

dr hab. inż. Artur Rusowicz, prof. Politechniki Warszawskiej

dr inż. Andrzej Grzebielec

mgr inż. Adam Dorsz

Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa,
Politechnika Warszawska

Zastosowanie metod numerycznych w ocenie bezpieczeństwa ewakuacji – w przykładowym garażu podziemnym

Streszczenie:

W większości nowobudowanych blokach mieszkalnych na najniższych kondygnacjach znajdują się garaże, które, zgodnie z obowiązującym prawem, podlegają rozporządzeniom dotyczącym ochrony przeciwpożarowej. W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznej garażu w trakcie pożaru. Zobrazowane zostało działanie wentylacji oddymiającej oraz mechanizm rozchodzenia się pożaru w garażu podziemnym.

Słowa kluczowe: ochrona przeciwpożarowa, wentylacja, symulacja numeryczna.

Application of the Numerical Methods in the Evaluation of Safety Evacuation – the Example of Underground Garage

Abstract:

In the majority of the new built blocks of flats on the lower floors there are garages. The garages, according to the law in force are subjects to fire protection regulations. The article presents the results of numerical simulation of the garage during a fire. The smoke ventilation activity and the mechanism of fire spreading in the underground garage were presented.

Keywords: fire protection, ventilation, numerical simulation.

1. WSTĘP

Obcowanie człowieka z naturą od zawsze wiązało się z wyzwaniami technicznymi stanowiącymi podwaliny szeroko rozumianej inżynierii. Już V w. p.n.e. grecki filozof Empedokles z Akragas wysnuł koncepcję czterech nieprzemijających żywiołów, z których jednym jest ogień, odgrywający od zarania dziejów istotne znaczenie dla cywilizacji jako źródło światła i ciepła, ale także niosący zagrożenie wynikające z jego nieprzewidywalności [1]. Obecnie w czasach, kiedy w obiektach budowlanych zagrożenie powstawania niekontrolowanego spalania jest wysokie, z uwagi na zmieniające się wyposażenie obiektów budowlanych, które z dekady na dekadę zwiększa gęstość obciążenia ogniowego [2]. Istotne staje się zapewnienie odpowiednich warunków panujących w obiekcie podczas pożaru oraz kontrolowanie jego rozwoju tak, aby eksploatacja obiektu była bezpieczna. W artykule poruszono istotne, z punktu widzenia inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, zagadnienie związane z bezpieczeństwem ewakuacji osób w obiekcie, w którym występuje pożar. Dynamiczny rozwój techniki w ostatnich dziesięcioleciach, zwłaszcza w zakresie elektroniki i automatyki umożliwił wykorzystanie opanowanych technologii do poprawy komfortu i bezpieczeństwa użytkowania obiektów budowlanych poprzez stworzenie zaawansowanych systemów dostosowujących swoją pracę do zagrożeń w nich powstających. Do takich systemów należy zaliczyć systemy wentylacji pożarowej, które obecnie stanowią złożone instalacje wykorzystujące sterowanie poszczególnymi elementami systemu w zależności od realizowanego scenariusza pożarowego. Istotą działania systemu wentylacji pożarowej, jest usuwanie dymu i kontrolowanie rozprzestrzeniania się ognia tak, aby umożliwić ewakuację i ochronę ludzi przebywających w obiekcie w trakcie pożaru do momentu przyjazdu służb ratowniczych [3, 4]. W myśl rozumienia polskich przepisów, za zapewnienie bezpieczeństwa ewakuacji odpowiadają systemy wentylacji pożarowej, które są w stanie zapewnić, że: „... w czasie potrzebnym do ewakuacji ludzi na chronionych przejściach i drogach ewakuacyjnych nie wystąpi zadymienie lub temperatura uniemożliwiająca bezpieczną ewakuację” [5]. Szczególne znaczenie nabiera ochrona dróg ewakuacyjnych podczas pożaru na kondygnacjach budynku, których zagrożenie wystąpieniem pożaru jest duże [6]. Do takich kondygnacji zalicza się m.in. kondygnacje podziemne w szczególności garaże podziemne.

Wentylacja pożarowa jest szczególnie trudnym zagadnieniem z punktu widzenia złożonych zjawisk fizycznych towarzyszących podczas jej pracy [7, 8] oraz legislacji krajowej – z uwagi na sformułowane wobec wentylacji pożarowej wymagania funkcjonalne, a nie formalne, pozostawiające udowodnienie skuteczności daleko nieokreślone [5]. W artykule zaproponowano sposób oceny skuteczności działania wentylacji pożarowej w garażu podziemnym pod budynkiem mieszkalnym, jako reprezentatywnym przypadku wraz z jej oceną na podstawie modelu numerycznego.

