



PRZEWODNIK KORZYSTANIA Z APLIKACJI WIND

Edited by: Inter-CAD Kft.

SPIS TREŚCI

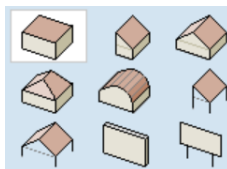
1. WPROWADZENIE	3
1.1. ZARYS OGÓLNY	3
1.2. WPROWADZENIE DO OPENFOAM	4
1.3. LICENCJA	4
1.4. OGRANICZENIA MODUŁU	5
2. PODSTAWY TEORETYCZNE	7
2.1. PRZEPŁYW STACJONARNY	7
2.2. SIMPLEFOAM	7
2.3. MODELE TURBULENCYJNE	8
2.3.1. Wprowadzenie	8
2.3.2. RANS	10
2.3.3. Modele k- ϵ	11
2.3.4. Modele k- ω	11
2.3.5. Funkcje ścianki (powierzchni ograniczającej)	12
3. OBCIĄŻENIE WIATREM	13
3.1. WPROWADZENIE	13
3.2. PARAMETRY OGÓLNE	13
3.2.1. Teren	13
3.2.2. Powietrze	13
3.3. PROFIL WIATRU	14
3.3.1. Standardowe profile wiatru	14
3.3.2. Własny profil wiatru	14
3.4. KIERUNKI WIATRU	14
4. ANALIZA	15
4.1. PARAMETRY ANALIZY	15
4.1.1. Metody ustawienia parametrów	15
4.1.2. Parametry modelu	15
4.1.2.1. Przestrzeń modelu przepływu wiatru	15
4.1.2.2. Opcje modelowania konstrukcji	17
4.1.3. Parametry siatki	18
4.1.3.1. Wprowadzenie	18
4.1.3.2. blockMesh	18
4.1.3.3. snappyHexMesh	18
4.1.4. Sterowanie rozwiązaniu	19
4.1.5. Generowane obciążenie wiatrem	20
4.2. WARUNKI BRZEGOWE	20
4.3. GENEROWANIE OBCIĄŻEŃ W AXISVM	21
5. WYNIKI	24
5.1. PRZYPADKI OBCIĄŻENIA WIATREM	24
5.2. KOMPONENTY WYNIKÓW	24
5.3. WYŚWIETLANIE WYNIKÓW	24
5.4. TRYBY WYŚWIETLANIA SIATKI	28
6. PRZYKŁADY WERYFIKACYJNE	31
6.1. CYLINDER	31
6.2. DACH DWUSPADOWY	33
7. LITERATURA	35

1. WPROWADZENIE

1.1. Zarys ogólny

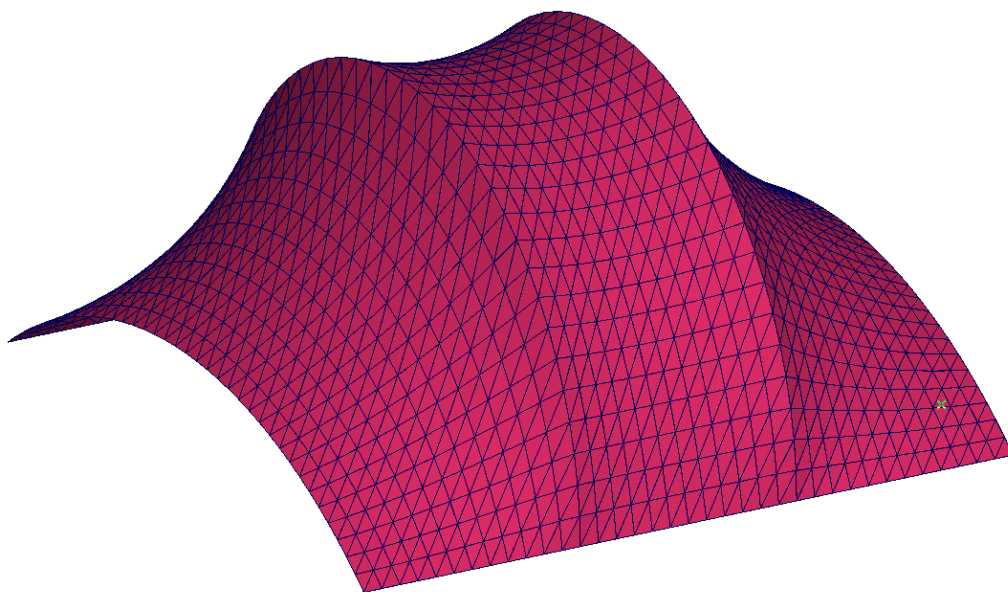
Aplikacja (dalej zwana też modułem) WIND pomaga użytkownikowi określić obciążenia od wiatru dla konstrukcji nieopisanych w normie projektowej. Jeśli geometria analizowanego modelu pasuje do przypadków normowych, które zawarte są w module SWG (Generator obciążeń klimatycznych od wiatru i śniegu), zaleca się określenie obciążeń od wiatru przy użyciu właśnie tego modułu, ponieważ zapewnia on rozwiązanie kompleksowe, które pozostaje zgodne z wymaganiami normy projektowej.

Dostępne typy
geometrii
konstrukcji
w module SWG



Następujące typy standardowych kształtów mogą być analizowane przy użyciu modułu SWG: *budynek z dachem: płaskim, jednospadowym, dwuspadowym, czterospadowym, walcowym, wiata jednospadowa lub dwuspadowa, wolnostojąca ściana oraz tablica*. Jeśli konstrukcja nie pasuje do żadnego z tych przypadków, symulacja w tunelu aerodynamicznym (zaimplementowana w module WIND) może stanowić istotną pomoc. Głównym zadaniem modułu SWG jest wyznaczenie obciążeń od wiatru oddziałujących na obiekty przekryte dachem. Moduł WIND oferuje możliwość określenia obciążeń wiatrowych dla znacznie szerszego zakresu konstrukcji, takich jak konstrukcje kratownicowe, hale częściowo otwarte, wieże chłodnicze, turbiny wiatrowe oraz konstrukcje powłokowe, zapewniając ogólne rozwiązanie. Analiza CFD (skrót od *ang. Computational Fluid Dynamics / pl. Numeryczna mechanika płynów*) daje znaczącą przewagę w przypadkach, gdy obciążenie wiatrem nie może być określone zgodnie z wymaganiami normy projektowej, lub gdy wymagałoby to bardzo zachowawczego podejścia i prowadziłoby do znacznego przeszacowania oddziaływania.

Podwójnie
zakrzywiona
powierzchnia
hiperboliczna -
przykład geometrii
konstrukcji
nieobjętej normami
projektowymi



☞ **W przypadku współoddziaływania kilku podstawowych konstrukcji (takich jak dach wielospadowy składający się z kilku dachów dwuspadowych), także należy rozważyć użycie modułu WIND.**

Po zakończeniu symulacji w tunelu aerodynamicznym oprogramowanie redukuje uzyskane pole ciśnień do samej konstrukcji, uzyskując w ten sposób obciążenia statyczne. Obciążenia te następnie uwzględnia się w statycznej analizie liniowej/nieliniowej, analizie wyboczeniowej oraz modułach do wymiarowania. Obliczenia w zakresie analizy przepływu wiatru są wykonywane przez otwarte oprogramowanie OpenFOAM.



Moduł pozwala na korzystanie ze standardowych profili dla wiatru opartych na Eurokodzie 1991-1-4 lub SIA261:2020, ale dostępna jest również możliwość wprowadzania niestandardowych profili wiatru. Standardowe profile wiatru Eurokodu i SIA są zgodne z następującymi załącznikami krajowymi:

Niemiecki EC	EC 1991-1-4:2005 DIN EN 1991-1-4/NA December 2010
Włoski NTC	EC 1991-1-4:2005 UNI EN 1991-1-4/NA July 2007 NTC 2018
Holenderski EC	EC 1991-1-4:2005 NEN EN 1991-1-4/NB November 2007
Węgierski EC	EC 1991-1-4:2005 MSz EN 1991-1-4/NA January 2016
Rumuński EC	CR 1-1-4/2012 SR EN 1991-1-4
Słowacki EC	EC 1991-1-4:2005 CSN EN 1991-1-4/NA July 2013
Polski EC	EC 1991-1-4:2005 PN EN 1991-1-4/NA October 2008
Duński EC	EC 1991-1-4:2005 DS/EN 1991-1-4 DK NA July 2015
Finlandzki EC	EN 1991-1-4:2005 SFS-EN 1991-1-4/NA November 2007
Norweski EC	EN 1991-1-4:2005 SN-EN 1991-1-4/NA 2009
Grecki EC	EN 1991-1-4:2005 ELOT EN 1991-1-4
Szwajcarski	SIA261:2020 Einwirkungen auf Tragwerke SIA261/1:2003 Ergänzende Festlegungen

1.2. Wprowadzenie do OpenFOAM

OpenFOAM (Open Field Operation And Manipulation) to darmowy zestaw narzędzi C++ o otwartym kodzie źródłowym, służącym do tworzenia niestandardowych solverów numerycznych oraz narzędzi do pre- i postprocesingu (przetwarzania początkowego i końcowego) do rozwiązywania problemów mechaniki ośrodka ciągłego, takich jak reakcje chemiczne, złożone przepływy płynów z udziałem turbulencji, transfer ciepła, akustyka, mechanika ciał stałych, przepływy elektromagnetyczne. Oprogramowanie od 2004 jest rozwijane głównie przez firmę OpenCFD Ltd. Ma ono szeroką bazę użytkowników z wielu dziedzin inżynierii i nauki, zarówno komercyjnych jak i akademickich.

Więcej informacji na temat OpenFOAM® <https://www.openfoam.com>.

Podręcznik użytkownika jest dostępny: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide>.

Więcej informacji można znaleźć na stronie <https://www.cfdsupport.com>

1.3. Licencja

OpenFOAM® jest rozpowszechniany na licencji GNU GPLv3, a jego kod źródłowy można znaleźć w folderze AxisVM X7/CFD/src. Moduł WIND działa jako interfejs między AxisVM a OpenFOAM, nie modyfikując kodu źródłowego OpenFOAM na żadnym poziomie.

*Oświadczenie
o znaku
towarowym*

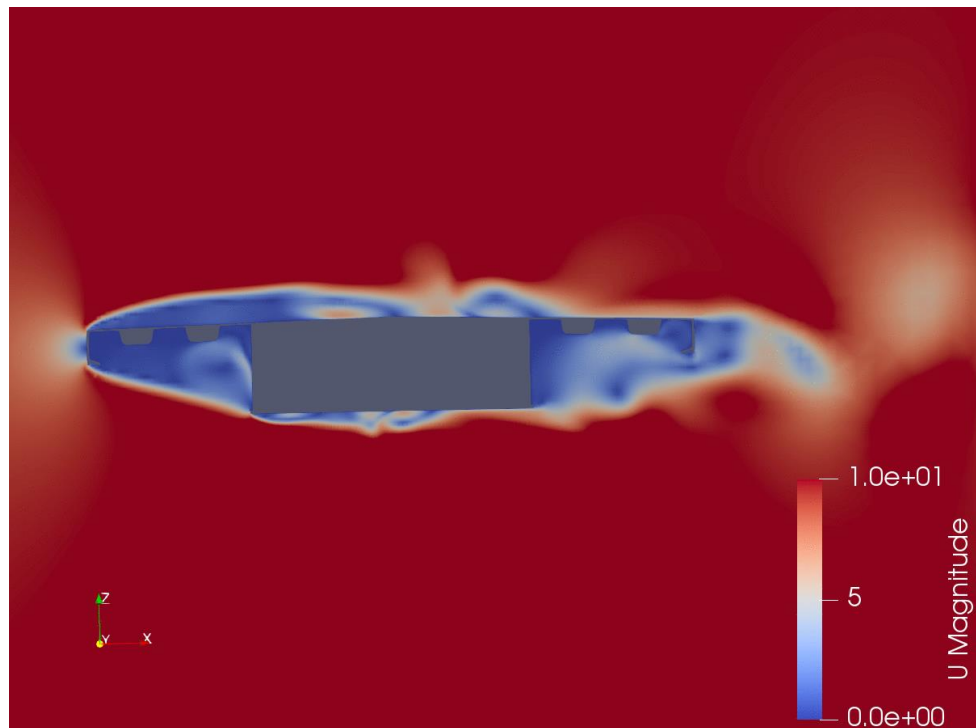
To rozwiązanie nie zostało zatwierdzone ani nie jest wspierane przez firmę OpenCFD Limited, producenta i dystrybutora oprogramowania OpenFOAM.

1.4. Ograniczenia modułu

Moduł WIND oblicza ustalony przepływ wiatru z następującymi ograniczeniami:

- każdy kierunek wiatru jest przypisany do oddzielnego przypadku obciążenia statycznego;
- moduł pozwala wyznaczyć współczynnik c_{pe} , ale nie szacuje wartości współczynnika c_{pi} ;
- moduł uwzględnia przepływ turbulentny w analizie przepływu, ale w przypadku, gdy powstałe turbulencje oddziałują bezpośrednio na konstrukcję tzn. mają znaczący wpływ na rozkład ciśnienia na konstrukcję (rozkład ciśnienia znacznie zmienia się w czasie, jak na poniższym przykładzie ze ścieżkami wirowymi Kármána), uzyskane wyniki mogą znacząco różnić się od rzeczywistego rozkładu ciśnienia;
- moduł nie jest przeznaczony do analizy zmęczenia materiału spowodowanego przez odrywanie się wirów (*ang. vortex shedding*);
- zakłada się, że konstrukcja zachowuje się jak ciało sztywne podczas symulacji przepływu wiatru, więc zmiany w rozkładzie ciśnienia spowodowane deformacjami konstrukcji nie są uwzględniane (patrz niżej);
- z tego samego powodu jak powyżej, moduł nie nadaje się do sprawdzania niestabilności aerodynamicznych, takich jak trzepotanie (drgania samowzbudne), galopowanie. Jeśli spodziewane jest, że niska sztywność konstrukcji może prowadzić do jej niestabilności, należy skonsultować się z ekspertem;
- zmiany w kształcie konstrukcji spowodowane jej oblodzeniem nie są uwzględniane;
- powierzchnia obwiedni modelu jest uważana za gładką.

