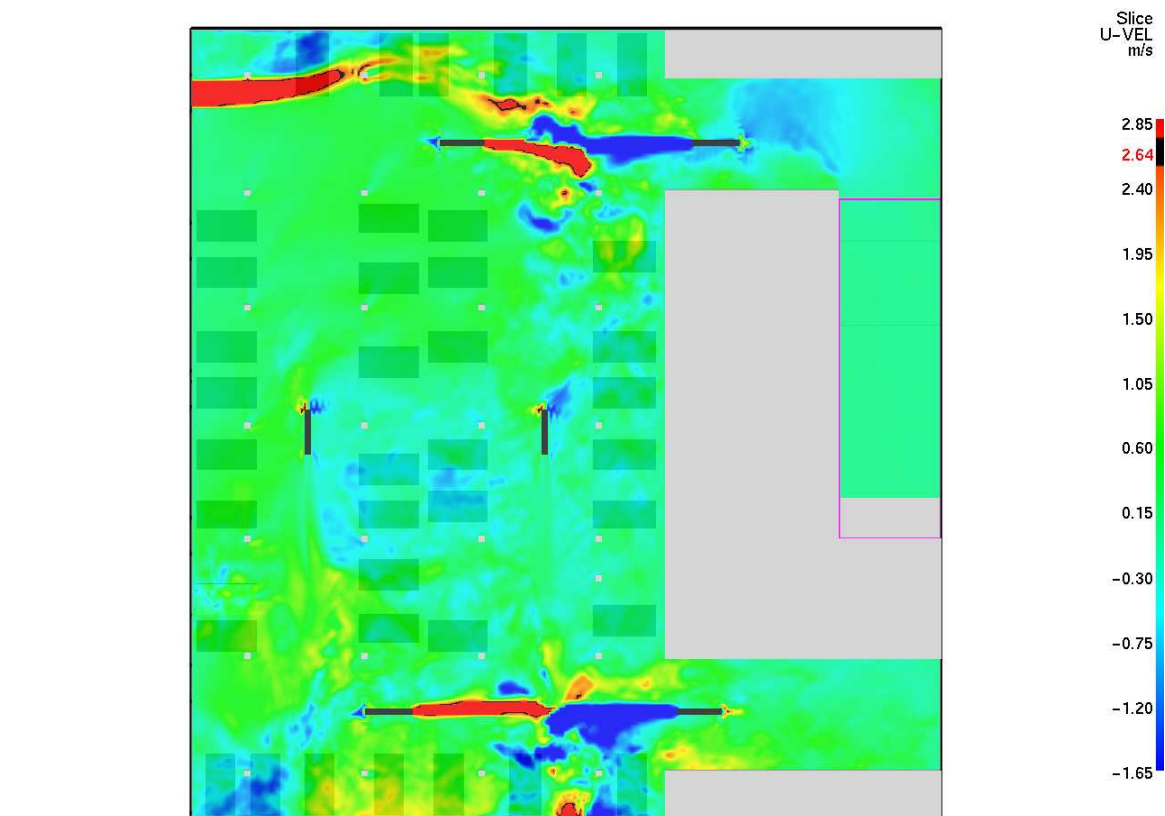
Rysunek 8 Scenariusz Sc1 pole temperatury na wysokości 1.8 m po czasie 900 sekund



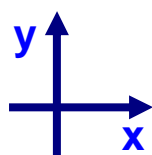
Rysunek 9 Scenariusz Sc1 zasięg widzialności na wysokości 1.8 m po czasie 360 sekund



Rysunek 10 Scenariusz Sc1 zasięg widzialności na wysokości 1.8 m po czasie 600 i 900 sekund

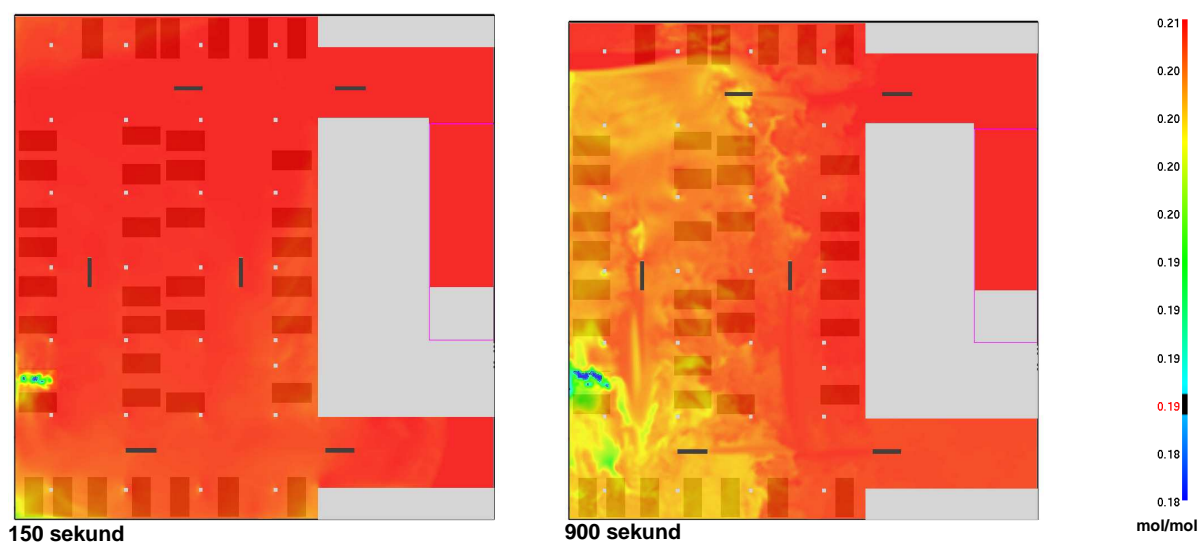


HRR: 1.5 MW
 Time: 898.2

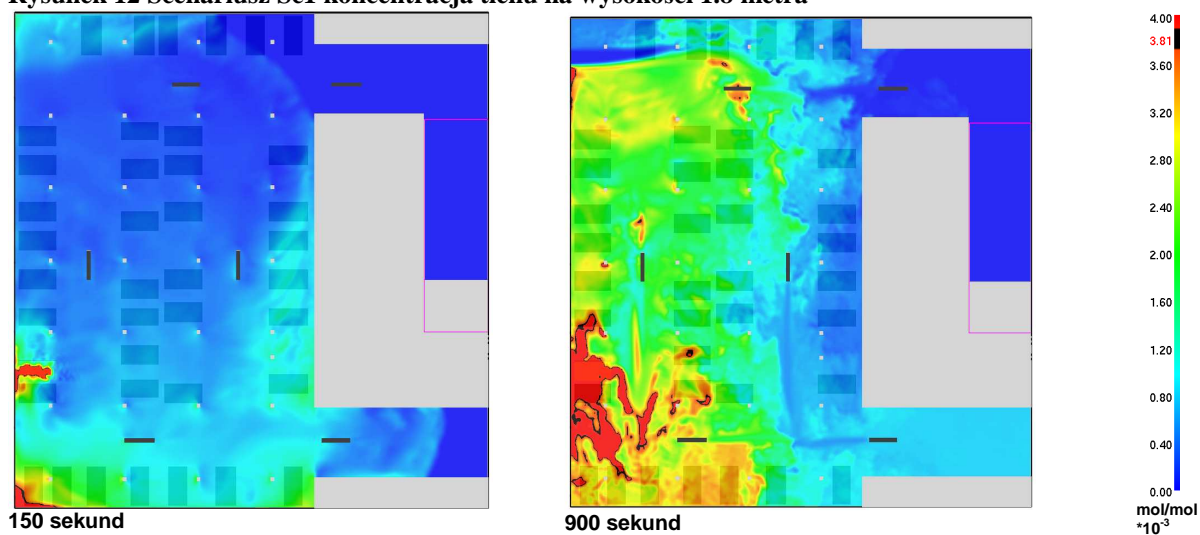


HRR: 1.5 MW
 Time: 898.2

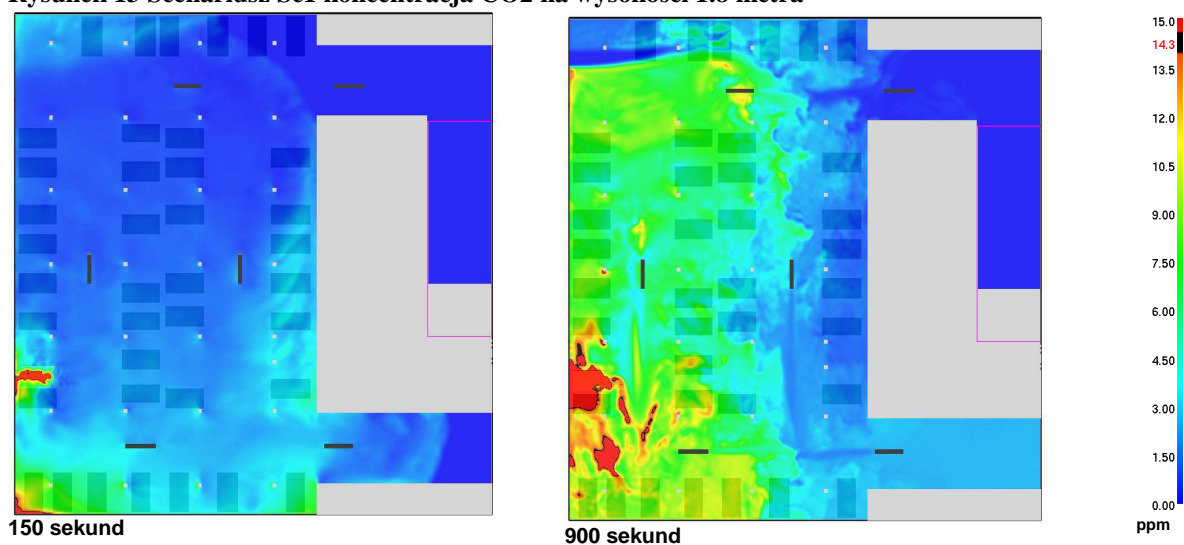
Rysunek 11 Scenariusz Sc1 prędkości U_x i V_y na wysokości 2.2 m w płaszczyźnie osiowej xy wentylatorów strumieniowych po czasie 900 sekund



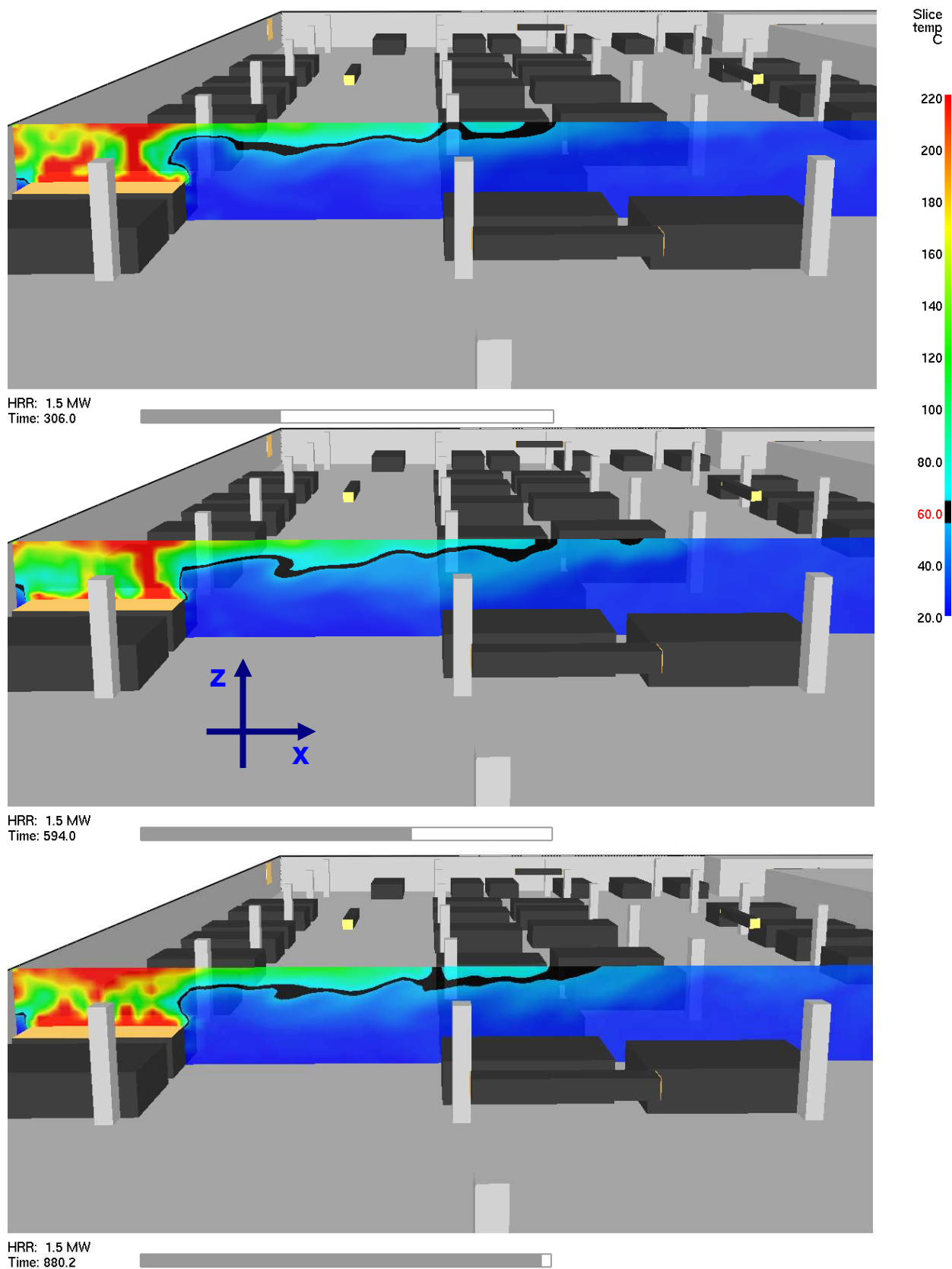
Rysunek 12 Scenariusz Sc1 koncentracja tlenu na wysokości 1.8 metra



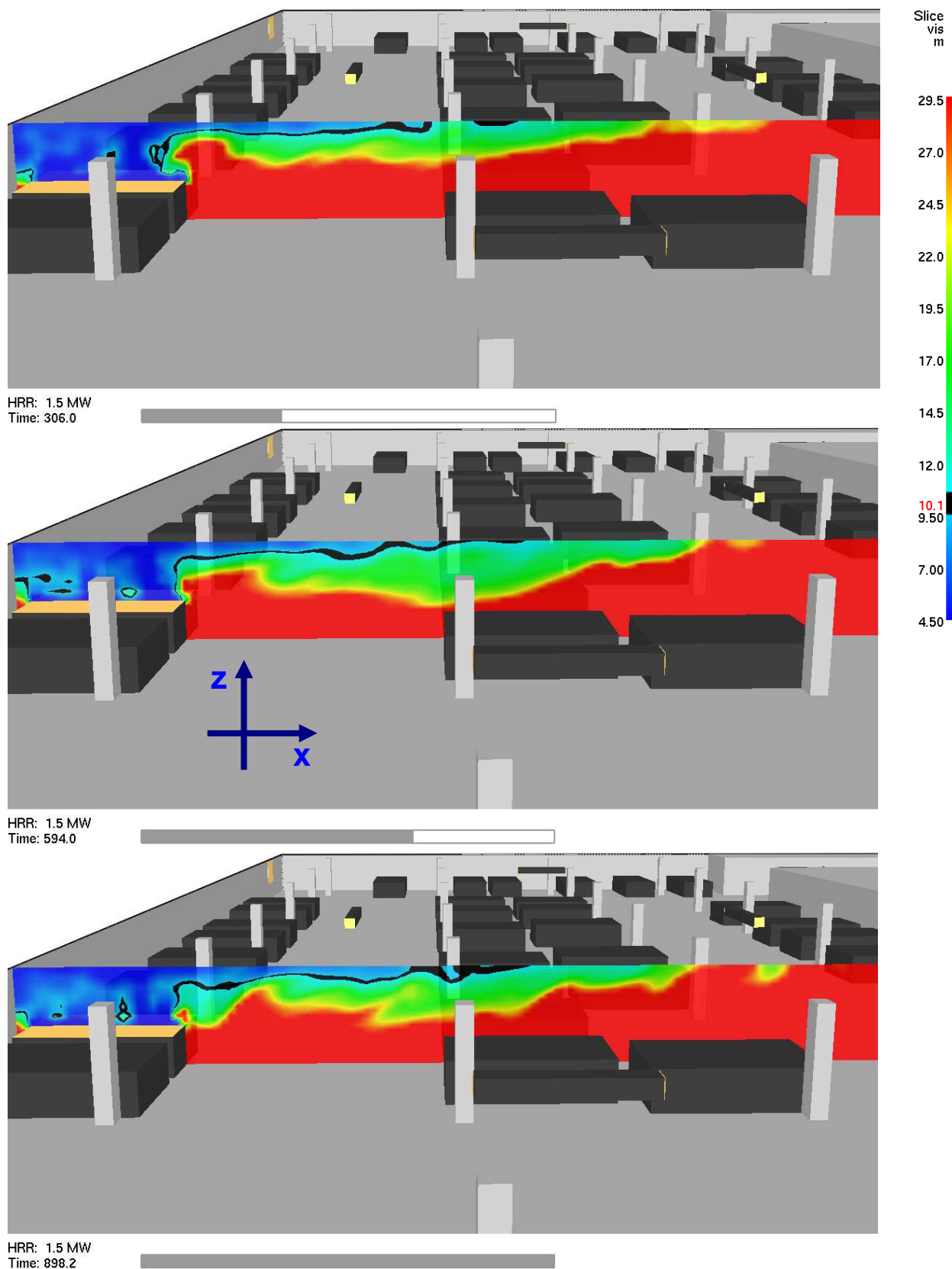
Rysunek 13 Scenariusz Sc1 koncentracja CO2 na wysokości 1.8 metra



Rysunek 14 Scenariusz Sc1 koncentracja CO na wysokości 1.8 metra



Rysunek 15 Scenariusz Sc1 pole temperatury w płaszczyźnie osiowej zx płonącego samochodu po czasie (od góry) 300, 600 i 900 sekund



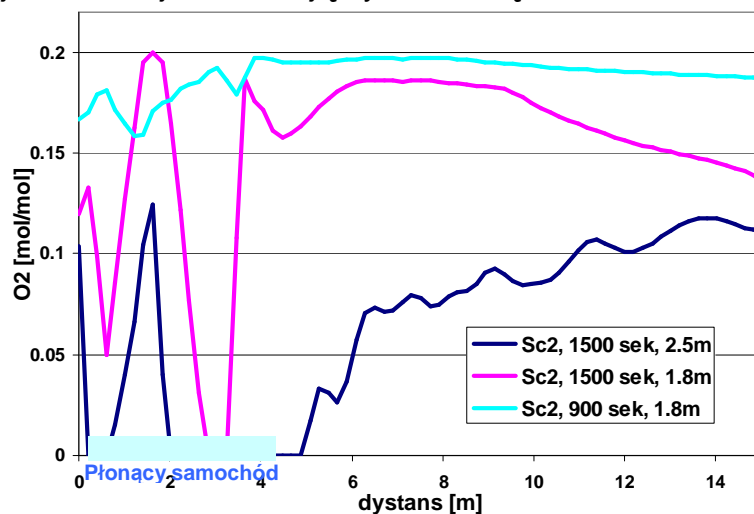
Rysunek 16 Scenariusz Sc1 zasięg widzialności w płaszczyźnie osiowej zx płonącego samochodu po czasie (od góry) 300, 600 i 900 sekund

Scenariusz 2 (Sc2)

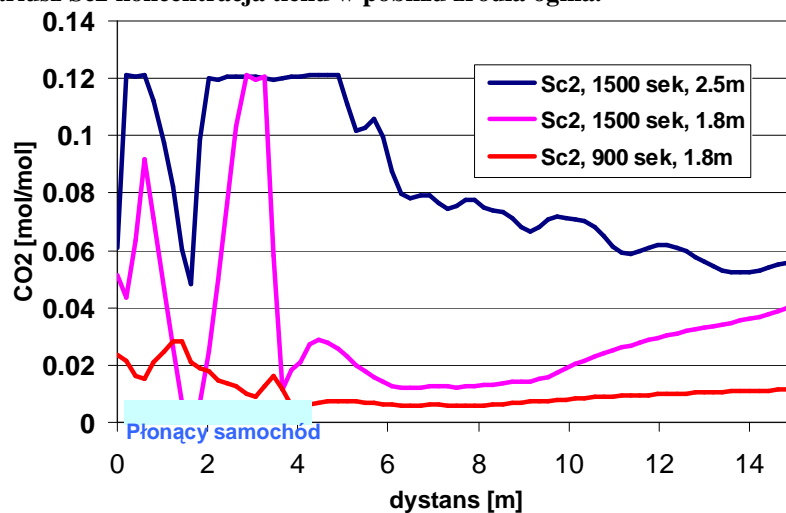
Rysunki od 17 do 32 przedstawiają poszczególne fazy pożaru i pracę pożarowej instalacji wentylacyjnej w scenariuszu Sc2. W tym scenariuszu symulowany czas został wydłużony do 1500 sekund, co pozwoliło na ocenę skutków pożaru gdy jego moc osiąga 7 MW. Na każdym rysunku zaznaczona jest moc pożaru w danej chwili (HRR). Wnioski z wykonanej symulacji można podsumować w następujących punktach:

- Po czasie około 600 sekund, w pobliżu klatki E2, temperatura lokalnie może przekroczyć 60°C , jakkolwiek dojście do niej nie jest całkowicie odcięte. Wraz ze wzrostem mocy pożaru warunki ulegają pogorszeniu i po czasie 1200 sekund temperatura stopniowo się podnosi wyłączając klatkę z użytku (ze względu na kryterium temperaturowe). Niezależnie od tego, w pozostałej części garażu wentylacja skutecznie utrzymuje dobre warunki temperaturowe przez cały symulowany czas tj. 1500 sekund. Należy jednak pokreślić, że ewakuacja w pobliżu klatki E2 rozpocznie się najszybciej (rys. 20-22, 31).
- Zasięg widzialności w pobliżu klatki E2 zaczyna dość silnie obniżać się po około 600 sekundach jednak dojście do niej nie zostaje jeszcze odcięte. Po około 1100 sekundach zadymienie praktycznie wyłącza tę klatkę z użytku. W pozostałej części garażu wentylacja utrzymuje bardzo dobre warunki widzialności i skutecznie izoluje obszar objęty pożarem przez pełne 1500 sekund symulacji. Wentylacja strumieniowa zapewnia łatwą lokalizację pożaru jednostkom staży pożarnej (rys. 23-25, 32).
- Obserwowana prędkość w osi wentylatorów strumieniowych i na dystansie 5m od wylotu nie przekracza 7 m/s (rys. 26, 27). Na wysokości człowieka (1.8 m) utrzymuje się ona na poziomie 4-5 m/s.
- Istotny spadek koncentracji tlenu ma miejsce w bezpośredniej bliskości źródła ognia i wynosi około 18% po czasie 900 sekund (rys. 28, rys. 17).
- Po czasie 900 sekund koncentracja CO_2 bezpośrednio nad źródłem ognia osiągnęła około 2% natomiast po 1500 sekund średnio 8%. W odległości ok. 15 metrów od źródła po czasie 900 sekund koncentracja wynosiła 0.5-1.0 % a po 1500 sekund około 2-4% (rys. 29 i rys. 18).
- Koncentracja CO w przeprowadzonej symulacji nie osiągnęła groźnego stężenia do czasu 900 sekund. Wraz ze wzrostem mocy pożaru koncentracja CO osiąga niebezpieczne wartości. Jednak ze względu na pewne ograniczenia związane z dokładnością modelowania reakcji chemicznych te dane należy traktować bardziej jako jakościową analizę pokazującą kierunki rozprzestrzeniania się konkretnej substancji niż analizę ilościową (rys. 30). Uwaga ta również dotyczy, jakkolwiek w mniejszym stopniu, koncentracji O_2 i CO_2 .
- Porównanie temperatury pod stropem bezpośrednio nad płonącym samochodem dla różnych scenariuszy po czasie 900 sekund ilustruje rys. 64. Temperatura waha się w granicach 390°C osiągając lokalnie co najwyżej 450°C . Po czasie 1500 sekund temperatura pod stropem utrzymuje się średnio na poziomie około 830°C , jakkolwiek lokalnie może osiągnąć 950°C .
- Symulacja wykazała że po czasie 1500 sekund temperatura na wysokości około 1.5m (wysokość samochodu) w pobliżu samochodu wynosi średnio 110°C co pozwala przypuszczać, że do tego czasu nie powinno nastąpić przeniesienia ognia na sąsiednie samochody (rys.65).
- Po czasie 1500 sekund temperatura na wysokości 1.8m, wzdłuż przejazdu nad którym umieszczone są wentylatory strumieniowe S1 i S2, waha się na

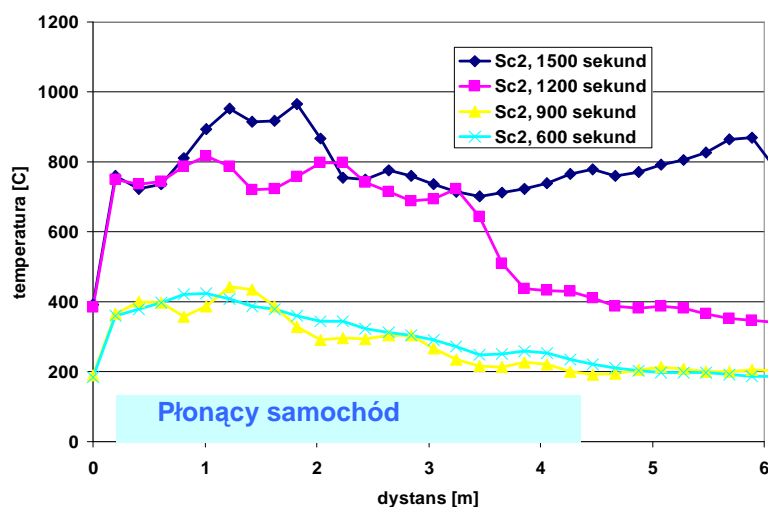
poziomie 30-40°C. Zasięg widzialności natomiast jest pomiędzy 5 a 20 metrów (rys. 66 i rys. 67) co jest rezultatem znacznie korzystniejszym niż w przypadku wentylacji kanałowej z instalacją tryskaczową ze scenariusza 5.