Na potrzeby analizy skuteczności pracy wentylacji pożarowej w garażu podziemnym zostały wykonane obliczenia numeryczne odwzorowujące jej pracę i parametry otoczenia oddziaływujące na warunki panujące podczas pożaru.

2. CEL PRACY

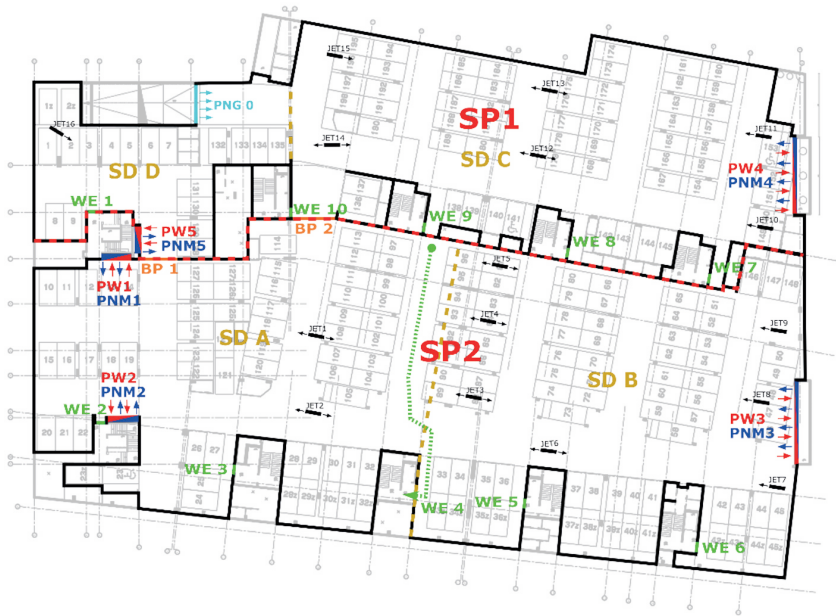
Praca stanowi próbę analizy rozprzestrzeniania się dymu i ciepła od modelowego pożaru w garażu podziemnym. Z racji ograniczonej zawartości artykułu, sprowadzono analizę do pojedynczej strefy dymowej rozważanej w garażu. W opracowaniu posłużono się specjalistycznym oprogramowaniem do analizy zagadnień związanych z inżynierią bezpieczeństwa pożarowego, jakim jest program Fire Dynamics Simulator (FDS) w wersji 6.1.1. Fire Dynamics Simulator jest oprogramowaniem, opracowanym przez amerykański instytut naukowo-badawczy NIST (ang. *National Institute of Standards and Technology*) przy współpracy fińskiego instytutu VTT Technical Research Centre of Finland [9, 10]. Program FDS korzysta z modeli obliczeniowej mechaniki płynów (CFD z ang. *Computational Fluid Dynamic*) do rozwiązania zagadnień ciepłno-przepływowych [9, 10, 11]. Model obliczeniowy zastosowany w programie FDS bazuje na rozwiązaniach równania Naviera-Stokesa zoptymalizowanego dla przepływów o małych prędkościach wraz z uwzględnieniem zjawiska spalania i przepływu ciepła. W skład równań Naviera-Stokesa wchodzi równania wyrażające zasadę zachowania masy, zasadę zachowania energii oraz zasadę zachowania pędu. Rozwiązanie równań Naviera-Stokesa stanowi pole temperatury, ciśnienia, gęstości oraz trzy składowe wektora prędkości. Wykorzystany model obliczeniowy programu oparty jest na modelu turbulencji typu LES (ang. *Large Eddy Simulation*). Wielkowirowy model turbulencji umożliwia odwzorowywanie wirów

wielkości porównywalnej z wymiarami pojedynczej komórki obliczeniowej [12]. W celu oceny skuteczności pracy wentylacji pożarowej ocenia się stan środowiska wewnętrznego w rozważanym obiekcie podczas pożaru. Oceny stanu środowiska wewnętrznego podczas pożaru dokonuje się przy wykorzystaniu analizy rozprzestrzeniania się dymu i ciepła. Rozprzestrzenianie się dymu i ciepła ocenia się podczas określonego obliczeniowego czasu niezbędnego na ewakuację ludzi z obszaru objętego pożarem [3, 4].