Ścieżki wirowe
Kármána wokół
przekroju mostu
(Lengyel i Pál, 2022)

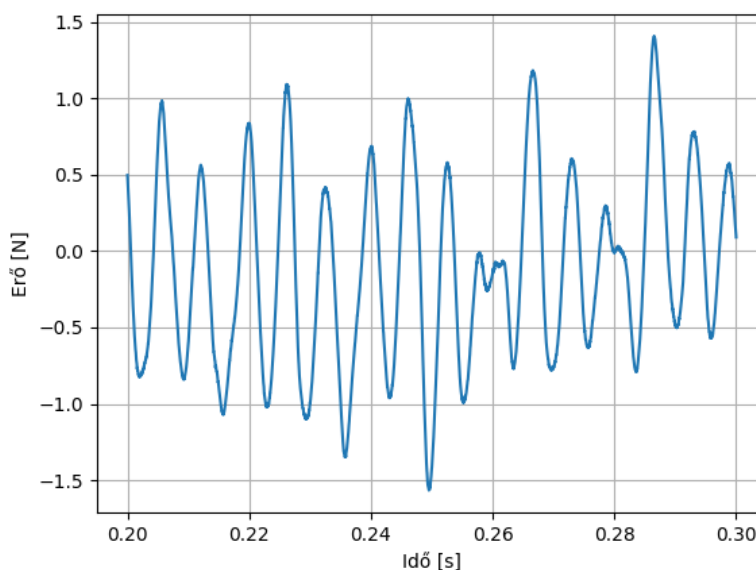


[Link do animacji](#)

https://gammacad.pl/app/uploads/2024/05/AxisVM-WIND-wiry_karmana_most_animacja1.mp4

Animacja pokazuje, że pole prędkości jest zależne od czasu, a wiry są cyklicznie odrywane za płytą mostu, więc rozkład ciśnienia na samej konstrukcji nie jest stacjonarny. Jeśli część oscylacyjna ciśnienia (patrz poniżej) jest istotnie duża w porównaniu do ciśnienia stacjonarnego, symulacja przepływu w stanie ustalonym nie jest zbieżna.

*Siła unosząca
działająca na
powyższy przekrój
w funkcji czasu
(Lengyel i Pál, 2022)*



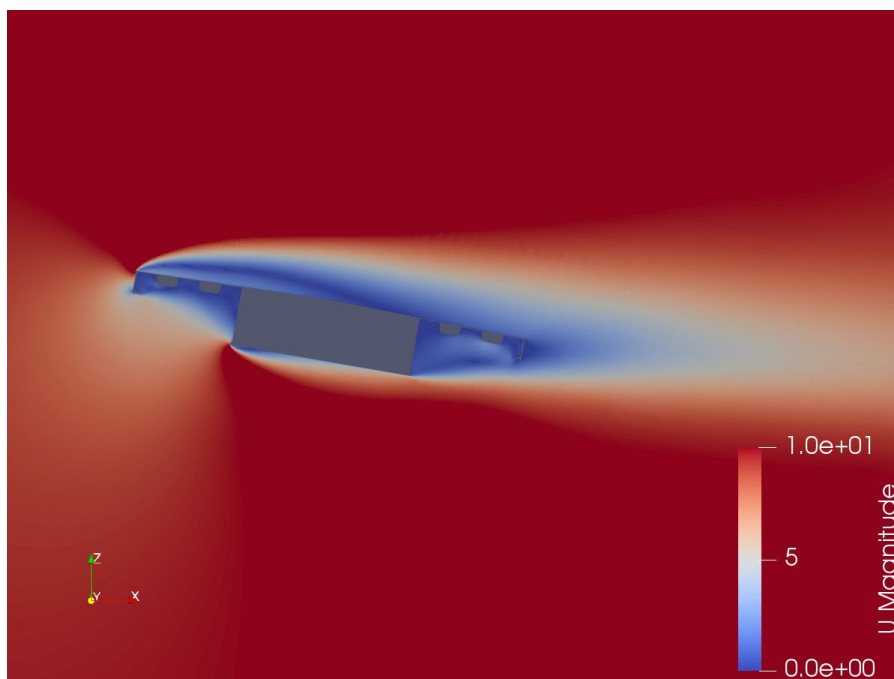
Takie oscylacje mogą powodować uszkodzenia zmęczeniowe. Moduł nie jest przeznaczony do analizowania tego efektu. W takim przypadku, należy skonsultować się z ekspertem.

👉 **Jeśli zauważysz, że siła wypadkowa działająca na konstrukcję w module WIND zmienia się okresowo w trakcie iteracji, to można przyjąć, że następuje zjawisko odrywania wirów.**

Dla konstrukcji podatnej o niskim tłumieniu strukturalnym, może wystąpić pewna forma niestabilności aerodynamicznej, jeśli jest ona narażona na działanie wiatru. Tłumienie konstrukcji podatnej narażonej na przepływ ma dwa składniki: 1) tłumienie strukturalne i 2) tłumienie aerodynamiczne. W przeciwieństwie do tłumienia strukturalnego, tłumienie aerodynamiczne może mieć wartość ujemną. Jeśli suma obu jest ujemna, rzeczywista część wykładnika Lyapunova odpowiedzi konstrukcji staje się dodatnia, a konstrukcja traci swoją stabilność aerodynamiczną. W praktyce konstrukcja ulegnie awarii z rosnącą w czasie amplitudą.

Ponieważ obliczenie tłumienia aerodynamicznego wymaga śledzenia informacji zwrotnej dotyczącej ruchu konstrukcji, moduł WIND nie jest odpowiedni do analizy tego zjawiska.

*Niestacjonarne pole
prędkości
spowodowane
obrotem płyty mostu
(Lengyel i Pál, 2022)*



[Link do animacji](https://gammaacad.pl/app/uploads/2024/05/AxisVM-WIND-wiatr-obrot-plyty-most.mp4)

<https://gammaacad.pl/app/uploads/2024/05/AxisVM-WIND-wiatr-obrot-plyty-most.mp4>

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

2.1. Przepływ stacjonarny

Zagadnienia aerodynamiczne można kategoryzować według różnych aspektów. Jednym z tych aspektów jest odpowiedź w czasie. W tym przypadku rozróżniamy przepływ stacjonarny i przepływ zależny od czasu (dopuszczający przypadek przepływu quasistacjonarnego). Różnica nie zawsze jest oczywista. Rozważając przyływ rzeki, wydaje się on być stacjonarny z daleka, ale okazuje się być zależny od czasu, gdy jest analizowany wokół przyczółków mostowych.

Sformułowanie matematyczne

Równania Naviera-Stokesa są następujące

$$\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u},$$

gdzie

- $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, y, z, t)$, to zależne od czasu pole prędkości
- $(\dot{\cdot}) = \frac{\partial(\cdot)}{\partial t}$, oznacza pochodną po czasie
- ∇ jest operatorem Nabla: $\nabla(\cdot) = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x} \\ \frac{\partial(\cdot)}{\partial y} \\ \frac{\partial(\cdot)}{\partial z} \end{bmatrix}$,
- ν to lepkość kinematyczna

Dla przepływu stacjonarnego, $\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{0}$, tj. $\mathbf{u} = \text{const.}$, $p = \text{const.}$

Zasadniczo, jeśli częściowa pochodna czasowa każdej zmiennej pola wynosi zero, przepływ jest stacjonarny.

Turbulencje

Ściśle rzecz biorąc, przepływ turbulentny jest przepływem nieustalonym. Fluktuacje turbulentne są statystycznie nieregularnymi, zależnymi od czasu zjawiskami. Przepływ turbulentny można jednak traktować jako przepływ ustalony z rozsądną dokładnością, jeśli użyjemy uśrednionych w czasie wartości prędkości, ciśnienia itp.

2.2. SimpleFOAM

SimpleFoam to solver dla przepływu stacjonarnego z nieściśliwym przepływem turbulentnym, który wykorzystuje algorytm SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations).

Solver wykorzystuje sekwencyjną technikę rozwiązywania. Rozwiązuje równania dla każdej zmiennej układu (prędkości, ciśnienia i turbulencji) po kolei, zastępując rozwiązanie poprzedniego równania następnym.

Relaksacja

OpenFOAM wykorzystuje technikę relaksacji podczas iteracji: w n -tym kroku wartość zmiennej można określić w następujący sposób:

$$Q^n = Q^0 + \alpha(Q - Q^0)$$

gdzie Q^0 jest rozwiązaniem początkowym, Q jest rozwiązaniem aktualnym, α jest współczynnikiem relaksacji. Jeśli współczynnik relaksacji wynosi 1.0 (brak relaksacji), kolejny krok zawsze startuje z aktualnego rozwiązania. Jeśli współczynnik relaksacji wynosi 0.0, rozwiązaniem pozostaje Q^0 w każdym kroku. Mówiąc prościej, jeśli współczynnik relaksacji jest niski, zbieżność rozwiązania jest stabilna, ale powolna. Natomiast gdy współczynnik relaksacji jest wysoki, rozwiązanie jest szybkie, ale może łatwo stać się niestabilne.



W module WIND zastosowano ciągłe zmniejszanie się relaksacji, zaczynając od niskiej wartości współczynnika, a następnie zwiększając go wraz z kolejnymi krokami czasowymi.

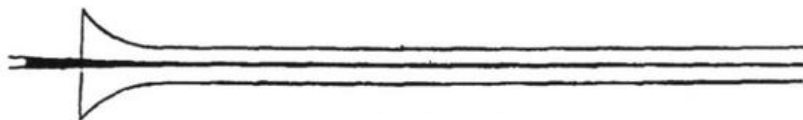
2.3. Modele turbulencyjne

2.3.1. Wprowadzenie

Jeśli ciecz lub gaz przepływa w równoległych warstwach i nie ma zakłóceń ani nie dochodzi do mieszania między warstwami, mówimy o przepływie laminarnym. Jeśli występuje mieszanie między warstwami, przepływ jest turbulentny. Taki przepływ charakteryzuje się chaotycznymi zmianami ciśnienia i prędkości przepływu.

Różne typy
przepływu
(Reynolds, 1883)

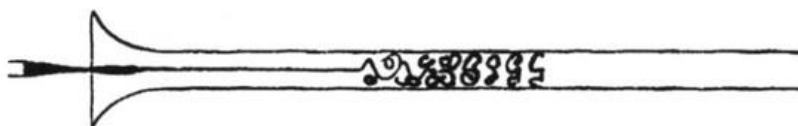
W oparciu o dobrze znany eksperyment, Osborne Reynolds zilustrował dwa rodzaje przepływu w następujący sposób:



Przepływ laminarny



Przepływ turbulentny



Przepływ turbulentny (obserwowany za pomocą iskry elektrycznej)

Ponieważ przepływ w zagadnieniach inżynierskich jest w większości przypadków turbulentny, symulacje CFD muszą rozwiązywać przepływy turbulentne. Modelowanie turbulencji jest jednym z najważniejszych elementów analizy CFD, a poprawne modelowanie turbulencji jest kluczowe dla uzyskania poprawnych i wiarygodnych wyników CFD.

DNS Symulacja przepływu musi śledzić małe wiry, aby przybliżyć rzeczywistość, ponieważ rozpraszanie energii zachodzi głównie na poziomie małych wirów. Jednak śledzenie tego zakresu rozmiarów wymaga ogromnej liczby elementów skończonych. Takie symulacje nazywane są symulacjami **DNS** (ang. Direct Numerical Simulation), czyli "bezpośrednią symulacją numeryczną" i są przeprowadzane tylko w kluczowych symulacjach, ponieważ moc komputerów osobistych nie jest wystarczająca do wykonania tych obliczeń.

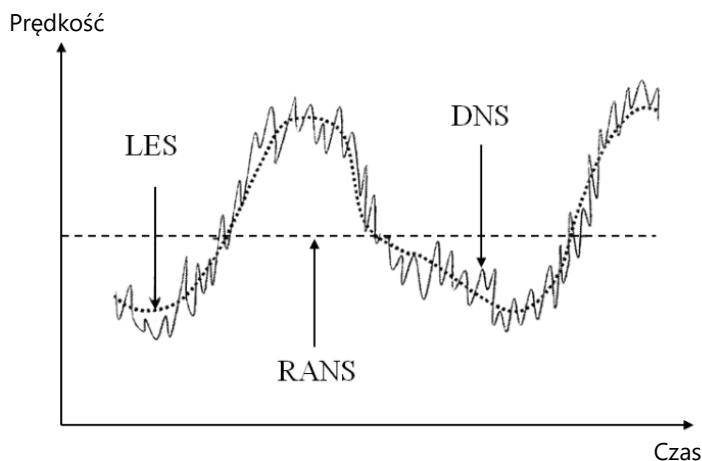
LES **LES** (ang. Large Eddy Simulation) - symulacja dużych wirów jest bardziej praktyczna. Oddziela ona małe i duże wiry, przy czym większe wiry nie są tłumione, a mniejsze są tłumione przez lepkość wirową. Wadą tego modelu jest to, że chociaż nie wymaga tak zagęszczonej siatki jak symulacja DNS, liczba elementów wymaganych do praktycznych obliczeń jest nadal dość wysoka.

RANS W praktycznych obliczeniach najczęściej stosowaną metodą jest **RANS** (ang. Reynolds Averaged Navier-Stokes). Metoda ta wymaga pewnego rodzaju modelowania nawet w przypadku wirów o średniej skali, ale pozwala na najbardziej zgrubną siatkę.

☞ **RANS pozwala jedynie na symulację przepływów stacjonarnych**

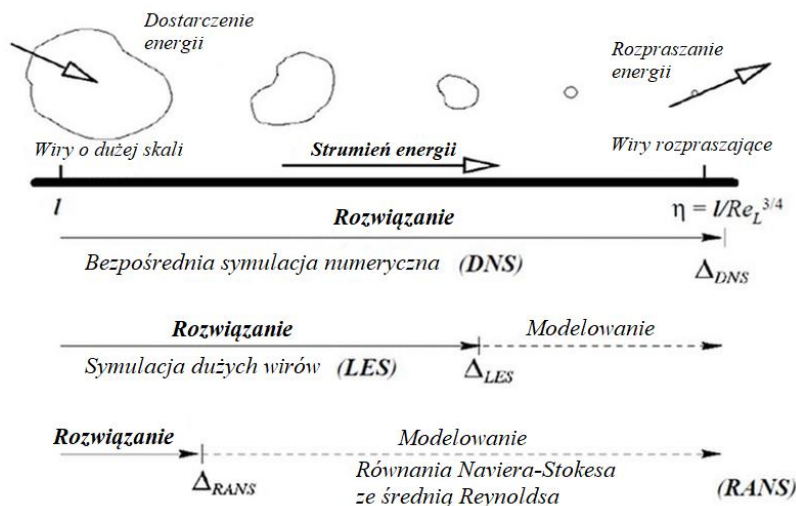
Podsumowując powyższe, technika RANS zapewnia rozwiązanie stacjonarne, LES zapewnia wyniki wygładzone w czasie, podczas gdy najbardziej ogólny wynik, obejmujący wszystkie skale czasowe, zapewnia DNS:

Prędkość przepływu w funkcji czasu dla różnych metod (Andersson i in., 2011)



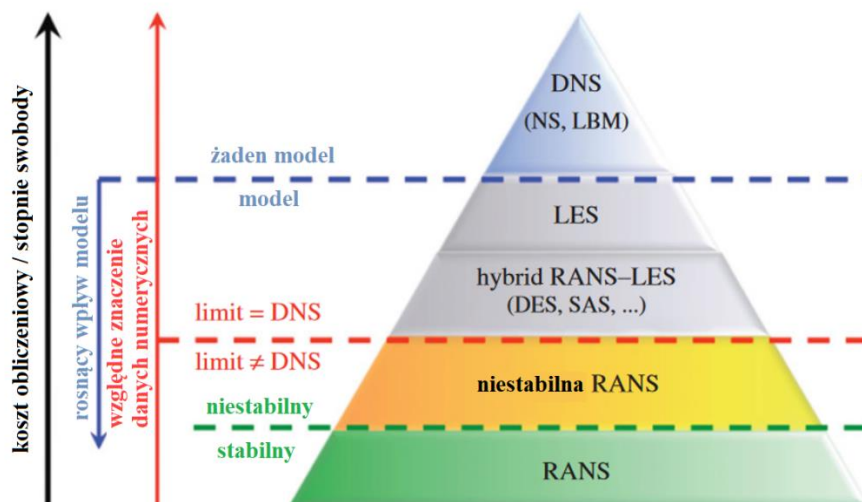
Poszczególne metody można również podzielić na kategorie ze względu na wielkość rozwiązywanych lub modelowanych wirów

