

# Scenariusze rozwoju pożaru na potrzeby analizy nośności konstrukcji

Adam Krasuski, Andrzej Krauze, Wojciech Kowalski – Szkoła Główna Służby Pożarniczej  
Andrzej Szarycki, Piotr Łukaszczuk – GryfitLab sp. z o.o.

## Wprowadzenie

Wymagania stawiane budynkom w przypadku powstania pożaru określone są w Prawie Budowlanym, które powołuje się na Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady UE [1]. Przepisy te mówią o konieczności „(...) zachowania funkcji nośnej konstrukcji przez określony czas trwania pożaru”. Niemal identyczne brzmienie ma paragraf 207 punkt 1 ustęp 1 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2012 r. [3].

Czas, przez który konstrukcja budynku powinna spełniać swoją funkcję nośną, wyróżniony jest w rozporządzeniu [3]. Jest on określony jako parametr R klasy odporności ogniowej. W zależności od klasy odporności pożarowej budynku definiuje się czas oddziaływania pożaru, który m. in. główna konstrukcja nośna budynku powinna wytrzymać.

Klasę odporności ogniowej elementów wyznacza się zgodnie z normą PN-EN 13501 [12]. Określa ona procedury i warunki prowadzenia badań. Zarówno [3], jak i [12] jako oddziaływanie pożaru, któremu powinny być poddane elementy konstrukcji definiują krzywą standardową. Jest to zależność temperatura-czas wyznaczona na początku XX w. i wprowadzona w 1917 r. do pierwszego standardu amerykańskiego. W publikacjach autorstwa Babrauskasa oraz Williamsona można odnaleźć obszerny materiał dotyczący historii badań ogniowych. Autorzy dokonali przeglądu literatury w podziale na okresy 1880 – 1918 w [6], oraz okresu 1918 – 1978 w [7]. Warto również przypomnieć bardzo ciekawy referat „Ocena odporności ogniowej – historia i perspektywy” Wojciecha Węgrzyńskiego, który został wygłoszony na konferencji w Zakopanem w 2019 r. W materiałach konferencyjnych Ochrona Przeciwpożarowa – Zakopane Wiosna 2019 został zamieszczony artykuł, w którym bardzo

przystępnie przedstawiono historię powstania dzisiejszych metod oceny odporności ogniowej [8].

W tym miejscu warto również przywołać pracę wykonaną przez autorów publikacji w ramach projektu dofinansowanego ze środków unijnych pt. "Prace badawczo-rozwojowe w celu wdrożenia w Gryfitlab Sp. z o.o. innowacji produktowej związanej z metodą badania skuteczności mocowania okładzin elewacyjnych w warunkach pożaru". W ramach przeprowadzonych prac m.in. poddano analizie wyniki z przeprowadzonych przez firmę Gryfitlab fizykalnych testów pożarowych. Eksperymenty wykonano dla kilkudziesięciu różnych wymiarów otworu okiennego. Badania te przeprowadzono w piecu badawczym ogrzewanym palnikami gazowymi, za pomocą których odwzorowywano standardową krzywą nagrzewania ISO 834. Na podstawie wyżej wymienionych eksperymentów wybrano optymalną wielkość oraz lokalizację otworu, a następnie dla tego układu badawczego wykonano symulacje komputerowe z wykorzystaniem oprogramowania FDS. W przeprowadzonych obliczeniach numerycznych odwzorowano rzeczywisty pożar jaki może wystąpić w standardowych typach budynków jak np. obiekt handlowy, mieszkalny bądź transportowy. Temperatura była mierzona w każdym badaniu oraz w symulacjach, za pomocą 20 termopar rozmieszczonych nad otworem lub obok, w zależności od przyjętych wymiarów otworu okiennego. Celem analizy było wskazanie najbardziej optymalnej konfiguracji otworu pieca oraz grubości ściany, analizując wyniki badań z lat 2020 i 2021. Napisany został specjalny program w języku Python 3.8, który pozwolił na porównanie oddziaływania temperaturowego we wszystkich 120 badaniach przeprowadzonych w piecu oraz w symulacjach porównawczych. Wybrane porównania wykazują, że suma oddziaływania temperaturowego w przypadku symulacji na pożar naturalny jest mniejsza od sumy oddziaływania z próby w piecu ogrzewanym krzywą ISO.