3. METODYKA

3.1. Modelowany obiekt

Niniejsze opracowanie dotyczy garażu podziemnego zamkniętego w wielorodzinnym budynku mieszkalnym. Garaż obejmuje kondygnację podziemną i stanowi dwie strefy pożarowe oddzielone od siebie przegrodą pożarową oraz bramą pożarową. W każdej ze stref można wyszczególnić dwie strefy detekcji dymu, dla których przewidziano odrębny scenariusz pożarowy. Garaż przeznaczony jest dla samochodów osobowych o łącznej liczbie dostępnych miejsc parkingowych wynoszących 198 miejsc. Wysokość garażu wynosi od ok. 2,49 m do ok. 3,75 m. W garażu przewidziano bezkanałowy mechaniczny system wentylacji pożarowej wykorzystujący wentylatory strumieniowe do transportu gazów i dymów pożarowych od punktów nawiewnych do punktów wyciągowych powodując jednocześnie mieszanie dymu z powietrzem oraz wentylatory wyciągowe do usuwania produktów spalania na zewnątrz budynku. Z przestrzeni garażowej istnieje możliwość ewakuacji przez 10 wyjść ewakuacyjnych, po 5 wyjść ewakuacyjnych z każdej strefy pożarowej. Schemat instalacji w rozważanym garażu oraz rzut modelu zostały przedstawione na rys. 1. Użytkownikami garażu są przede wszystkim mieszkańcy, osoby zaznajomione z planem garażu. Dostęp do wyjść ewakuacyjnych nie jest ograniczony. Maksymalna długość przejścia ewakuacyjnego dla strefy dymowej A wynosi ok. 39,2 m, która na rys. 1 została zaznaczona kolorem zielonym.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie analizowanego garażu z podziałem na strefy detekcji dymu. Źródło: opracowanie własne.

PNG – punkt napływu naturalnego powietrza do przestrzeni garażu,

PNM – punkt napływu mechanicznego, PW – punkt wyciągowy,

WE – wyjście ewakuacyjne, JET – wentylator strumieniowy,

BP – brama pożarowa, SD – strefa dymowa, SP – strefa pożarowa.

Symulację przeprowadzono w oparciu o założenia warunkujące powstanie modelu obliczeniowego. Do najważniejszych z nich należą:

- Model przestrzeni obliczeniowej został podzielony za pomocą sześcienniej strukturalnej siatki obliczeniowej o rozdzielczości 0,2 m (aspect ratio =1).
- Liczba komórek obliczeniowych w siatce wynosi 2 031 744 szt.
- Model przepływu turbulentnego przyjmowany w symulacji to modelu turbulencji LES (Large Eddy Simulation).
- Zastosowany model SGS to model Deardorffa.
- Modelowym źródłem pożaru jest powierzchniowe źródło o wymiarach 5×5 m i zmiennej mocy w czasie wg holenderskiej normy NEN 6098:2010 [10].

- Moc maksymalna modelowanego pożaru wynosi 9,4 MW.
- Wartość przyjętego współczynnika generacji sadzy wynosi $Y_s = 0,1$ kg/kg.
- W modelu pożaru przyjęto wartość ciepła spalania, uśrednioną dla samochodu osobowego wynoszącą 25 MJ/kg.
- Udział ciepła wymienianego na drodze konwekcji wynosi 70% a na drodze promieniowania 30%.
- Wentylatory strumieniowe zostają uruchomione w 300 s.
- Uruchomienie wentylatorów wyciągowych następuje bezzwłocznie po wykryciu pożaru w 60 s.
- Czas do osiągnięcia wydajności znamionowej wentylatorów strumieniowych wynosi 10 s.
- Czas do osiągnięcia wydajności znamionowej wentylatorów wyciągowych wynosi 60 s.
- Łączna wydajność wentylatorów oddymiających wynosi 180 000 m³/h,
- Parametry początkowe otoczenia:
 - a) temperatura otoczenia +20°C,
 - b) ciśnienie otoczenia 1,01325 bar,
 - c) wilgotność względna 40%,
 - d) współczynnik widzialności – 3,
 - e) przyciąganie ziemskie 9,81 m/s²,

Na potrzeby analizy skuteczności pracy systemu przeciwpożarowego w garażu podziemnym konieczne staje się określenie długości wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji, na podstawie którego dokonuje się oceny parametrów panujących na przejściach ewakuacyjnych. Garaż podziemny, zwłaszcza pod budynkiem mieszkalnym, jest traktowany jako obszar o małym zagęszczeniu osób. Długość trwania wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji szacowana jest na podstawie zależności (1):

$$t_{\text{WCBE}} = \Delta t_{\text{det}} + \Delta t_{\text{a}} + (\Delta t_{\text{pre}(99\%)} + \Delta t_{\text{pre}(1\%)} + \Delta t_{\text{tra}}) \quad (1)$$

gdzie:

Δt_{det} – czas detekcji [s],

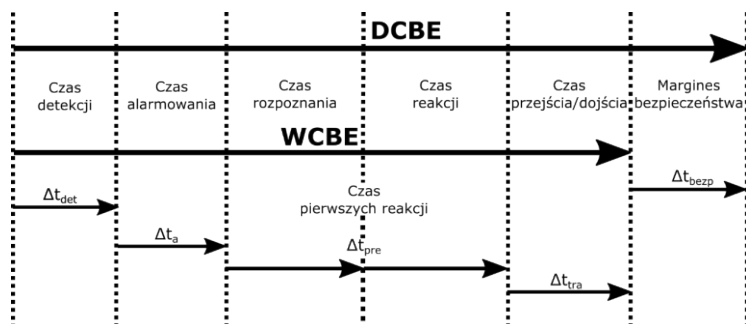
Δt_{a} – czas alarmowania [s],

$\Delta t_{\text{pre}(1\%)}$ – czas reakcji pierwszych osób [s],

$\Delta t_{\text{pre}(99\%)}$ – czas reakcji ostatnich osób [s],

Δt_{tra} – czas przejścia [s].

Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji (WCBE) oraz dostępny czas ewakuacji (DCBE) zostały porównane na diagramie przedstawionym na rys. 2.



Rys. 2. Składowe wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji wg [4]

Na podstawie zapisów przedstawionych w PD 7974-6:2004 [4], poszczególne składowe wymaganego czasu bezpiecznej ewakuacji wyniosły: czas detekcji $\Delta t_{det} = 60$ s, czas alarmowania $\Delta t_a = 0$ s, czas reakcji pierwszych osób $\Delta t_{pre(1\%)} = 60$ s, czas reakcji ostatnich osób $\Delta t_{pre(99\%)} = 120$ s, czas przejścia $\Delta t_{tra} = 60$ s.

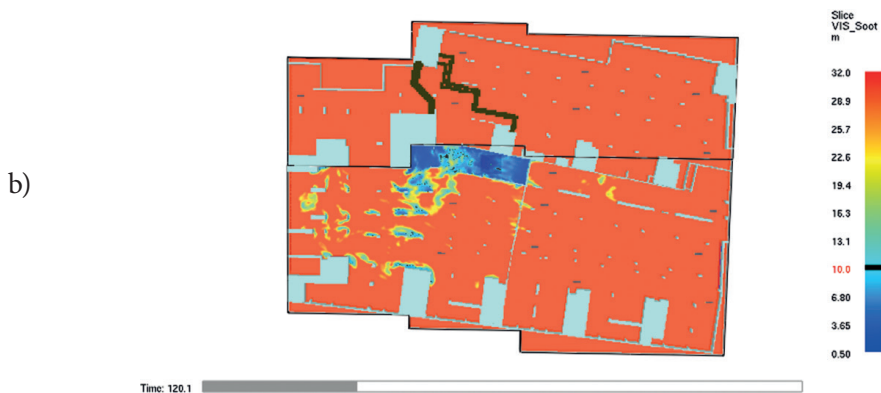
Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji dla rozważanej strefy detekcji dymu A, będący sumą powyższych czasów wyniósł: $t_{WCBE} = 300$ s.