Porównanie metod według skali rozwiązywanych lub modelowanych wirów (André Bakker, 2011)



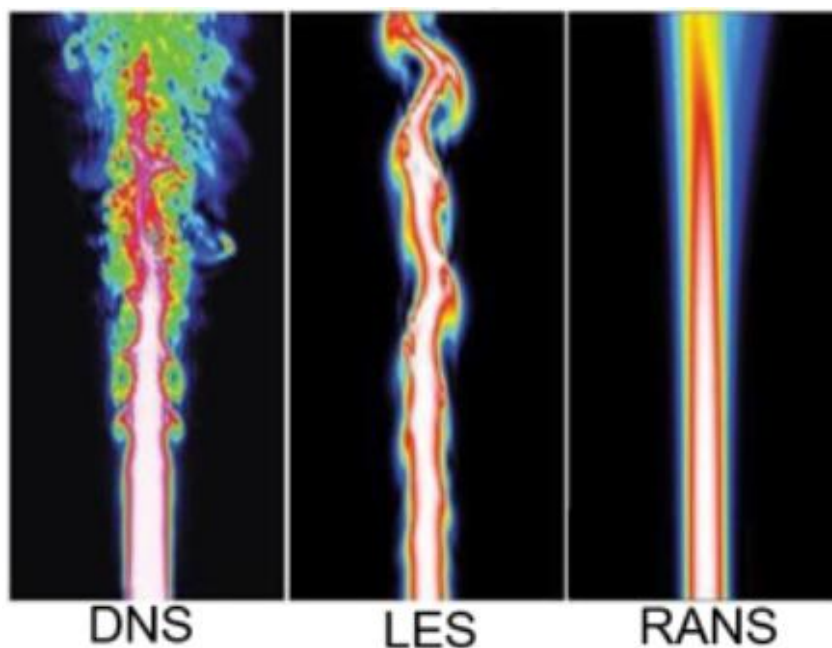
Trzy rodzaje symulacji rozwiązują różne zakresy wielkości wirów. DNS rozwiązuje bezpośrednio cały zakres wielkości, podczas gdy RANS modeluje większość zakresów i rozwiązuje bezpośrednio tylko duże wiry.

Klasyfikacja metod według poziomu modelowania (Deck i in., 2014)



Poniższe rysunki pokazują, które zakresy wielkości wirów są rozwiązywane i aproksymowane przez 3 różne techniki symulacji.

*Porównanie DNS,
LES, i RANS.
(2006). Italian
National Agency
for New Energy
Technologies,
Energy and
Sustainable
Economic
Development.*



Można stwierdzić, że najbardziej praktyczną metodą dla obliczeń inżynierskich jest symulacja RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), która jest zastosowana również w module WIND.

2.3.2. RANS

Równania Naviera-Stokesa można uśrednić w celu uzyskania uśrednionych równań przepływu, zwanych uśrednionymi równaniami Reynoldsa Naviera-Stokesa (RANS). W tym rozwiązaniu zmienna część rozwiązania nie jest obliczana, a wielkości są uśredniane w określonym przedziale czasu.

Uśrednione równania są bardzo podobne do oryginalnych, ale zawierają kilka dodatkowych członów w równaniach pędu, zwanych członami naprężenia Reynoldsa, które są nieznane i muszą być jakoś modelowane.

W przypadku RANS należy zamodelować zakres średnich i małych wirów, ponieważ rozpraszanie energii w większości odbywa się w tym właśnie zakresie. Aby zamodelować takie rozpraszanie, wprowadzono lepkość turbulentną w oparciu o eksperymenty. Moduł WIND implementuje tak zwany model dwóch równań, w którym dwa równania są dodawane do równań Naviera-Stokesa w celu modelowania turbulencji.

2.3.3. Modele k-ε

Moduł WIND oferuje model k-ε zarówno standardowy, jak i *Realizable k-ε*.

☞ **Domyślnym modelem turbulencji jest k-ε.**

Jest to pierwsza wersja modeli dwurównaniowych należących do rodziny modeli o wysokiej liczbie Reynoldsa (Caretto i in., 1972).

Pierwszą zmienną jest turbulentna energia kinetyczna (k), a drugą zmienną w tym przypadku, jest turbulentne rozpraszanie energii (ϵ), gdzie ϵ określa skalę turbulencji.

Standardowy model k-ε jest jednym z najczęściej stosowanych modeli turbulencji, chociaż nie sprawdza się dobrze w przypadku dużych, niekorzystnych gradientów ciśnienia. Jest to model dwurównaniowy, tzn. zawiera dwa dodatkowe równania ruchu reprezentujące turbulentne właściwości przepływu. Pozwala to modelowi z dwoma równaniami na uwzględnienie efektów takich jak konwekcja i dyfuzja energii turbulentnej.

Model *Realizable k-ε* (T.-H. Shih i in., 1995) zapewnia lepsze wyniki dla niekorzystnych gradientów ciśnienia i przepływów recyrkulacyjnych.

2.3.4. Modele k-ω

Moduł WIND oferuje model k-ω zarówno standardowy, jak i *SST k-ω*.

Standardowy model k-ω jest modelem empirycznym, opartym na równaniach ruchu dla energii kinetycznej (k) i szybkości rozpraszania (ω) (Wilcox, 1988). Należy on do rodziny modeli o niskiej liczbie Reynoldsa.

Model turbulencji *SST k-ω* (Menter 1993) to model wirowo-lepkościowy z dwoma równaniami, który stał się bardzo popularny. Formuła przenoszenia naprężeń ścinających (SST od ang. Shear Stress Transport) łączy w sobie to, co najlepsze z dwóch modeli.

Zastosowanie formuły k-ω w wewnętrznych częściach warstwy przyściennej (rozumianej tutaj ogólnie jako warstwa przygraniczna, czyli w pobliżu powierzchni ograniczającej) sprawia, że model ten może być bezpośrednio stosowany aż do samej ścianki poprzez podwarstwę lepkościową, dzięki czemu model *SST k-ω* może być używany jako model turbulencji Low-Re, bez potrzeby stosowania dodatkowych funkcji tłumienia. Formuła SST przełącza się ponadto na zachowanie k-ε w obszarze swobodnego przepływu, co pozwala uniknąć powszechnego problemu modeli k-ω, które wykazują zbyt dużą wrażliwość na wlocie przepływu swobodnego na właściwości turbulencji. Autorzy korzystający z modelu *SST k-ω* często doceniają go za dobre zachowanie w przypadku niekorzystnych gradientów ciśnienia i przepływie rozdzielającym. Należy wspomnieć, że model *SST k-ω* generuje nieco zbyt duże poziomy turbulencji w obszarach o dużych odkształceniach normalnych, takich jak obszary stagnacji i obszary z silnym przyspieszeniem.

Działanie SST k-ω
(źródło:
simscale.com)



Model k-ε daje dobre wyniki w zakresie swobodnego przepływu, podczas gdy model k-ω w zakresie brzegowej warstwy przygranicznej. Zalety tych dwóch modeli turbulencji można połączyć za pomocą funkcji mieszania *tanh*.

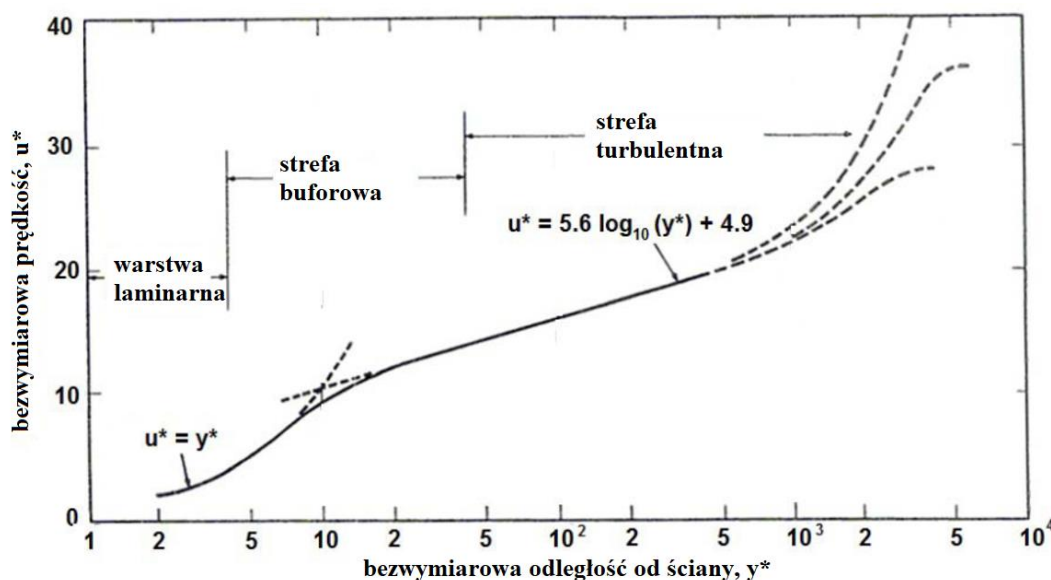
Jedną z wad modelu k-ω jest jego wrażliwość na wartości swobodnego przepływu k , ω i ϵ . W przeciwieństwie do modelu turbulencji k-ε, który nie jest tak wrażliwy. Model *SST k-ω* łączy w sobie zalety dwóch modeli.

2.3.5. Funkcje ścianki (powierzchni ograniczającej)

Termin ściana jest tutaj używany dla każdej powierzchni granicznej, gdzie pole prędkości zmienia się gwałtownie. Podczas modelowania turbulencji bardzo ważne jest dokładne uwzględnienie wpływu ściany, ponieważ turbulentna energia kinetyczna (k) w pobliżu ściany jest wysoka, a co za tym idzie determinuje siły przepływu działające na konstrukcję.

Ponieważ prędkość przepływu przy ścianie wynosi zero, w pobliżu ściany musi znajdować się warstwa laminarna. Po niej następuje strefa buforowa i turbulentna.

Funkcja ściany
(źródło: caltech)



Oś pozioma pokazuje bezwymiarową odległość y^* od ściany, podczas gdy oś pionowa pokazuje bezwymiarową prędkość przepływu. Zależność jest liniowa dla wartości blisko ściany ($y^* < 5$) i logarytmiczna dla większych odległości od ściany ($30 < y^* < 300$).

Warstwy

Warstwa laminarna	$y^* < 5$
Strefa buforowa	$5 < y^* < 30$
Strefa turbulentna	$y^* > 30$

W odniesieniu do funkcji ścian, możemy rozróżnić modele o niskiej liczbie Reynoldsa i wysokiej liczbie Reynoldsa. Model $k-\epsilon$ jest zazwyczaj modelem o wysokiej liczbie Reynoldsa, podczas gdy $k-\omega$ jest modelem o niskiej liczbie Reynoldsa. W przypadku modelu o niskiej liczbie Reynoldsa funkcja ściany nie jest potrzebna, ale w pobliżu ściany wymagana jest bardzo drobna siatka.

Funkcje ścian mogą być również wykorzystywane w modelach o niskiej liczbie Reynoldsa. Funkcja *omegaWallFunction* używana w OpenFOAM może obsługiwać zarówno przepływ laminarny (drobna siatka), jak i turbulentny (gruba siatka) w pobliżu ściany. Wartość ω w strefie buforowej jest interpolowana przez algorytm. Natomiast dla $k-\epsilon$ stosowana jest procedura *epsilonWallFunction*. Zakłada ona, że pierwsza komórka znajduje się w strefie turbulentnej, więc jeśli siatka jest zbyt drobna, może on wręcz pogorszyć dokładność obliczeń w modelu $k-\epsilon$.

3. OBCIĄŻENIE WIATREM

3.1. Wprowadzenie

Przypadki obciążeń WIND – róża wiatrów Obciążenia od symulowanego wiatru WIND są umieszczane w przypadkach obciążeń. Przypadki te umieszczane są w jednej grupie obciążeń, gdzie wzajemnie się wykluczają. Przypadki obciążeń wiatrem są określane jako róża wiatrów. Róża wiatrów (np. w1) zawiera przypadki obciążeń o tym samym profilu wiatru, ale dla różnych kierunkach wiatru (np. w1-0°, w1-90°, w1-180°, w1-270°). Liczba róż wiatrów nie jest ograniczona.

☞ **Jeżeli utworzonych zostało więcej niż 1 grupa dla obciążeń WIND, należy ustawić ich wzajemne wykluczanie się w relacjach dla kombinacji decydujących.**

3.2. Parametry ogólne

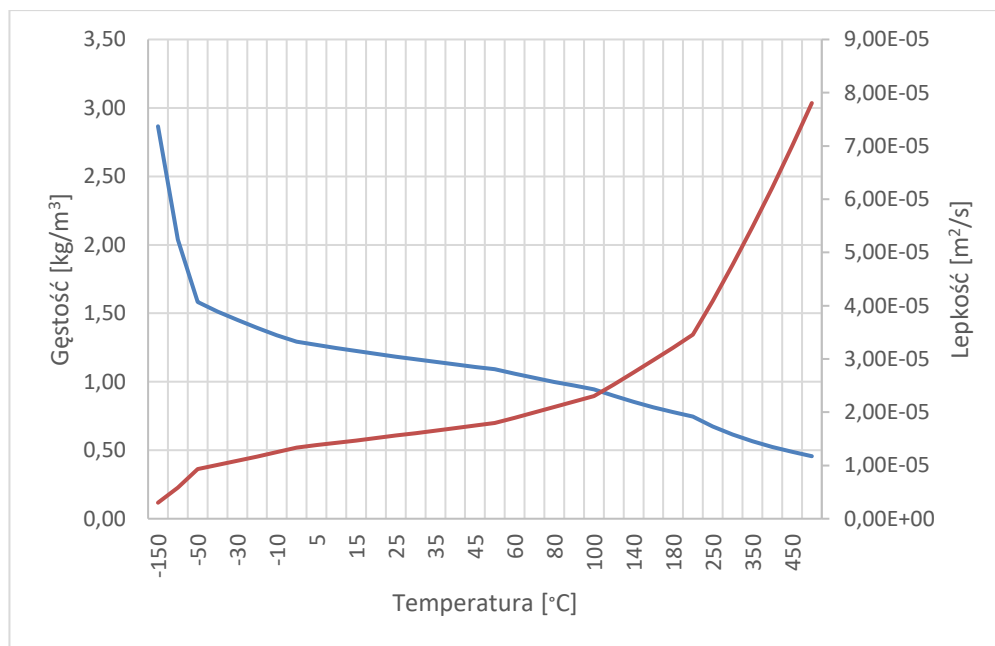
3.2.1. Teren

Z_0 Poziom terenu w globalnym układzie współrzędnych modelu. Model jest przecinany płaszczyzną poziomą na tej wysokości i tylko część znajdująca się powyżej płaszczyzny jest umieszczana w tunelu aerodynamicznym.