Szersze spojrzenie na „określony czas trwania pożaru”, a także na definicję oddziaływania termicznego, prezentuje zharmonizowana norma PN-EN 1991-1-2 [9]. Wprowadza ona podział metod projektowania konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe. Pierwszym sposobem sugerowanym przez [9] są reguły tradycyjne. Opierają się one na wykorzystaniu jako oddziaływania termicznego tzw. krzywych nominalnych. Są to zależności określające temperaturę gazów pożarowych w środowisku pożaru. W zależności od warunków towarzyszących spalaniu czy rodzaju materiału projektant może wybrać spośród krzywej standardowej, pożaru zewnętrznego czy węglowodorowej. Dalej, podążając za wskazaniami normy, należy określić odpowiedź termiczną oraz mechaniczną konstrukcji. Do tego celu mogą być wykorzystane proste przybliżone metody (dane tabelaryczne, równania analityczne)

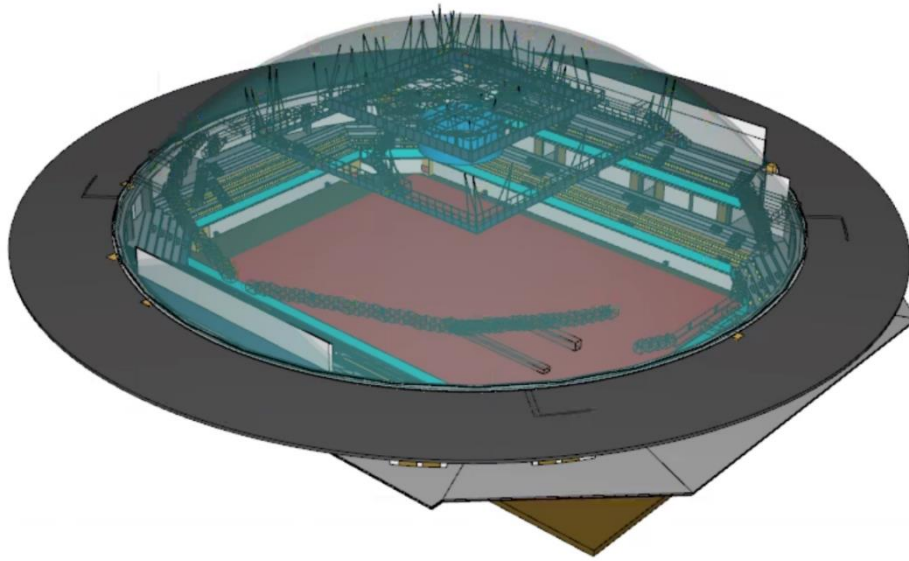
lub bardziej zaawansowane (modele i programy komputerowe). Te pierwsze są opisane niemalże krok po kroku w normie, a inżynier prowadzący analizę nie powinien mieć większych problemów z wyborem prawidłowych zależności. Dla bardziej zaawansowanych metod [9] ogranicza się do ogólnych wymagań, które powinny spełniać modele. Uzyskane przy pomocy tych obliczeń wyniki można więc odnieść do wymagań stawianych w [3] jako klasa odporności ogniowej.

Alternatywna metoda projektowania przedstawiona w [9] zakłada „ustalenie oddziaływań termicznych na przesłankach o podłożu fizycznym”. Dopuszcza więc obliczenie wpływu pożaru na elementy konstrukcyjne przy pomocy tzw. modeli pożaru naturalnego. Norma wyróżnia m. in. modele pożaru lokalnego, strefowe oraz zaawansowane (CFD). Do obliczenia odpowiedzi termicznej i mechanicznej struktury nie możliwe jest już wykorzystanie najprostszych metod (danych tabelarycznych). Należy przeprowadzić bardziej zaawansowaną analizę, wybierając spośród prostych i zaawansowanych narzędzi. Wykorzystanie tej metody pozwala na indywidualne podejście do projektowania konstrukcji. Norma [9] wprost sugeruje wykorzystanie tzw. projektowania na cele funkcjonalne, nazywając tę metodę „zasadami opartymi na właściwościach użytkowych”. Pozwala to na optymalizację projektu pod kątem wymagań przeciwpożarowych, przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiego poziomu bezpieczeństwa. Jednakże oprócz zmniejszenia kosztów inwestycji możliwy jest także bardziej właściwy dobór zabezpieczeń przeciwpożarowych i uniknięcie niebezpiecznego niedoszacowania zagrożeń.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono przykład realizacji analizy konstrukcji hali stalowej na warunki pożarowe przy wykorzystaniu alternatywnych metod. Wyniki porównano pod kątem oceny skuteczności i możliwości wykorzystania podejść opartych na właściwościach użytkowych w praktyce projektowej.

## **Opis obiektu**

Obiektem poddanym analizie była stalowa konstrukcja dachu hali widowiskowo-sportowej. Stanowiła ona kopułę budynku o wysokości ok. 30 m oraz rozpiętości ok. 60 m. Obiekt przeznaczony był do prowadzenia zawodów sportowych oraz organizacji wydarzeń kulturalnych, artystycznych, targów i wystaw.



Rysunek 1. Model geometryczny hali wprowadzony do oprogramowania CFD.

## Charakterystyka pożarowa obiektu

Obiekt zakwalifikowano do kategorii zagrożenia ludzi ZL I oraz klasy odporności pożarowej B. W związku z tym, wymaganie w zakresie odporności ogniowej stawiane konstrukcji dachu hali to R 30.