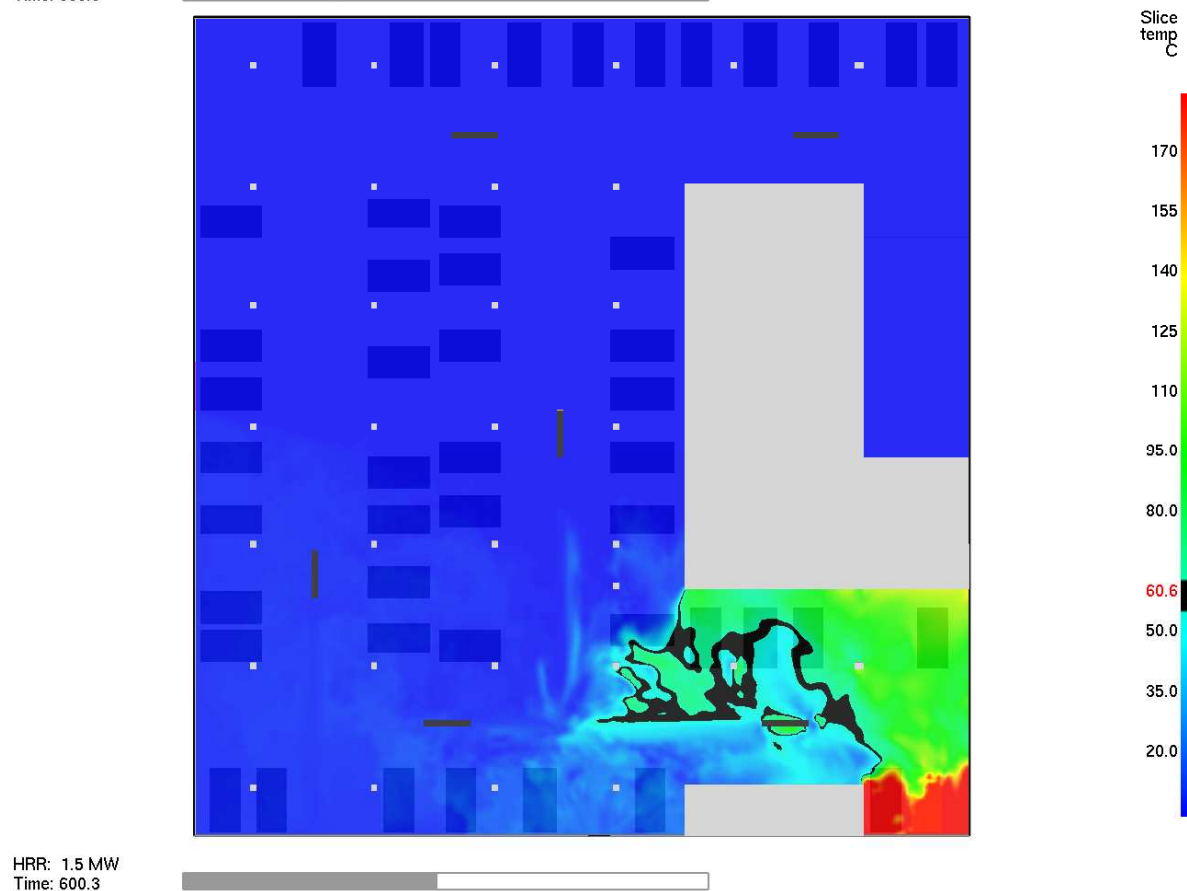
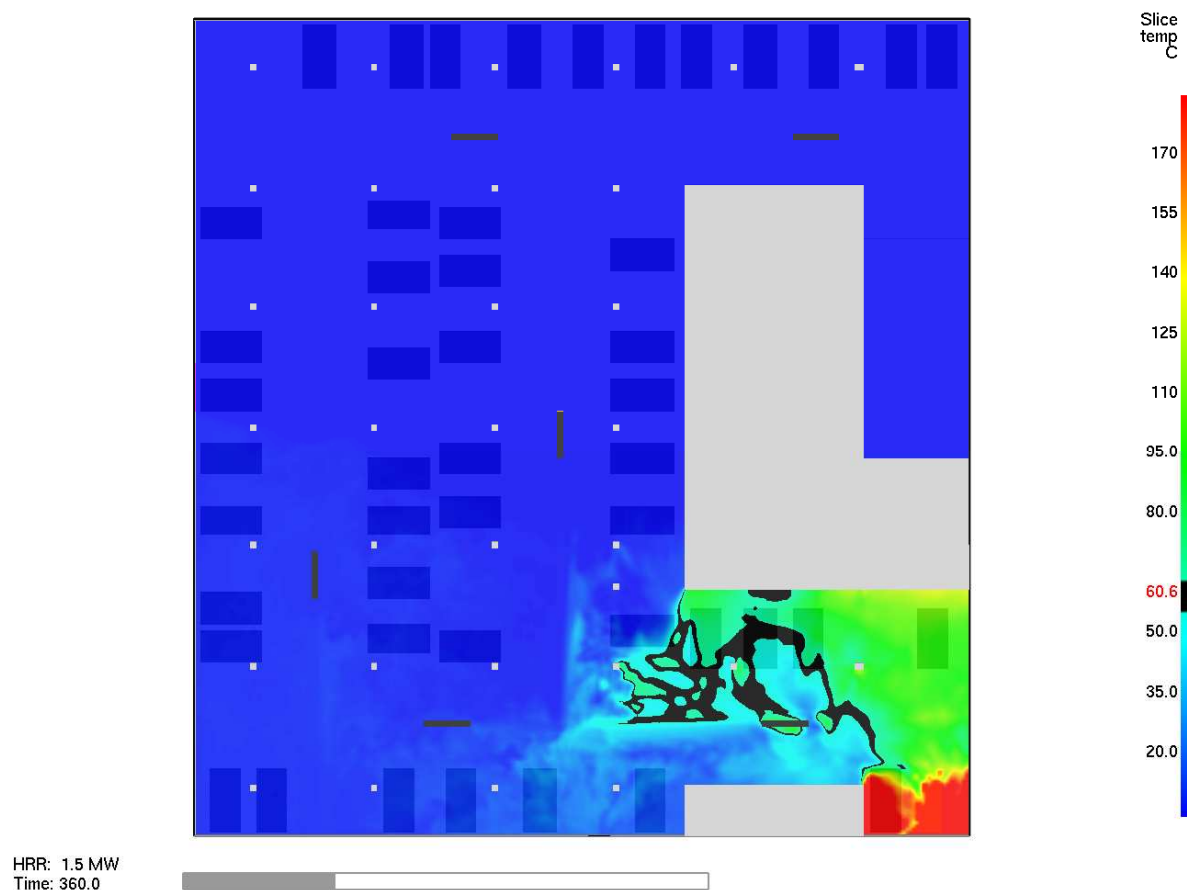
Rysunek 17 Scenariusz Sc2 koncentracja tlenu w pobliżu źródła ognia.



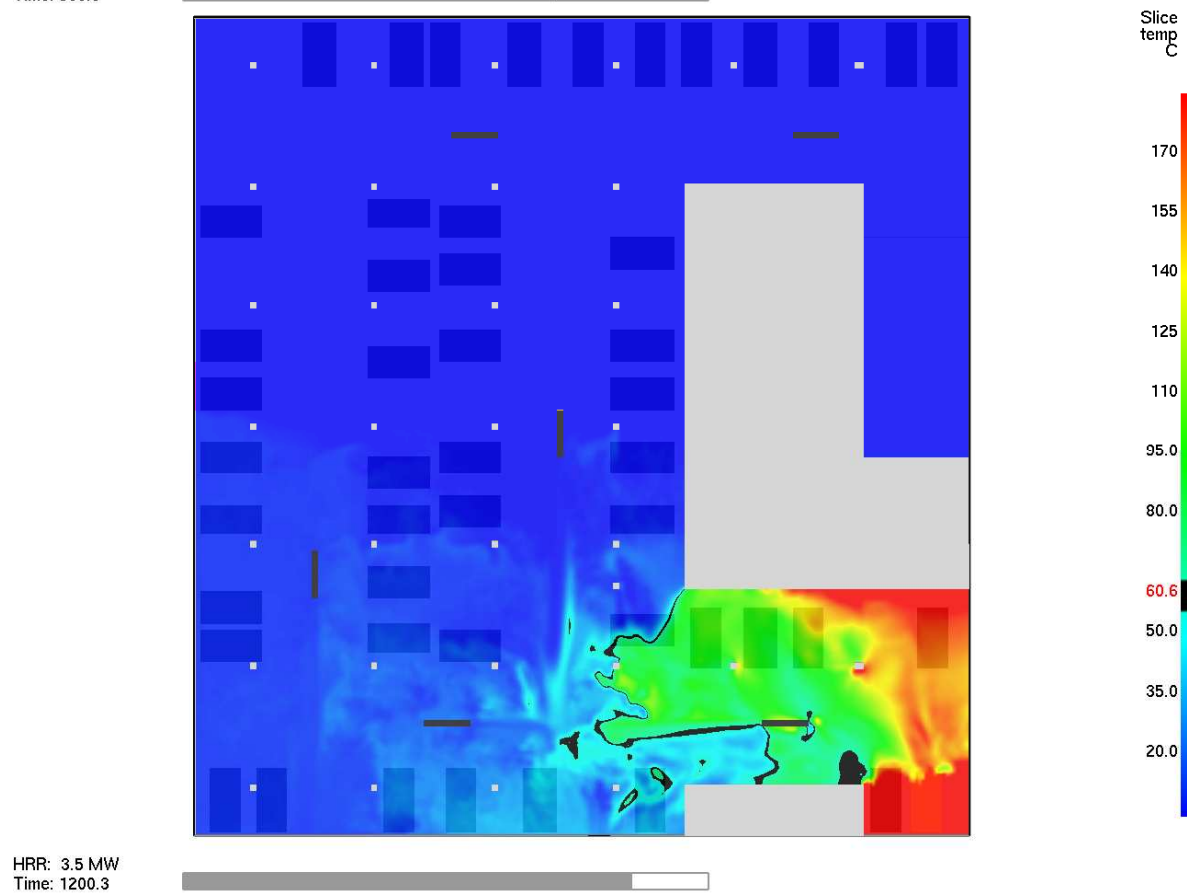
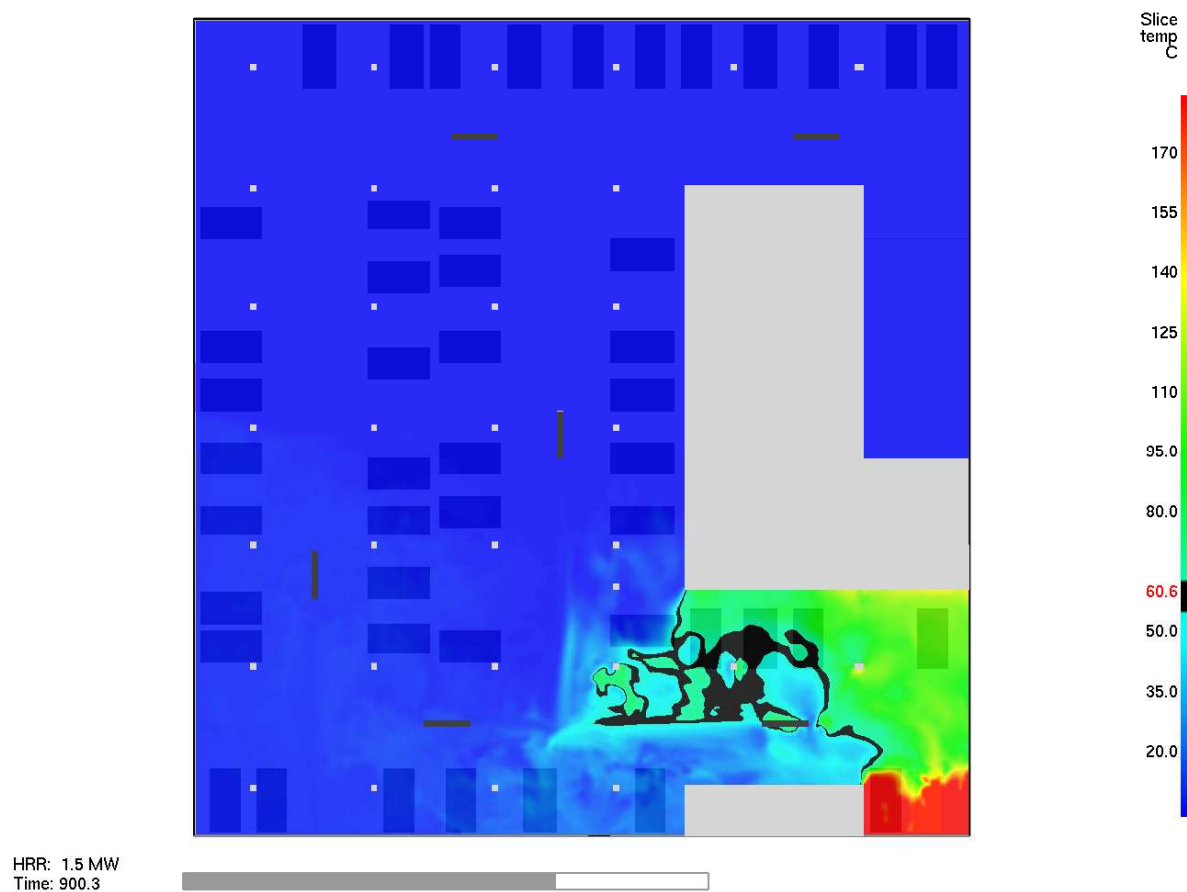
Rysunek 18 Scenariusz Sc2 koncentracja dwutlenku węgla w pobliżu źródła ognia.



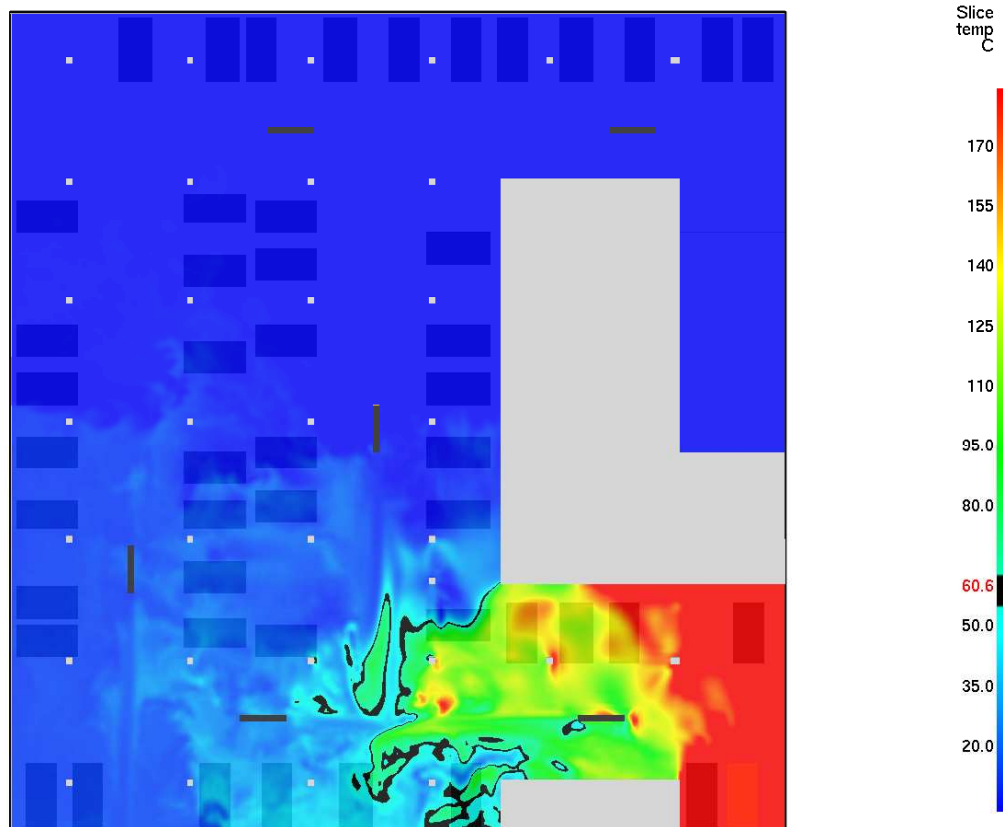
Rysunek 19 Scenariusz Sc2 temperatura pod stropem w płaszczyźnie osiowej samochodu.



Rysunek 20 Scenariusz Sc2 pole temperatury na wysokości 1.8 m po czasie 360 i 600 sekund

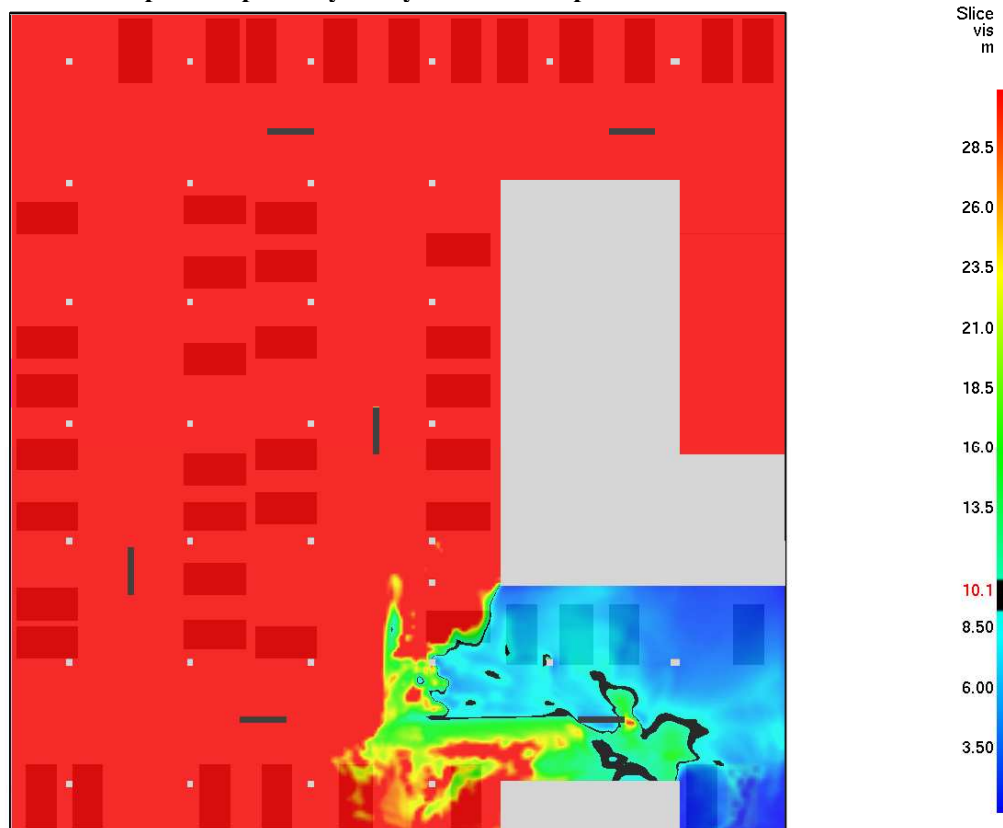


Rysunek 21 Scenariusz Sc2 pole temperatury na wysokości 1.8 m po czasie 900 i 1200 sekund



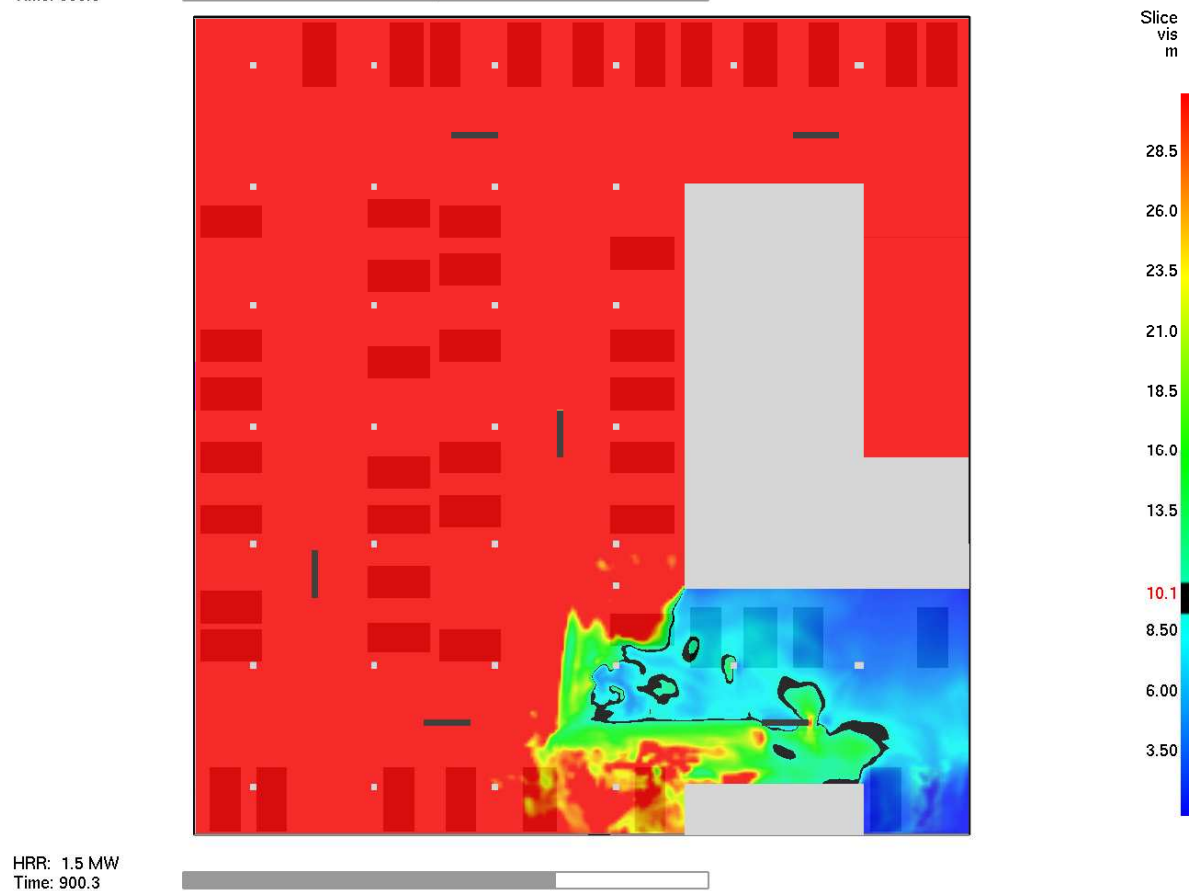
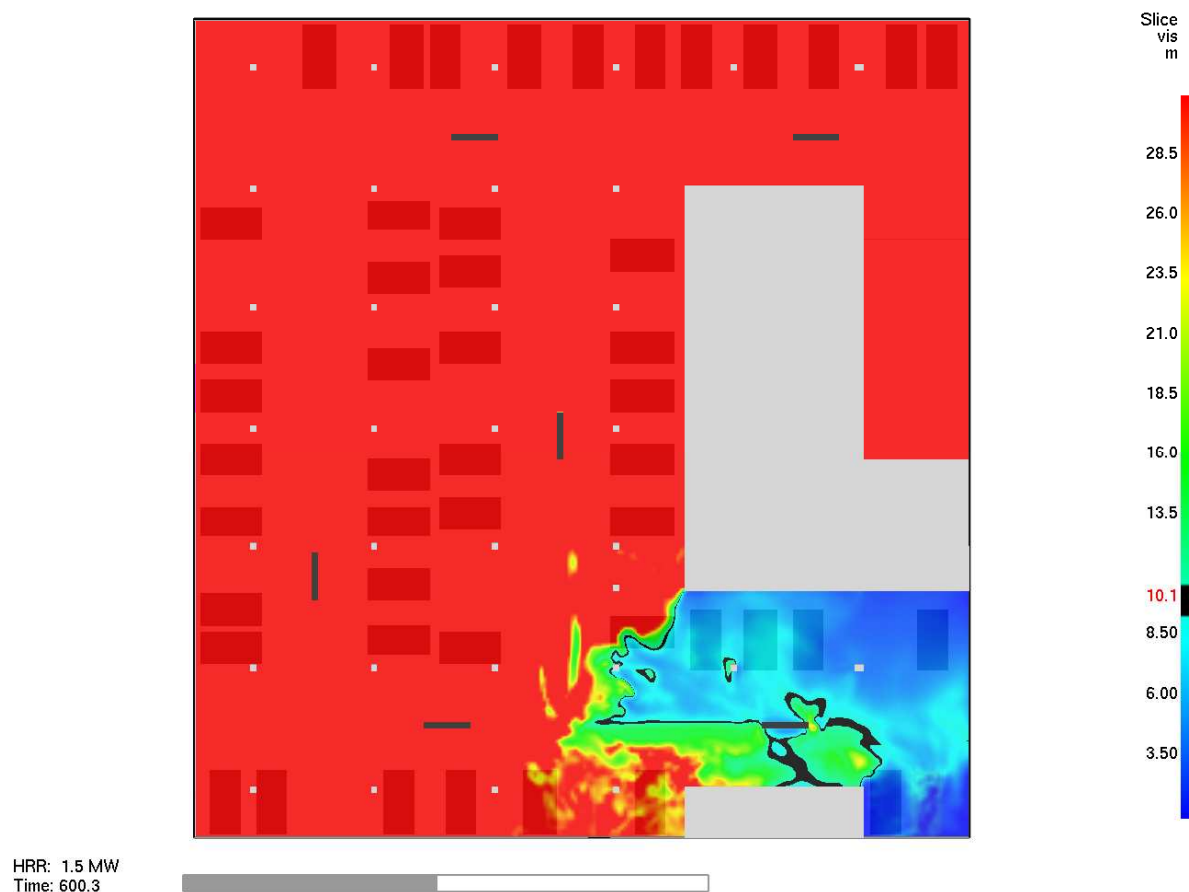
HRR: 6.9 MW
Time: 1498.8

Rysunek 22 Scenariusz Sc2 pole temperatury na wysokości 1.8 m po czasie 1500 sekund

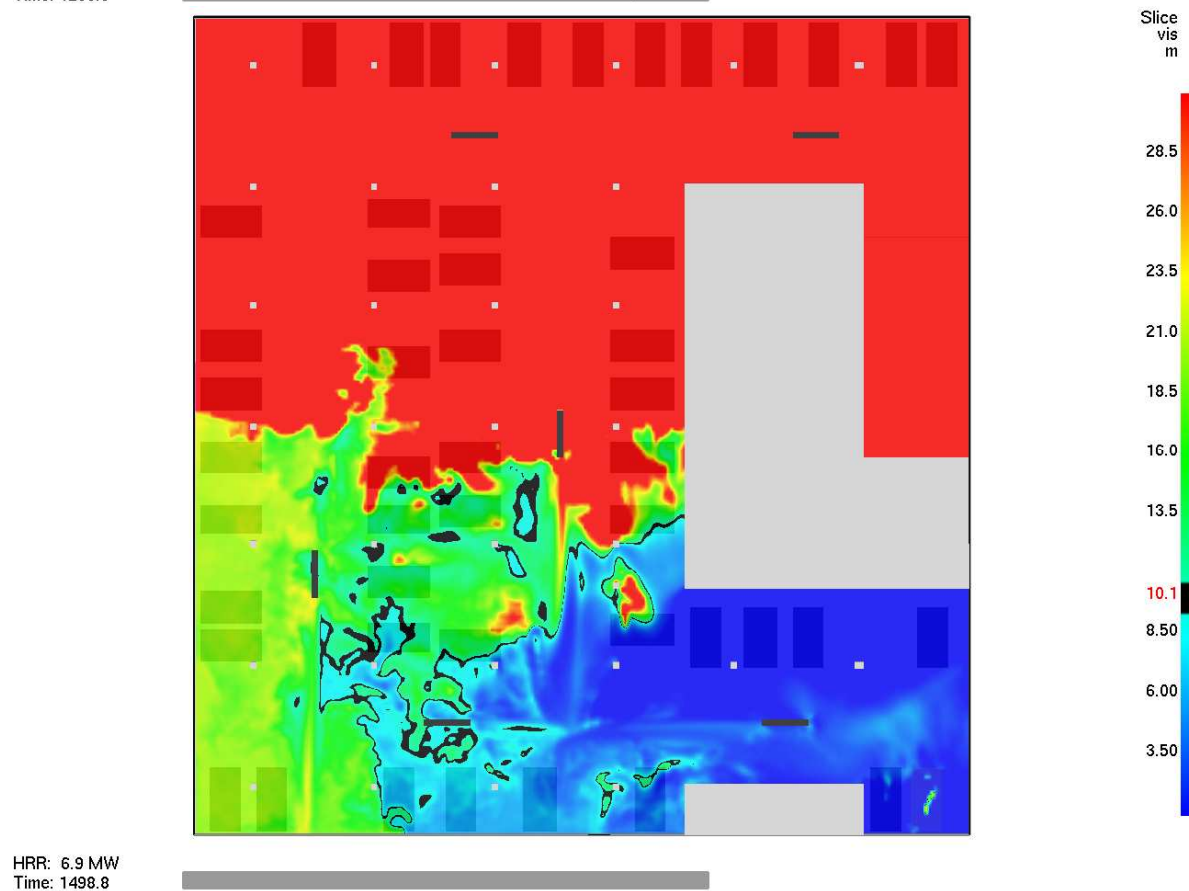
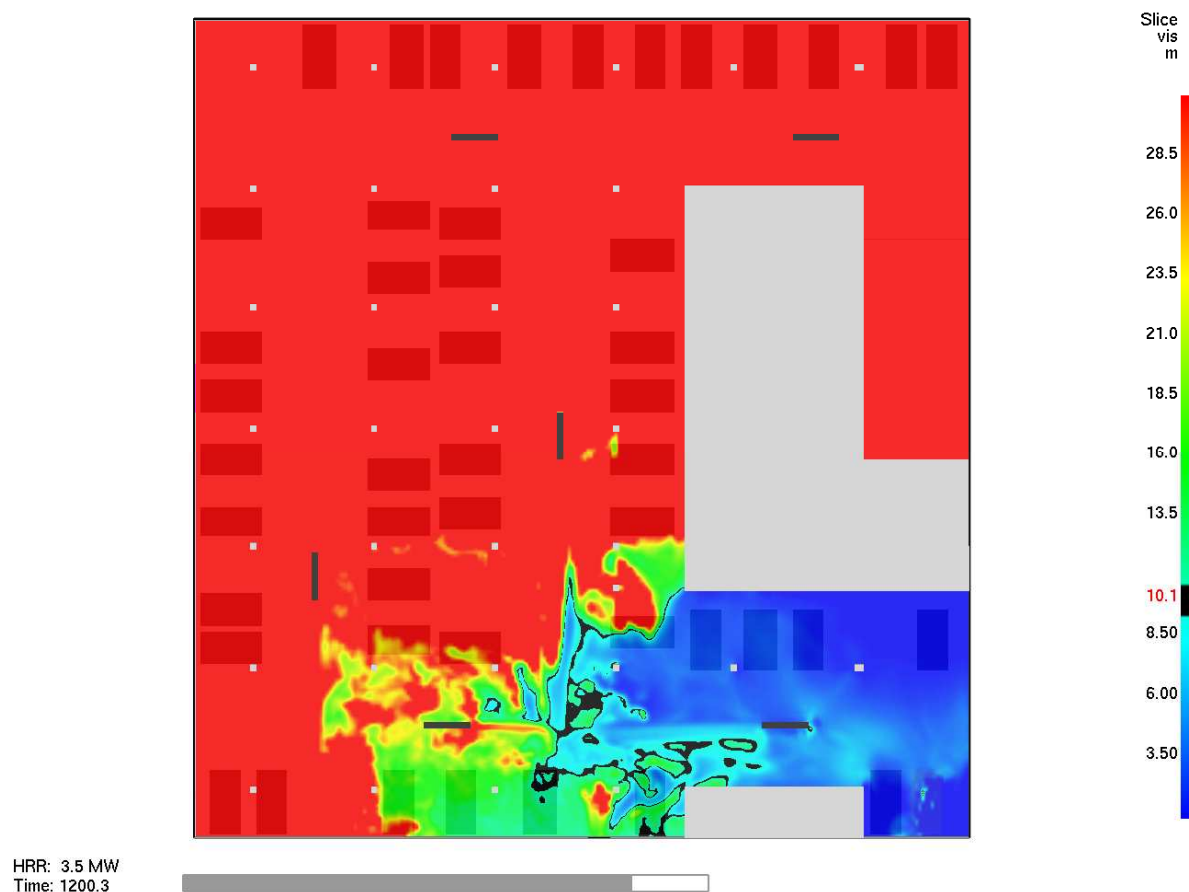