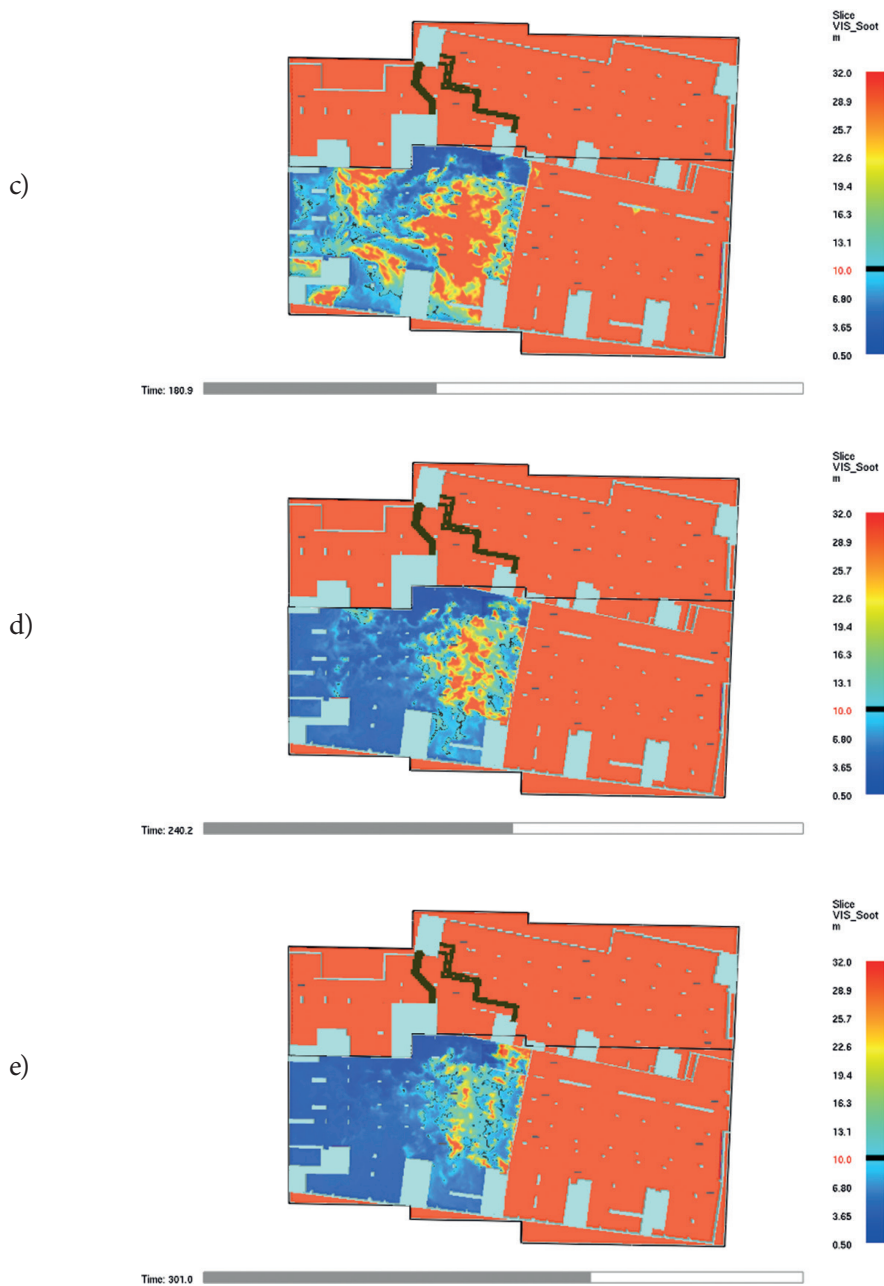
Wskutek rozwoju pożaru, w obiekcie zmieniają się warunki środowiskowe w nim panujące, oddziaływujące na przebywające w przestrzeni obiektu osoby zarówno fizycznie, jak i psychologicznie [13]. Oddziaływania fizyczne są efektem powstałych w wyniku spalania toksycznych gazów, uwalnianego ciepła i dymu ograniczającego zasięg widoczności, które bezpośrednio wpływają na funkcjonowanie układu oddechowego człowieka najczęściej prowadząc do uduszenia, bólu skóry, bólu oczu, oparzeń, hipotermii. U podstaw oddziaływań psychologicznych leży strach przed ogniem, zadymieniem, ciepłem, a także ciekawość i próba obserwacji ognia, które mogą mieć wpływ na czas rozpoczęcia ewakuacji oraz wybór jej kierunku. Do zaproponowanych w pracy warunków krytyczne środowiska będące podstawą do oceny warunków bezpiecznej ewakuacji należą [13, 14]:

- Temperatura powietrza w przestrzeni dróg ewakuacyjnych do wysokości 1,8 m nie powinna być wyższa niż 60°C .
- Zasięg widzialności znaków ewakuacyjnych i elementów konstrukcyjnych budynku na wysokości 1,8 m od poziomu posadzki drogi ewakuacyjnej nie powinien być mniejszy niż 10 m.

4. WYNIKI BADAŃ

Modelowy pożar, zgodnie z założeniami analizy, odpowiada pożarowi trzech samochodów osobowych. Miejsce pożaru zostało dobrane, jako prawdopodobnie najtrudniejszy z możliwych scenariuszy pożarowych dla strefy A. Pożar jest zlokalizowany na granicy stref dymowych, strefy A i strefy B w najodleglejszym miejscu od punktu wyciągowego. Na rys. 3 przedstawiono rozkłady widzialności dla strefy dymowej A. Kolor niebieski i jasnoniebieski odnosi się do widzialności poniżej 10 m, kolor czarny oznacza widzialność równą 10 m, kolor zielony, żółty i czerwony odpowiednio widzialność powyżej 10 m zgodnie z przedstawioną poniżej skalą.