Konstrukcja kopuły oparta była na żelbetowych słupach – te znajdowały się poza zakresem analizy. Rygle główne oraz płatwie wykonano z profili dwuteowych, odpowiednio HEAA 320 i IPE 200. Pozostałe elementy (pierścienie podporowe i obwodowe) wykonano z rur kwadratowych. Sztywność konstrukcji dodatkowo zapewniały stężenia rurowe i ciągnowe. Połączenia rygiel–pierścień żelbetowy oraz płatew-pierścień przyjęto jako przegubowe, pozostałe jako sztywne.

Układ konstrukcyjny poddano oddziaływaniom mechanicznym. Wyznaczono wyjątkową kombinację obciążeń zgodnie z normą PN-EN 1990 [11]. Uwzględniono ciężar własny konstrukcji, ciężar dachu i urządzeń technologicznych, a także nierównomierne obciążenie śniegiem.

## Scenariusz pożarowy

Wybór scenariusza pożarowego jest pierwszym etapem przygotowania analizy. W tym obszarze powinni być aktywni głównie inżynierowie bezpieczeństwa pożarowego oraz rzeczoznawcy. Konstruktorzy mogą nie dysponować wystarczającą wiedzą w zakresie możliwości i skutków rozwoju pożaru, zatem konieczne jest wsparcie ze strony specjalistów z odpowiednim wykształceniem pożarniczym, ale również znajomością istniejących modeli pożaru.

W normie PN-EN 1991-1-2:2006 [9] zapisano, że procedura projektowania konstrukcji na warunki pożaru w wyjątkowej sytuacji obliczeniowej obejmuje m.in. wybór właściwych scenariuszy pożarowych i związanych z nimi pożarów obliczeniowych na podstawie oceny ryzyka pożaru. Przeprowadzając ocenę ryzyka należy zidentyfikować możliwe do wystąpienia pożary i związane z nimi scenariusze rozwoju zdarzeń, które powinny uwzględniać prawdopodobieństwo ich wystąpienia i skutki w kontekście analizowanego zachowania nośności konstrukcji w warunkach pożarowych. Scenariusz pożarowy powinien opisywać przebieg pożaru w czasie, w sposób który umożliwia identyfikację kluczowych zdarzeń. Oznacza to, że należy wytypować scenariusze, które odróżniają się od innych zdarzeń mogących wystąpić w rozpatrywanym obiekcie. Następnie z grupy wytypowanych zdarzeń powinny zostać wybrane reprezentatywne scenariusze, które wraz z odpowiadającymi im pożarami obliczeniowymi posłużą do analizy zachowania się konstrukcji w warunkach pożarowych. Określenie scenariuszy musi uwzględniać nie tylko wielkość pożaru, ale również np. umiejscowienie względem elementów konstrukcyjnych.

Należy również zauważyć, że w punkcie 2.4. normy zapisano, że w przypadku zastosowania naturalnego „modelu pożaru, dokonuje się analizy temperatury elementów konstrukcyjnych dla pełnego czasu trwania pożaru, łącznie z fazą studzenia”.

Dodatkowo warto zaznaczyć, że krajowy załącznik informacyjny zaleca stosowanie zaawansowanych modeli opartych na numerycznej mechanice płynów, wykluczając np. modele pożaru lokalnego, czy też modele strefowe. Z uwagi na powyższe, w opisywanym przykładzie został użyty program Fire Dynamics Simulator [2].