☞ **Moduł WIND nie uwzględnia modelu terenu z modułu SOIL.**

3.2.2. Powietrze

Należy określić parametry powietrza jako przepływającego medium. Gęstość i lepkość kinematyczna w funkcji temperatury pokazano na wykresie poniżej:



Moduł WIND stosuje wartości domyślne zgodnie z Eurokodem. Wartości domyślne przyjęto dla temperatury powietrza ~15°C stąd gęstość $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ a lepkość kinematyczna $\nu = 15 \text{ mm}^2/\text{s}$.

3.3. Profil wiatru

3.3.1. Standardowe profile wiatru

Kategoria terenu Kategoria terenu pomaga określić chropowatość terenu.

Intensywność turbulencji, I [%] Intensywność turbulencji opisuje odchylenie standardowe prędkości wiatru w stosunku do wartości średniej.

Turbulencja	Liczba Reynoldsa	Intensywność turbulencji, I [%]
Bardzo niska	$Re < 3000$	0.05-1%
Niska	$3000 < Re < 5000$	1%
Średnia	$5000 < Re < 15000$	1-5%
Wysoka	$15000 < Re < 100000$	5-20%



v_{b0} wartość podstawowa bazowej prędkości wiatru
 c_{dir} współczynnik kierunkowy
 c_{season} współczynnik pory roku
 c_0 współczynnik orografii
 k_l współczynnik turbulencji
 $c_s c_d$ współczynnik konstrukcyjny

☞ **Współczynnik konstrukcyjny nie pojawia się bezpośrednio w symulacji aerodynamicznej. Współczynnik konstrukcyjny jest używany do modyfikacji obciążeń statycznych uzyskanych z symulacji CFD.**

☞ **Moduł określa profil wiatru zgodnie z załącznikiem krajowym.**



q_{p0} Wartość referencyjna ciśnienia dynamicznego

☞ **Prędkość wiatru jest obliczana na podstawie ciśnienia zgodnie z poniższym równaniem:**

$$v = \sqrt{\frac{2q}{\rho}}$$

3.3.2. Własny profil wiatru

Własny profil wiatru jest określany przez serię wartości wielkość-prędkość wiatru w powiązaniu z intensywnością turbulencji

☞ **Prędkość wiatru i intensywność turbulencji muszą być dodatnie.**

☞ **Własny profil wiatru może prowadzić do rozbieżnego lub wolno zbieżnego rozwiązania. Jeśli to możliwe, należy unikać stosowania własnego profilu wiatru i zamiast niego używać standardowego profilu wiatru.**

3.4. Kierunki wiatru

Kąty opisują odchylenie od globalnej osi X przestrzeni modelu w płaszczyźnie X-Y.

Rozkład równomierny N równomiernie rozłożonych kierunków zostanie wygenerowanych pomiędzy φ_1 i φ_0 .

Własne kierunki Lista kątów oddzielonych średnikami. Naciśnięcie klawisza Enter lub kliknięcie przycisku + powoduje dodanie wielu kierunków do listy kierunków.

☞ **Jeśli kąt jest już na liście, nic się nie dzieje.**

4. ANALIZA

4.1. Parametry analizy

4.1.1. Metody ustawienia parametrów

Dostępne są dwie metody ustawienia parametrów: *Uproszczona* i *Szczegółowa*. W trybie *Uproszczonym* jedno ustawienie jednego paska kontroluje wiele różnych parametrów. W trybie *Szczegółowym* można kontrolować wiele różnych ustawień modelu w tym przestrzeń tunelu aerodynamicznego, siatkę i sterowanie rozwiązaniem.

☞ **Uproszczona metoda jest wystarczająca w przypadkach, gdy geometria nie jest skomplikowana, a elementami narażonymi na działanie wiatru są zazwyczaj obszary lub panele obciążeniowe.**

Gęstość siatki Parametry siatki można kontrolować, ustawiając jeden pasek kontrolny.

Maksymalna liczba iteracji Jeśli liczba iteracji osiągnie tę wartość, analiza zostanie zakończona.

Warunek zatrzymania, ciśnienie resztkowe Jeśli ciśnienie resztkowe w równaniu ciśnienia spadnie poniżej tej wartości, analiza zakończy się ważnym wynikiem.

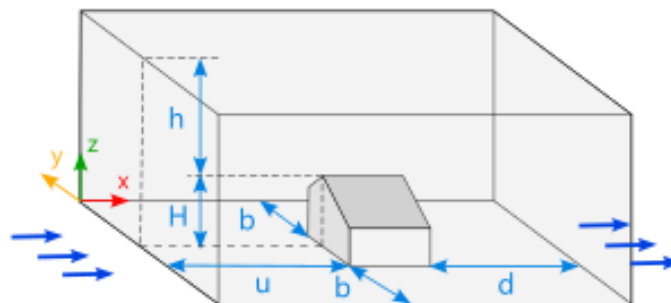
☞ **Jeśli rozwiązanie jest zbieżne, warunek zatrzymania jest spełniony, ale wartości sił aerodynamicznych na wykresie podczas analizy ulegały zmianie do samego jej końca, to należy zaostrzyć warunek zatrzymania.**

4.1.2. Parametry modelu

4.1.2.1. Przestrzeń modelu przepływu wiatru

Właściwe proporcje przestrzeni modelu Wiele artykułów omawia optymalny rozmiar tunelu aerodynamicznego. Zwiększenie rozmiaru tunelu aerodynamicznego poprawia dokładność, ale także wydłuża czas obliczeń. Dlatego ważne jest, aby znaleźć optimum, w którym wymagania dotyczące zasobów obliczeniowych są nadal akceptowalne, a dokładność wyników jest dobra.

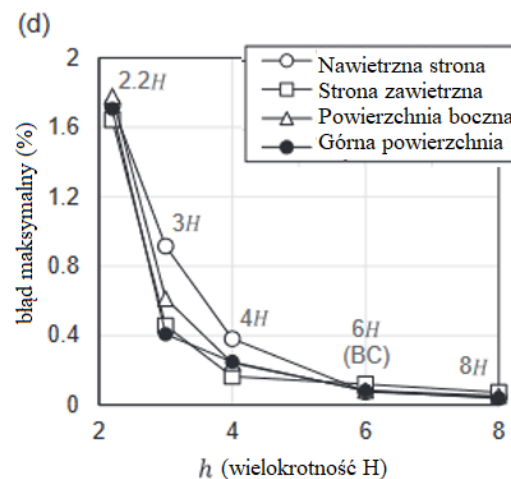
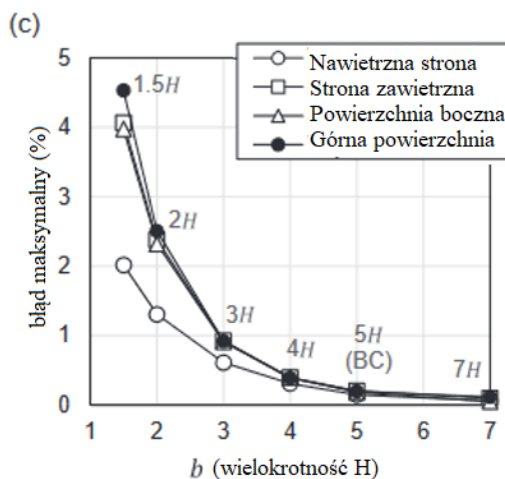
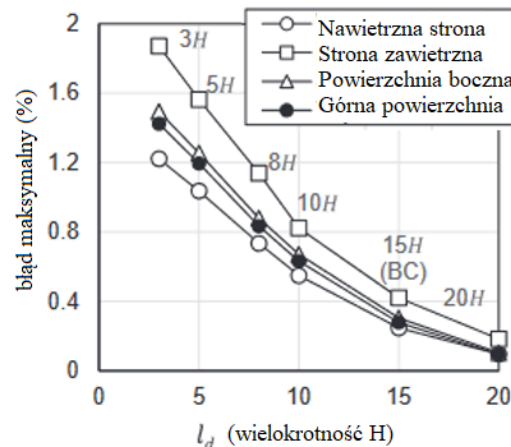
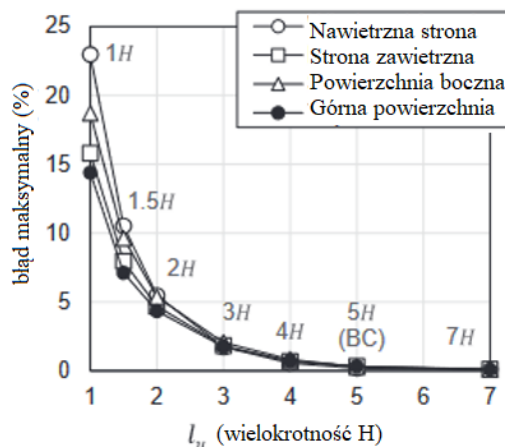
☞ **Jeśli używana jest mała przestrzeń modelowa, ściany tunelu mogą wpływać na pole ciśnienia, powodując przepływ, który nie jest rzeczywisty. Możliwy błąd może polegać na tym, że przepływ między ścianą a konstrukcją przyspiesza bardziej niż w rzeczywistości, a ssanie wiatru znacznie wzrasta.**



Zakres przestrzeni modelu musi być określony proporcjonalnie do wysokości H konstrukcji. Rozmiar tunelu aerodynamicznego z przodu konstrukcji to u , po bokach b , za konstrukcją d , a powyżej h .

☞ **W przypadku niskich i szerokich konstrukcji metoda zależna od ich wysokości nie jest miarodajna. Należy upewnić się, że tak zwany współczynnik blokowania (powierzchnia konstrukcji rzutowana na wlot podzielona przez powierzchnię wlotu) nie przekracza 3%.**

Błędy numeryczne
wynikające z
rozmiaru
przestrzeni modelu
obliczeniowego
(Yousef Abu-Zidan
et al, 2021)



W oparciu o pracę Franke i. in., moduł WIND używa następujących wartości domyślnych:

Domyślne
rozmiary tunelu
aerodynamicznego

$u = 5 \cdot H$
 $b = 5 \cdot H$
 $h = 5 \cdot H$
 $d = 15 \cdot H$

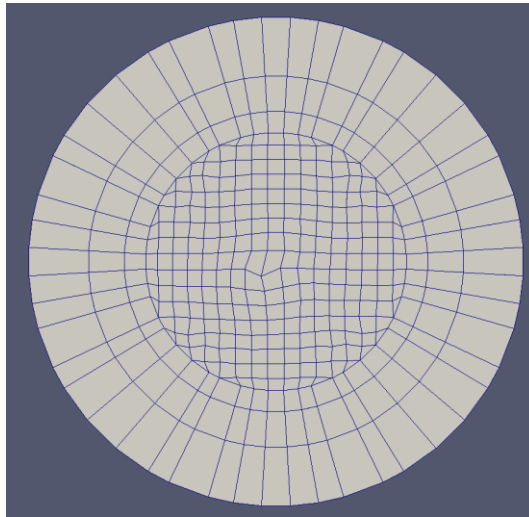


W przytoczonych artykułach h jest mierzone od podłoża, podczas gdy w naszym przypadku jest mierzone od wierzchołka konstrukcji.

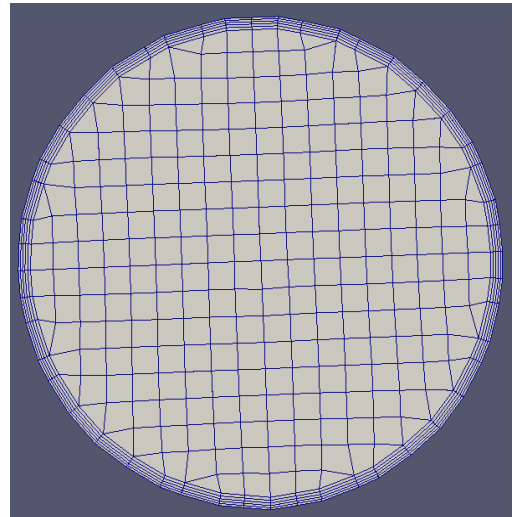
Skalowanie

W kilku artykułach omówiono możliwość tworzenia modeli CFD o zmniejszonej skali (Ai, Mak, 2014). Zaletą tych modeli jest to, że zagęszczenie siatki może być znacznie zmniejszone. Wynika to z faktu, że y^* , który reprezentuje zmianę prędkości w pierwszej komórce wzdłuż ścian, jest znacznie mniejszy w przypadku modeli zredukowanych. Siatka o niższym y^* zazwyczaj dokładniej opisuje zachowanie w pobliżu ściany, patrz poniżej.

Gęstość siatki w pobliżu ściany
(źródło:
simscale.com)



$y^* \approx 30$



$y^* \approx 1$

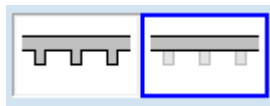
- ☞ **Należy jednak pamiętać, że przeskalowanie modelu powinno być stosowane tylko w przypadku konstrukcji niezależnych od liczby Reynoldsa, więc użytkownicy mniej zaznajomieni z modelowaniem CFD powinni zachować skalę 1:1.**

4.1.2.2. Opcje modelowania konstrukcji

- Elementy eksportowane** Obliczenia mogą być opcjonalnie ograniczone do fragmentów aktywnych (widocznych aktualnie na modelu, jeśli takie istnieją), dzięki czemu elementy, które nie są istotne w symulacji przepływu, mogą zostać pominięte i wykluczone z obliczeń.
- Panele obciążeniowe** Panele obciążeniowe to elementy nie posiadające grubości, ponieważ ich jedyną funkcją jest rozkładanie obciążeń. Jednakże symulacja aerodynamiczna wymaga, aby wszystkie elementy umieszczone w przepływie miały niezerową grubość, zatem istnieje możliwość wprowadzenia tej wartości. Grubość ta jest istotna tylko wtedy, gdy panel obciążeniowy lub jego część funkcjonuje jako element wolnostojący.
- Przecięcie elementów łączących** Małe szczeliny pojawiające się na krawędziach, gdzie elementy są połączone pod kątem, mogą powodować trudności w tworzeniu siatki. W prostych przypadkach, aktywacja tej opcji może wyeliminować problemy z siatką.
- Przekroje poprzeczne** Siatkowanie elementów belkowych z ich rzeczywistym przekrojem i uwzględnianie wszystkich parametrów może znacznie wpłynąć na złożoność siatki i czas obliczeń. Dostępne są trzy opcje: brak uproszczeń, zignorowanie promieni zaokrągleń lub zastąpienie przekroju jego obwiednią.



- Płyty uźebrowane** Opcjonalne modelowanie płyt z lub bez parametrycznych żeber.