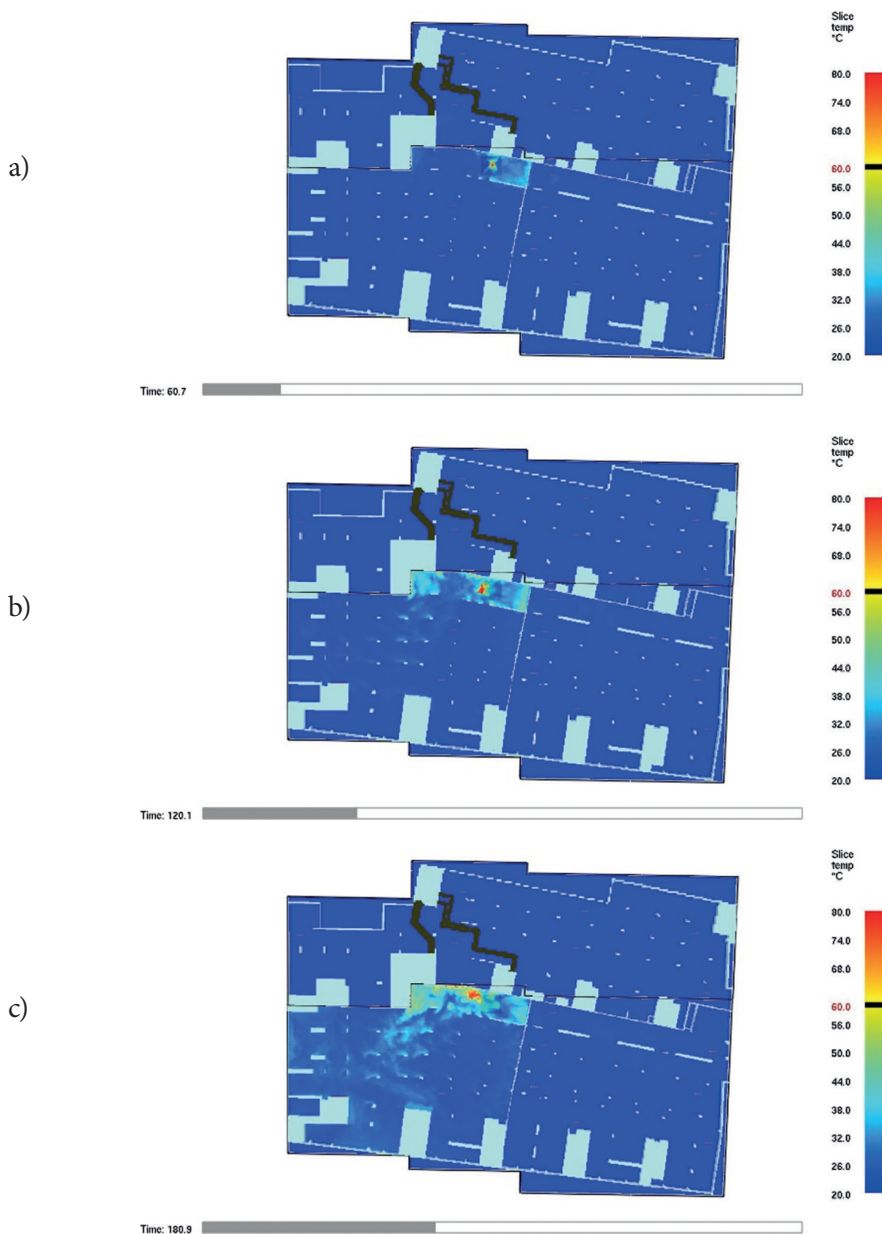


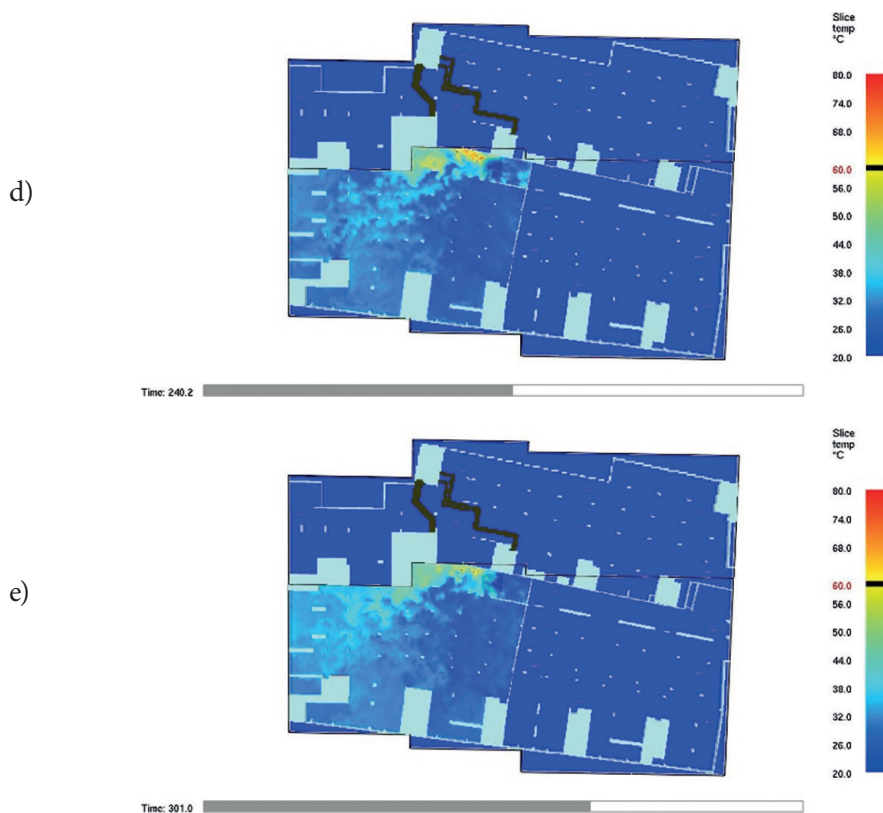


Rys. 3. Rozkład widzialności w czasie modelowego pożaru na wysokości 1,8 m od posadzki po: a – 1 min., b – 2 min., c – 3 min., d – 4 min., e – 5 min.

Źródło: opracowanie własne

Rozkład temperatury na wysokości 1,8 m od posadzki podczas modelowego pożaru w strefie dymowej A przedstawiono na rys. 4. Kolor niebieski i zielono-niebieski odnosi się do temperatury poniżej 60°C, kolor czarny oznacza temperaturę równą 60°C, kolor zielony, żółty i czerwony odpowiednio do temperatury powyżej 60°C – zgodnie z przedstawioną skalą.





Rys. 4. Rozkład temperatury w czasie pożaru na wysokości 1,8 m od podłogi po: a – 1 min., b – 3 min., c – 5 min., d – 7 min., e – 9 min., f – 11 min., g – 13 min., h – 15 min.

Źródło: opracowanie własne

5. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonej numerycznej analizy skuteczności pracy wentylacji pożarowej garażu podziemnego otrzymano wyniki przedstawiające rozkłady parametrów podlegających ocenie dla strefy dymowej A. Skuteczność działania wentylacji pożarowej polega na zapewnieniu odpowiednich warunków panujących na przejściach ewakuacyjnych z przestrzeni garażu podziemnego. Zapewnienie odpowiednich warunków panujących na przejściach ewakuacyjnych umożliwi bezpieczną ewakuację w określonym czasie

podczas pożaru. Analizy warunków panujących na przejściach ewakuacyjnych dokonano dla strefy dymowej A.

Na podstawie wyznaczonego czasu bezpiecznej ewakuacji, który wyniósł 300 s oraz określonych krytycznych warunków środowiskowych panujących w garażu dokonano analizy dostępności przejść oraz wyjść ewakuacyjnych. W strefie dymowej A występują 2 dostępne wyjścia ewakuacyjne WE2 oraz WE3 które prowadzą bezpośrednio do klatek schodowych stanowiących wyjście ewakuacyjne, w bramach pożarowych BP1 i BP2 zaprojektowane są drzwi stanowiące transfer do sąsiedniej strefy pożarowej SP1 umożliwiające przejście strefy nie objętej pożarem. Dodatkowo istnieje możliwość ewakuacji osób do sąsiedniej strefy dymowej SD2 poprzez ciąg komunikacyjny.