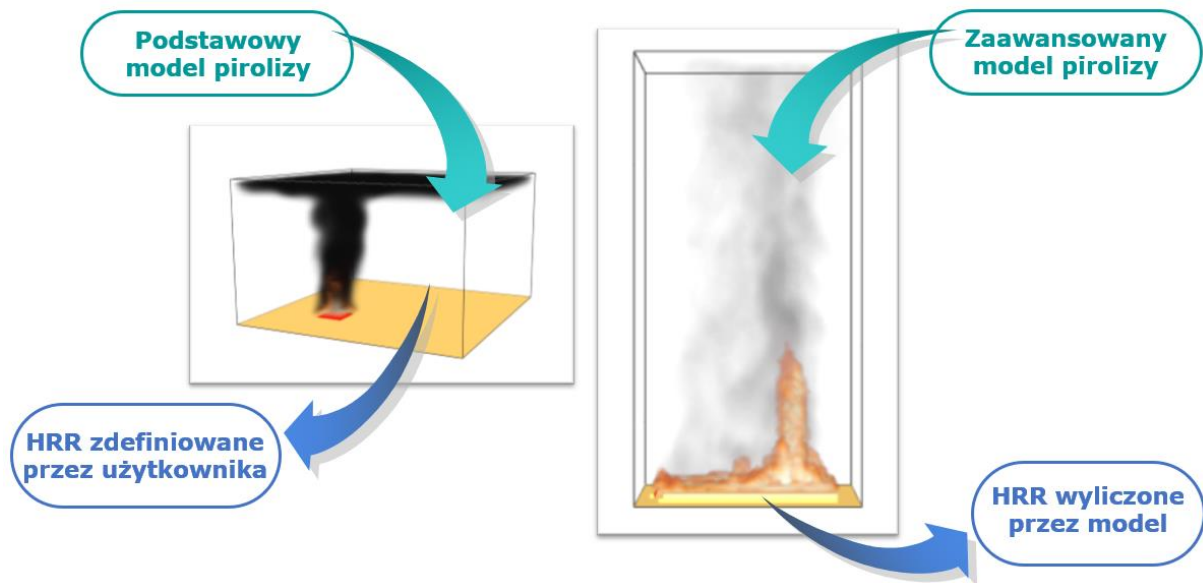
## Pożar obliczeniowy – FDS

Wartości oddziaływania termicznego pożaru naturalnego, w postaci temperatury gazów pożarowych i intensywności promieniowania, wyznaczono przy użyciu modelu połowego. Program Fire Dynamics Simulator jest szeroko stosowany do symulowania rozwoju pożaru oraz jako narzędzie wspomagające projektowanie wentylacji pożarowej czy strategii ewakuacji.

Użyto programu Fire Dynamics Simulator w wersji 6.7.6. Program został opracowany przez amerykański instytut naukowo-badawczy NIST (National Institute of Standards and Technology). FDS jest narzędziem komputerowym przeznaczonym do modelowania pożaru. Program pozwala analizować transport ciepła i produktów spalania powstałych na skutek pożaru, pirolizy, wymiany ciepła poprzez promieniowanie oraz konwekcję [2].

Wykonując analizę w programie Fire Dynamics Simulator, należy rozróżnić modelowanie spalania w fazie gazowej od modelowania pirolizy lub rozkładu termicznego materiału. Piroliza jest przekształceniem albo rozkładem związku, które prowadzi do powstania gazów pirolitycznych pod wpływem ciepła. Piroliza następuje jako pierwszy etap reakcji chemicznej, która występuje w procesie spalania wielu paliw stałych, takich jak tkaniny, papier, drewno oraz tworzywa sztuczne. Spalanie w fazie gazowej odnosi się do egzotermicznej reakcji chemicznej zachodzącej pomiędzy gazowym paliwem a tlenem, któremu towarzyszy wydzielanie ciepła i światła w postaci płomienia. Oznacza to, że piroliza paliwa w fazie stałej skutkuje wytworzeniem palnych gazów pirolitycznych. Widoczny płomień nie powstaje w wyniku spalania stałego paliwa, ale jako skutek reakcji wydzielających się z tego materiału palnych gazów pirolitycznych z tlenem. W programie FDS, pożar jest szczególnym warunkiem brzegowym, który jest nakładany na określoną powierzchnię. Program umożliwia zdefiniowanie pożaru na dwa sposoby. Pierwszym jest określenie szybkości uwalniania ciepła z powierzchni, czyli inaczej z angielskiego Heat Release Rate (HRR). Drugą metodą jest dokładne określenie właściwości palnych materiałów i modelowanie ich spalania. W tym przypadku szybkość spalania zależy od ciepła, które oddziałuje na powierzchnię materiału, powodując wydzielanie palnych gazów pirolitycznych. Zarówno definiowanie pożaru projektowego o dokładnie określonych parametrach jak i modelowanie pirolizy materiału stałego, polega na obliczaniu w programie uwalniania odpowiedniej ilości określonego

(jednego rodzaju) paliwa w stanie gazowym, które ulega spalaniu w zdefiniowanym obszarze pożaru.



Rysunek 1. Metody modelowania pożaru w programie FDS.

W przywołanej analizie wykorzystano podstawowy sposób modelowania pożaru, w oparciu o zastosowanie tzw. koncepcji palnika gazowego (burner). Zatem do modelu wprowadzono wcześniej zdefiniowany pożar projektowy (obliczeniowy).

Parametry pożaru obliczeniowego można ustalić w oparciu o wskazania załącznika E do normy [9]. Ze względu na zastosowanie wentylacji mechanicznej w obiekcie stwierdzono, że pożar ograniczony będzie ilością dostępnego paliwa. Po fazie rozwoju wg [9] moc pożaru ustala się i pozostaje na stałym poziomie, aż do wypalenia się 70% dostępnego paliwa. Następnie, do całkowitego wypalenia się materiałów, moc pożaru spada liniowo.