- ☞ **Należy używać możliwie najprostszego modelu geometrycznego. Elementy, które nie odgrywają znaczącej roli w przepływie, nie powinny być brane pod uwagę, ponieważ niepotrzebnie zwiększają czas obliczeń. Na przykład, jeśli model jest pokryty panelami obciążeniowymi, w większości przypadków wystarczy uwzględnić tylko te panele i nie ma potrzeby eksportowania dodatkowych elementów konstrukcji.**
- ☞ **Obciążenia statyczne będą umieszczane tylko na wyeksportowanych elementach.**
- ☞ **Najtrudniejszym zadaniem jest modelowanie przekrojów smukłych. Ogólnie rzecz biorąc, minimalny rozmiar siatki musi być mniejszy niż minimalna szerokość modelowanych elementów**

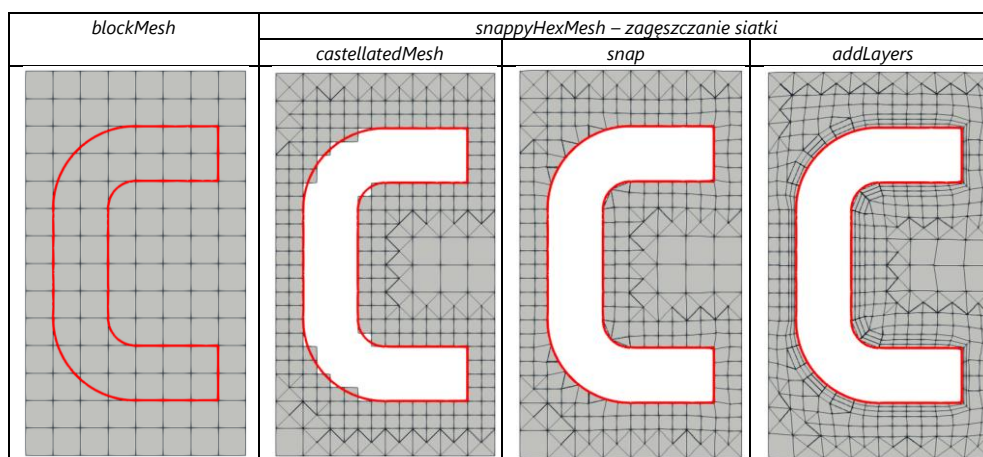
konstrukcyjnych. Nie stanowi to większego problemu w przypadku masywnych elementów konstrukcyjnych, ale jeśli grubość ścianki wynosi zaledwie kilka milimetrów, znacznie wydłuży to czas obliczeń. W takim przypadku przydatne może być zamodelowanie przekroju za pomocą jego obwiedni.

4.1.3. Parametry siatki

4.1.3.1. Wprowadzenie

Główne etapy tworzenia siatki w OpenFOAM. W pierwszej kolejności, tworzymy siatkę podstawową 3D (zwaną *blockMesh*), a następnie "rzutujemy" obiekt z tej siatki (patrz *castellatedMesh*). Wynikowa "zgrubna" powierzchnia jest kształtowana w taki sposób, że punkty graniczne wypadają na powierzchni obiektu (patrz *snap*). Na koniec do otoczenia ściany dodawane są dodatkowe warstwy (patrz *addLayers*), aby uwzględnić gwałtowną zmianę prędkości (patrz y^* powyżej).

Etapy generowania
siatki (źródło:
CFDsupport)



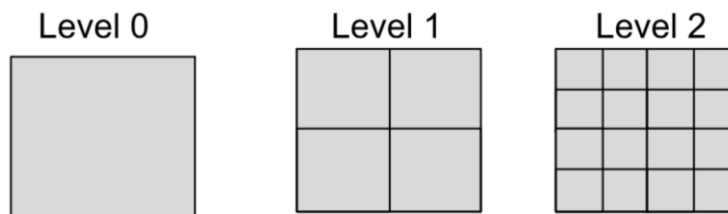
4.1.3.2. blockMesh

Pierwszym krokiem w tworzeniu siatki jest utworzenie tak zwanej siatki *blockMesh*. Można to uznać za siatkę podstawową, która siatkuje tylko przestrzeń tunelu aerodynamicznego. Rozmiar siatki określony w oprogramowaniu jest powiązany z tą siatką.

4.1.3.3. snappyHexMesh

Drugim krokiem w tworzeniu siatki jest uwzględnienie modelu umieszczonego w strumieniu. Proces ten nazywany jest *snappyHexMesh* (zagęszczanie siatki) i jest najbardziej czasochłonną częścią procesu tworzenia siatki. Aby zinterpretować pokazane tutaj parametry, musimy zdefiniować pojęcie "poziomu" używane w siatce OpenFOAM.

Interpretacja
poziomów (źródło:
CFDsupport)

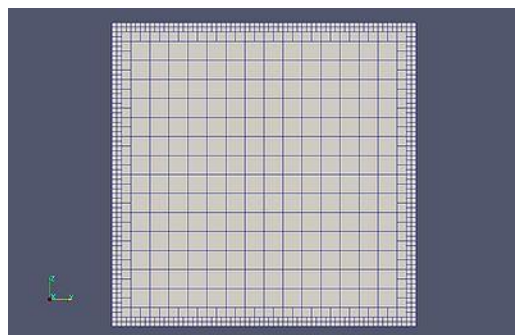


Podział komórki 3D na n poziomów skutkuje powstaniem 2^{3n} nowych komórek.

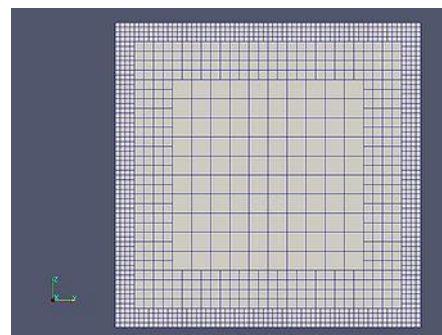
Zagęszczanie siatki Program w dwóch krokach zagęszcza siatkę bazową w pobliżu obwiedni konstrukcji. Najpierw określa 20% wartości u , d , b , h , i w tym zakresie stosuje minimalne zagęszczenie siatki, a następnie w zakresie 10% powyższych wartości - maksymalne zagęszczenie. Zagęszczenie jest niezbędne do dokładnego śledzenia zachowania podstawowych zmiennych w zakresie szybkich zmian prędkości.

Liczba komórek
(oczek siatki)
między poziomami
(źródło:
OpenFOAM)

Przy przechodzeniu między poziomami, OpenFOAM wykorzystuje co najmniej tyle pośrednich warstw komórek.



1

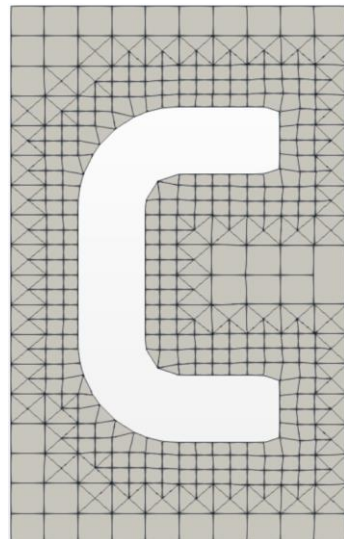


4

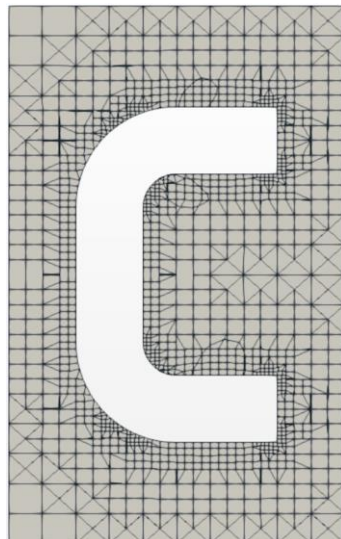
Minimalne /
maksymalne
zagęszczenie siatki
powierzchni

OpenFOAM używa dwóch liczb do opisanego stopnia zagęszczenia siatki w pobliżu powierzchni.

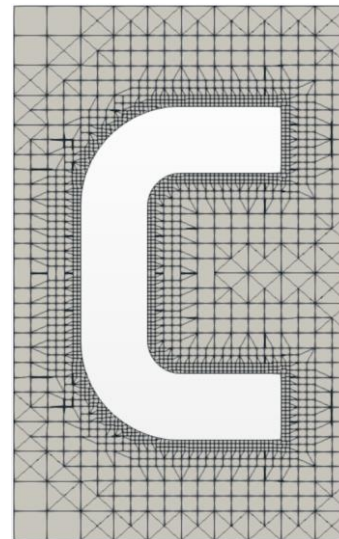
Zagęszczenie siatki
powierzchni dla
różnych wartości
parametru
sterującego
(źródło:
CFDsupport)



(1-1)



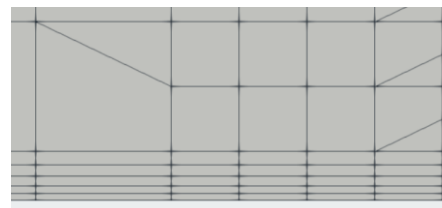
(1-3)



(3-3)

Liczba warstw
brzegowych

W pobliżu ścianek gradient pola prędkości jest bardzo wysoki, dlatego zaleca się zagęszczenie siatki poprzez dodanie dodatkowych warstw wokół tych powierzchni. Procedura *addLayers*, jak opisano powyżej, dzieli brzegowe komórki, zmniejszając ich rozmiar w kierunku normalnym do powierzchni, poprawiając w ten sposób dokładność rozwiązania w pobliżu ścianki.



W przypadku zakrzywionych struktur należy unikać dodawania warstw (zaleca się zdefiniowanie 0 jako liczby warstw brzegowych).

4.1.4. Sterowanie rozwiązaniem

Modele turbulencji

Model turbulencji można wybrać z listy rozwijanej.



Domyślnym modelem turbulencji jest model k-ε, patrz wyżej.

Sterowanie
rozwiązaniem

Dodatkowe warunki zatrzymania można określić dla pola prędkości i parametrów turbulencji.

- ☞ **Dodatkowe kryteria zbieżności są przydatne, gdy ciśnienie resztkowe spada poniżej wymaganego poziomu, ale siły aerodynamiczne w końcowych iteracjach nadal zmieniają swoje wartości.**

4.1.5. Generowane obciążenie wiatrem

Rozmiar siatki dla obciążeń wiatrem Za pomocą tego parametru możemy dostosować dokładność rozkładu obciążenia wiatrem. Zaleca się aby rozmiar siatki był o 1 rząd wielkości większy niż rozmiar siatki konstrukcji.

- ☞ **Domyślna wielkość siatki obciążenia to 5,0 m.**

4.2. Warunki brzegowe

Wlot Powierzchnia $x=0$, na której przepływające medium wchodzi do tunelu aerodynamicznego, nazywana jest wlotem. Na tej granicy określamy warunki brzegowe wlotu, tj. profil prędkości zależny od wysokości i warunków turbulencji.

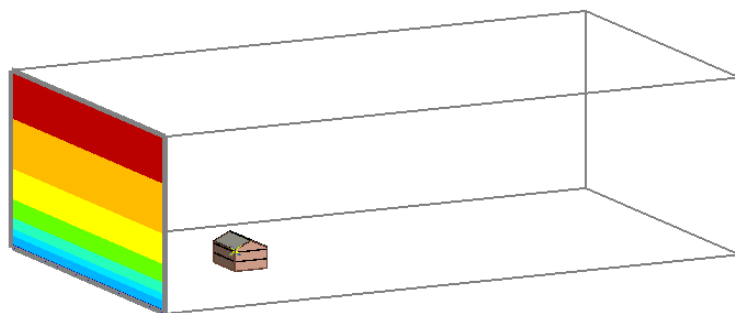
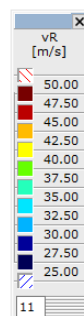
Prędkość wlotu
Energia kinetyczna
turbulencji
 ε

$U(z)$
na podstawie definicji $k(z) = \frac{3}{2} (U(z) \cdot I(z))^2$

trzeci parametr wlotowy, zwany skalą długości turbulencji, jest przybliżany na podstawie danych zaczerpniętych z literatury przedmiotu.

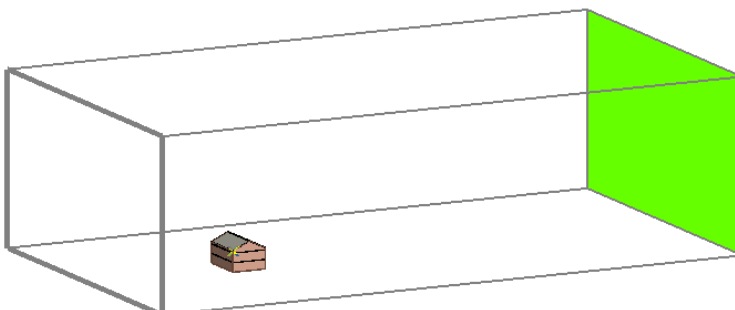
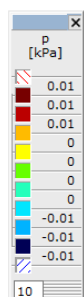
ω wg definicji $\omega(z) = \frac{1}{C_\mu} \frac{\varepsilon(z)}{k(z)}$, gdzie $C_\mu = 0,09$.

Standardowy profil
prędkości przy
wlocie



Wylot Wylot to powierzchnia równoległa do wlotu, gdzie strumień powietrza opuszcza tunel aerodynamiczny. Tutaj przyrost ciśnienia w stosunku do ciśnienia atmosferycznego wynosi zero. Warunek ten oznacza, że pole ciśnienia na powierzchni wylotowej nie różni się od ciśnienia występującego w niezakłóconym strumieniu.

Zerowe ciśnienie
na wylocie



Inne warunki brzegowe Po obu stronach i na górze nałożony jest warunek poślizgu, tj. naprężenie ścinające wynosi zero.

Ukształtowanie terenu Na dolnej powierzchni tunelu nałożony jest warunek braku poślizgu, tj. prędkość wynosi zero.

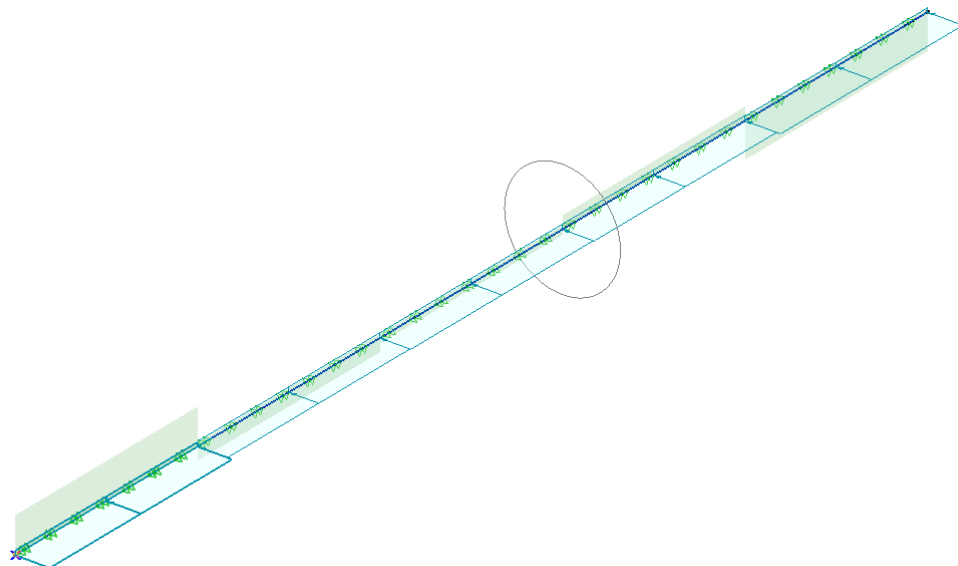
Konstrukcja Na granicy konstrukcji nałożony jest warunek braku poślizgu, tj. prędkość wynosi zero.