HRR: 1.5 MW
Time: 360.0

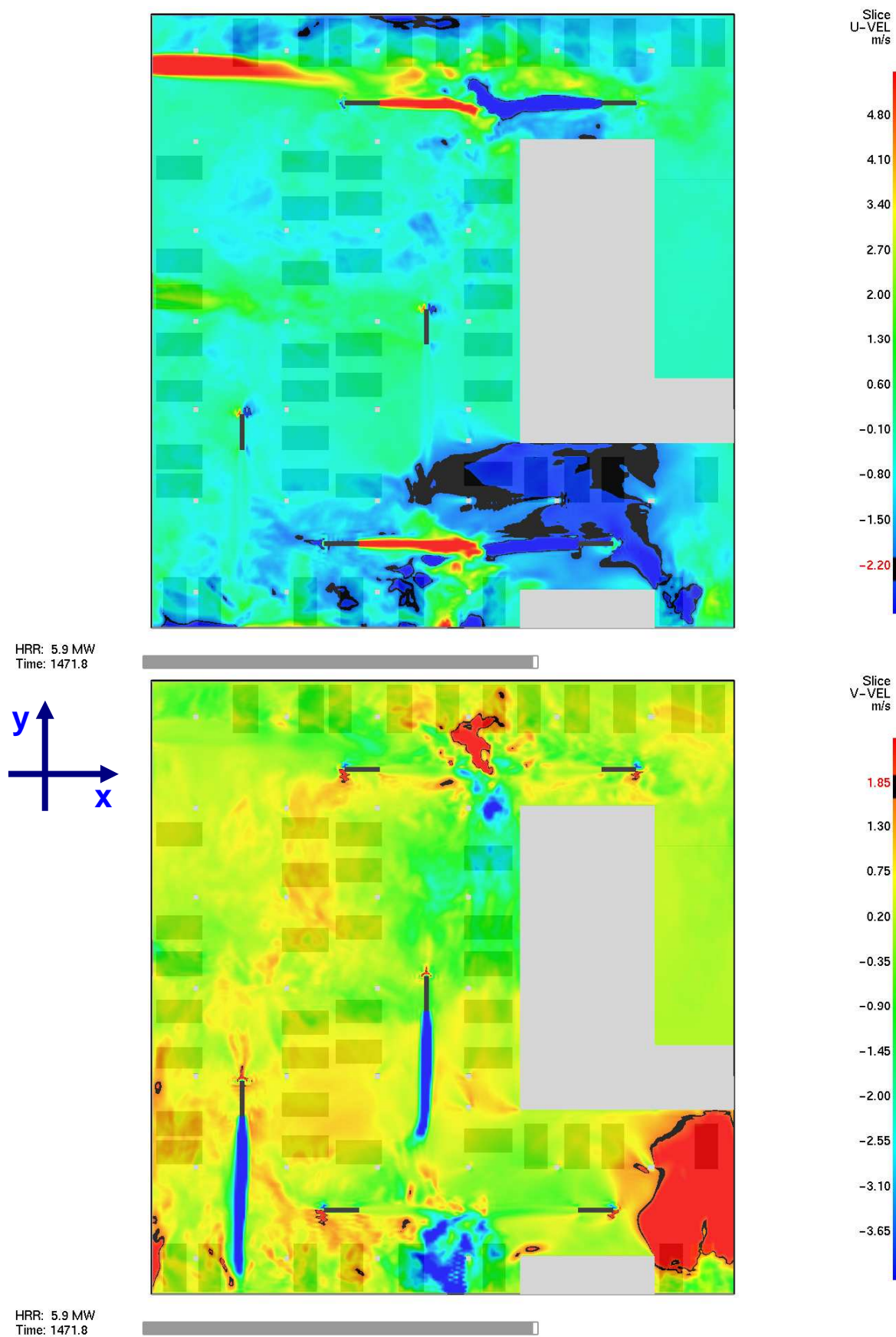
Rysunek 23 Scenariusz Sc2 zasięg widzialności na wysokości 1.8 m po czasie 360 sekund



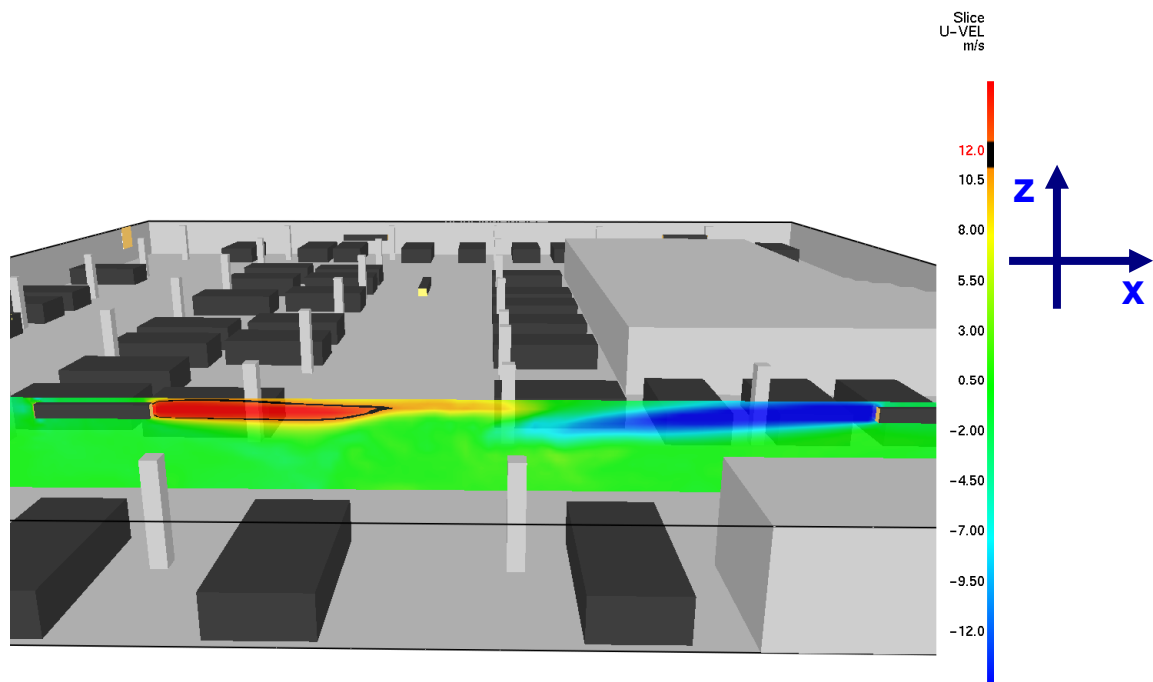
Rysunek 24 Scenariusz Sc2 zasięg widzialności na wysokości 1.8 m po czasie 600 i 900 sekund



Rysunek 25 Scenariusz Sc2 zasięg widzialności na wysokości 1.8 m po czasie 1200 i 1500 sekund

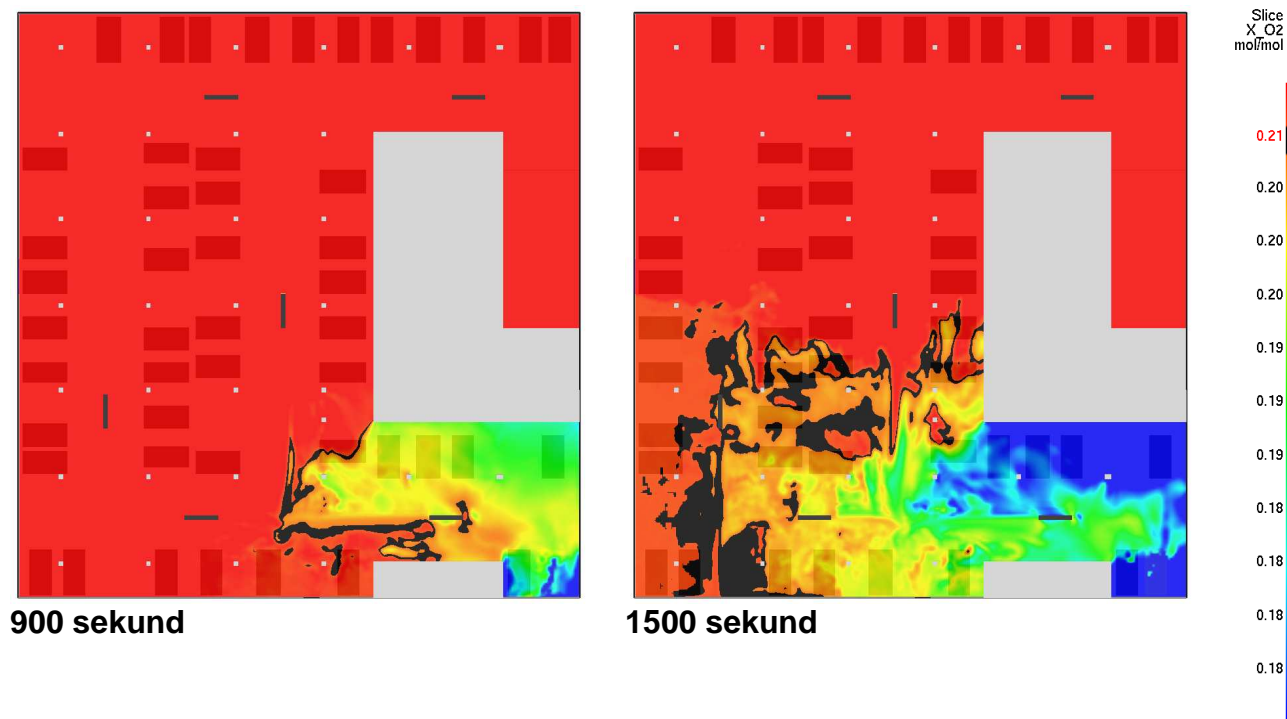


Rysunek 26 Scenariusz Sc2 prędkości U_x i V_y na wysokości 2.2 m w płaszczyźnie osiowej xy wentylatorów strumieniowych po czasie 1500 sekund

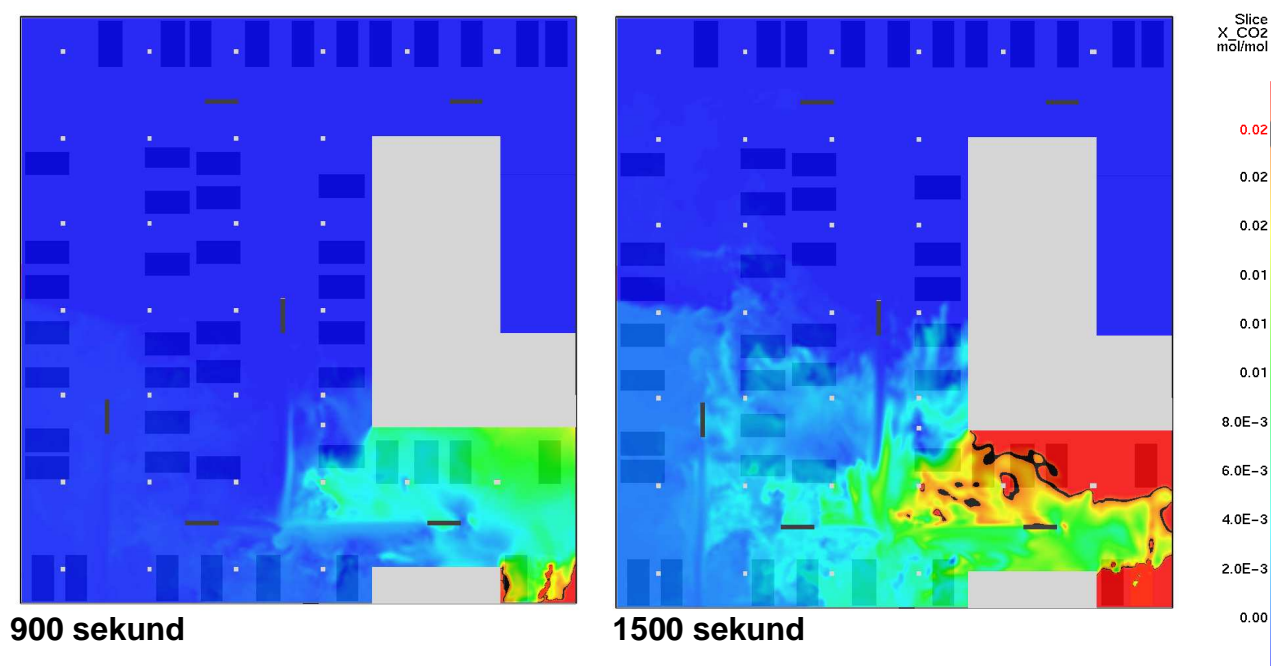


HRR: 5.9 MW
Time: 1471.8

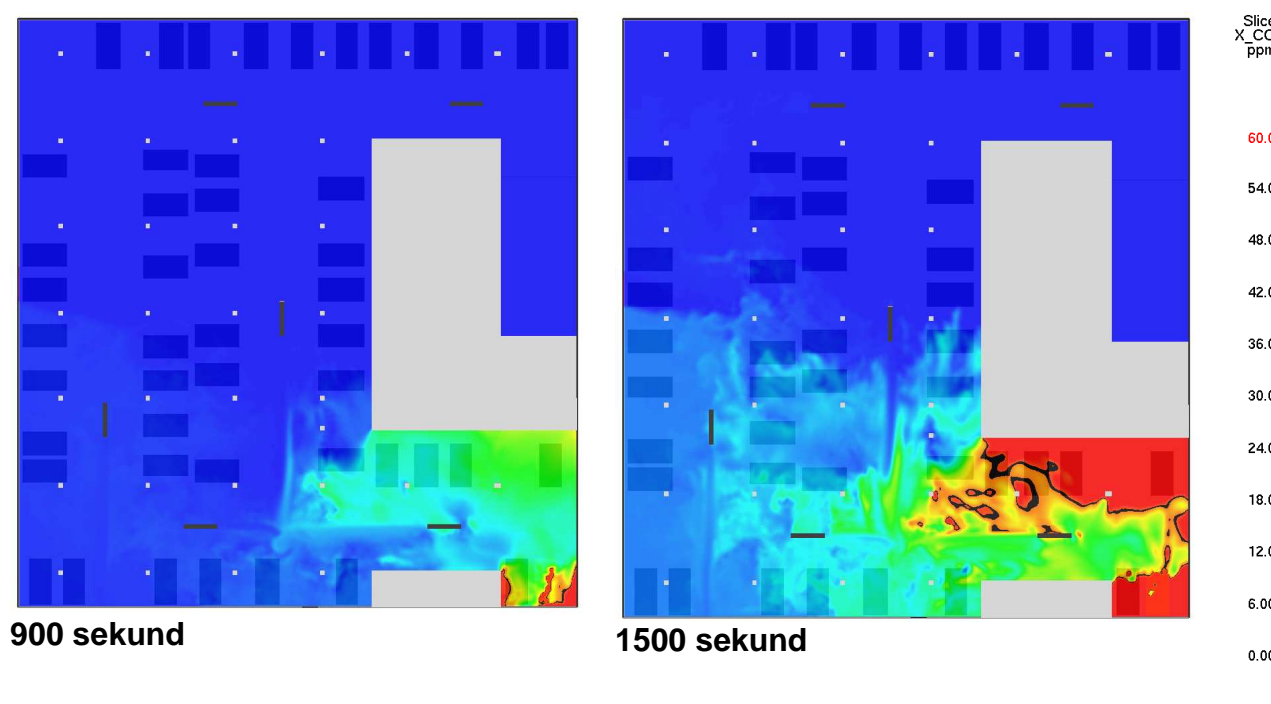
Rysunek 27 Scenariusz Sc2 prędkość U_x w płaszczyźnie osiowej xz wentylatorów strumieniowych po czasie 1500 sekund



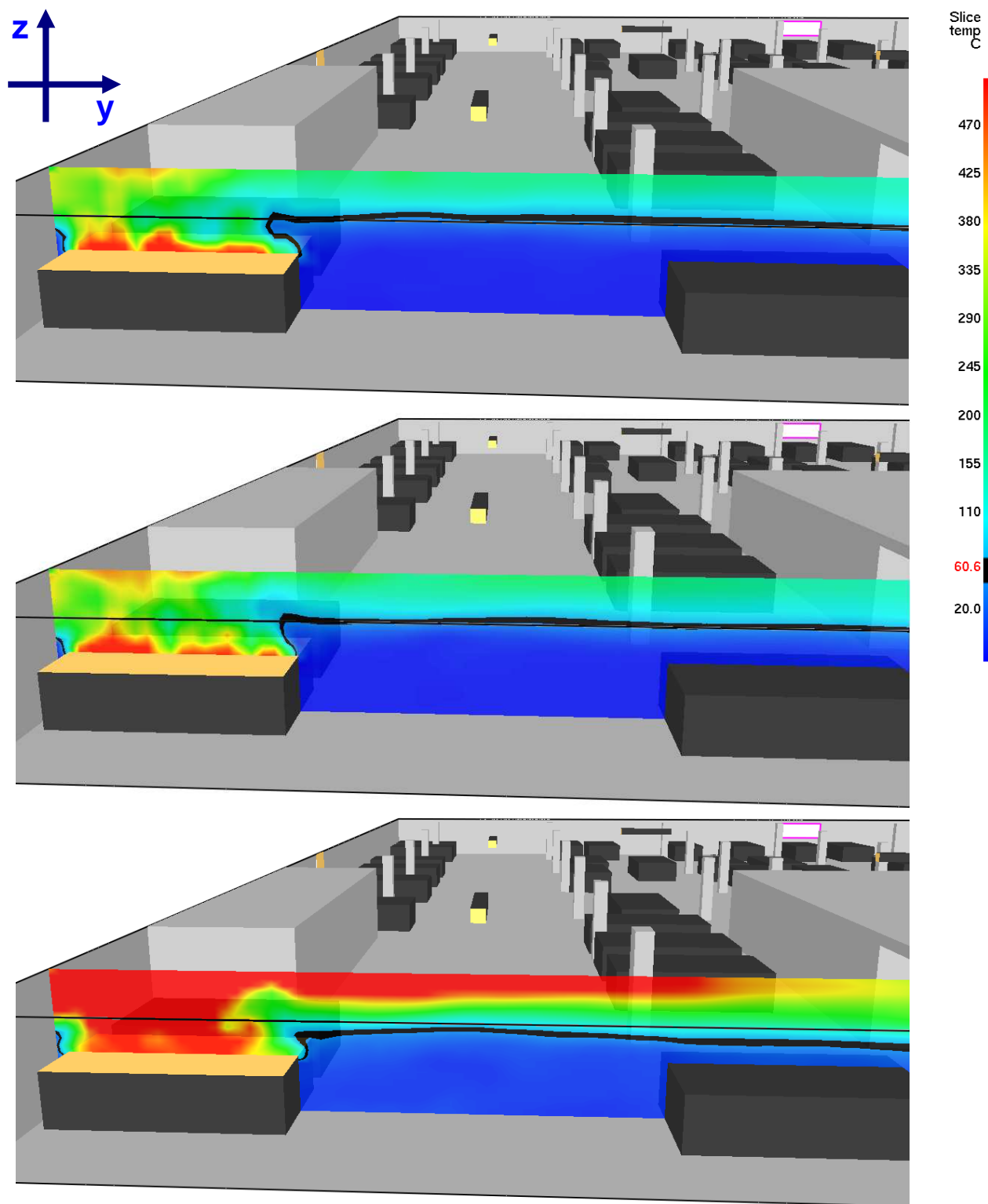
Rysunek 28 Scenariusz Sc2 koncentracja tlenu na wysokości 1.8 metra



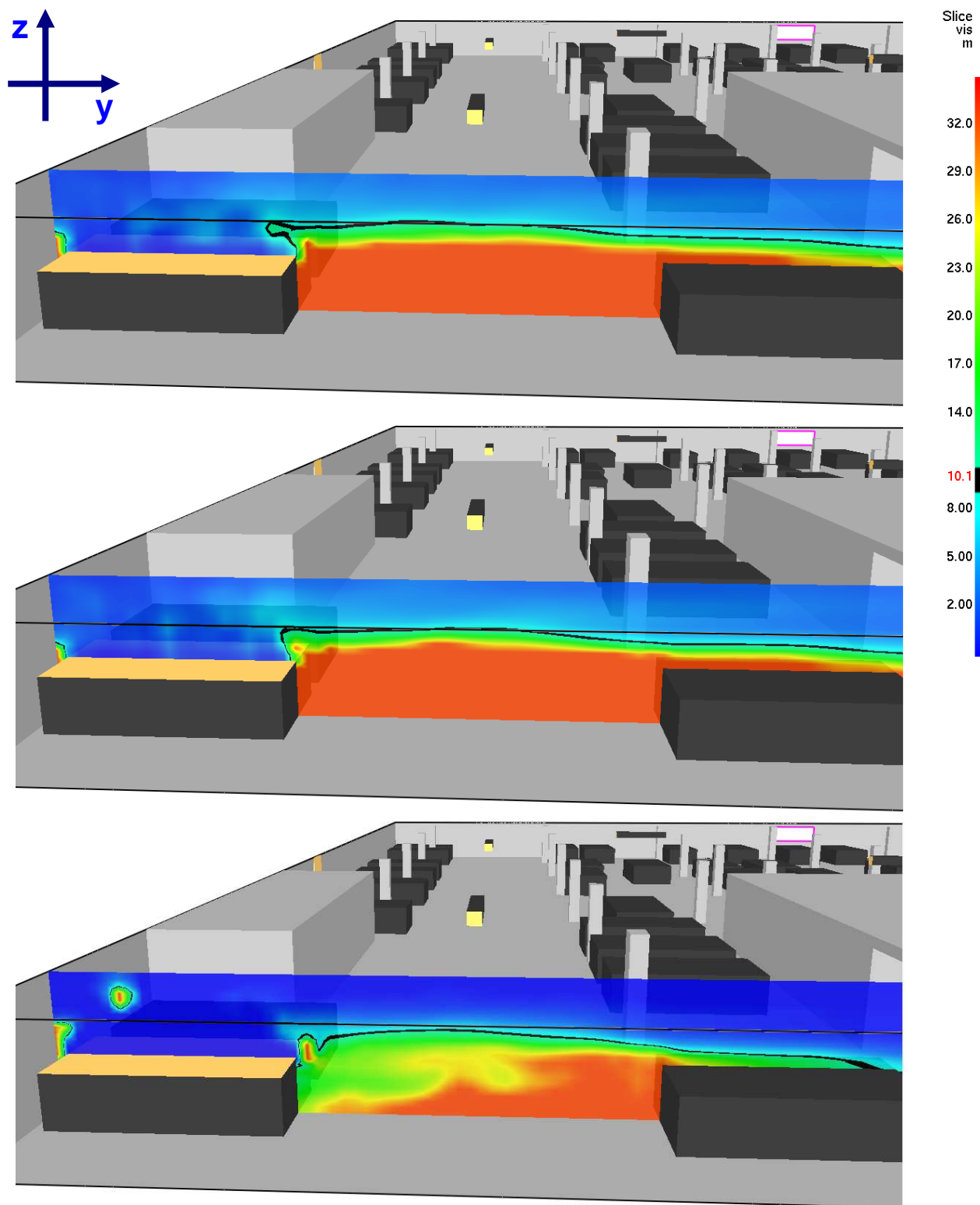
Rysunek 29 Scenariusz Sc2 koncentracja CO2 na wysokości 1.8 metra



Rysunek 30 Scenariusz Sc2 koncentracja CO na wysokości 1.8 metra



Rysunek 31 Scenariusz Sc2 pole temperatury w płaszczyźnie osiowej zy płonącego samochodu po czasie (od góry) 600, 900 i 1500 sekund

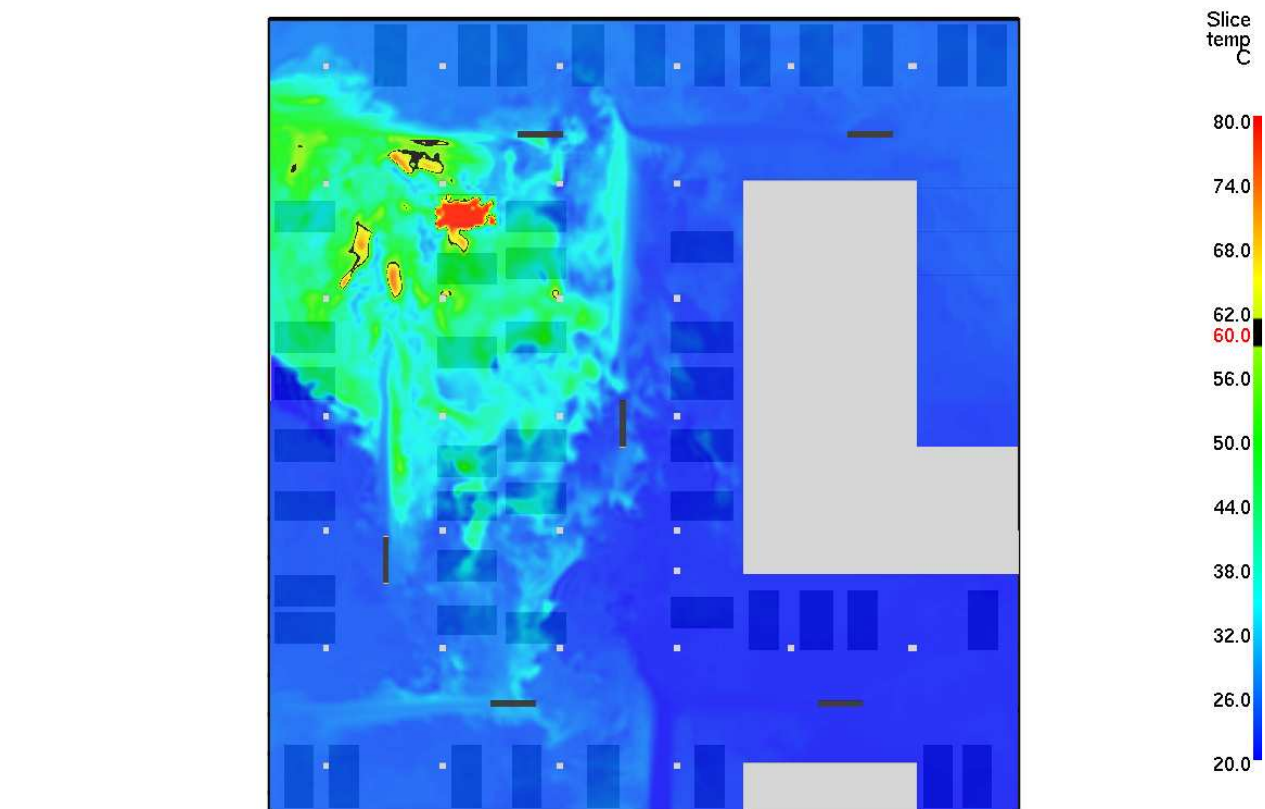


Rysunek 32 Scenariusz Sc2 zasięg widzialności w płaszczyźnie osiowej zy płonącego samochodu po czasie (od góry) 600, 900 i 1500 sekund