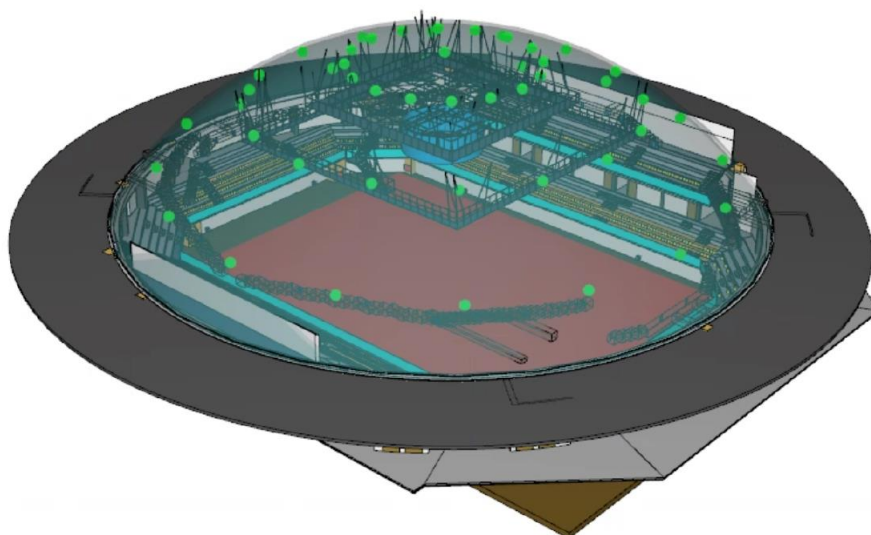
W tym miejscu warto zaznaczyć, że problematyczne dla projektanta są scenariusze, w których należy uwzględnić szybkość rozwoju pożaru w przypadku wysokiego składowania np. w hali magazynowej, czy też uwzględnienie efektywnego zadziałania instalacji gaśniczej. W takim przypadku uzasadnione wydaje się wykorzystanie np. innych zasad wiedzy technicznej lub publikacji naukowych w celu określenia bardziej intensywnego rozwoju pożaru niż to opisano w normie Eurokod. Z kolei wnikliwa ocena ryzyka i niezawodności urządzeń gaśniczych, może być podstawą do uwzględnienia gaszenia pożaru w przyjętym modelu pożaru.

## Odpowiedź termiczna konstrukcji

Do ustalenia odpowiedzi termicznej konstrukcji wykorzystano program SAFIR® autorstwa J.-M. Franssena z Uniwersytetu w Liege. Oferuje on analizę termiczną dwu- i trójwymiarową elementów przy użyciu Metody Elementów Skończonych (MES). Modele materiałowe zaimplementowane w kodzie obejmują m. in. stal, beton, drewno czy izolacje. Możliwe jest także wprowadzenie własnego materiału [10].

Jako warunki brzegowe można przyjąć temperaturę, strumień ciepła, a także temperaturę gazów pożarowych. Program numerycznie rozwiązuje układy równań opisujące zmianę temperatury w kolejnych węzłach modelu na przestrzeni kolejnych kroków czasowych. Jako oddziaływanie termiczne można przyjąć także dane pochodzące z modeli pożaru naturalnego.

Przy wykorzystaniu danych pochodzących z zaawansowanych modeli pożaru (CFD) wykorzystywane są pliki transferowe. Zawierają one dane dotyczące temperatury gazów oraz intensywności promieniowania w kolejnych komórkach modelu połowego w czasie trwania symulacji pożaru. Następnie SAFIR® mapuje te dane na konkretne przekroje elementów konstrukcyjnych. Dzięki temu oddziaływanie termiczne na elementy konstrukcyjne różni się w zależności od ich położenia oraz orientacji względem źródła ognia.



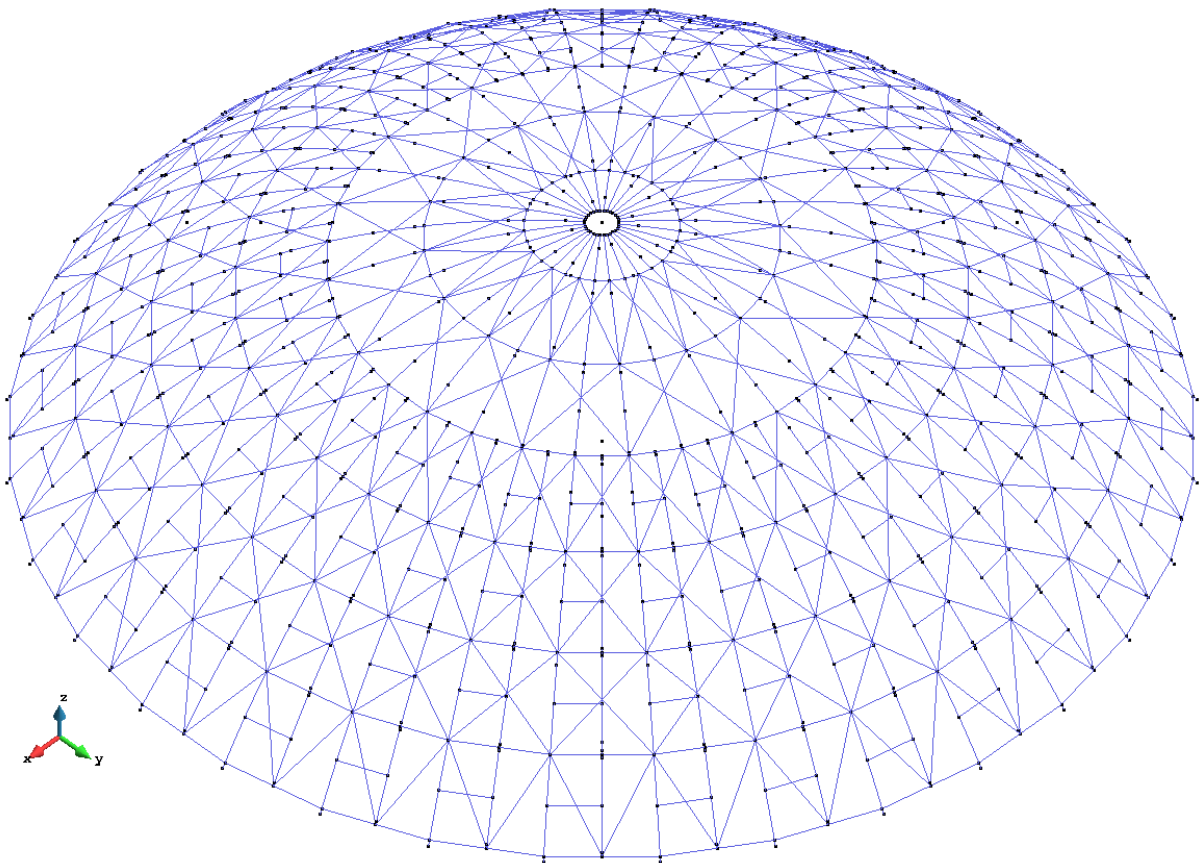
Rysunek 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych adiabatycznej temperatury powierzchni w modelu.