Na podstawie kryterium widzialności, podczas pożaru w jego pierwszej minucie, dym rozprzestrzenia się od miejsca pożaru do granicy strefy dymowej, na której zostaje zatrzymany przez kurtynę dymową, jednocześnie można zaobserwować, że śladowe ilości dymu dostają się do sąsiedniej strefy pożarowej poprzez otwartą jeszcze w tym czasie bramę pożarową BP2. W drugiej minucie zostaje odcięty dostęp do możliwości ewakuacji przez drzwi w bramie pożarowej BP2. Kolejna minuta rozwoju pożaru prowadzi do zadymienia większej części strefy dymowej SD1 przez co częściowo ograniczony jest dostęp do wyjść ewakuacyjnych WE2 i WE3 poprzez gromadzący się przy klatkach schodowych dym. W pełni dostępne pozostają drzwi w bramie pożarowej BP1 oraz ciąg komunikacyjny prowadzący do sąsiedniej strefy SD2. W dalszym czasie nastąpiło zadymienie klatek schodowych z wyjściami ewakuacyjnymi WE2 i WE3 oraz drzwi w bramie pożarowej BP1 pozostawiając możliwość ucieczki ciągiem komunikacyjnym do sąsiedniej strefy SD2. Przy tak zlokalizowanym pożarze w strefie dymowej A za niepokojące należy uznać szybkie rozprzestrzenianie się dymu w całej strefie jednakże z uwagi na małe rozmiary strefy (powierzchnia ok 1750 m²) czas przejścia do sąsiedniej strefy pożarowej lub dymowej z każdego miejsca w strefie jest bardzo krótki. Wydostanie się użytkowników garażu do sąsiedniej strefy pożarowej lub dymowej gwarantuje im bezpieczną ewakuację. Dym w wymaganym czasie bezpiecznej ewakuacji nie przedostaje się do sąsiedniej strefy dymowej umożliwiając ewakuację przez zaprojektowane w niej wyjścia ewakuacyjne: WE4, WE5, WE6. Ocena możliwości ewakuacji na podstawie przewidywanego rozkładu widzialności znaków ewakuacyjnych oraz przegród budowlanych w trakcie przemieszczania się osób do wyjść ewakuacyjnych zostaje określona, jako wystarczająca.