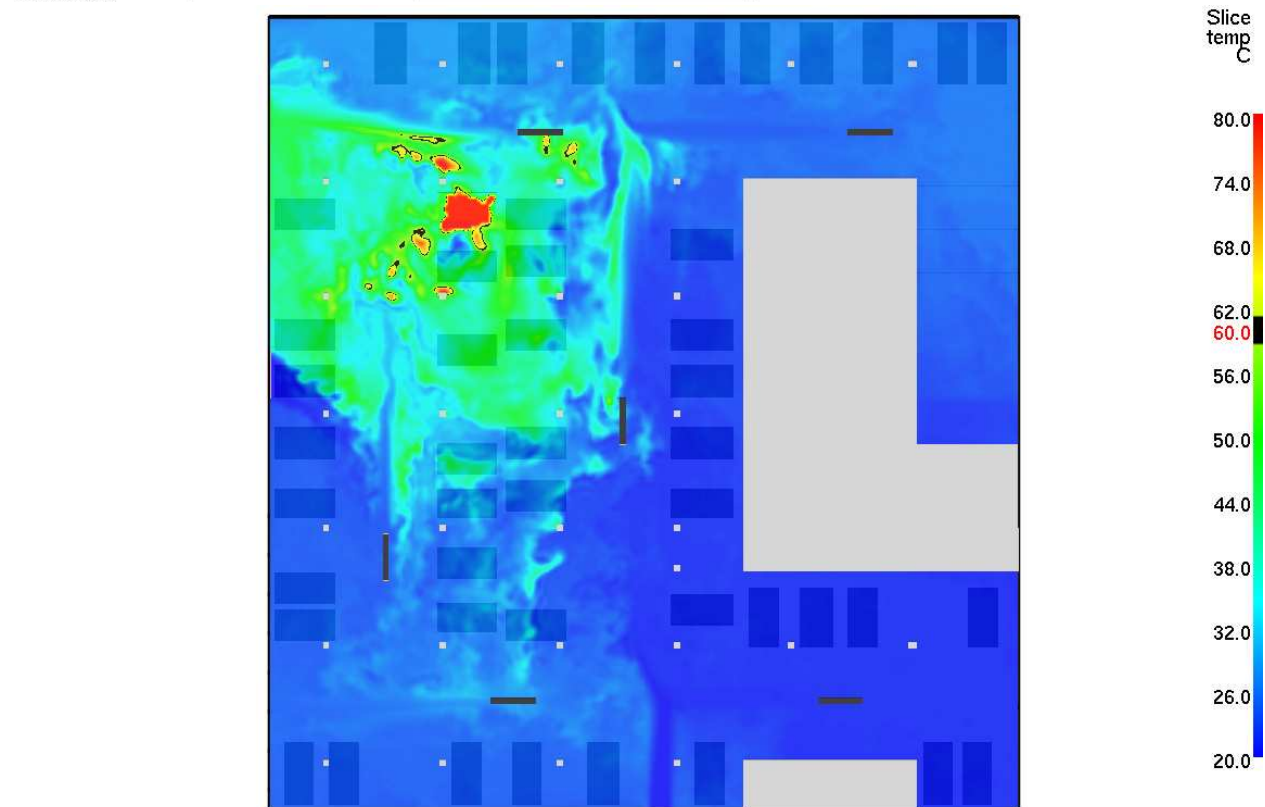
Scenariusz 3 (Sc3)

Rysunki od 33 do 42 przedstawiają poszczególne fazy pożaru i pracę pożarowej instalacji wentylacyjnej w scenariuszu Sc3. Na każdym rysunku zaznaczona jest moc pożaru w danej chwili (HRR). Wnioski z wykonanej symulacji można podsumować w następujących punktach:

- Dogodne warunki temperaturowe dla ewakuacji są utrzymane przez cały czas trwania symulacji tj. 900 sekund. Temperatura na wysokości człowieka, na przejściach ewakuacyjnych w pobliżu źródła ognia, przez cały symulowany czas, osiąga co najwyżej wartość pomiędzy 40 °C a 50 °C. W dalszej odległości od płonącego samochodu temperatura jest odpowiednio niższa. Temperatura powyżej 60 °C jest obserwowana tylko bezpośrednio nad płonącym samochodem (rys. 33, 34, 41).
- Dobre warunki widzialności utrzymują się przez pełne 900 sekund symulacji na praktycznie całej powierzchni garażu. Na przejściach ewakuacyjnych zasięg widzialności lokalnie (blisko źródła ognia) spada co najwyżej do około 12-14 metrów (nie jest to jednak stały trend). System wentylacji pożarowej skutecznie ogranicza rozchodzenie się dymu i ułatwia lokalizację pożaru (rys. 35, 36, 42).
- Żadna z klatek nie zostaje wyłączona z użytku przez czas 900 sekund (dwukrotnie dłuższy od szacunkowego czasu ewakuacji).
- Największa prędkość obserwowana w osi wentylatorów strumieniowych to około 8 m/s na dystansie około 5m od wylotu. W płaszczyźnie osiowej wentylatorów strumieniowych prędkość powietrza nie przekracza 4.5-5 m/s na dystansie około 5m od wylotu (rys. 37).
- Symulacja wykazała, że spadek koncentracji tlenu ma miejsce w bezpośredniej bliskości źródła ognia (na poziomie 19% w pobliżu źródła ognia – rys. 38).
- Przez czas trwania symulacji nie zarejestrowano też istotnego wzrostu koncentracji CO₂ (około 1% bezpośrednio nad źródłem ognia; 0.2% do 5m od źródła) (rys. 39).
- Koncentracja CO w przeprowadzonej symulacji nie osiągnęła groźnego stężenia. Jednak ze względu na pewne ograniczenia związane z dokładnością modelowania reakcji chemicznych te dane należy traktować bardziej jako jakościową analizę pokazującą kierunki rozprzestrzeniania się CO niż analizę ilościową (rys. 40).
- Porównanie temperatury pod stropem bezpośrednio nad płonącym samochodem dla różnych symulacji ilustruje rysunek 64. Po 900 sekundach średnia temperatura osiąga wartość średnio 290 °C a lokalnie 370 °C.



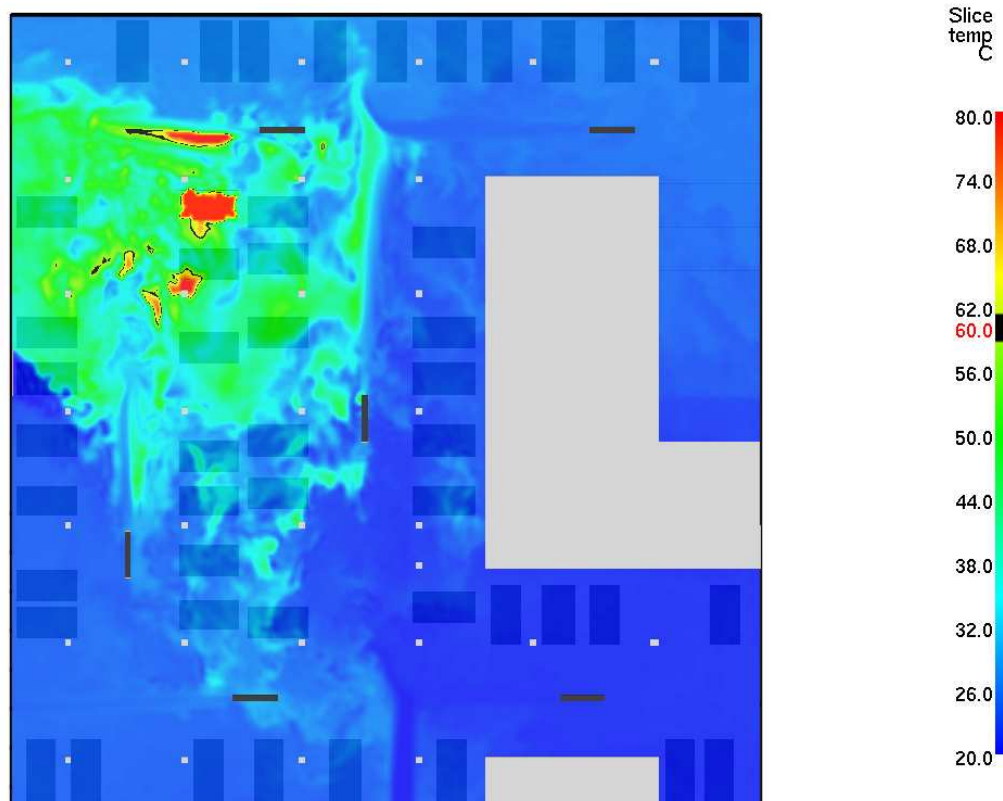
HRR: 1.5 MW
Time: 360.0



HRR: 1.5 MW
Time: 600.3

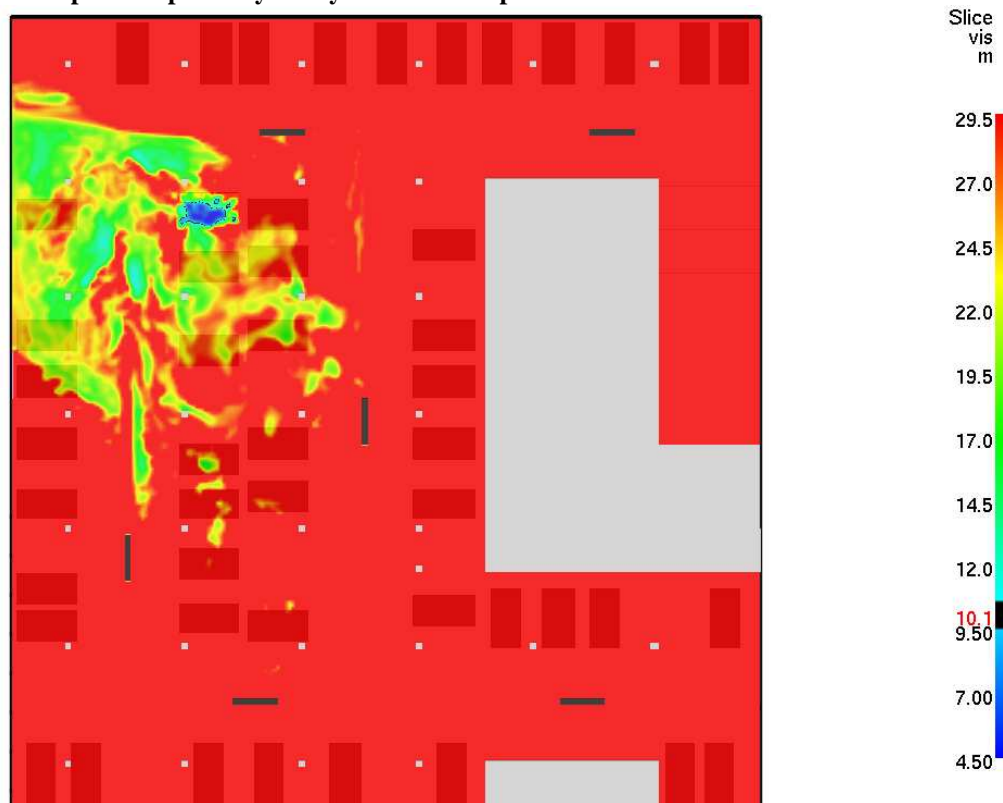


Rysunek 33 Scenariusz Sc3 pole temperatury na wysokości 1.8 m po czasie 360 i 600 sekund



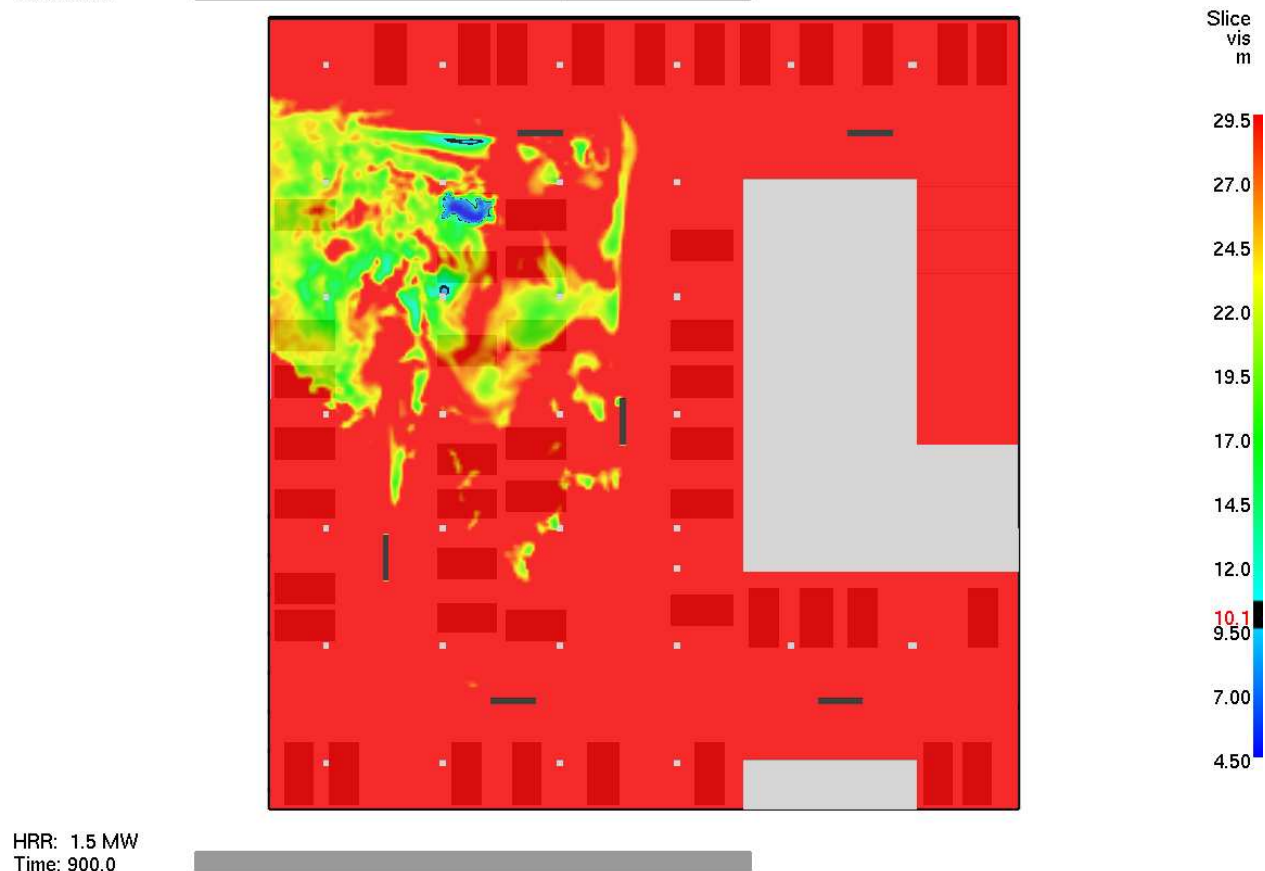
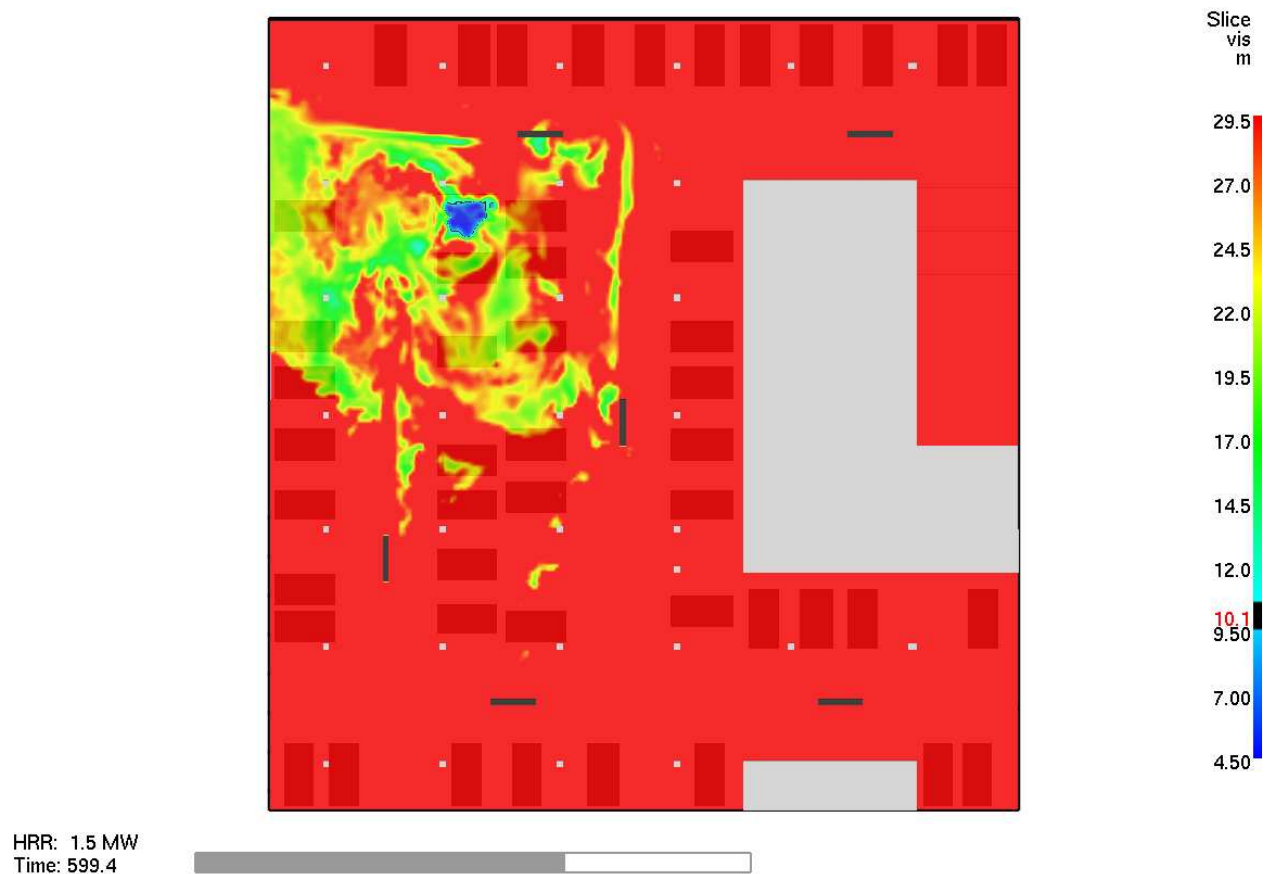
HRR: 1.5 MW
Time: 900.0

Rysunek 34 Scenariusz Sc3 pole temperatury na wysokości 1.8 m po czasie 900 sekund

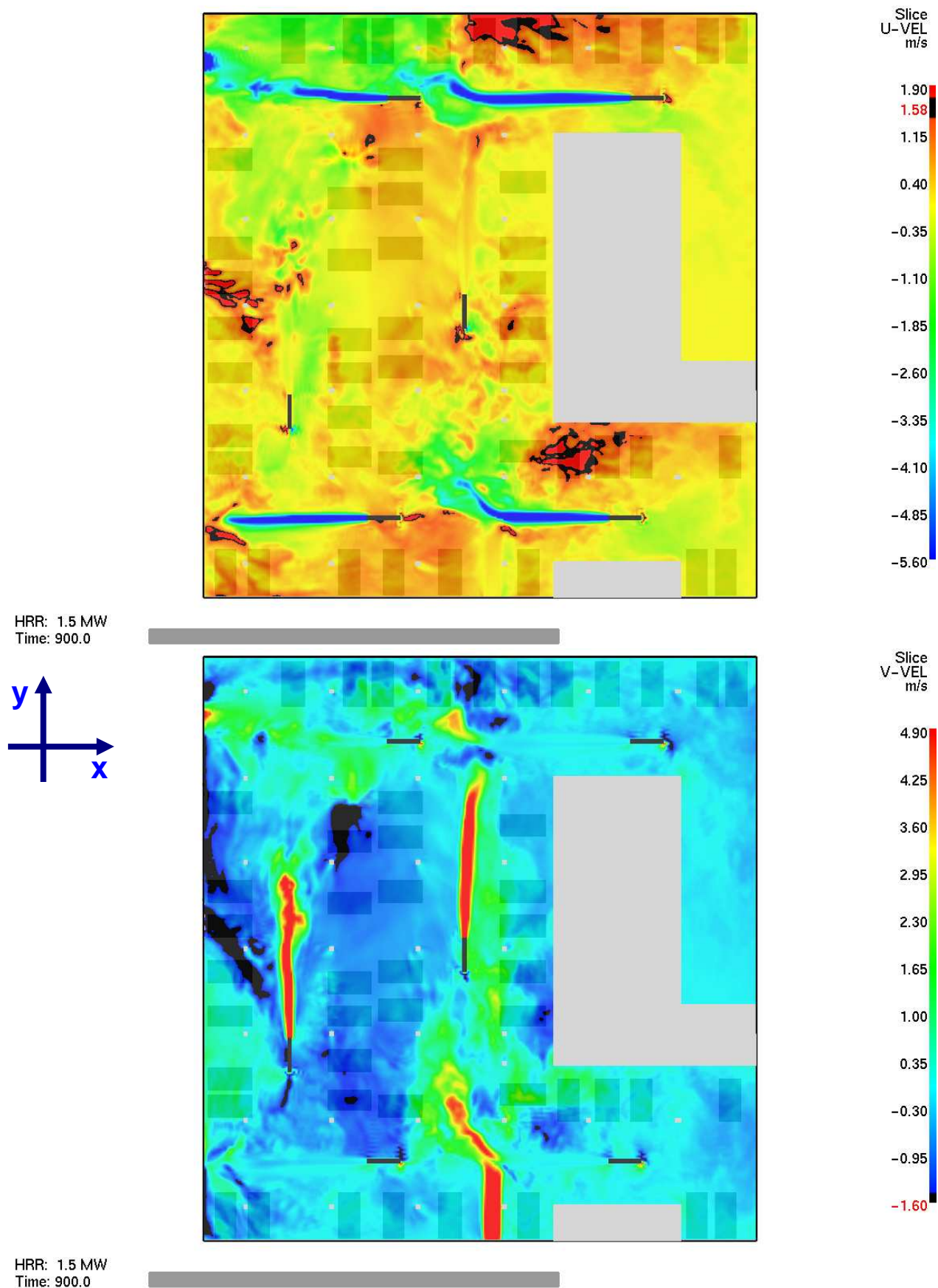


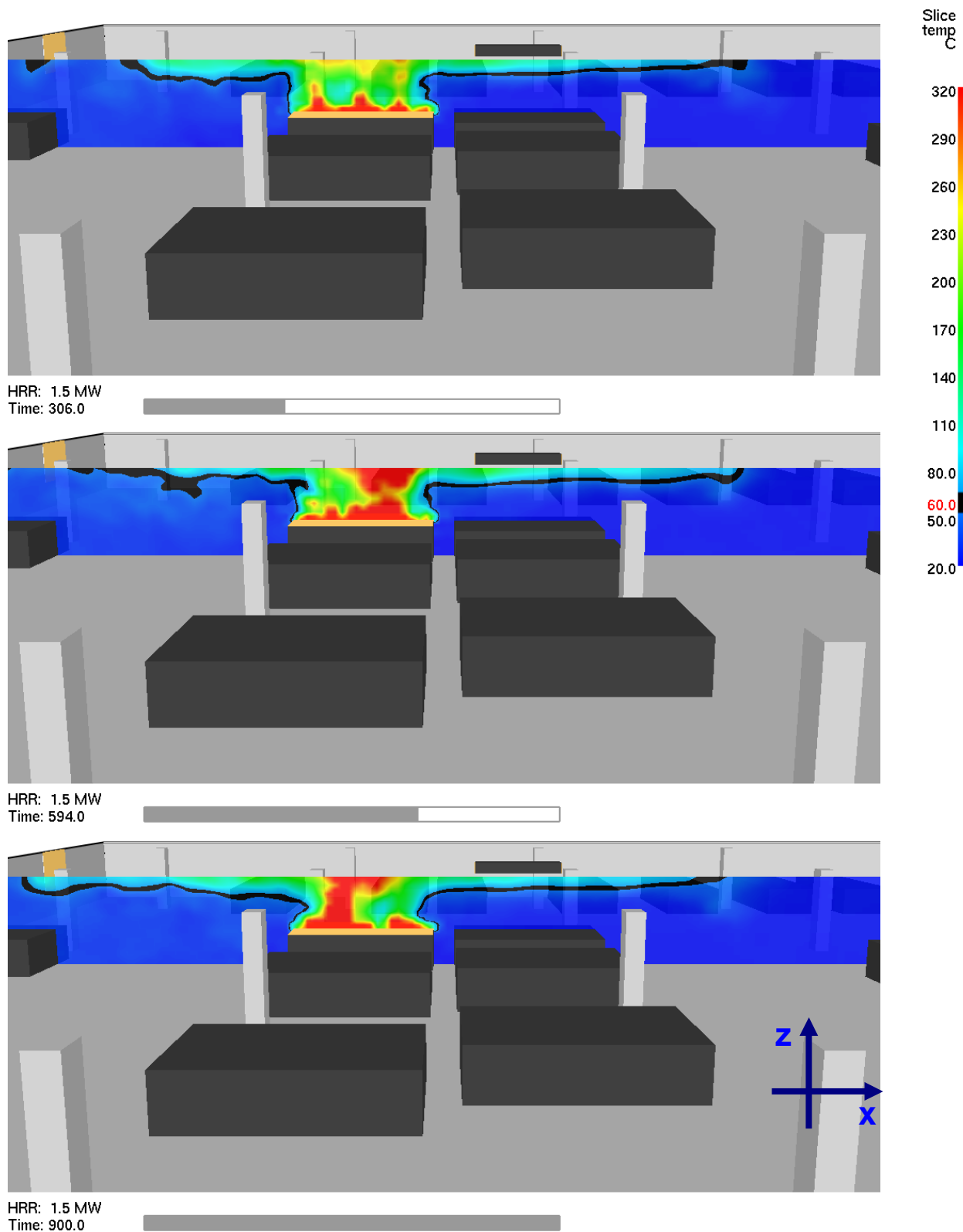
HRR: 1.5 MW
Time: 360.0

Rysunek 35 Scenariusz Sc3 zasięg widzialności na wysokości 1.8 m po czasie 360 sekund