Geometria konstrukcji przedstawiona jest w postaci szkieletowego modelu, składającego się z jednowymiarowych (liniowych) elementów. Każdej linii przyporządkowano przekrój, który koresponduje z profilem wykorzystanym w danej części konstrukcji. Znając wartości strumienia ciepła i temperatury otoczenia wokół poszczególnych elementów konstrukcji, program oblicza pola temperatur w ich przekrojach w kolejnych krokach czasowych. Uwzględnione zostają także straty w postaci ciepła oddanego do otoczenia na drodze promieniowania oraz konwekcji. Obliczenia odpowiedzi termicznej prowadzone są odrębnie dla dwóch lub trzech przekroi każdego elementu skończonego.

## Odpowiedź mechaniczna konstrukcji

Zachowanie się konstrukcji pod wpływem oddziaływań wynikających z wyjątkowej kombinacji obciążeń (w tym związane ze zmianą temperatury w elementach) obliczono także przy użyciu programu SAFIR®. Układ kopuły wprowadzono w postaci jednowymiarowych elementów – linii. Model geometryczny wykorzystany w analizie przedstawiono na rysunku 3.

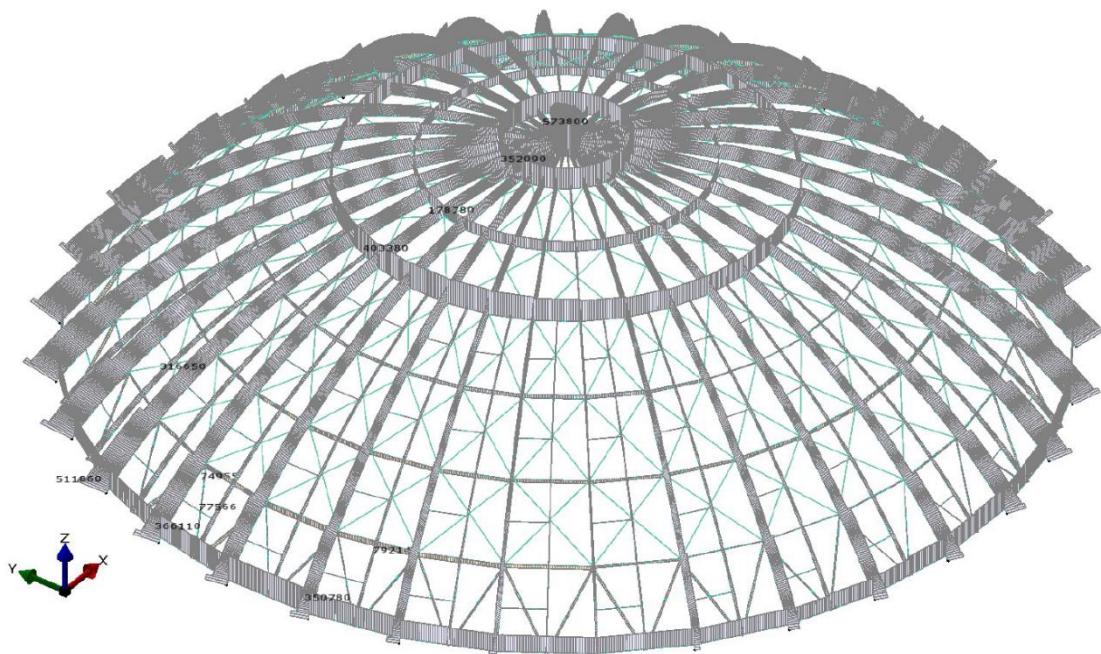


Rys. 3. Model geometryczny analizowanej konstrukcji dachu hali widowiskowo-sportowej