☞ **W pobliżu terenu i konstrukcji stosowane są tak zwane funkcje ściany.**

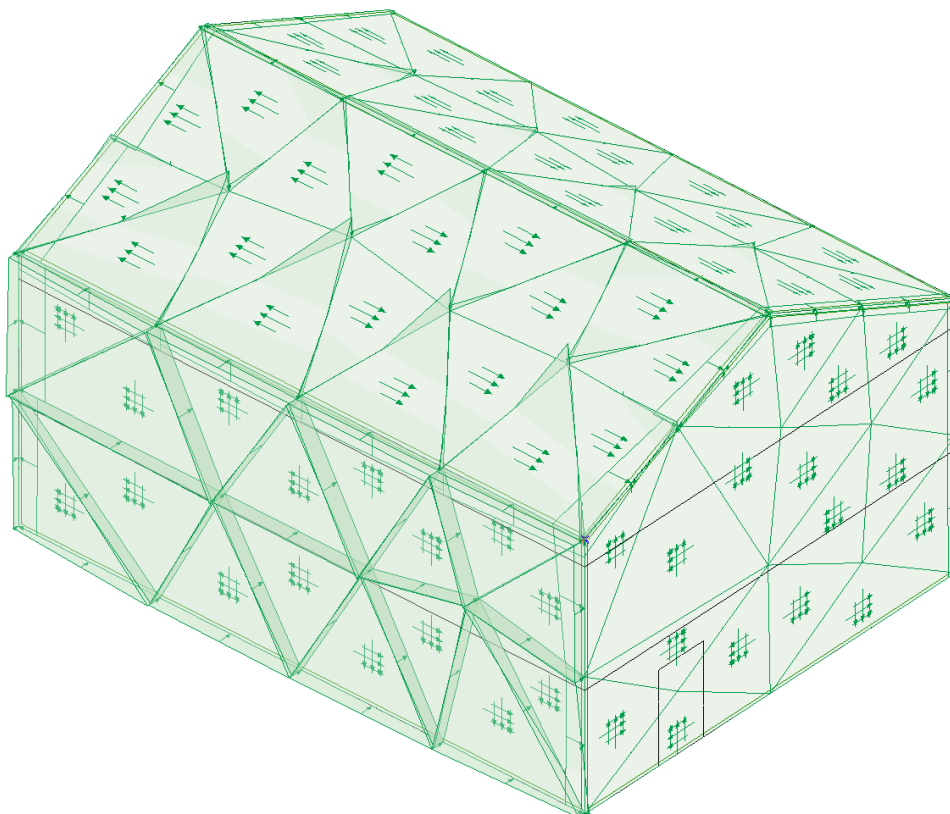
4.3. Generowanie obciążeń w AXISVM

Na wstępie określone jest, który element konstrukcyjny przenosi obciążenia z poszczególnych oczek siatki (komórek) OpenFOAM. Następnie na tych elementach generowana jest siatka (podział) umożliwiająca zróżnicowanie obciążenia (patrz poniżej).

*Siatka obciążeń:
siatka liniowa dla
obciążeń wiatrem
(niezależna od siatki
elementów)*

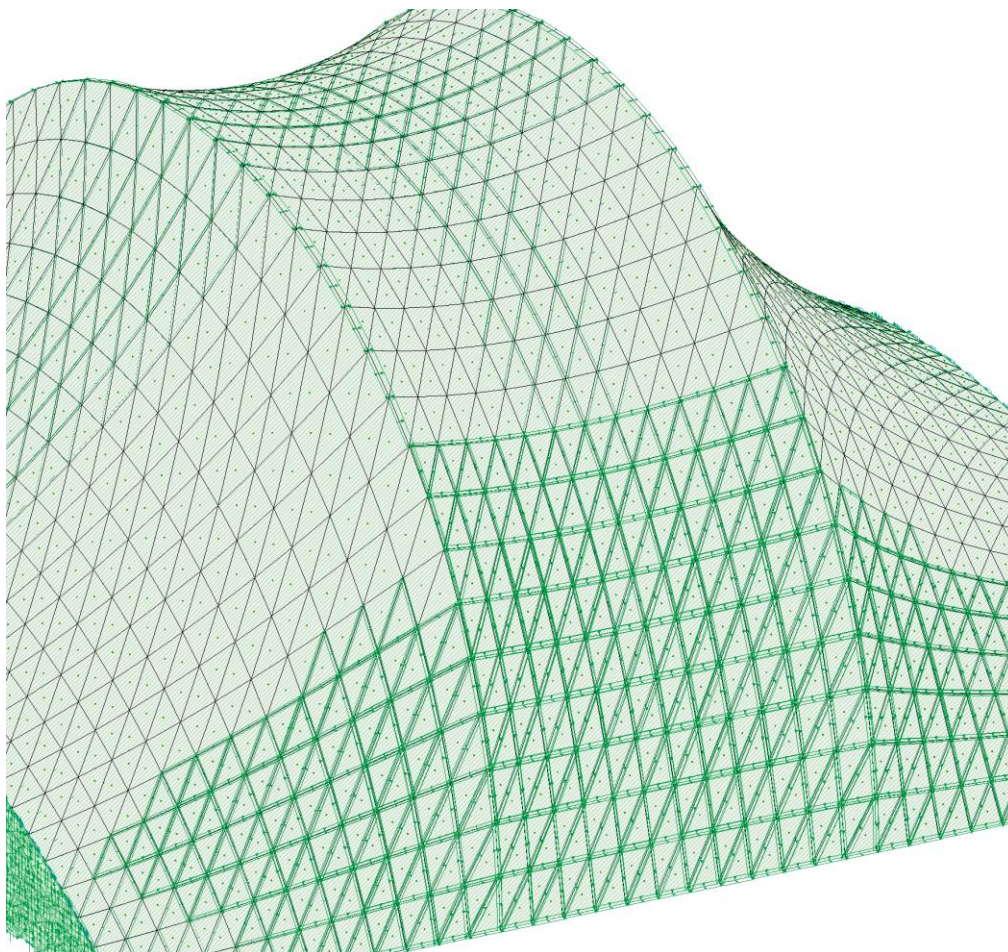


*Siatka obciążeń:
trójkątna siatka
powierzchniowa dla
obciążeń wiatrem
(niezależna od siatki
elementów)*



☞ **Rozmiar siatki obciążeń w parametrach analizy WIND określa wielkość tej siatki (patrz wyżej).**

*Siatka obciążeń
dla obciążeń
wiatrem na
elementach o
podwójnie
zakrzywionej
powierzchni
(zależne od siatki
elementów
skończonych)*



☞ **Jeśli elementy powierzchniowe nie zostały wygenerowane poprzez siatkowanie obszaru, ale jako niezależne elementy, to siatka (podział) obciążenia jest tworzona na podstawie kształtu samych elementów skończonych (trójkątnych lub czworokątnych).**

*Redukcja
obciążenia*

Gdy siatka obciążeń jest już znana, pole ciśnienia zostaje zredukowane. Pole ciśnienia jest sprowadzane do j -tego elementu siatki obciążeń zgodnie z następującym wzorem

$$\begin{aligned} R_j &= \sum_i A_i (p_i \mathbf{n}_i - \mathbf{t}_i), \\ M_j &= \sum_i \mathbf{r}_i \times A_i (p_i \mathbf{n}_i - \mathbf{t}_i), \end{aligned}$$

gdzie A_i jest polem powierzchni jednego elementu siatki, p_i jest ciśnieniem wywieranym na element siatki, $\mathbf{n}_i$ jest wektorem normalnym powierzchni elementu siatki stykającej się z konstrukcją, $\mathbf{t}_i$ jest lepkiem naprężeniem ścinającym działającym na powierzchnię, $\mathbf{r}_i$ jest wektorem względnym między środkiem siatki obciążenia elementu konstrukcyjnego a środkiem powierzchni elementu siatki. R_j jest siłą wypadkową działającą na j -ty element siatki obciążenia, i M_j jest momentem.

*Obciążenie
elementów
liniowych*

W przypadku liniowego podziału obciążenia, równomiernie rozłożona siła i moment są zdefiniowane z następującymi wartościami: $\mathbf{q}_j = \frac{\mathbf{R}_j}{l_j}$, $\mathbf{m}_j = \frac{\mathbf{M}_j}{l_j}$ gdzie l_j jest długością elementu siatki obciążenia.

*Obciążenie
obszarów*

Umieszczenie liniowo zmiennego obciążenia rozłożonego na trójkącie wymagałoby znalezienia 9 parametrów z 6 równań, co byłoby wadliwie zdefiniowanym problemem. Zamiast tego zakłada się, że ciśnienie prostopadłe do powierzchni zmienia się liniowo, podczas gdy ciśnienie w kierunku równoległym do płaszczyzny jest stałe. Daje to w sumie 5 parametrów przy 6 równaniach. Niespójność została rozwiązana poprzez niespełnienie równania momentu wokół normalnej trójkąta. W ten sposób otrzymujemy układ równań z 5 zmiennymi

Obciążenie elementów powierzchniowych Pojedyncze powierzchniowe elementy skończone są zwykle używane do modelowania zakrzywionych struktur. W związku z tym zakłada się, że zakres tych elementów nie jest znaczący, więc ciśnienie na nich jest stałe. W konsekwencji równoważność momentów nie jest spełniona. Wielkość stałych obciążeń powierzchniowych wynosi: $p_j = \frac{R_j}{A_j}$ gdzie A_j jest powierzchnią elementu powierzchniowego.



Wszystkie składowe obciążenia są zdefiniowane w globalnych osiach X, Y, Z.

5. Wyniki

5.1. Przypadki obciążenia wiatrem

Przypadki obciążenia Lista rozwijana umożliwia wybranie przypadku obciążenia, w celu wyświetlenia wyników dla tego przypadku obciążenia.

5.2. Komponenty wyników

Ciśnienie (p, strP) Wyniki ciśnienia uzyskane na siatce lub wzdłuż linii strumienia mogą być wyświetlane (patrz poniżej).

 **Wartości ciśnienia są ujemne dla ssania wiatru, a dodatnie dla parcia.**

Współczynnik c_{pe} Moduł WIND definiuje współczynnik ciśnienia dla powierzchni zewnętrznej w następujący sposób:

$$c_{pe} = \frac{p}{\frac{1}{2} \rho v^2(z)'}$$

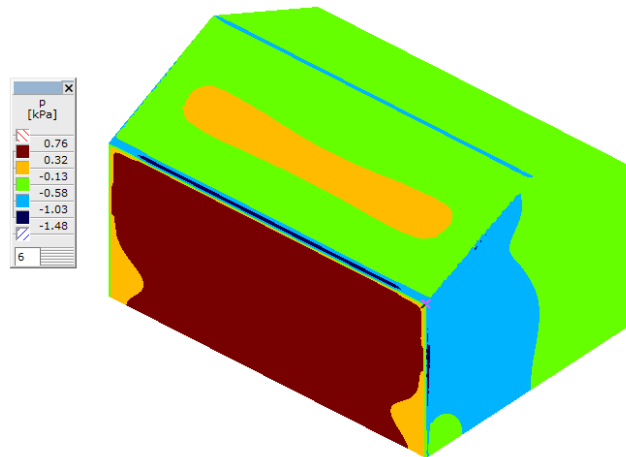
tj. stosunek ciśnienia w danym punkcie do ciśnienia dynamicznego na wysokości tego punktu.

Prędkość wiatru (vx, vy, vz, vR, strV) Pole prędkości w lokalnych kierunkach tunelu aerodynamicznego, wypadkowa prędkość wiatru i prędkość wzdłuż linii opływowych.

 **Ze względu na przyjęty brak poślizgu pole prędkości wynosi zero na obudowie konstrukcji, więc nie jest wyświetlane.**

5.3. Wyświetlanie wyników

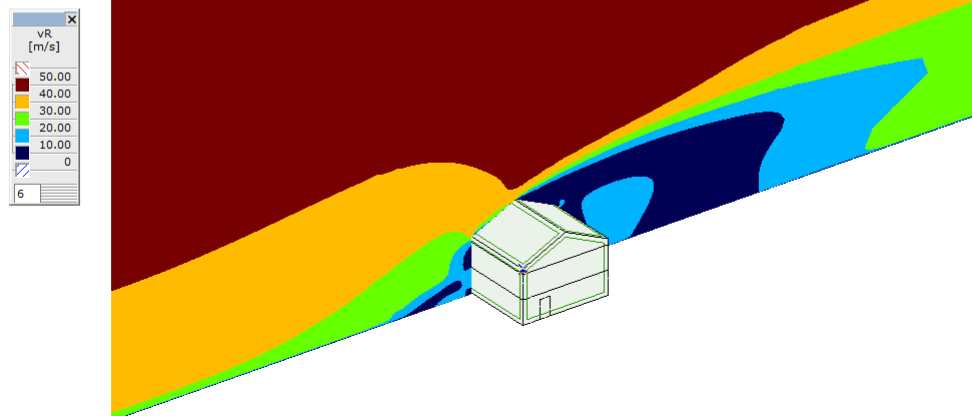
Obudowa konstrukcji Wartości ciśnienia i współczynnika ciśnienia mogą być wyświetlane na obudowie konstrukcji.



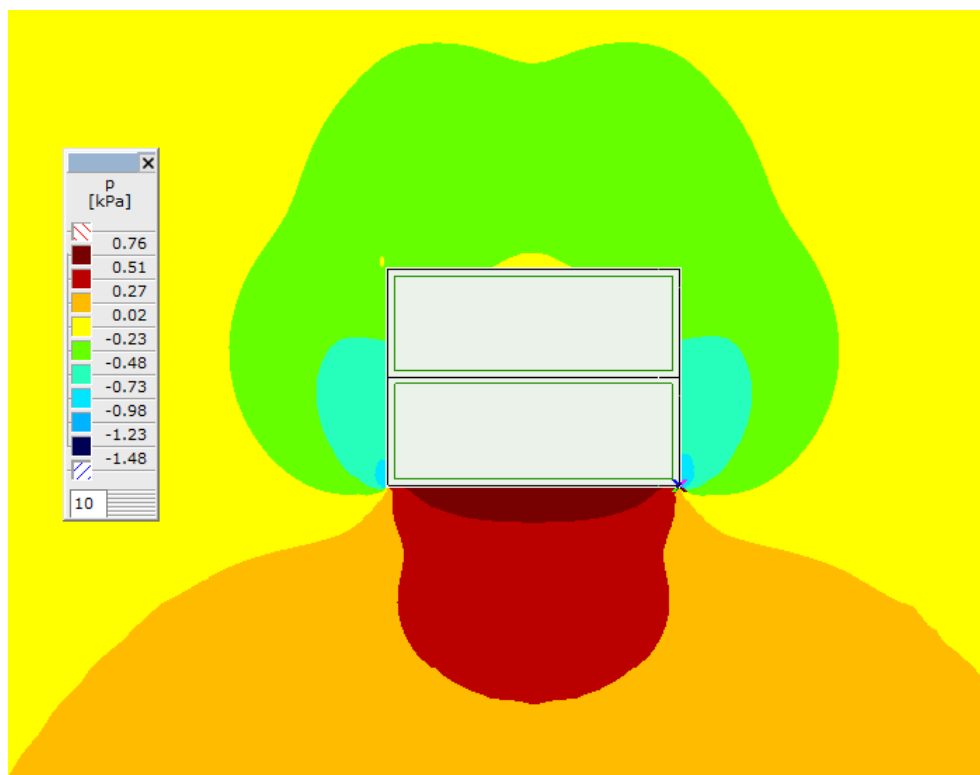
Płaszczyzny wycinające Po utworzeniu płaszczyzn wycinających można na nich wyświetlić pole ciśnienia lub pola prędkości z tunelu aerodynamicznego.