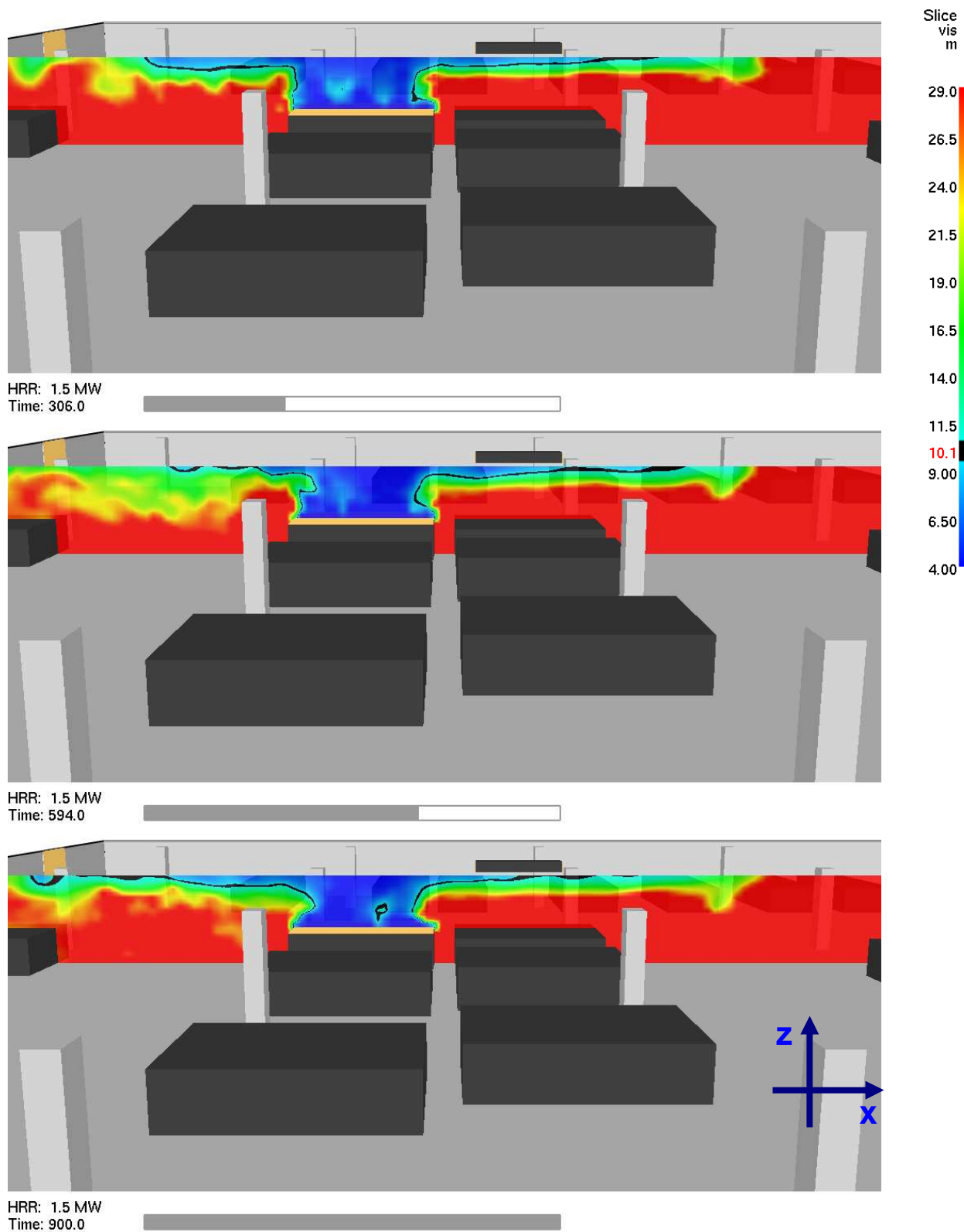


Rysunek 36 Scenariusz Sc3 zasięg widzialności na wysokości 1.8 m po czasie 600 i 900 sekund





Rysunek 41 Scenariusz Sc3 pole temperatury w płaszczyźnie osiowej zx płonącego samochodu po czasie (od góry) 300, 600 i 900 sekund

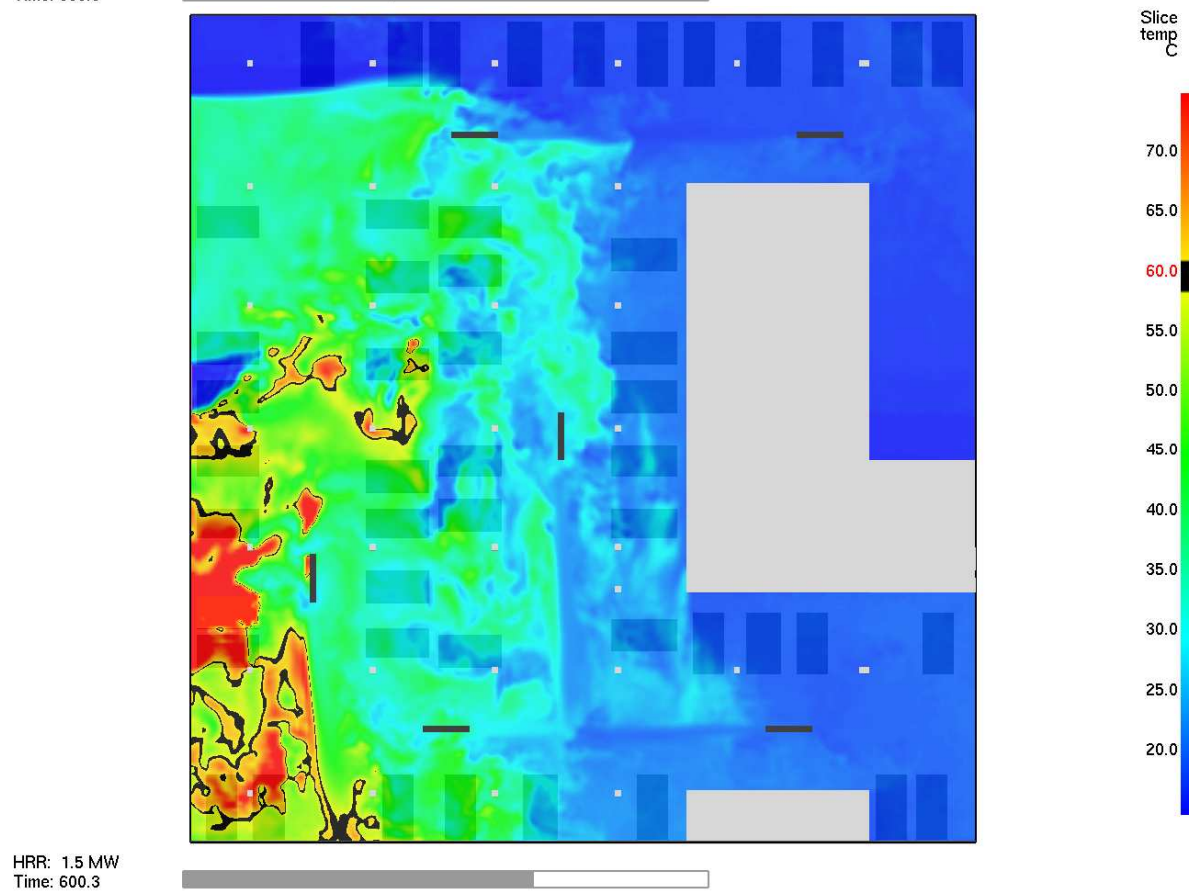
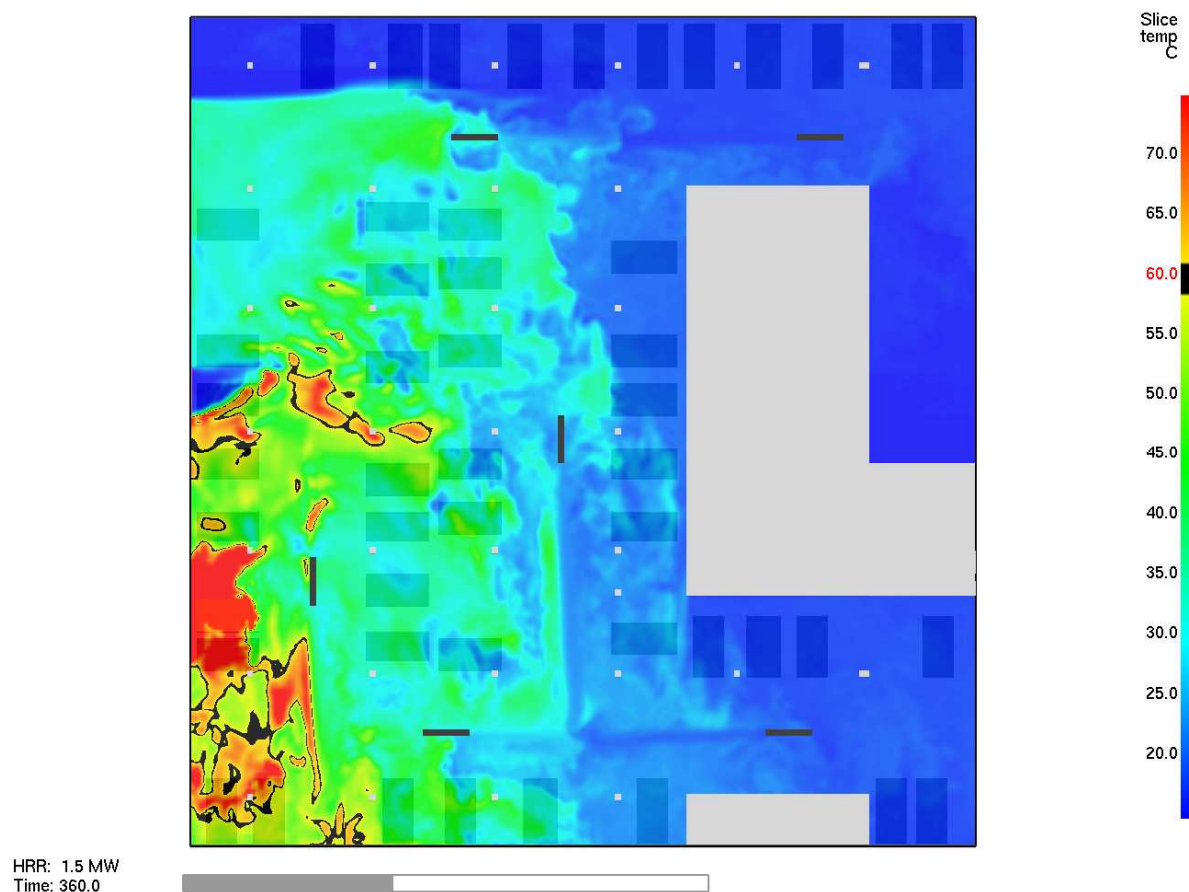


Rysunek 42 Scenariusz Sc3 zasięg widzialności w płaszczyźnie osiowej zx płonącego samochodu po czasie (od góry) 300, 600 i 900 sekund

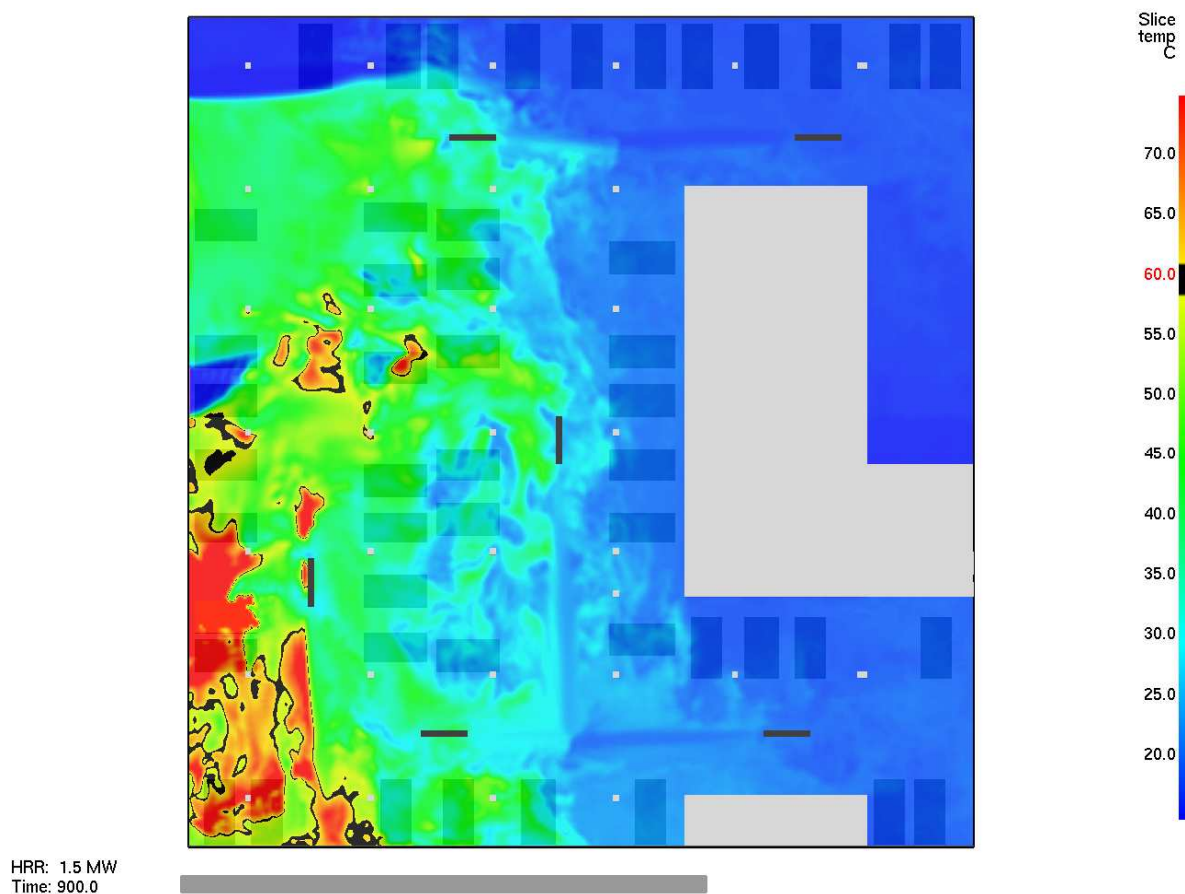
Scenariusz 4 (Sc4)

Rysunki od 43 do 52 przedstawiają poszczególne fazy pożaru i pracę pożarowej instalacji wentylacyjnej w scenariuszu Sc4 dla kondygnacji '-2'. W scenariuszu tym symulowany jest pożar powstający w największej odległości od dwóch głównych wentylatorów nawiewno-wywiewnych. Na każdym rysunku zaznaczona jest moc pożaru w danej chwili (HRR). Wnioski z wykonanej symulacji można podsumować w następujących punktach:

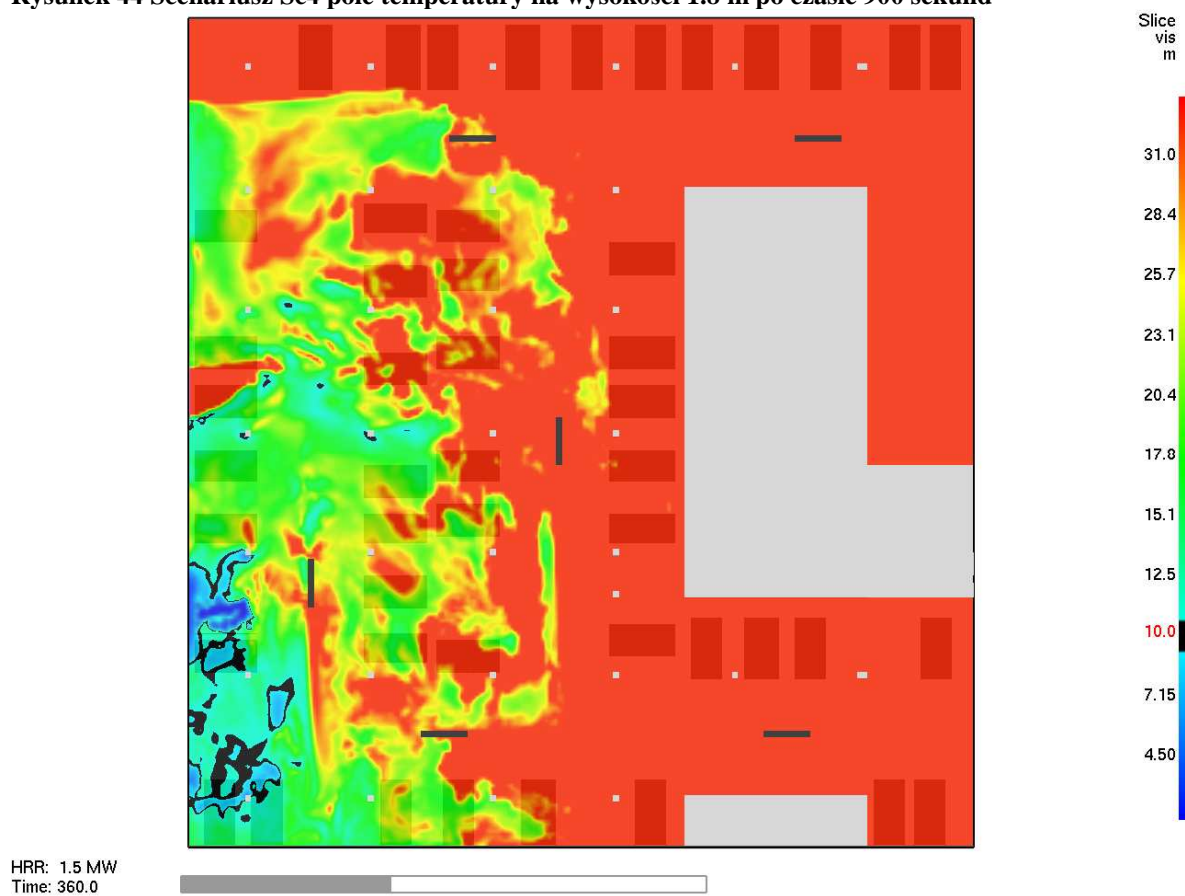
- Jedynie lokalnie, w bezpośredniej bliskości źródła ognia, temperatura może przekroczyć 60°C. W pozostałej części garażu, a co najważniejsze na dojściach do klatek ewakuacyjnych, warunki temperaturowe są dogodne przez cały symulowany czas (rys. 43, 44, 51).
- Symulacja wykazała, że przez cały symulowany czas, wentylatory nawiewno-wywiewne i strumieniowe utrzymują bardzo dobre warunki zasięgu widzialności i skutecznie izolują obszar objęty pożarem. Na dojściach do klatek ewakuacyjnych zasięg widzialności spada chwilowo, co najwyżej, do 12 metrów w bezpośredniej bliskości źródła ognia (rys. 45, 46, 52).
- Prędkość w osi wentylatorów strumieniowych i na dystansie 5m od wylotu nie przekracza 7-8 m/s. Na wysokości człowieka (1.8 m) utrzymuje się ona na poziomie 4-5 m/s. Rysunek 47 przedstawia prędkości na wysokości 2.2 metra (płaszczyzn osiowa wentylatorów strumieniowych).
- Rejestrowany w symulacji spadek koncentracji tlenu wynosi w bezpośredniej bliskości źródła ognia około 19% (rys. 48).
- Koncentracja CO₂ po 900 sekundach bezpośrednio nad źródłem ognia osiągnęła maksymalnie 1% (rys. 49).
- Otrzymane wyniki wskazują, że koncentracja nie osiągnęła groźnego stężenia. Jednak, jak było to już wspomniane ze względu na pewne ograniczenia związane z dokładnością modelowania reakcji chemicznych te dane należy traktować bardziej jako jakościową analizę pokazującą kierunki rozprzestrzeniania się CO, niż analizę ilościową (rys. 50).
- Porównanie temperatury pod stropem bezpośrednio nad płonącym samochodem dla różnych scenariuszy po czasie 900 sekundach ilustruje rysunek 64. Temperatura otrzymana w tym scenariuszu nie odbiega od wartości przewidywanych w innych symulacjach i waha się średnio na poziomie 240°C lokalnie osiągając 280°C.



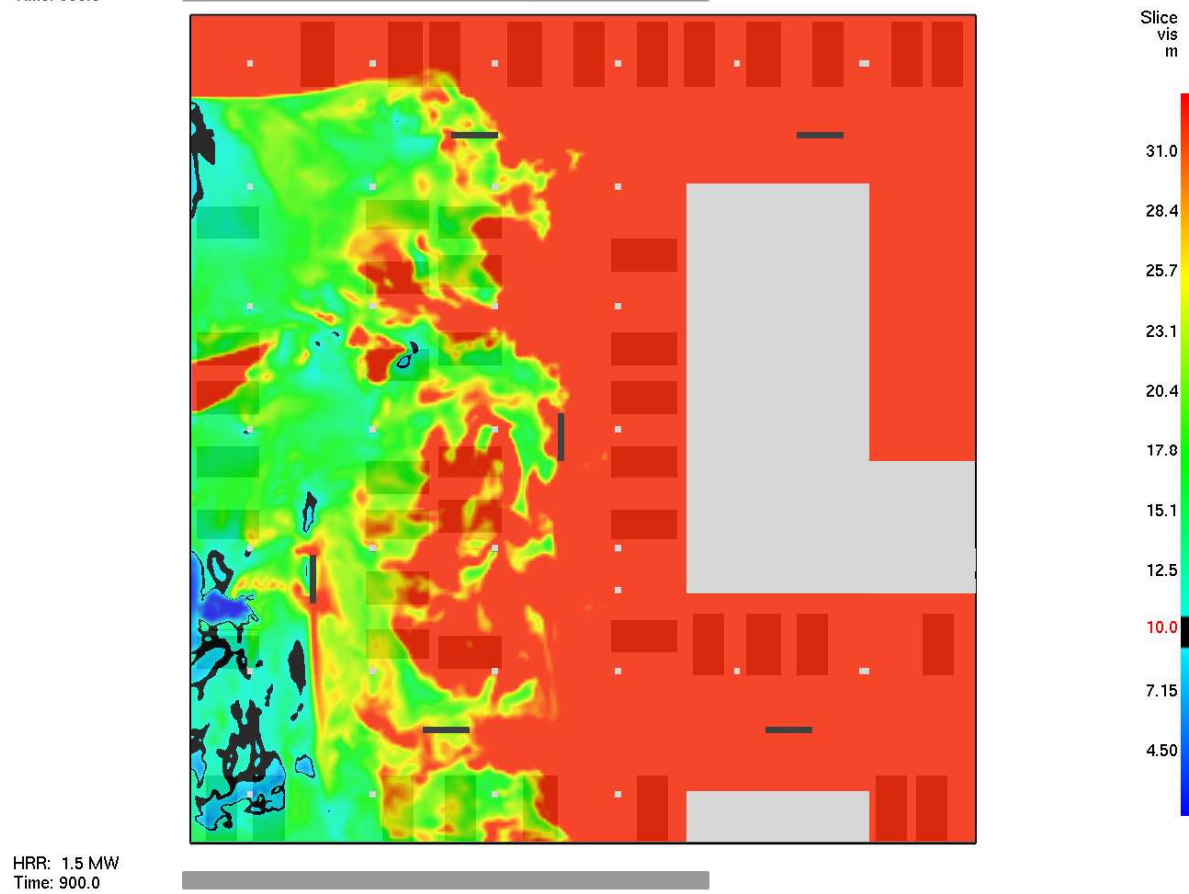
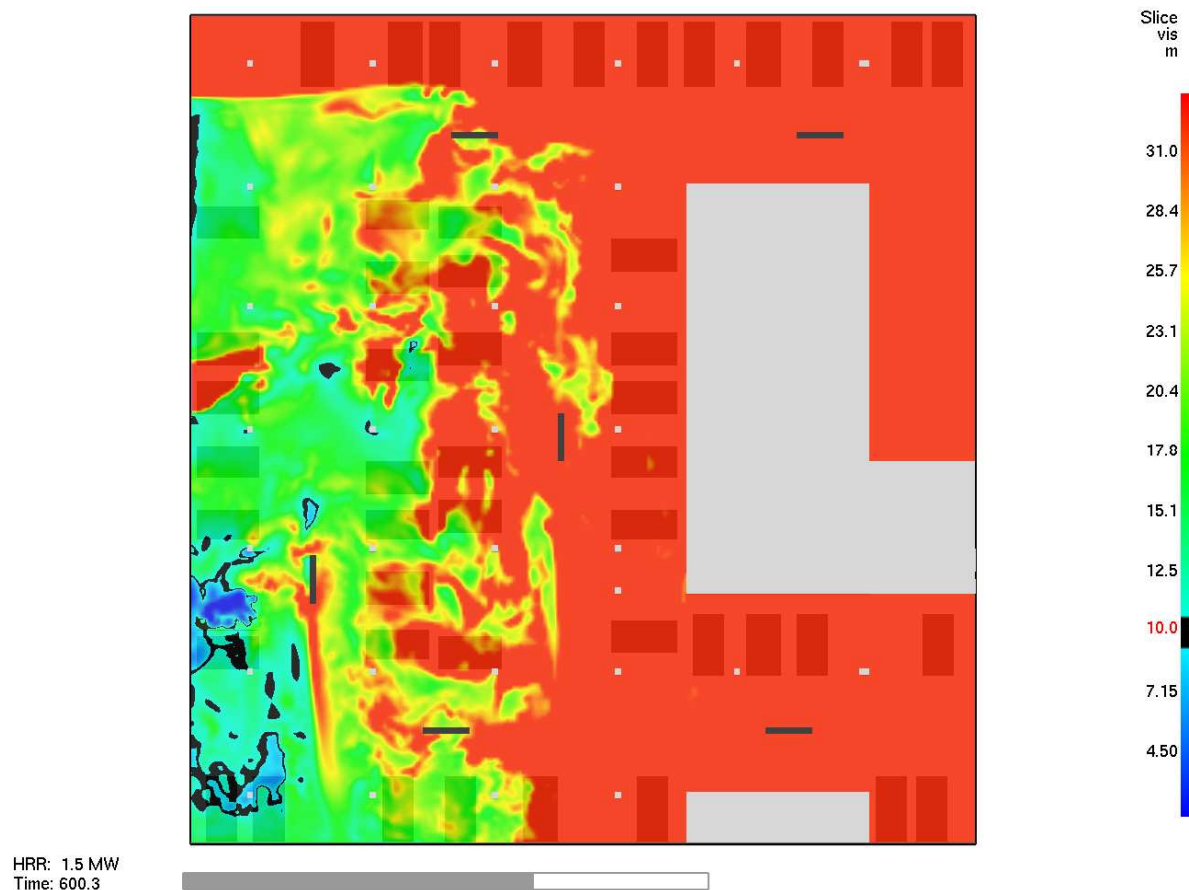
Rysunek 43 Scenariusz Sc4 pole temperatury na wysokości 1.8 m po czasie 360 i 600 sekund