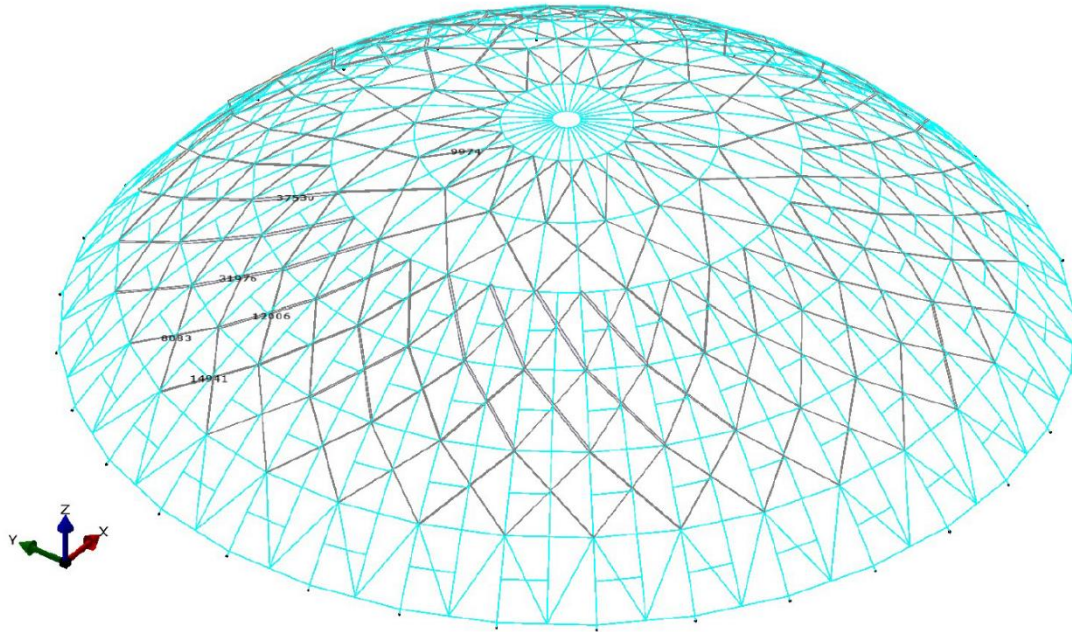
Z każdym z elementów skończonych, na które został podzielony model, skojarzony był jego przekrój. Pola temperatur, uzyskane w poprzednim kroku analizy, były obliczane w dwóch przekrojach każdego elementu liniowego. Na tej podstawie można było określić zmianę właściwości wytrzymałościowych oraz odpowiedź mechaniczną elementu w postaci przemieszczeń i wartości sił wewnętrznych [10].

Połączenia zostały odwzorowane w postaci przegubów lub połączeń sztywnych w taki sposób, aby możliwie dokładnie odwzorować schemat statyczny konstrukcji. Obciążenia stałe i zmienne uzyskane z wyjątkowej kombinacji [11] przyłożone zostały jako skupione bądź liniowe.

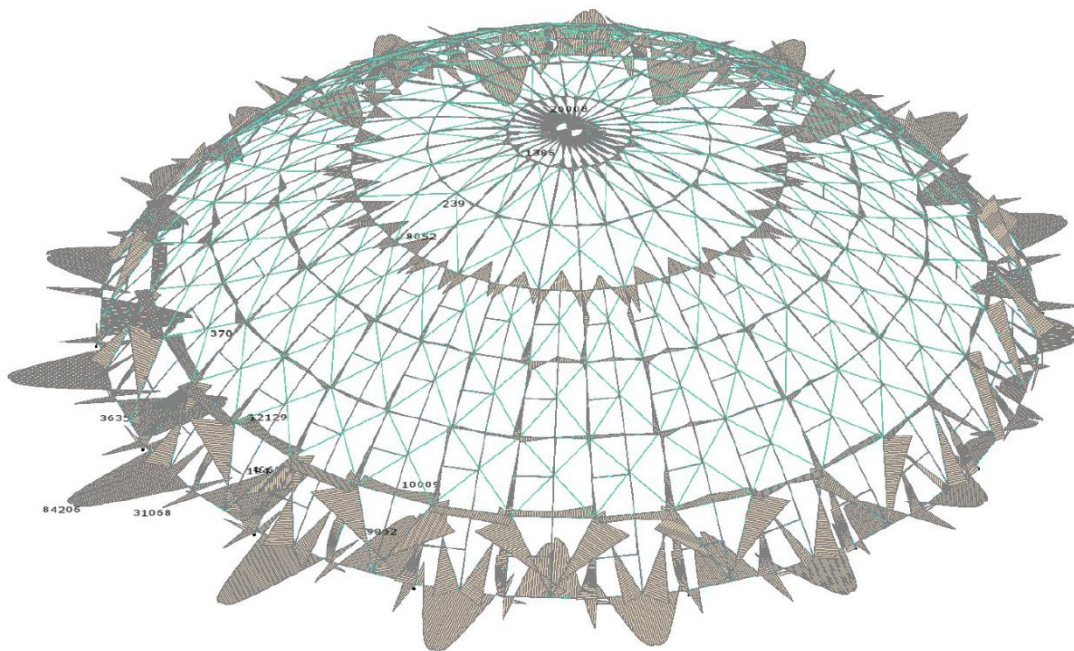
Poniżej zamieszczono przykładowe wyniki niektórych obliczeń numerycznych. Przedstawiono wyniki w postaci sił osiowych i momentów zginających. Możliwe jest również przeanalizowanie reakcji podporowych, sił tnących i przemieszczeń. Poza widokiem w kluczowych momentach, możliwe jest także wykonanie wykresów dla wybranych węzłów.