Skanery Skanery to interaktywne, ruchome płaszczyzny przekroju do wyświetlania pola ciśnienia lub prędkości z tunelu aerodynamicznego. Skanery umożliwiają również animację.

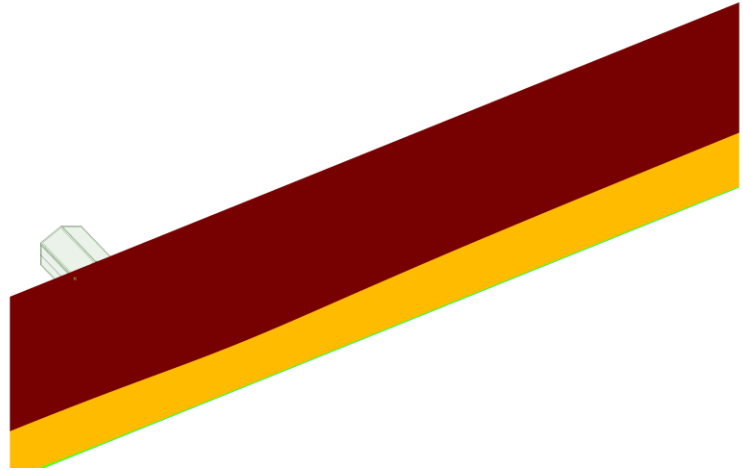
Wypadkowa
prędkość wiatru na
płaszczyźnie o
normalnej w
kierunku y



Ciśnienie wiatru
na płaszczyźnie z
normalną w
kierunku z (widok
z góry)



Prędkość wiatru na
interaktywnej
płaszczyźnie
przekroju
z normalną
w kierunku -y-
(może być
animowana)



Strumienie Punkty na trajektorii strumienia są uzyskiwane przy użyciu całkowania w czasie:

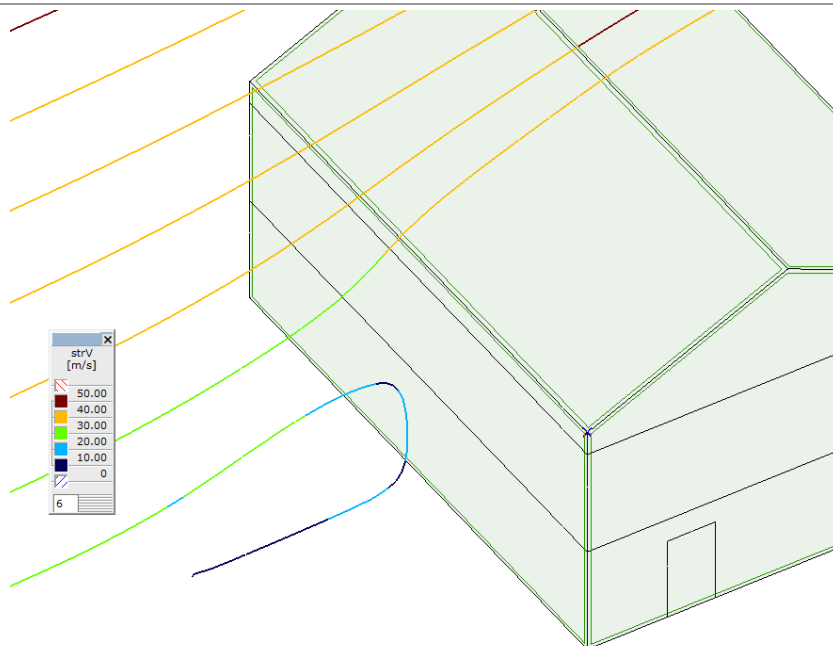
$$\mathbf{r}(t) = \int_{\tau=0}^t \mathbf{v}(\mathbf{r}(\tau)) d\tau.$$

Aby obliczyć tę całkę, należy zdefiniować punkty początkowe. Te punkty początkowe można określić w oknie dialogowym AxisVM jako serię punktów na powierzchni wlotu.

- | | |
|------------------------------------|--|
| <i>Układ</i> | Seria punktów początkowych strumienia może być pozioma lub pionowa. |
| <i>Pozycja</i> | Pozycję serii punktów można określić w kategoriach względnych lub bezwzględnych. W przypadku pionowych punktów początkowych jest to pozycja pozioma, natomiast w przypadku poziomych punktów początkowych jest to pozycja pionowa. |
| <i>Liczba punktów początkowych</i> | Liczba punktów początkowych w serii wygenerowanych dla danej pozycji. |
| <i>Ograniczenia</i> | Domyślnie seria przebiega od lewej krawędzi prostokąta wlotu do prawej krawędzi (poziomo) lub od dołu do góry wlotu. Serię można ograniczyć do mniejszego zakresu, wprowadzając dwie wartości z zakresu 0-1. |

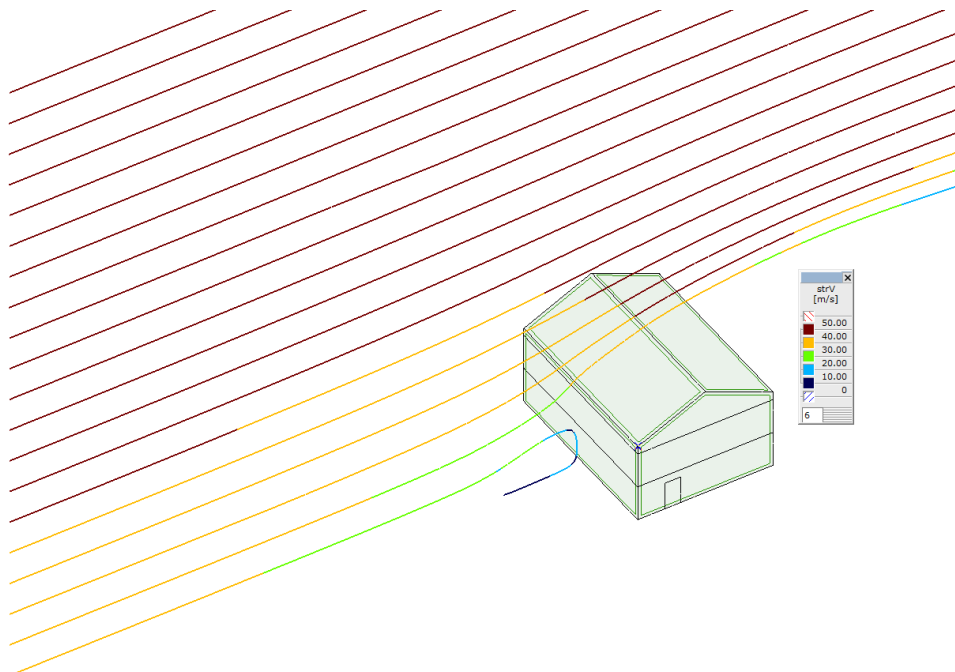


Linie strumienia mogą być kolorowane według prędkości lub wartości ciśnienia.

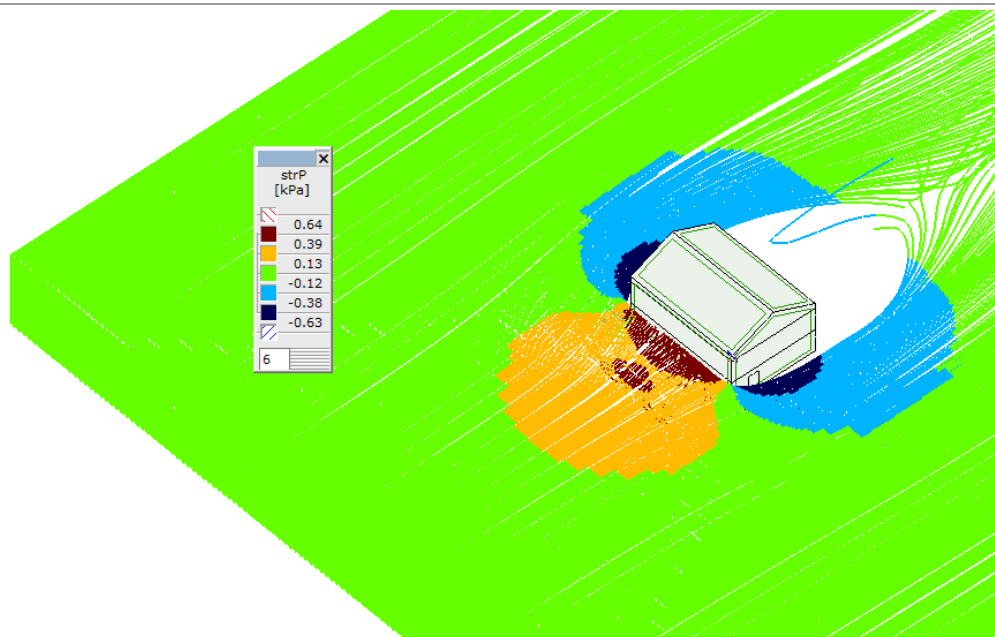


☞ Jeśli prędkość wiatru w punkcie należącym do linii strumienia spadnie poniżej określonej wartości, linia strumienia zostanie przzerwana.

Pionowo rozłożone linie
strumienia, 20 punktów
początkowych



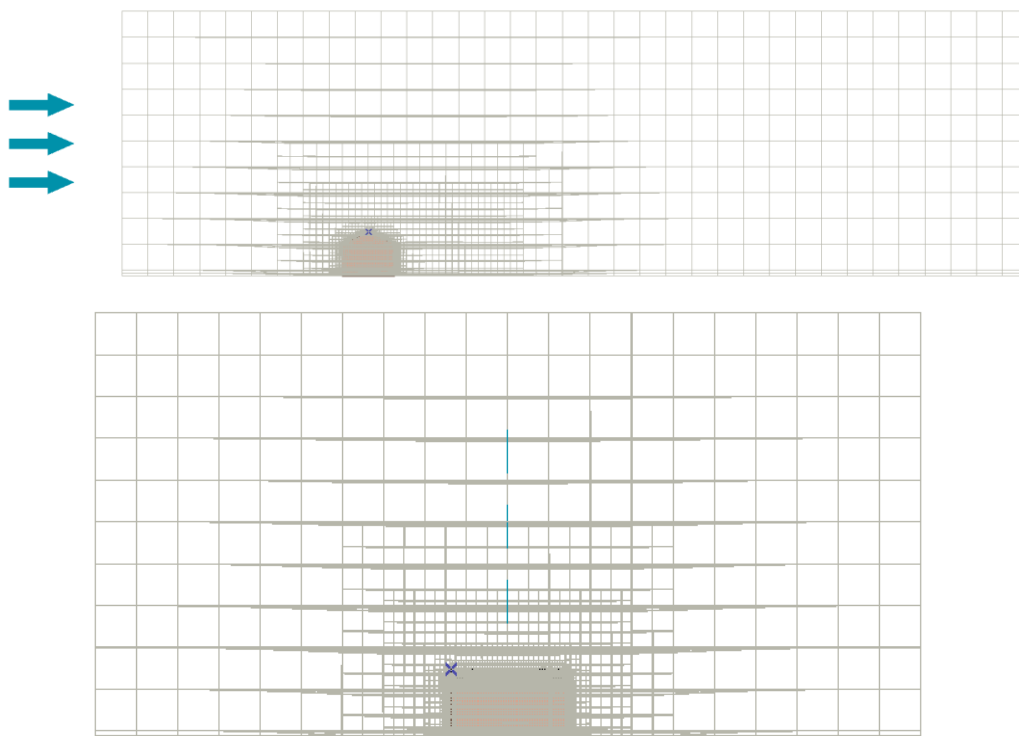
Poziomo rozłożone linie
strumienia, 500 punktów
początkowych



5.4. Tryby wyświetlania siatki

*Siatka 3D modelu
analizy przepływu
wiatru*

Wyświetla siatkę bryłową w tunelu aerodynamicznym.



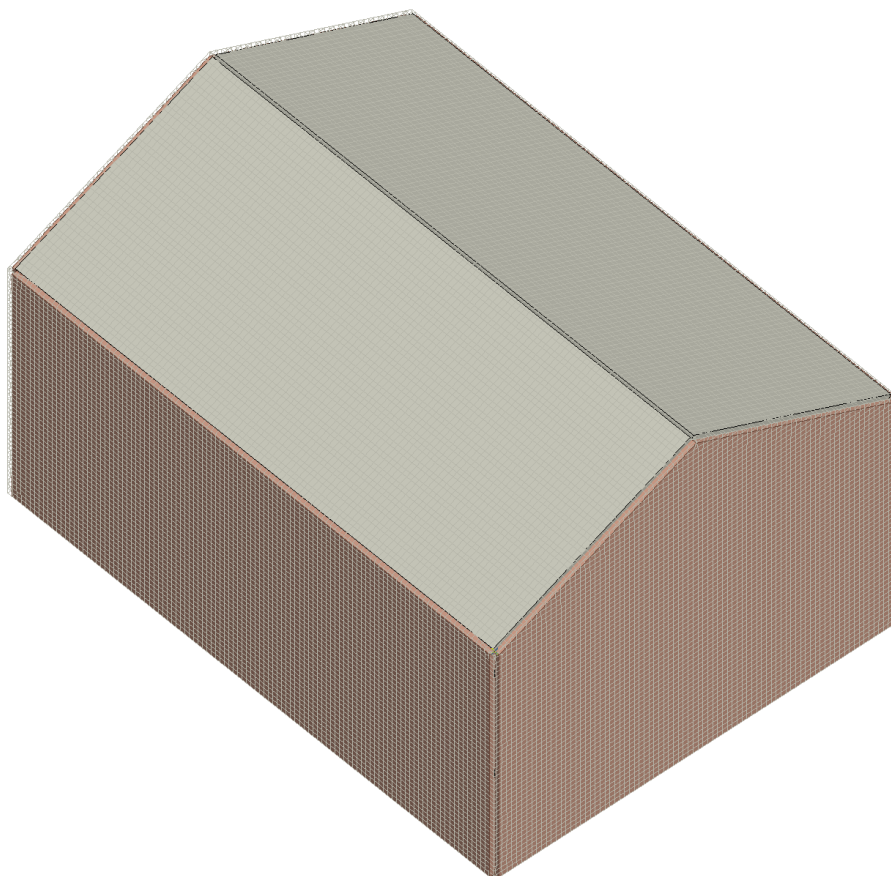
*Siatka powierzchniowa
modelu przepływu
wiatru*

Wyświetla siatkę na powierzchniach bocznych tunelu aerodynamicznego.