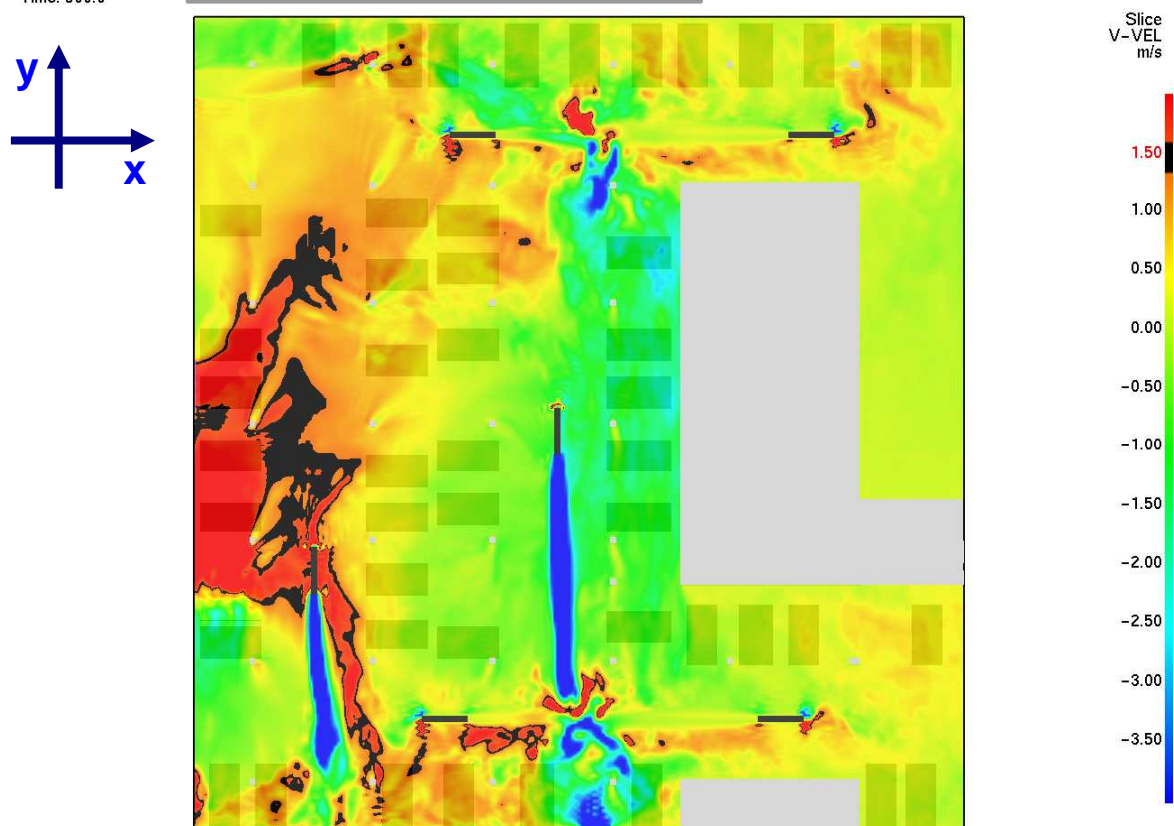
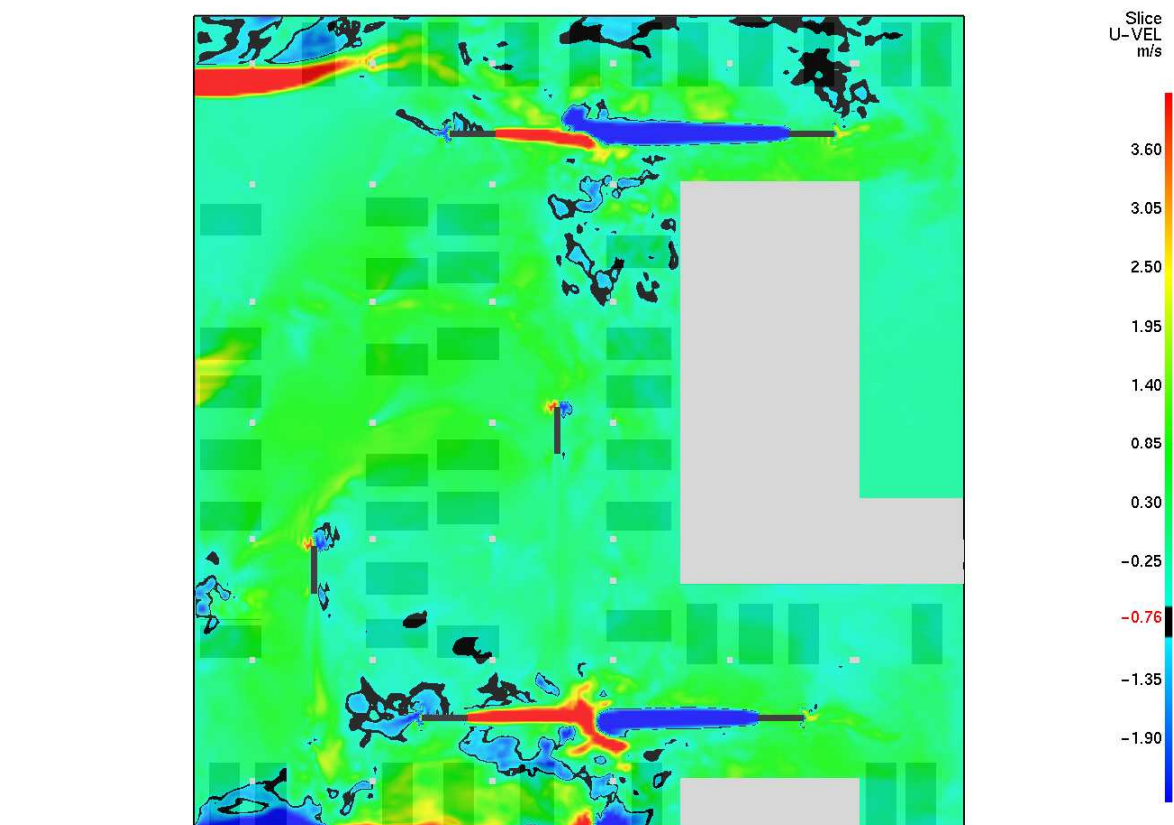
Rysunek 44 Scenariusz Sc4 pole temperatury na wysokości 1.8 m po czasie 900 sekund



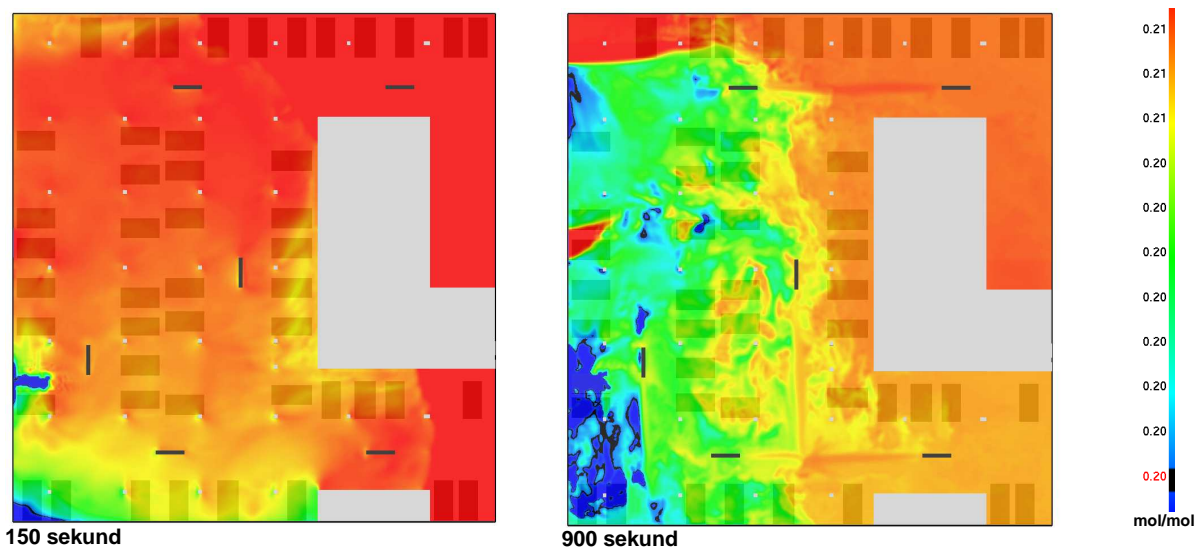
Rysunek 45 Scenariusz Sc4 zasięg widzialności na wysokości 1.8 m po czasie 360 sekund



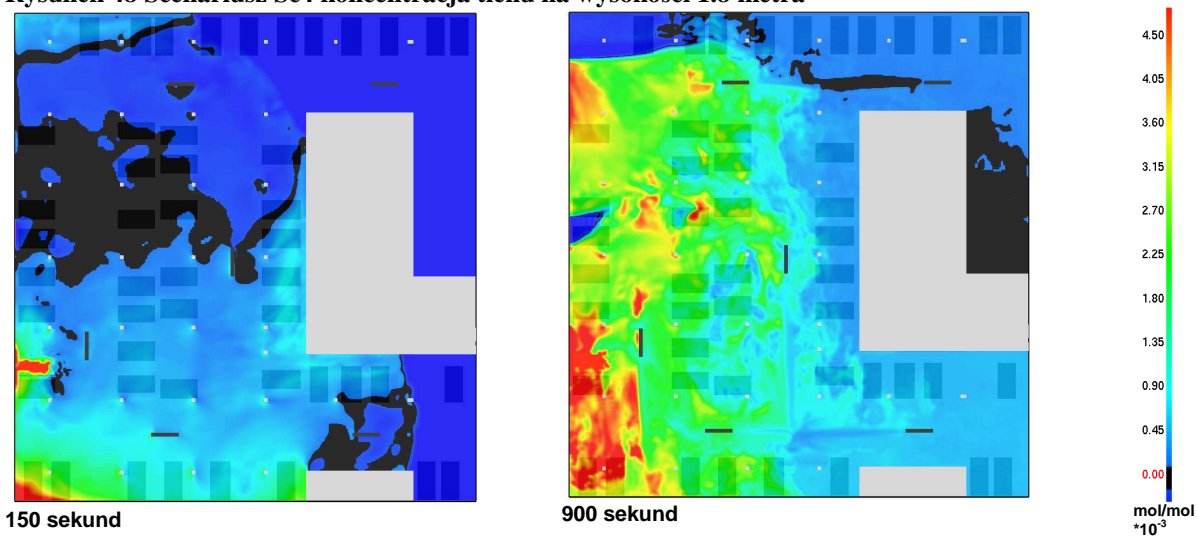
Rysunek 46 Scenariusz Sc4 zasięg widzialności na wysokości 1.8 m po czasie 600 i 900 sekund



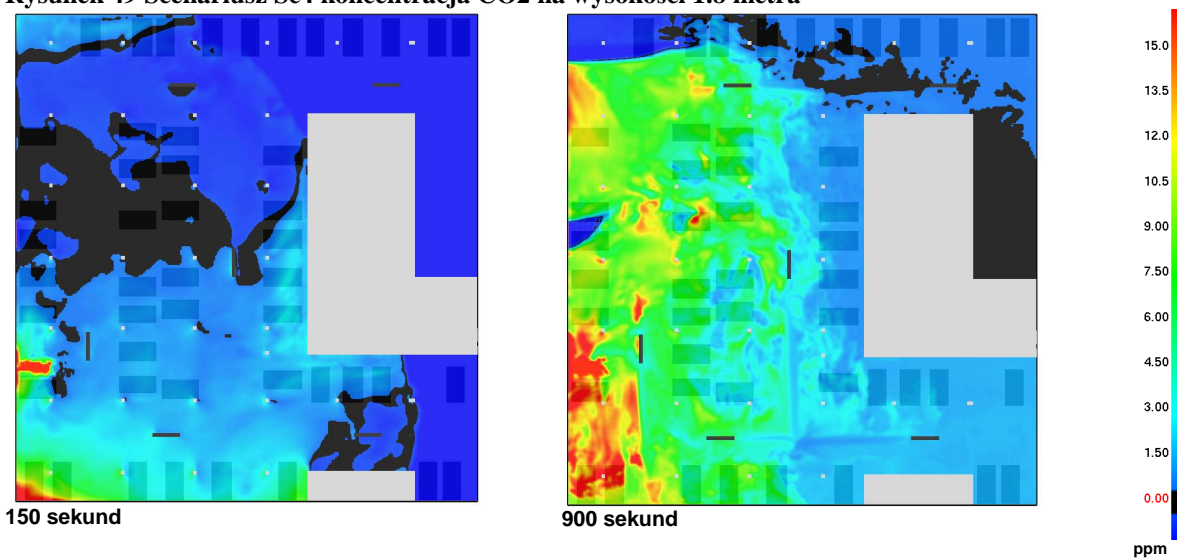
Rysunek 47 Scenariusz Sc4 prędkości U_x i V_y na wysokości 2.2 m w płaszczyźnie osiowej xy wentylatorów strumieniowych po czasie 900 sekund



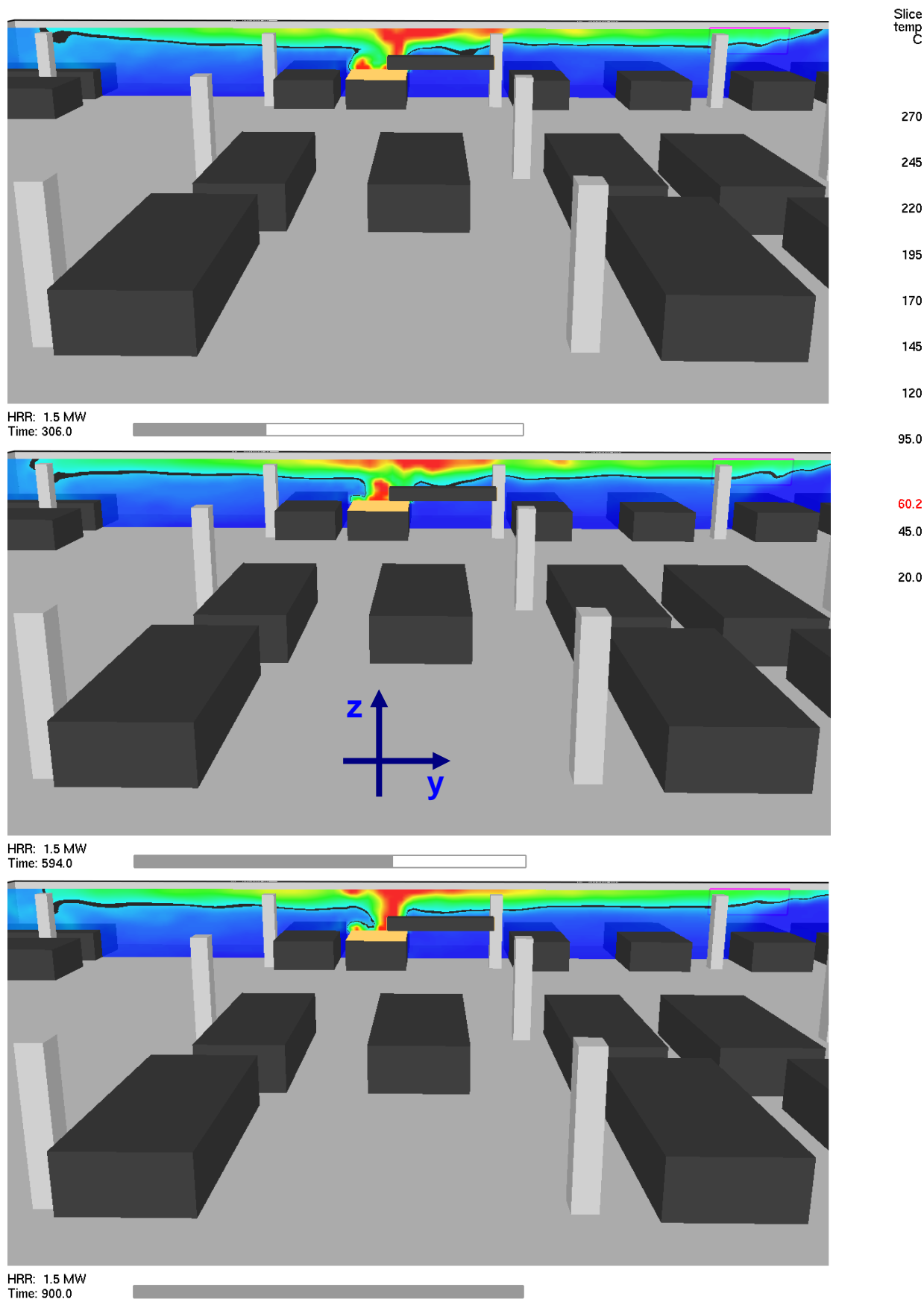
Rysunek 48 Scenariusz Sc4 koncentracja tlenu na wysokości 1.8 metra



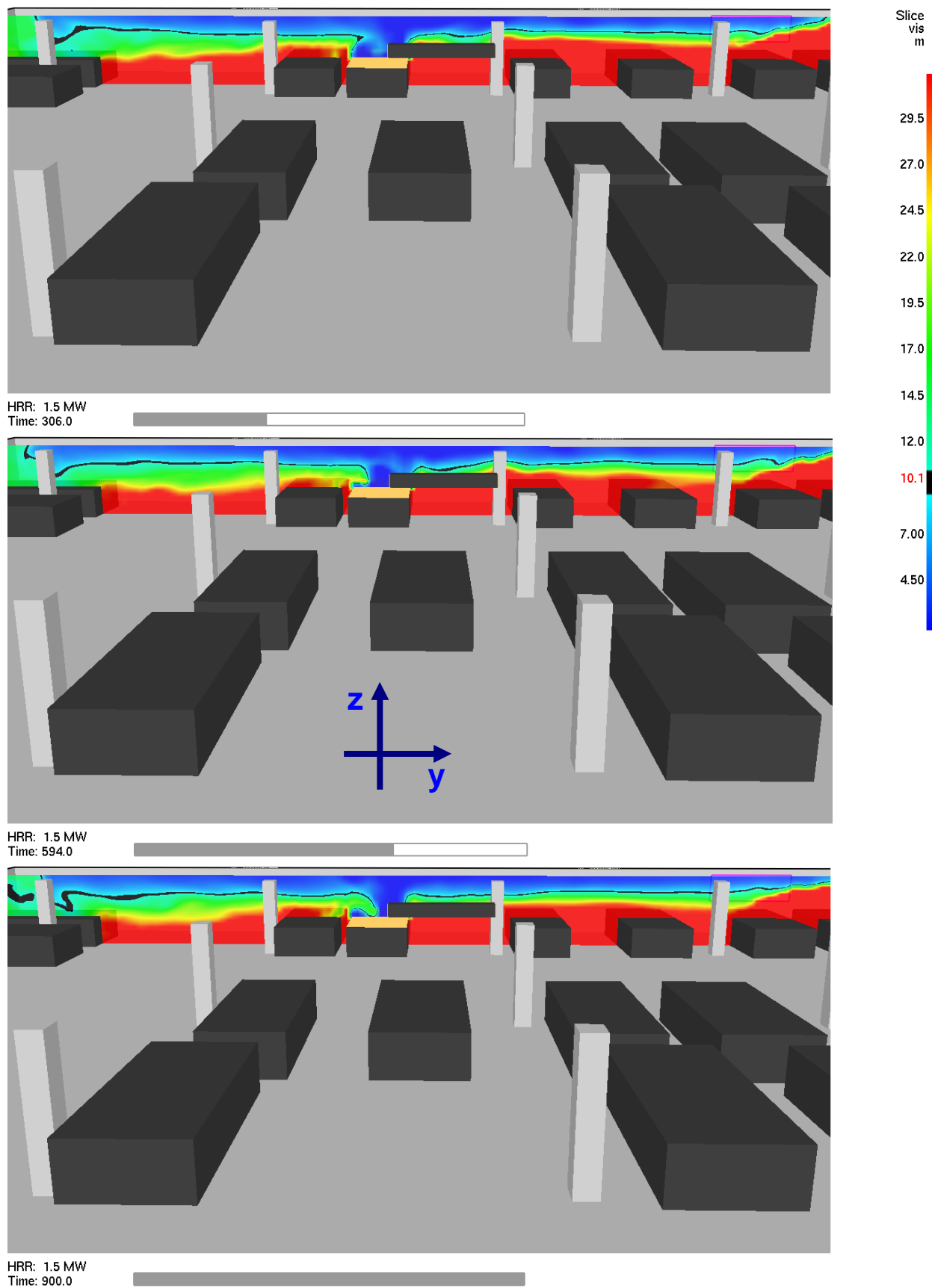
Rysunek 49 Scenariusz Sc4 koncentracja CO2 na wysokości 1.8 metra



Rysunek 50 Scenariusz Sc4 koncentracja CO na wysokości 1.8 metra



Rysunek 51 Scenariusz Sc4 pole temperatury w płaszczyźnie osiowej zy płonącego samochodu po czasie (od góry) 300, 600 i 900 sekund

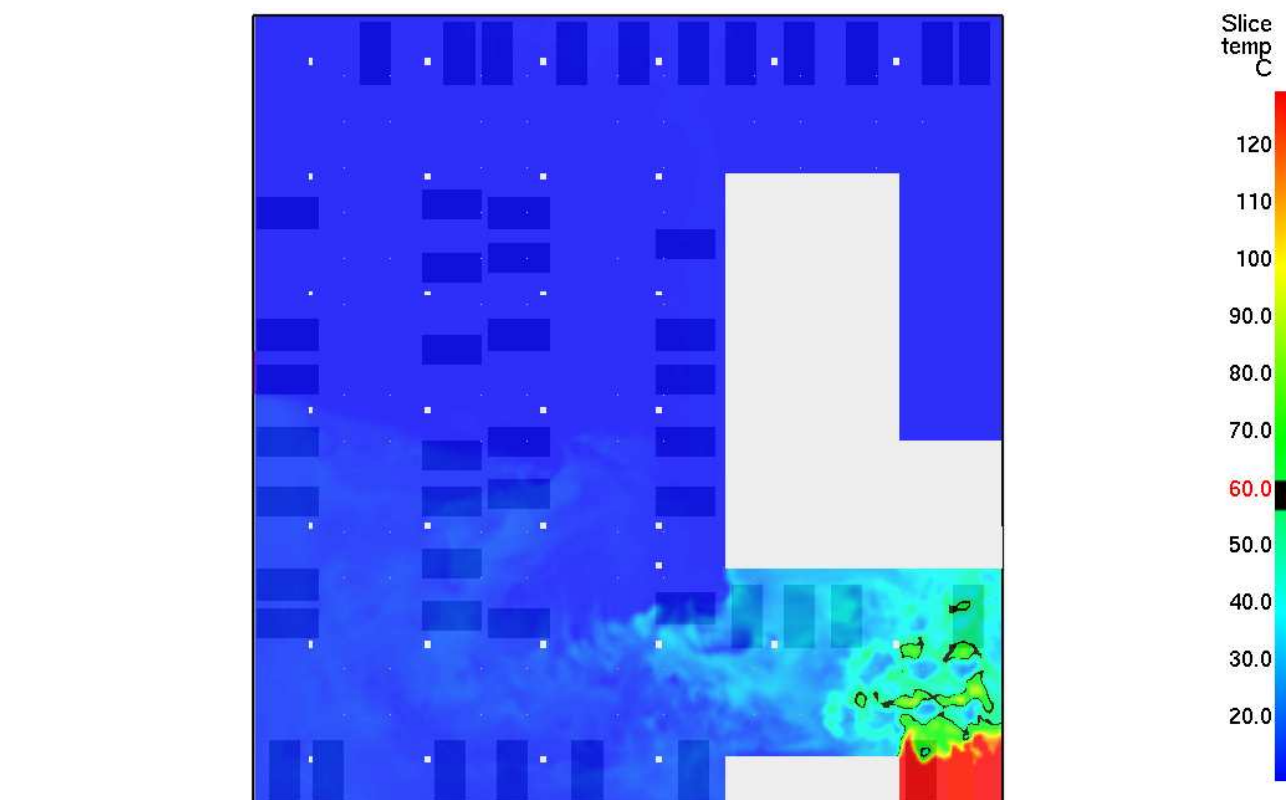


Rysunek 52 Scenariusz Sc4 zasięg widzialności w płaszczyźnie osiowej zy płonącego samochodu po czasie (od góry) 300, 600 i 900 sekund

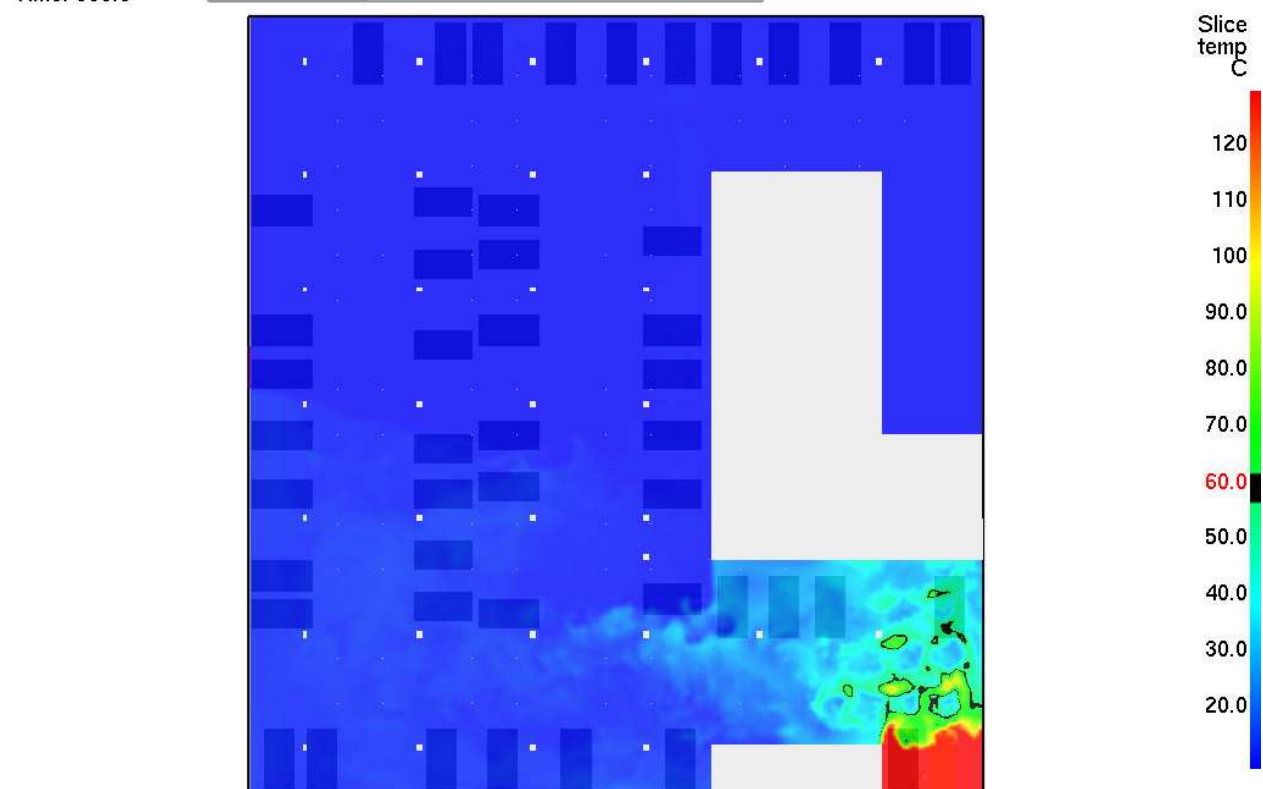
Scenariusz 5 (Sc5)

Rysunki od 53 do 67 przedstawiają poszczególne fazy pożaru i pracę pożarowej instalacji wentylacyjnej w scenariuszu Sc5 dla kondygnacji '-2'. W scenariuszu tym testowana jest efektywność pracy kanałowej instalacji wentylacyjnej z instalacją tryskaczową dla lokalizacji pożaru jak w scenariuszu Sc2. Na każdym rysunku zaznaczona jest moc pożaru w danej chwili (HRR). Wnioski z wykonanej symulacji można podsumować w następujących punktach:

- Przez czas dłuższy niż dwukrotny czas ewakuacji wentylacja kanałowa z instalacją tryskaczową skutecznie ogranicza przyrost temperatury. Termiczne kryterium odcięcia klatki schodowej E2 zostaje przekroczone dopiero po czasie około 1400 sekund (rys. 53-55, 62).
- Zasięg widzialności pozostaje na zadowalającym poziomie przez czas ewakuacji. Jednak po czasie około 600 sekund dojście do klatki E2 staje się poważnie utrudnione. Po około 1000 sekund od powstania pożaru klatka zostaje praktycznie odcięta (ze względu na kryterium zasięgu widoczności). Wraz ze wzrostem mocy pożaru, po około 1200 sekundach zasięg na obszarze prawie połowy garażu spada poniżej 10 metrów poważnie ograniczając możliwość lokalizacji źródła ognia (rys. 56-58, 63). Po czasie 1500 sekund na przejeździe, na którym w scenariuszu Sc2 umieszczone są wentylatory strumieniowe S1 i S2, zasięg widzialności spada poniżej 5 metrów (rys. 67) co jest wynikiem prawie dwa razy gorszym od zasięgu widzialności w Sc2. Takie pogorszenie zasięgu widzialności spowodowane jest w pierwszej kolejności przez powstałą parę wodną jak również przez przechłodzenie i zrzucenie przez tryskacze do niższych warstw części stałych frakcji dymu.
- Rejestrowany w symulacji spadek koncentracji tlenu po 900 sekundach wynosi w bezpośredniej bliskości źródła ognia około 16% (rys. 59) co jest wynikiem gorszym niż w przypadku wentylacji strumieniowej. Jest to po części spowodowane mniejszym przepływem (obiegim) powietrza jak również mniejszym mieszaniem się powietrza.
- Koncentracja CO₂ po 900 sekundach bezpośrednio nad źródłem ognia osiągnęła maksymalnie 3-4% - co jest wartością wyższą od obserwowanej przy wentylacji strumieniowej (rys.60).
- Koncentracja CO w pobliżu źródła ognia po 900 sekundach zbliżyła się do wartości niebezpiecznych. Jednak, jak było to już wspomniane, ze względu na pewne ograniczenia związane z dokładnością modelowania reakcji chemicznych te dane należy traktować bardziej jako jakościową analizę pokazującą kierunki rozprzestrzeniania się CO, niż analizę ilościową (rys. 61).
- Porównanie temperatury pod stropem bezpośrednio nad płonącym samochodem dla różnych scenariuszy po czasie 900 sekund przedstawia rysunek 64. Otrzymana średnia temperatura wyniosła około 300°C a maksymalna lokalnie 350 °C. Po czasie 1500 sekund temperatura osiągnęła wartość około 780 °C, natomiast lokalnie wyniosła nawet 940 °C (rys. 65). Porównanie ze scenariuszem Sc2 pozwala stwierdzić, że obserwowane temperatury są generalnie niższe dla wentylacji kanałowej z tryskaczami.
- Symulacja wykazała że po czasie 1500 sekund temperatura na wysokości około 1.5m (wysokość samochodu) w pobliżu płonącego samochodu wynosi średnio 90 °C co pozwala przypuszczać, że do tego czasu nie powinno nastąpić przeniesienia ognia na sąsiednie samochody (rys.65).
- Temperatury w dalszej odległości od źródła ognia pozostają w obu scenariuszach zbliżone (rys. 66).