W przypadku kryterium temperaturowego możliwość ewakuacji ludzi zostaje określona na podstawie rozkładu temperatury gazów podczas pożaru na wysokości 1,8 m. Analizując zmiany temperatury podczas pożaru w strefie dymowej A, zauważono, że w trzeciej minucie trwania pożaru zostają przekroczone w stopniu zagrażającym bezpiecznej ewakuacji przez drzwi znajdujące się w bramie pożarowej BP2. Na przejściach ewakuacyjnych prowadzących do pozostałych wyjść ewakuacyjnych nie zauważa się temperatury przekraczającej wartość krytyczną. Obserwuje się natomiast podniesioną temperaturę na drodze przepływu dymu do punktu wyciągowego. Przyrost temperatury przy takich wydatkach systemu wentylacji pożarowej jest stopniowy i przewidywalny nie zagrażający ewakuującym się użytkownikom garażu.

Wykorzystanie metod obliczeniowych mechaniki płynów (CFD) do analizy warunków środowiskowych panujących podczas modelowego pożaru w rozważanym obiekcie może prowadzić do głębokiej analizy inżynierskiej, której wstęp został przedstawiony w powyższym artykule, jednakże należy mieć na uwadze, że są to metody bardzo wrażliwe na poczynione założenia w modelu, dlatego trzeba dokonywać wszelkich starań, aby model jak najwierniej odzwierciedlał rzeczywiste zjawiska fizyczne. Niejednokrotnie analizy z wykorzystaniem metod obliczeniowej mechaniki płynów mogą się przełożyć na poprawę bezpieczeństwa nie tylko ewakuacji ludzi z zagrożonych powstawaniem pożar obiektów, a także bezpieczeństwa konstrukcji i użytkownika.

LITERATURA

- [1] Tatarkiewicz W., Historia filozofii, t. I, PWN, Warszawa 1993.
- [2] Rusowicz A., Grzebielec A., Ruciński A., Ocena zagrożeń związanych z wykorzystywaniem naturalnych czynników chłodniczych. *Logistyka* 2014, nr 5, s. 1310–1316.
- [3] PD 7974:2002 The application of fire safety engineering principles to the design of buildings – Part 2: Spread of smoke and toxic gases within and beyond the enclosure of origin.
- [4] 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, behavior and condition.

- [5] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (DzU nr 75, poz. 690 z późn. zm.)
- [6] Ołdakowska E., Możliwość zastosowania betonów modyfikowanych rozdrobnionymi odpadami gumowymi w budownictwie rolniczym. *Aparatura Badawcza i Dydaktyczna* 2012, 17, s. 61–68.
- [7] Drysdale D., *An introduction to fire dynamics*, Wiley 2011.
- [8] Dorsz A., Rusowicz A., Grzebielec A., Jaworski M., Ruciński A., Wentylacja pożarowa garaży – analiza symulacji numerycznych. *Logistyka* 2016, 1, s. 75–80.
- [9] McGrattan K.B., Hostikka S., Floyd J., Baum H., Rehm R., Mell W., McDermot R., *Fire Dynamics Simulator (Version 6) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model*, NIST Special Publication 1018-6, NIST, July 2014.
- [10] McGrattan K., Overholt K., Weinschenk C., McDermott, R. Floyd J., Hostikka S., *Fire Dynamics Simulator User Guide*, NIST Special Publication 1019. Washington: NIST Special Publication, 2014.
- [11] Hegeman S.T.G.D., *Smoke movement in fire situations, CFD-utilization in car park Fleerde*, Technische Universiteit Eindhoven, December 2008.
- [12] Stroup D., Lindeman A., *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications*. NUREG-1824, supplement 1, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 2013. EPRI 1011999. 37.
- [13] Poh W., *Tenability criteria for design of smoke hazard management systems*, Ecolibrium, 2011.
- [14] Węgrzyński W., Krajewski G., *Wentylacja pożarowa garaży. Projektowanie, Ocena i Odbiór*. Instrukcja ITB nr 493/2015. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2015.