Rys 4. Wizualizacja sił osiowych w prętach.



Rys 5. Wizualizacja sił osiowych w cięgnach.



Rysunek 6. Wizualizacja momentów zginających w prętach.

## Podsumowanie

Komputerowe analizy konstrukcji w warunkach pożaru mogą stanowić wsparcie dla projektantów i rzeczoznawców przy tworzeniu optymalnych i bezpiecznych rozwiązań

z zakresu ochrony przeciwpożarowej. Narzędzie to jest szczególnie pomocne, gdy konstrukcja lub wykorzystanie obiektu jest niestandardowe. Jako efekt współpracy branży przeciwpożarowej (rzeczoznawca, analityk) i budowlanej (rzeczoznawca, konstruktor) możliwa jest indywidualna ocena zagrożenia pożarowego w obiekcie oraz skutków, jakie ze sobą niesie. Przy prowadzeniu analiz z wykorzystaniem modeli komputerowych należy być świadomym ich przeznaczenia oraz ograniczeń.

Zastosowanie interfejsu SAFIR® – FDS umożliwia precyzyjną ocenę odpowiedzi termicznej elementów konstrukcyjnych poddanych oddziaływaniu pożaru naturalnego. Zaawansowany model pożaru, w ramach swojego szerokiego zastosowania, generuje dane, dotyczące środowiska pożarowego – temperatury i promieniowania. Następnie dane te wykorzystywane są przez oprogramowanie MES do obliczenia pól temperatur w przekrojach elementów konstrukcyjnych. Komputerowe modelowanie zjawisk jest zawsze obarczone pewnym błędem, wynikającym chociażby z zastosowanych przybliżeń czy uproszczeń. Jednak świadome korzystanie z tego typu narzędzi, z pełną świadomością ograniczeń z nimi związanych, może nieść za sobą duże korzyści. Zarówno w zakresie podniesienia poziomu bezpieczeństwa, poprzez indywidualne dostosowanie zabezpieczeń do zidentyfikowanych zagrożeń, jak i obniżenia kosztów inwestycji (optymalizacja rozwiązań).

Zastosowanie symulacji komputerowych w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego stało się powszechne. Z powodzeniem wykorzystywane są nie tylko przy wspomaganiu projektowania wentylacji oddymiającej, ale coraz częściej do projektowania konstrukcji na ewentualne oddziaływanie pożaru. Biorąc pod uwagę powyższe, warto podjąć inicjatywę przygotowania wytycznych, które pozwolą porównywać opracowywane projekty w tych samych kryteriach. Wspólna inicjatywa np. kadry naukowej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej oraz specjalistów pracujących w Biurze Przeciwdziałania Zagrożeniom Komendy Głównej PSP, w celu przygotowania takiego dokumentu byłaby ze wszech miar potrzebna.

## Literatura

- [1] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z dnia 9 marca 2011 roku.
- [2] McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., Vanella M., Fire Dynamics Simulator User's Guide, NIST Special Publication 1019, Sixth Edition, 2020.
- [3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690 z późn. zm.).
- [4] Morgan J. Hurley, Daniel Gottuk, John R. Hall Jr., Kazunori Harada, Erica Kuligowski, Milosh Puchovsky, Jose Torero, John M. Watts Jr., and Christopher Wieczorek. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.
- [5] BSI Standards Publication. PD 7974-6 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings - Part 6: Human factors: Life safety strategies — Occupants evacuation, behaviour and condition, 2019.
- [6] V. Babrauskas, R. Williamson, The historical basis of fire resistance testing — Part I, Fire Technol. 14 (1978) 304–316. doi:10.1007/BF01998390.
- [7] V. Babrauskas, R.B. Williamson, The historical basis of fire resistance testing — Part II, Fire Technol. 14 (1978) 304–316. doi:10.1007/BF01998390.
- [8] Wojciech Węgrzyński. Ocena odporności ogniowej – historia i perspektywy. Ochrona Przeciwpowozarowa – Zakopane Wiosna 2019.
- [9] PN-EN 1991-1-2:2006. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje — Część 1-2: Oddziaływania ogólne - Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.
- [10] J.-M. Franssen, SAFIR: A thermal/structural program for modeling structures under fire. Engineering Journal-American Institute of Steel Construction Inc, 42(3):143–158, 2005.
- [11] PN-EN 1990:2004. Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji.
- [12] PN-EN 13501-2:2016-07. Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków -- Część 2: Klasyfikacja na podstawie wyników badań odporności ogniowej, z wyłączeniem instalacji wentylacyjnej.