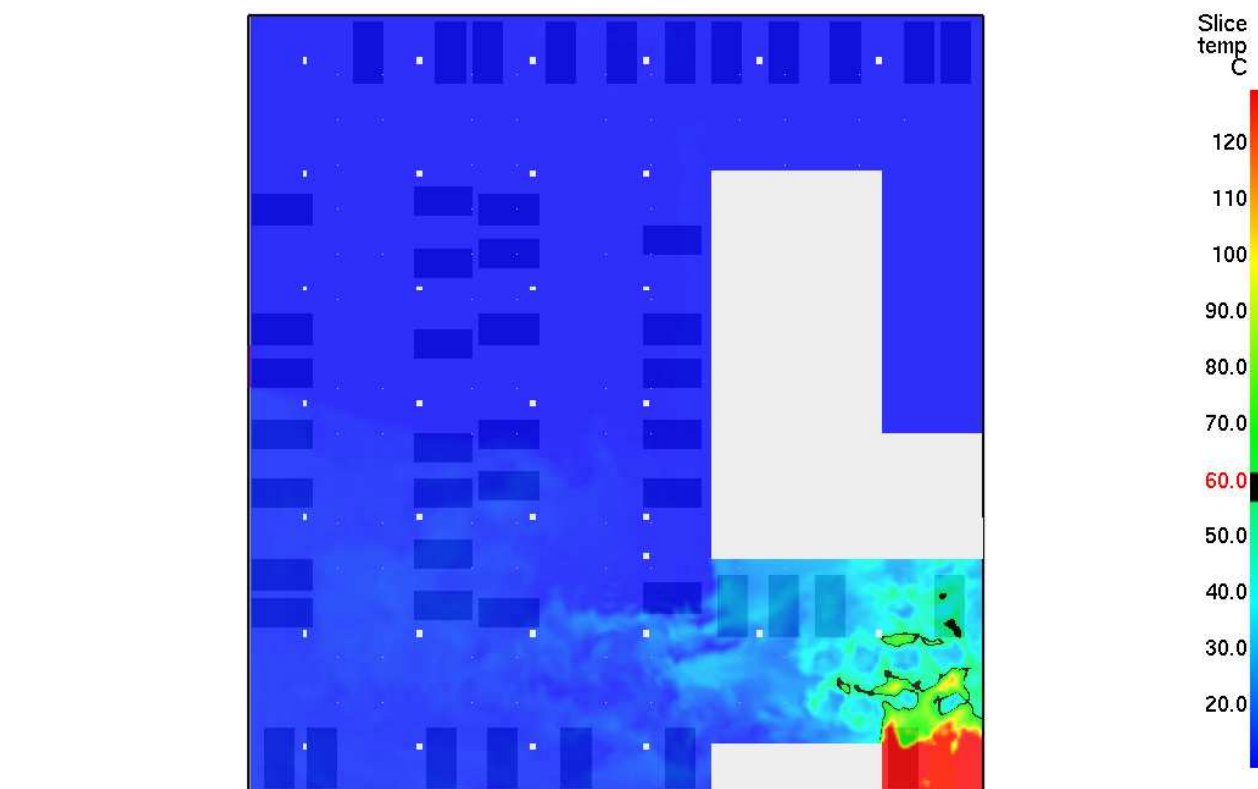
HRR: 1.5 MW
Time: 360.0



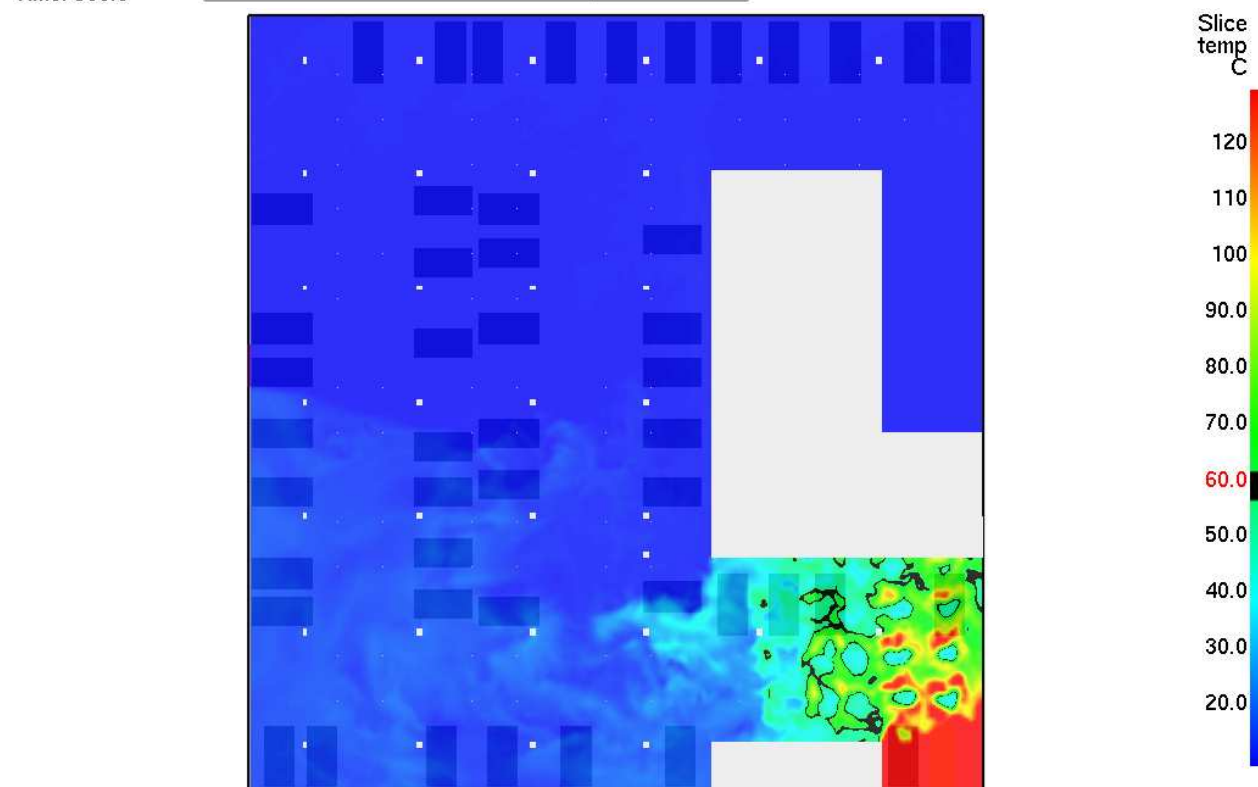
HRR: 1.5 MW
Time: 600.3



Rysunek 53 Scenariusz Sc5 pole temperatury na wysokości 1.8 m po czasie 360 i 600 sekund



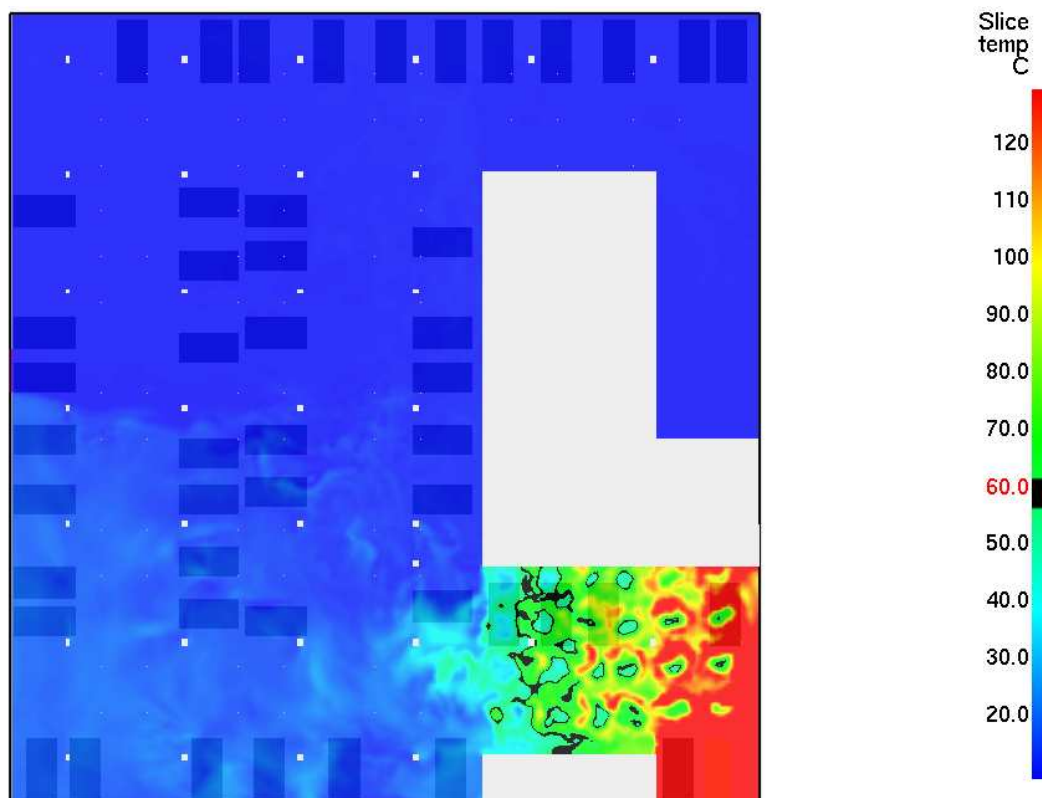
HRR: 1.5 MW
Time: 900.0



HRR: 3.5 MW
Time: 1199.4

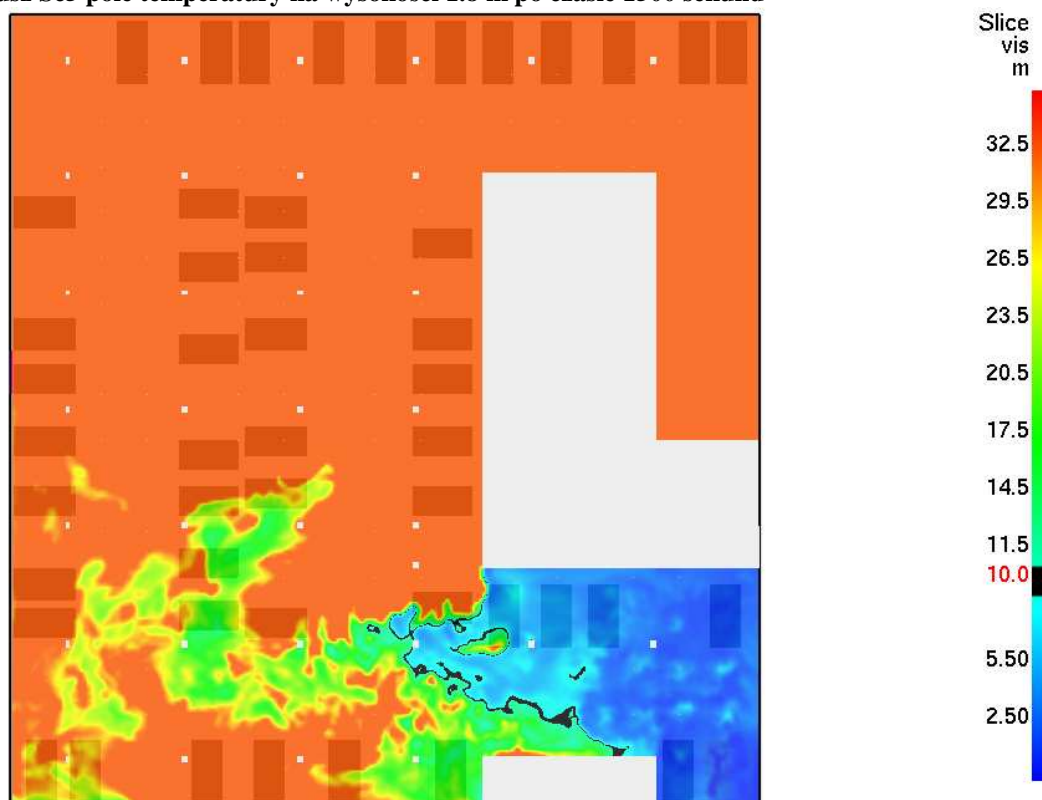


Rysunek 54 Scenariusz Sc5 pole temperatury na wysokości 1.8 m po czasie 900 i 1200 sekund



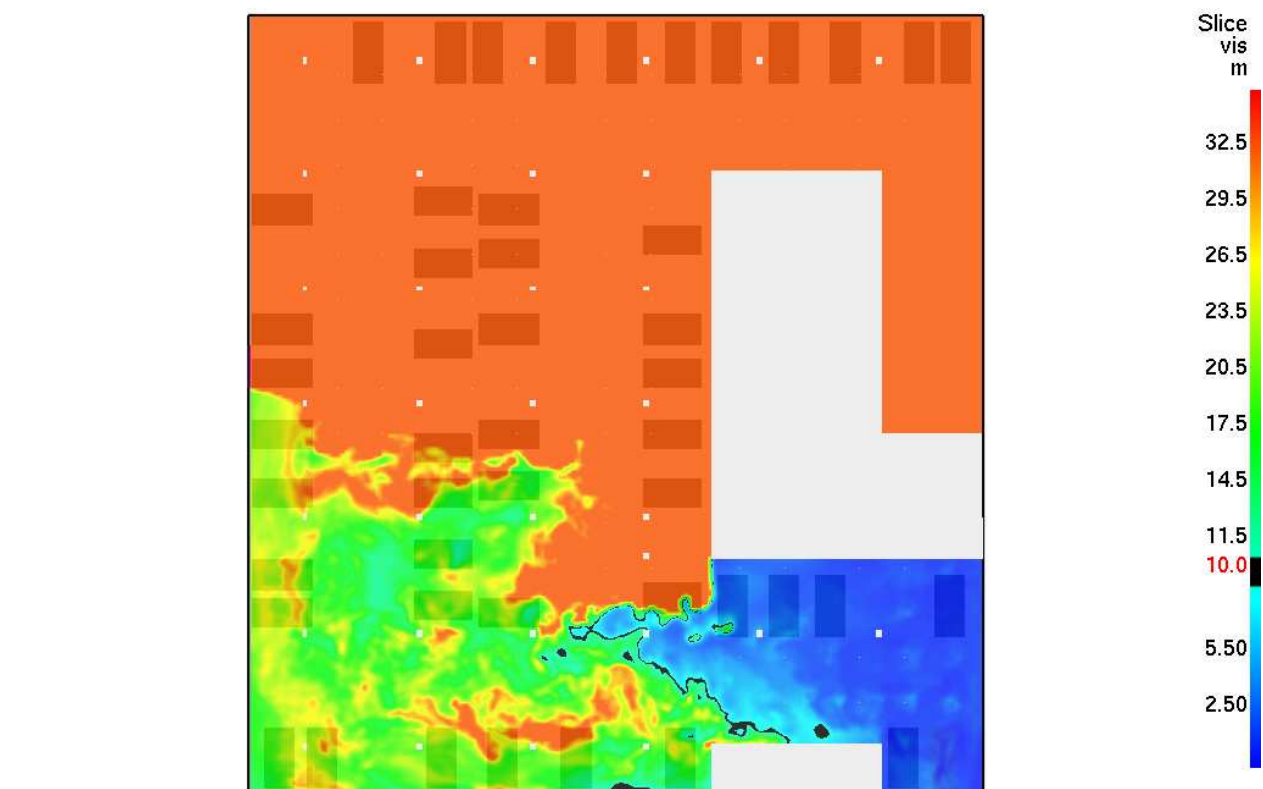
HRR: 6.3 MW
Time: 1499.4

Rysunek 55 Scenariusz Sc5 pole temperatury na wysokości 1.8 m po czasie 1500 sekund

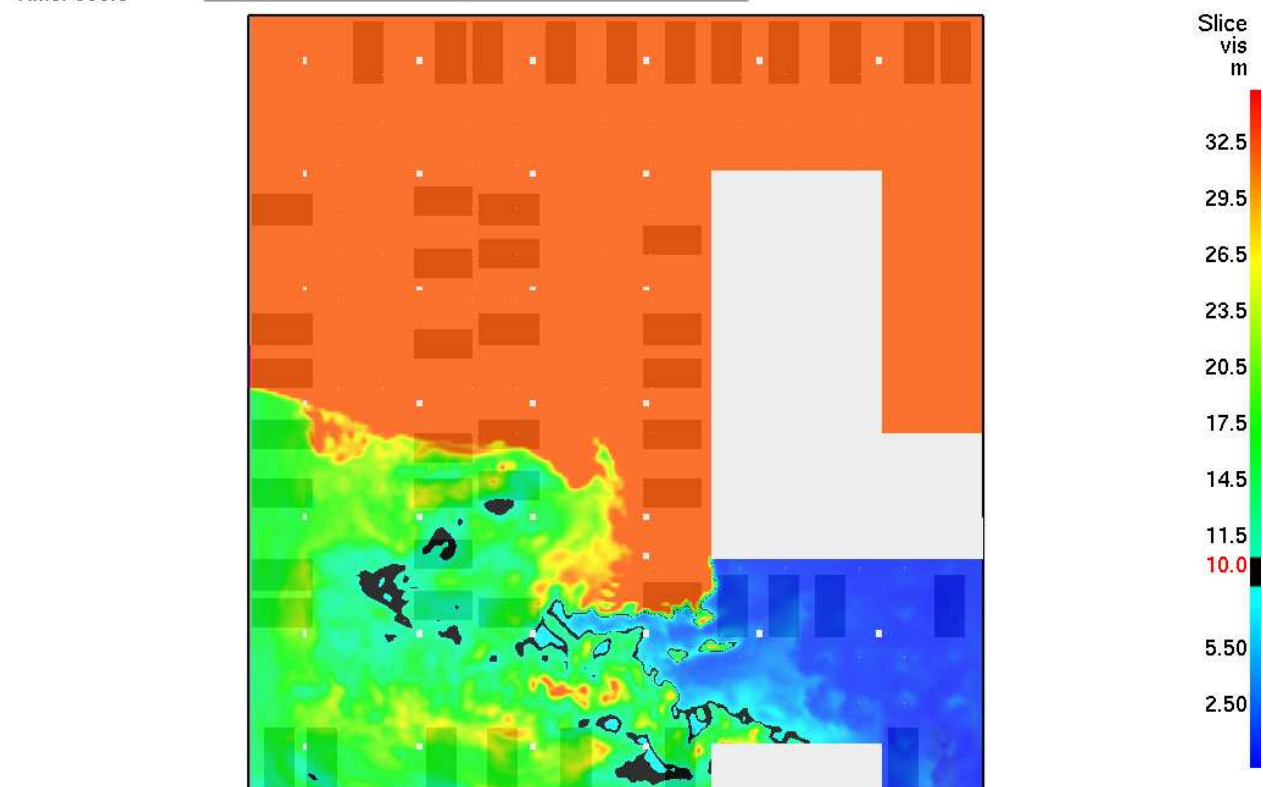


HRR: 1.5 MW
Time: 360.0

Rysunek 56 Scenariusz Sc5 zasięg widzialności na wysokości 1.8 m po czasie 360 sekund



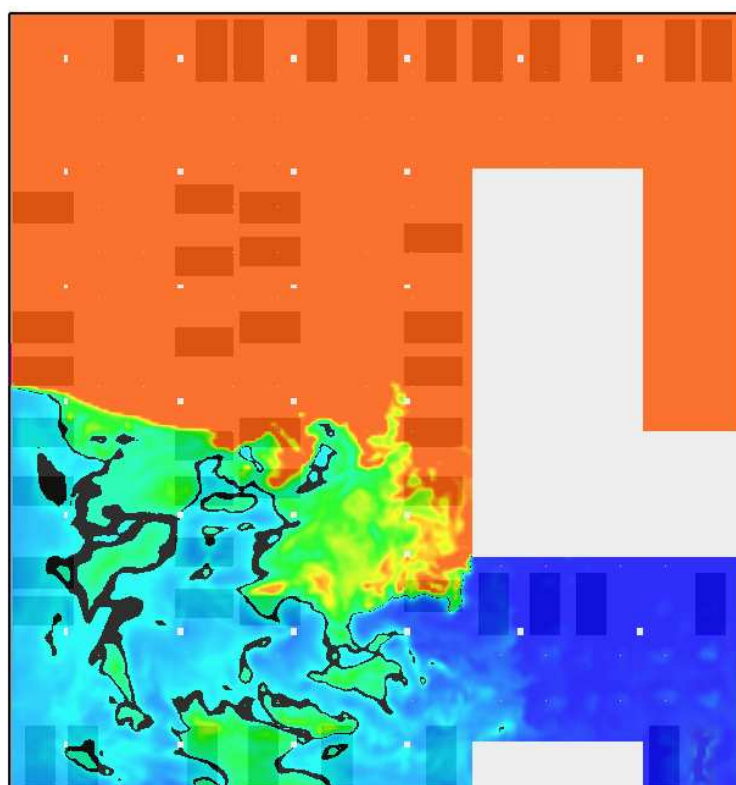
HRR: 1.5 MW
Time: 600.3



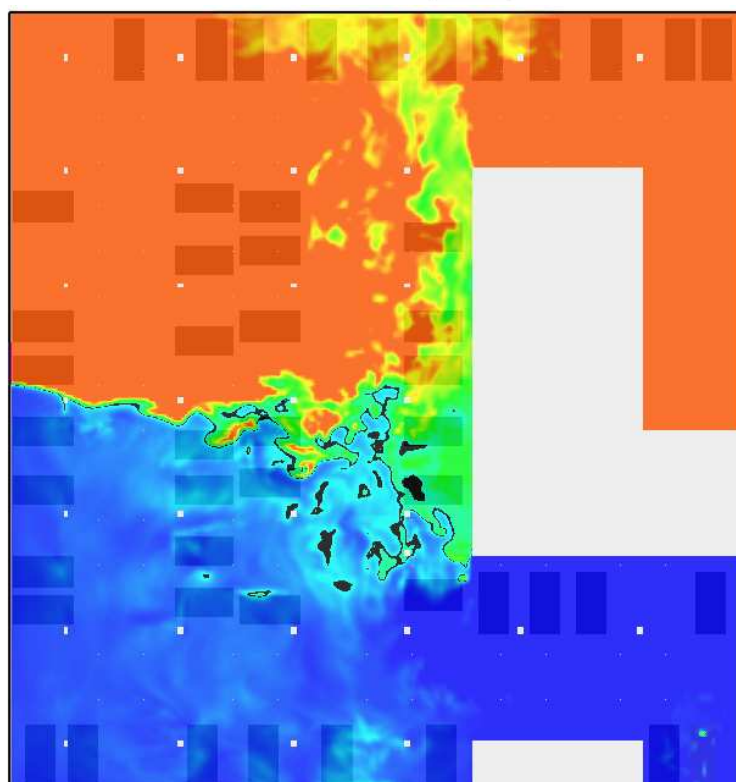
HRR: 1.5 MW
Time: 900.0



Rysunek 57 Scenariusz Sc5 zasięg widzialności na wysokości 1.8 m po czasie 600 i 900 sekund



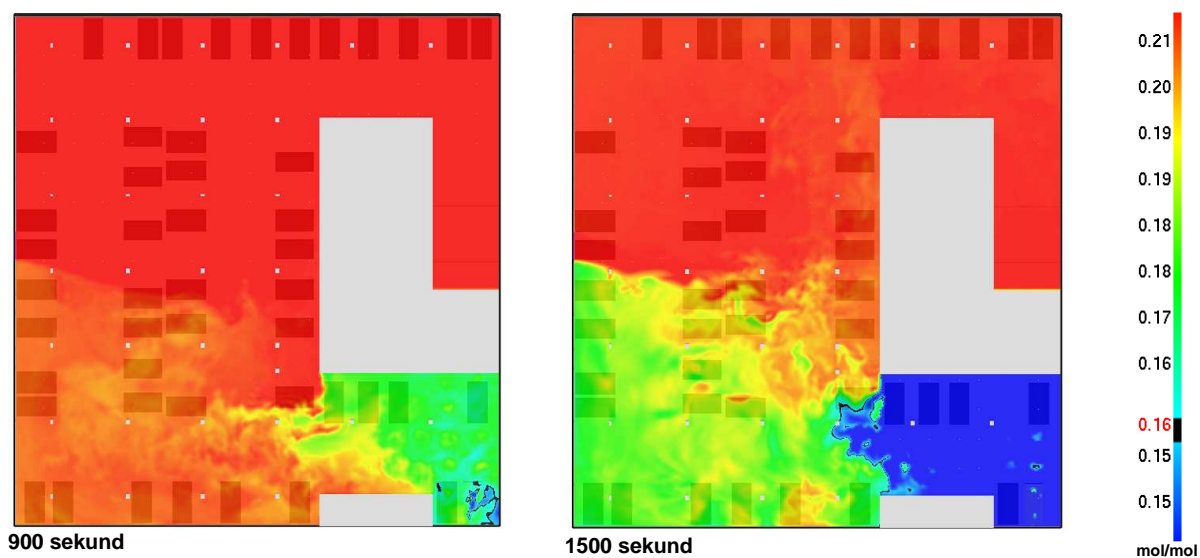
HRR: 3.5 MW
Time: 1199.4



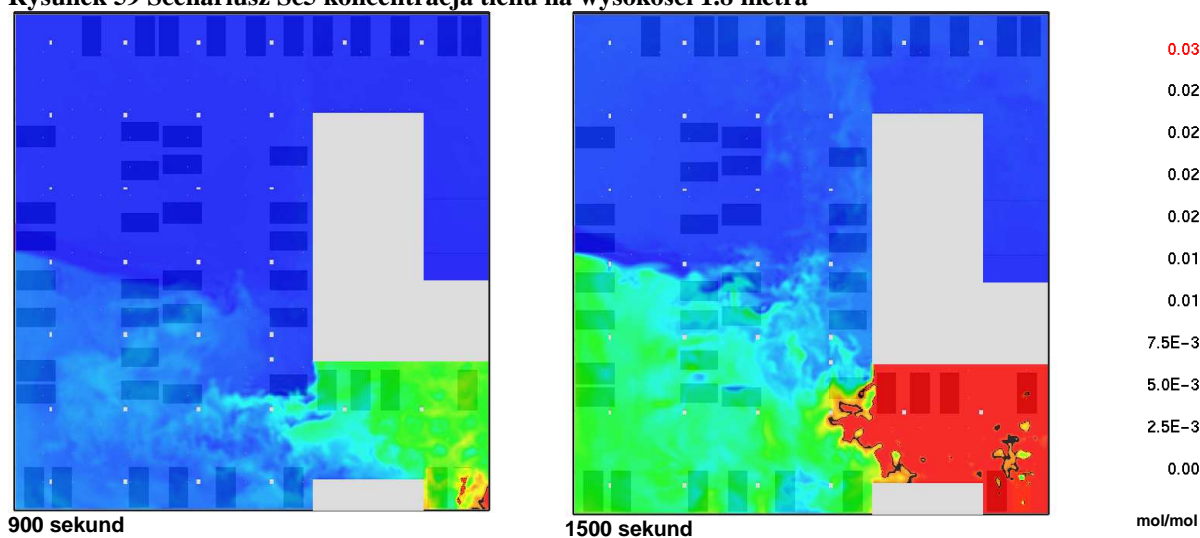
HRR: 6.3 MW
Time: 1499.4



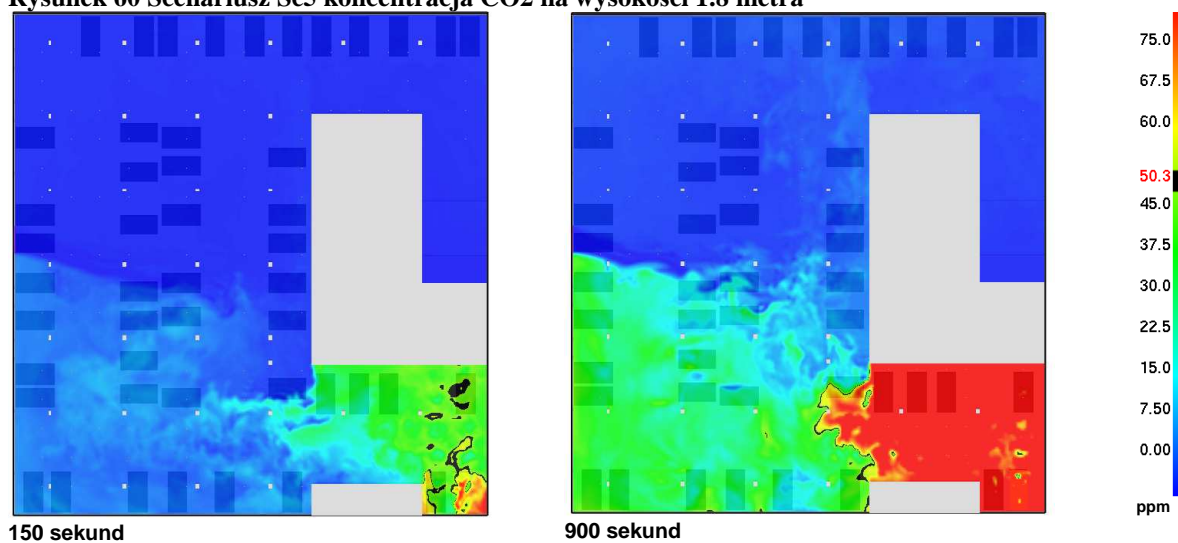
Rysunek 58 Scenariusz Sc5 zasięg widzialności na wysokości 1.8 m po czasie 1200 i 1500 sekund