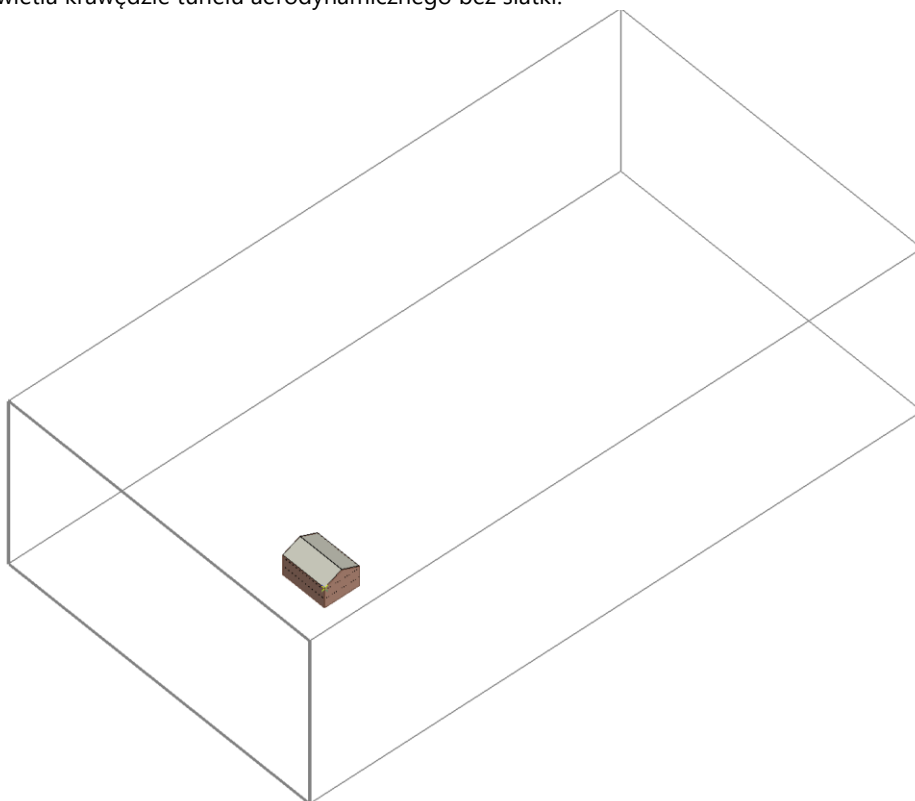


*Model tunelu
aerodynamicznego*

Siatka powierzchniowa na obudowie modelu umieszczonego w tunelu aerodynamicznym.



Tunel aerodynamiczny Wyświetla krawędzie tunelu aerodynamicznego bez siatki.

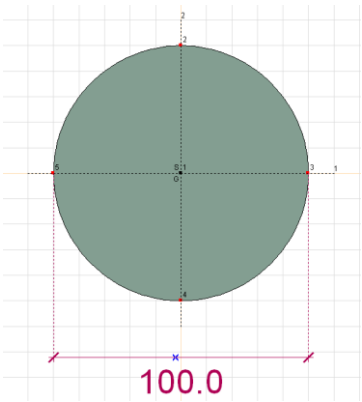


6. Przykłady weryfikacyjne

6.1. Cylinder

Plik modelu WIND_cylinder.axs

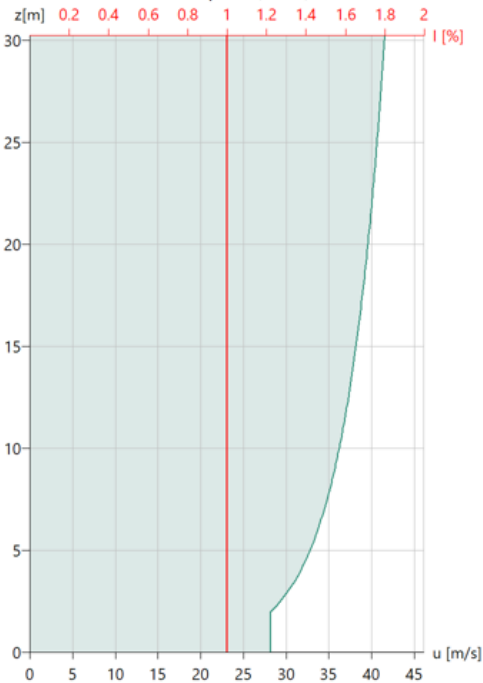
Model prętowy,
przekrój
poprzeczny



10 m odcinek pełnego walca o średnicy 1 m na wysokości 5 m

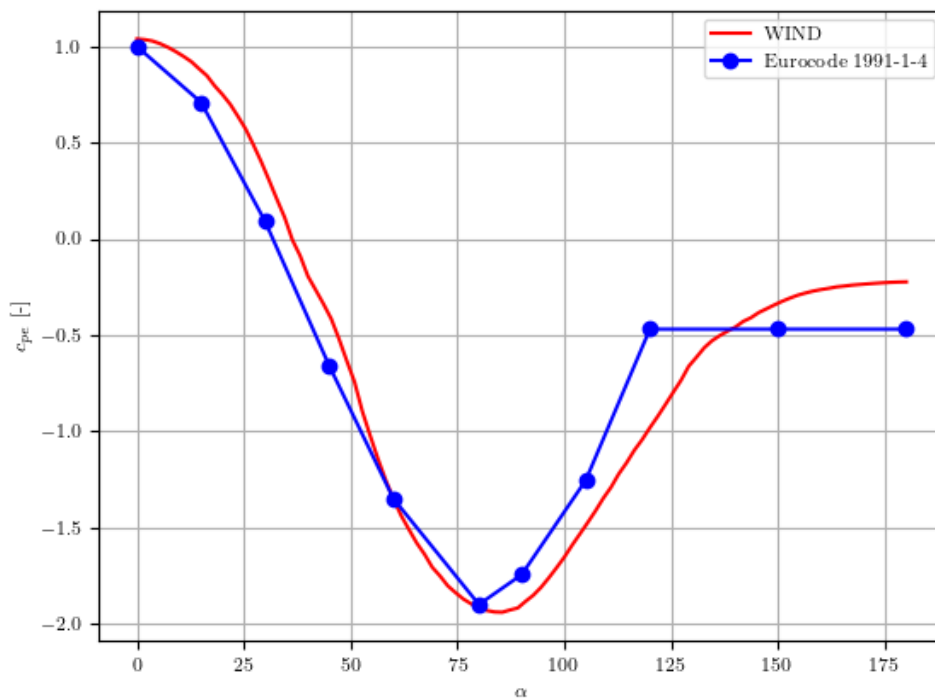
Profil wiatru

Typ	Profil standardowy
Norma projektowa:	Eurokod
Teren, Z_0 :	0 m
Kategoria terenu	II
Gęstość powietrza, ρ	1,25 kg/m ³
Lepkość kinematyczna, ν	15 mm ² /s
V_{b0}	23,6 m/s
C_{dir} C_{season} C_0 $C_s C_d$	1,0
Intensywność turbulencji	1 %



Model turbulencji k-ε

Wyniki Wartość współczynnika ciśnienia na powierzchni cylindra:

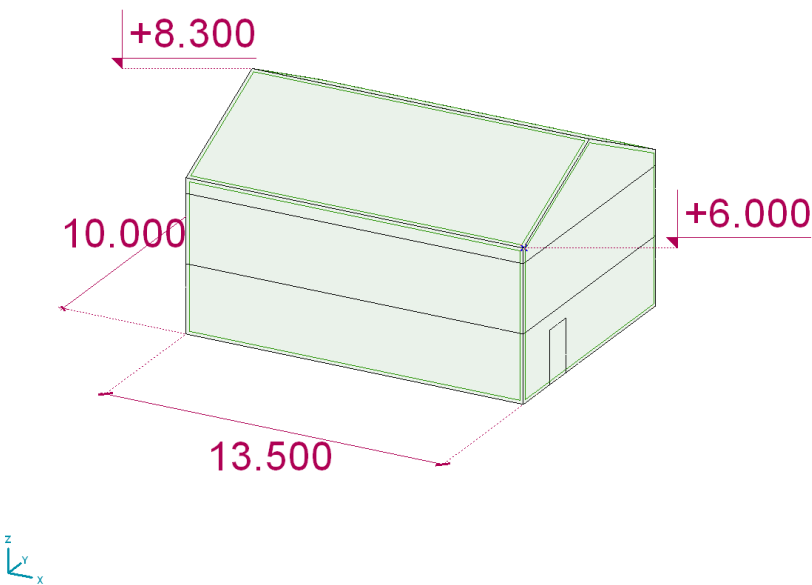


Wyniki numeryczne i te określone w normie wykazują dobrą zgodność.

6.2. Dach dwuspadowy

Plik modelu WIND_duopitch.axs

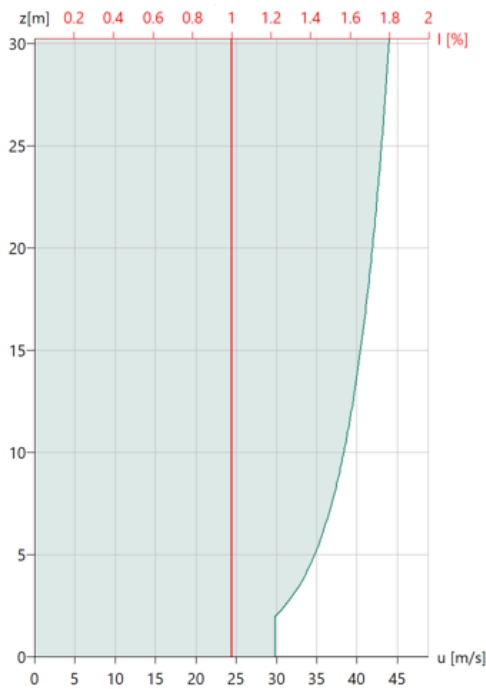
Model



Profil wiatru

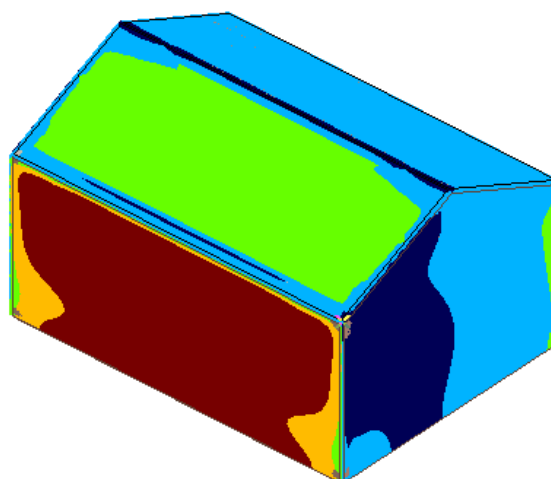
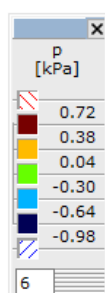
Typ profilu:	Standardowy
Norma projektowa:	Eurokod
Teren, Z_0 :	0 m
Kategoria terenu	II
Gęstość powietrza, ρ	1,25 kg/m ³
Lepkość kinematyczna, ν	15 mm ² /s
v_{b0}	25,0 m/s
C_{dir} , C_{season} C_0 C_s C_d	1,0
Intensywność turbulencji	1 %

Kierunek wiatru Globalny +Y



Model turbulencji $k-\epsilon$

Ciśnienie wiatru
na powierzchni
modelu



	EN 1991-1-4	RWIND	WIND	Różnica [%]
F_x [kN]	77,71	76,95	72,60	6,4
F_y [kN]	0,00	-0,22	0,10	-
F_z [kN]	48,02	52,53	44,10	8,1

7. Literatura

Lengyel Gábor, Pál Gábor. A Szentendrei Duna-ág Feletti Kerékpároshíd Tervezése, MAGÉSZ, 19: 2. szám pp. 19-34. (2022).

Reynolds, Osborne. "An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels". *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 174 (0), 1883, P. 935–982

Andersson B, Andersson R, Håkansson L, Mortensen M, Sudiyo R, van Wachem B. *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Cambridge University Press; 2011.

Deck, Sébastien, Fabien Gand, Vincent Brunet, and Saloua Ben Khelil. 2014. "High-Fidelity Simulations of Unsteady Civil Aircraft Aerodynamics: Stakes and Perspectives. Application of Zonal Detached Eddy Simulation." *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences* 372 (2022). The Royal Society.

Comparison of a DNS, LES and RANS. (2006). Italian National Agency for New Energy Technologies, Energy and Sustainable Economic Development.

L.S. Caretto, A.D. Gosman, S.V. Patankar, and D.B. Spalding. [Two Calculation Procedures for Steady, Three-Dimensional Flows With Recirculation](#). In *Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Fluid Mechanics*, volume 19 of *Lecture Notes in Physics*, pages 60–68. Springer, 1972.

T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu. A New k - ϵ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation. *Computers Fluids*, 24(3):227-238, 1995.

Wilcox, D.C., *Re-assessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models*, AIAA Journal, vol. 26, no. 11, pp. 1299-1310, 1988.

Menter, F. R., *Zonal Two Equation k - ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows*, AIAA Paper 93-2906, 1993

Yousef Abu-Zidan, Priyan Mendis, Tharaka Gunawardena, *Optimising the computational domain size in CFD simulations of tall buildings*, Heliyon, Volume 7, Issue 4, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06723>.

Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A.G., Krüs, H.W., Schatzmann, M., Westbury, P.S., et al. Recommendations on the use of CFD in wind engineering. In: van Beeck, J.P.A.J. (Ed.), *Proceedings of the international conference on urban wind engineering and building aerodynamics*. COST action C14, impact of wind and storm on city life built environment. Von Karman Institute, Sint-Genesius-Rode, Belgium, 5e7 May 2004.

Franke, Jörg & Baklanov, Alexander. (2007). Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment: COST Action 732 Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models.

Bert Blocken, *Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations*, Building and Environment, Volume 91, 2015, Pages 219-245, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.015>.

Z.T. Ai, C.M. Mak, *Potential use of reduced-scale models in CFD simulations to save numerical resources: Theoretical analysis and case study of flow around an isolated building*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 134, 2014, Pages 25-29, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.08.009>.

Yi Yang, Ming Gu, Suqin Chen, Xinyang Jin, *New inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 97, Issue 2, 2009, Pages 88-95, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.12.001>.

Mohammadreza Shirzadi, Parham A. Mirzaei, Mohammad Naghashzadegan, *Improvement of k-epsilon turbulence model for CFD simulation of atmospheric boundary layer around a high-rise building using stochastic optimization and Monte Carlo Sampling technique*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 171, 2017, Pages 366-379, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.10.005>.

D.M. Hargreaves, N.G. Wright, *On the use of the k-ε model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 95, Issue 5, 2007, Pages 355-369, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.08.002>.

OpenFOAM, The OpenFOAM Foundation, *User Guide*, version 10, 2022.