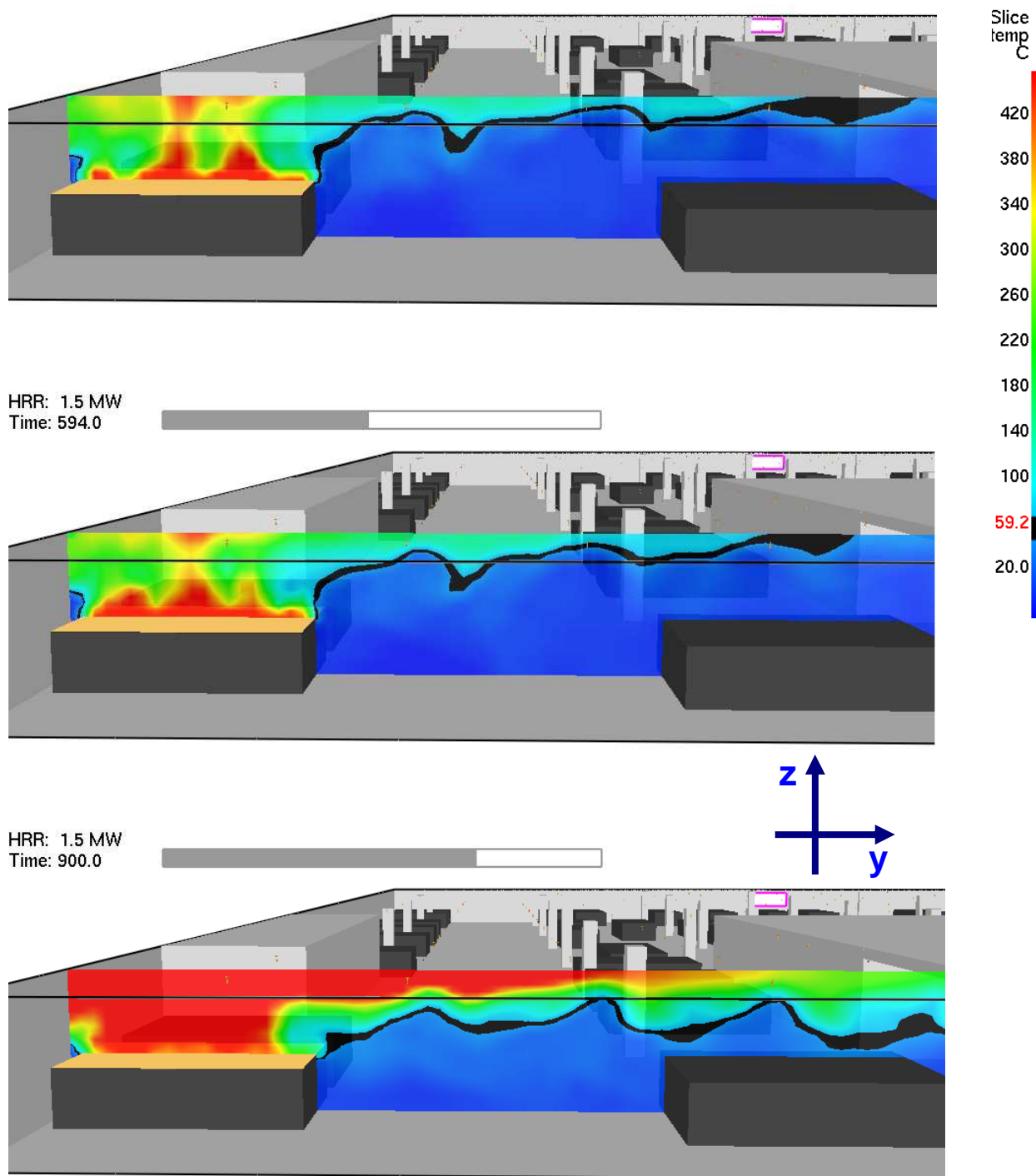
Rysunek 59 Scenariusz Sc5 koncentracja tlenu na wysokości 1.8 metra



Rysunek 60 Scenariusz Sc5 koncentracja CO2 na wysokości 1.8 metra

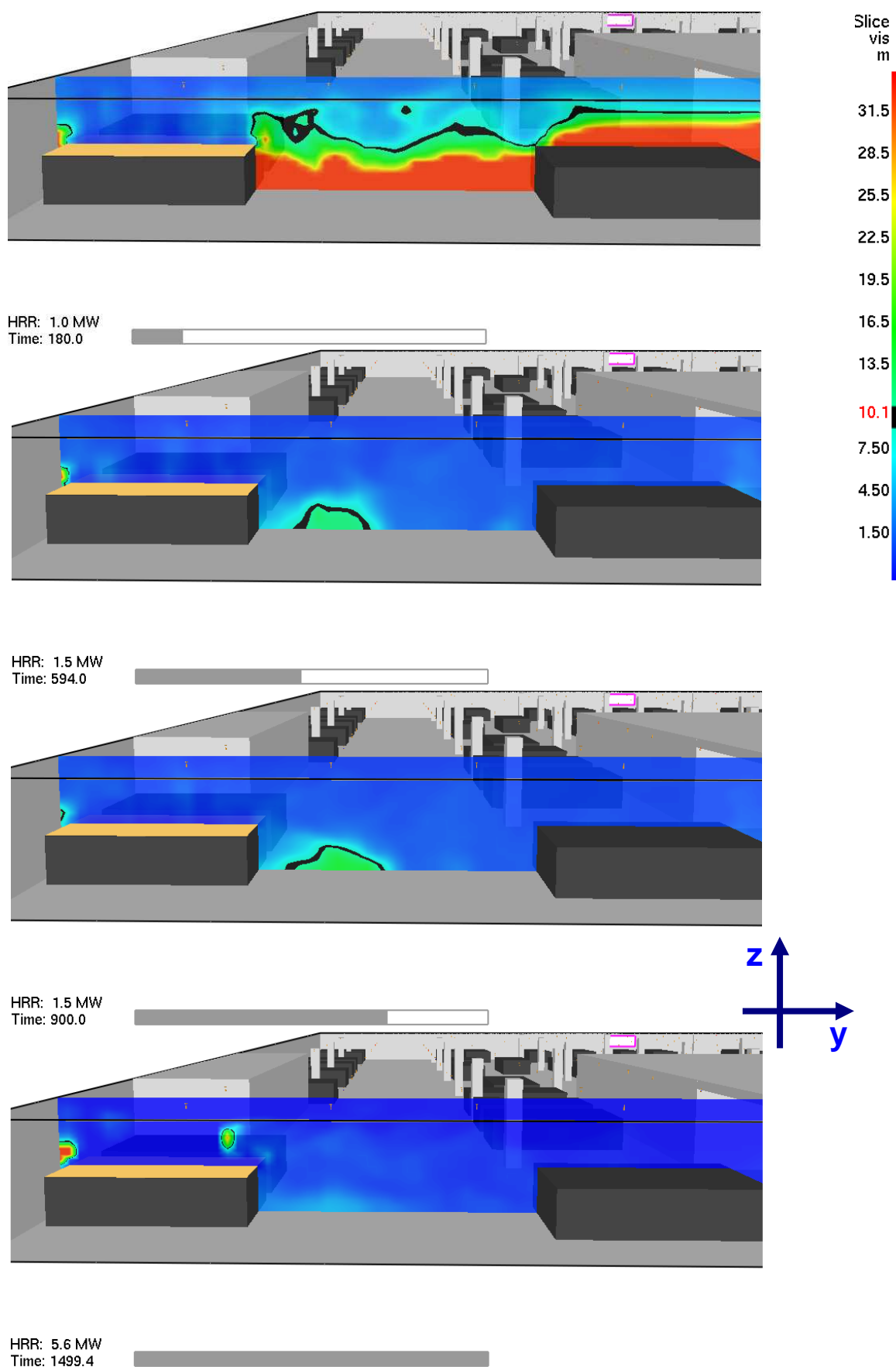


Rysunek 61 Scenariusz Sc5 koncentracja CO na wysokości 1.8 metra

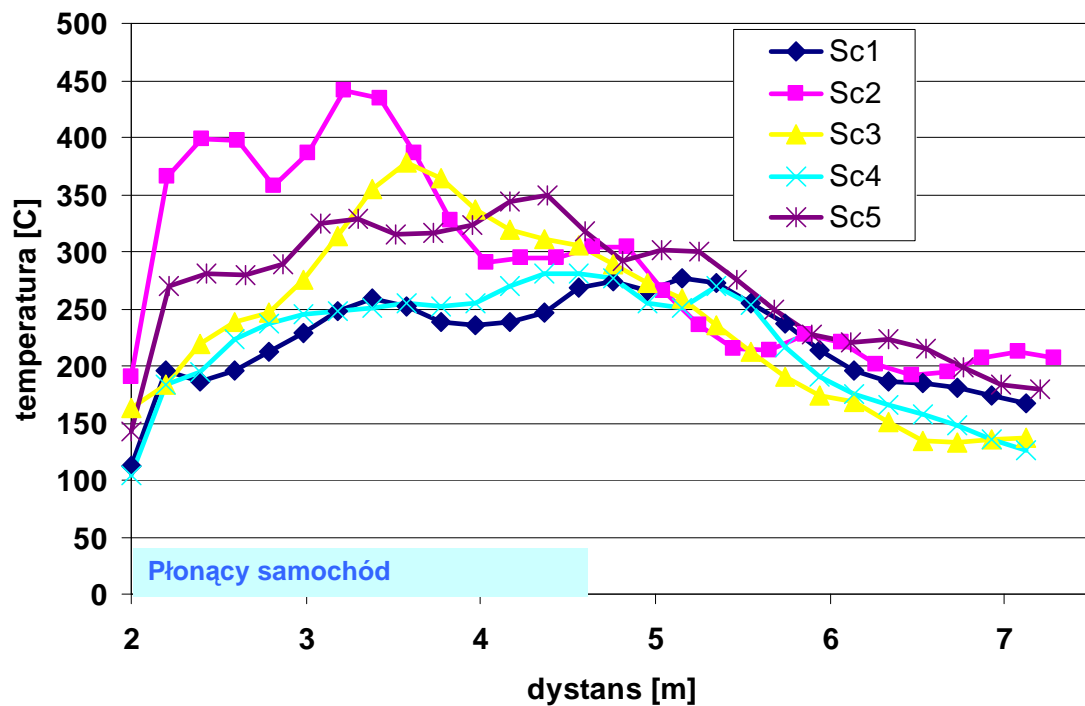


HRR: 5.6 MW
Time: 1499.4

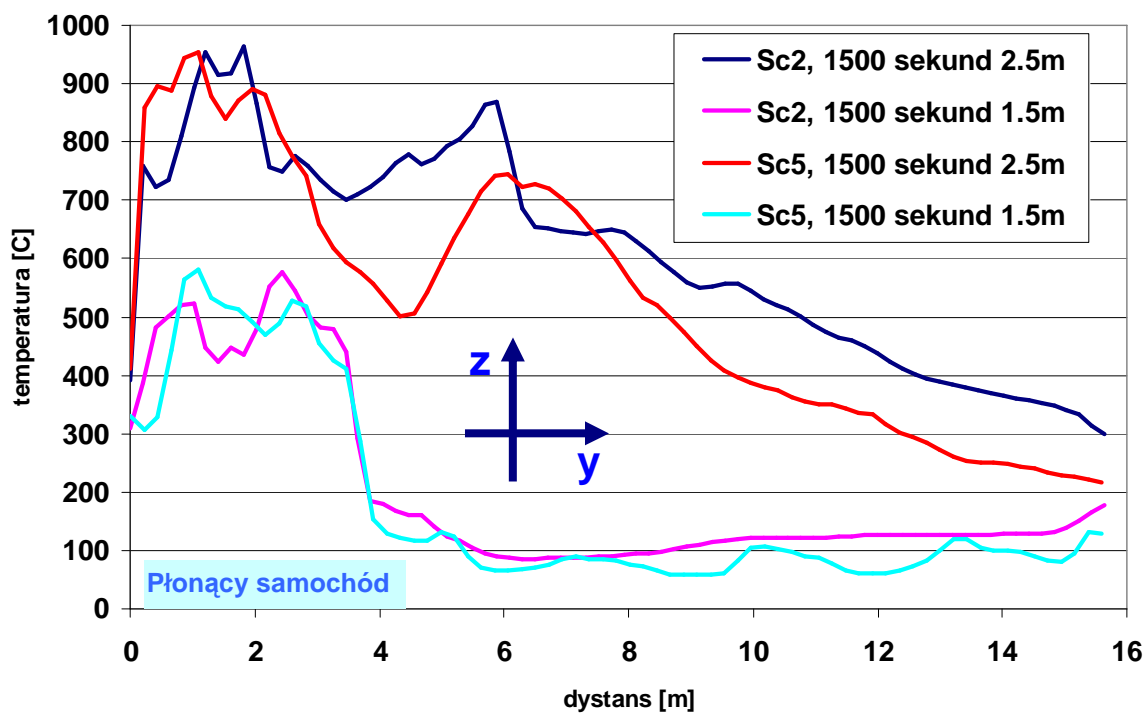
Rysunek 62 Scenariusz Sc5 pole temperatury w płaszczyźnie osiowej z płonącego samochodu po czasie (od góry) 600, 900 i 1500 sekund



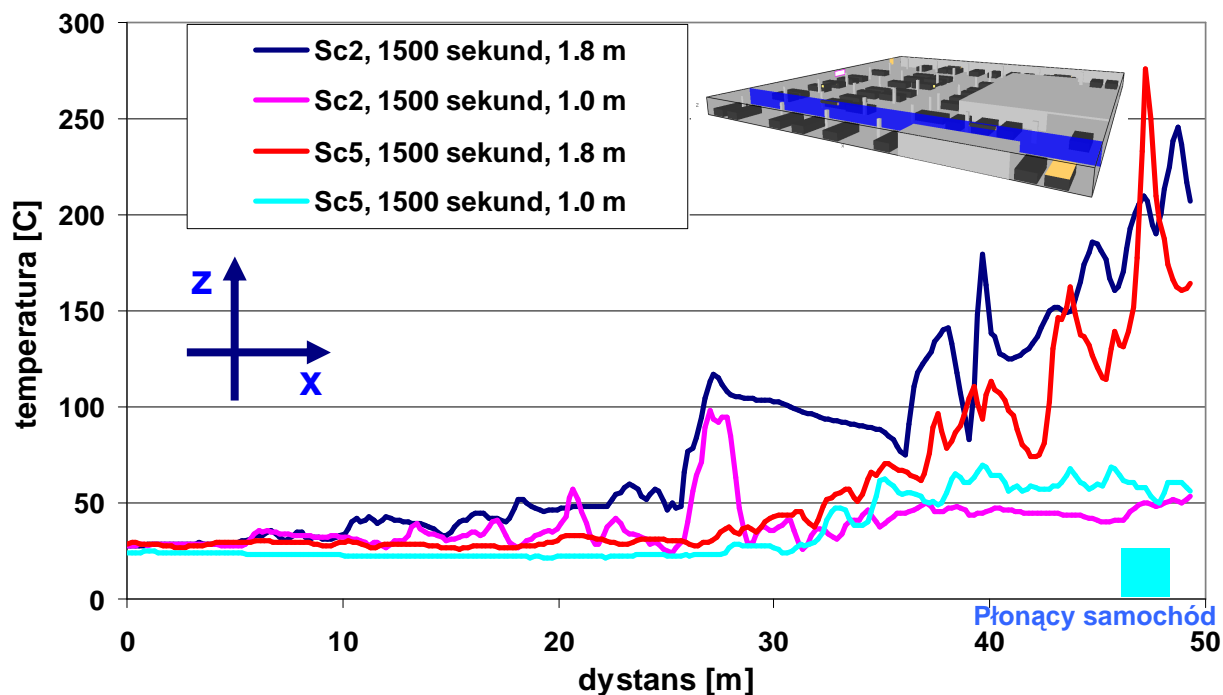
Rysunek 63 Scenariusz Sc5 zasięg widzialności w płaszczyźnie osiowej zy płonącego samochodu po czasie (od góry) 180, 600, 900 i 1500 sekund



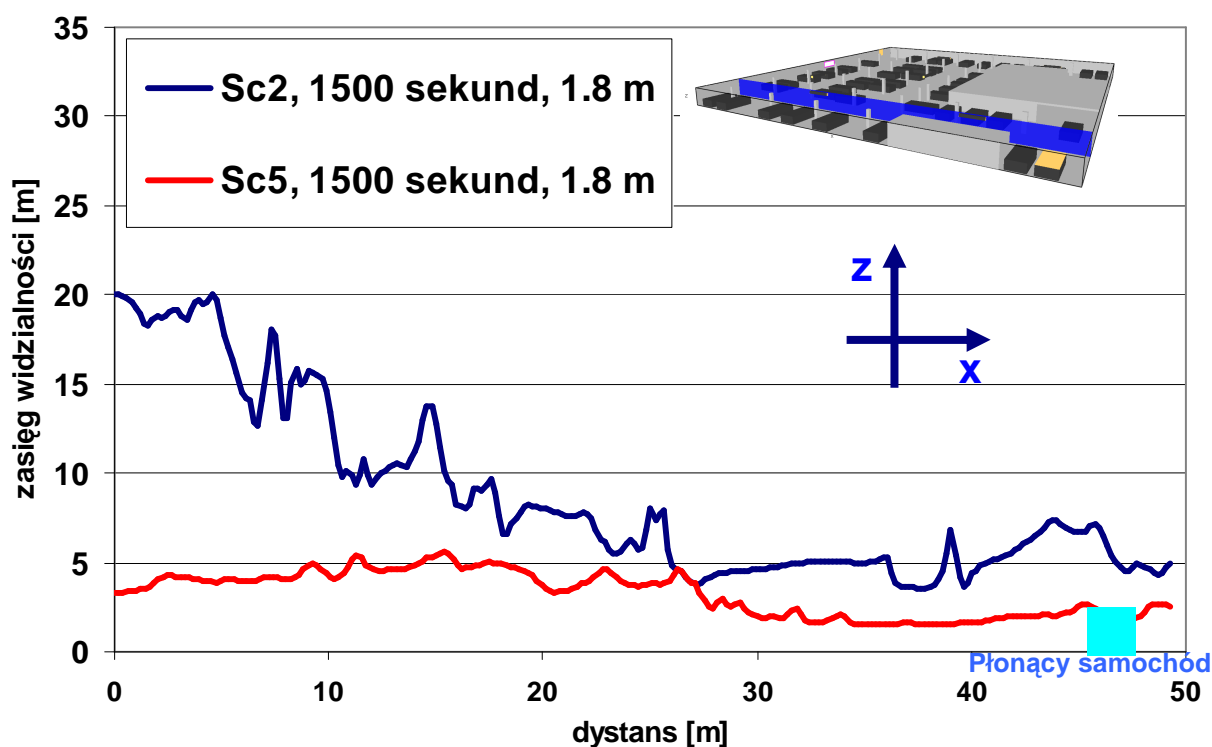
Rysunek 64 Porównanie temperatur pod stropem dla poszczególnych scenariuszy w płaszczyźnie osiowej samochodu po czasie 900 sekund.



Rysunek 65 Porównanie temperatur w scenariuszach Sc2 i Sc5 w płaszczyźnie osiowej samochodu po czasie 1500 sekund.



Rysunek 66 Porównanie temperatur w płaszczyźnie osiowej wentylatorów strumieniowych S1 i S2 po czasie 1500 sekund, na wysokości 1.0m i 1.8m, otrzymanych w scenariuszach Sc2 i Sc5.



Rysunek 67 Porównanie zasięgu widzialności w płaszczyźnie osiowej wentylatorów strumieniowych S1 i S2 po czasie 1500 sekund, na wysokości 1.8m, otrzymanych w scenariuszach Sc2 i Sc5.

8. Podsumowanie i wnioski

- Temperaturowe skutki pożaru są efektywnie ograniczane przez wentylację strumieniową przez czas dwukrotnie dłuższy niż minimalny czas ewakuacji (Sc1-Sc4). Temperatura na przejściach ewakuacyjnych jest utrzymywana przez odpowiedni czas poniżej 60°C. Pożar w narożnej części kondygnacji '-2' powoduje zwykle lokalne przekroczenie oczekiwanych warunków temperaturowych, a w dłuższej perspektywie prowadzi do ocięcia wyjścia ewakuacyjnego E2.
- Strumieniowa wentylacja pożarowa utrzymuje dogodne warunki widzialności przez cały czas ewakuacji. Jedynie pożar w narożnej części kondygnacji '-2' może prowadzić w dłuższym czasie do lokalnego spadku zasięgu widzialności poniżej wartości oczekiwanych. Przekroczenie tych wartości jest jednak znacznie wolniejsze niż w przypadku wentylacji kanałowej z instalacją tryskaczową.
- Porównanie pracy wentylacji kanałowej z instalacją tryskaczową i wentylacji strumieniowej pokazuje, że oba systemy są w stanie zapewnić dobre warunki ewakuacji. Należy jednak podkreślić, że o ile instalacja tryskaczowa skuteczniej ogranicza moc pożaru, to przyczynia się one jednak do poważnego ograniczenia zasięgu widzialności. Instalacja strumieniowa zapewnia natomiast lepszą widoczność i łatwiejszą lokalizację źródła ognia, a tym samym poprawia warunki w jakich będą działały jednostki PSP. Spadek widoczności w systemie z wentylacją strumieniową ma charakter warstwowy tj. dym unoszony przez gorące powietrze i mieszaninę gazów spalinowych wypełnia w pierwszej kolejności górne warstwy powietrza w garażu. W przypadku wentylacji kanałowej z instalacją tryskaczową spadek widoczności następuje w całej objętości.
- Symulacja potwierdziła konieczność uzupełnienia instalacji wyciągowej o wentylatory strumieniowe. Wentylatory wyciągowe przy obecnej konfiguracji, nawet o stosunkowo dużej wydajności, nie są w stanie same w pełni zapewnić oczekiwanych warunków ewakuacji, głównie ze względu na ograniczenia związane z niemożnością kontrolowania przepływu powietrza. Taka kontrola jest natomiast możliwa przy zastosowaniu wentylatorów strumieniowych.
- Temperatura pod stropem, bezpośrednio nad źródłem ognia osiąga po czasie 15 minut średnio około 220-380 °C (Sc1-Sc3), przy czym lokalnie może osiągnąć nawet 450 °C. Po 25 minutach temperatura osiąga średnio około 600-850 °C jakkolwiek lokalnie może wynieść nawet 950 °C (Sc2, Sc5). W tym czasie jednostki PSP będą już prowadzić akcję gaśniczą ograniczając moc pożaru.
- Porównanie czasu wymaganego dla przeprowadzenia ewakuacji (minimum 7 minut) oraz przewidywanego czasu, po którym widzialność i temperatura na przejściach ewakuacyjnych osiągną niebezpieczne wartości progowe wykazuje że, projektowany system bezkanałowej

wentylacji oddymiającej w garażu zapewni bezpieczne warunki ewakuacji na przejściach ewakuacyjnych w przewidywanym czasie ewakuacji ludzi (Sc1-Sc4) oraz ułatwi prowadzenie działań ratowniczo-gaśniczych przez ekipy straży pożarnej (Sc2).

- Symulacja wykazała również, że koncentracja produktów spalania (CO₂ i CO) nie osiąga wielkości krytycznych w czasie ewakuacji. Jest to związane z dużą wydajnością przyjętych urządzeń wentylacyjnych jak również sposobem ich pracy (rozrzedzaniem i mieszaniem mas powietrza przez wentylatory strumieniowe). Wartości zbliżają się do krytycznych dopiero po dłuższym czasie (1200 -1500 sekund) oraz lokalnie w pobliżu źródła ognia. Należy jednak pamiętać o pewnych ograniczeniach związanych z modelowaniem numerycznym reakcji chemicznych w tak dużych obiektach.

Literatura

[1] NFPA 502. "Standards for Road Tunnels, Bridges and Other Limited Access High ways" 2001 Edition.

[2] Brzezińska D. (2004) Wykorzystanie technik komputerowych w projektowaniu systemów oddymiania (na przykładzie Wielofunkcyjnej Hali Sportowo-Widowskiej) 4, *Ochrona przeciwpożarowa w Budownictwie*.

[3] Ferziger J. H., Perić M. (1999) *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer

[4] Ferziger J. H. (1995) Large-eddy and direct simulation of turbulent flows. W *Lecture notes for the short course on calculations of turbulent flows*. TU Hamburg

[5] Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide, NIST Special Publication 1018 March 2006.

[6] Fire Dynamics Simulator (Version 4) Users Guide, NIST Special Publication 1019 March 2006.

[7] Jansens M. Heat release rate of motor vehicles, *5th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods*, Luxemburg October 2004.

[8] Madrzykowski D. Vettori R. L. (2000) Simulation of the Dynamics of the Fire at 3146 Cherry Road NE Washington D.C., May 30, 1999; *NISTIR 6510*.

[9] Skaźnik M. (2005) Utrata widoczności w dymie podstawowym zagrożeniem podczas pożaru, 2, *Ochrona przeciwpożarowa w Budownictwie*.