



Rozprawa doktorska

ANALIZA OBCIĄŻENIA WIATREM KATENOIDALNYCH POWŁOK CHŁODNI KOMINOWYCH Z WYKORZYSTANIEM MODELU CFD ORAZ NOWOCZESNYCH NARZĘDZI WERYFIKACJI DOŚWIADCZALNEJ

Katedra Mechaniki i Mostów

Dyscyplina naukowa:	Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport
Autor:	mgr. inż. Maciej Wiśniowski
Promotor:	dr hab. inż. Ryszard Walentyński, prof. PŚ
Promotor pomocniczy:	dr inż. Agnieszka Padewska-Jurczak

Gliwice, Wrzesień 2025

Spis rzeczy

Spis rzeczy	2
1 Wstęp	5
1.1 Cel i zakres pracy	5
1.2 Geneza powstania pracy	5
2 Oddziaływania wiatru na konstrukcje	8
2.1 Ogólna charakterystyka ciśnienia wywołanego wiatrem	8
2.1.1 Charakterystyka terenu	12
2.1.2 Wpływ geometrii na wielkość obciążenia	15
2.1.3 Ciśnienie wiatru na budowle o rzucie w kształcie koła	17
2.2 Obciążenie wiatrem w ujęciu różnych norm	20
2.2.1 Norma brytyjska BS 6399-2:1997	20
2.2.2 Norma włoska NTC	21
2.2.3 Norma indyjska	23
2.2.4 Norma amerykańska	24
2.2.5 Spojrzenie starej Polskiej normy na obciążenie wiatrem.	27
2.2.6 Chińska norma obciążenia wiatrem	31
2.2.7 Porównanie profili wiatru według różnych norm	32
2.3 Badania in-situ	35
2.4 Badania laboratoryjne	35
2.4.1 Techniki pomiarowe przepływu stosowane w warunkach laboratoryjnych	39
2.4.2 Techniki pomiarowe ciśnienia stosowane w badaniach	44
2.4.3 Pomiar sił oddziałujących na model	45
2.5 Numeryczne symulacje do wyznaczania rozkładu ciśnienia	48
2.5.1 Podstawy teoretyczne i właściwości fizyczne	48
3 Wybrane zagadnienia z zakresu dynamiki płynów	49
3.1 MOC – mechanika ośrodków ciągłych	49
3.2 Operacje i specjalne symbole	50
3.3 Podstawowe zależności i równania dynamiki płynów	51
3.4 Turbulencja	56
3.5 Wybrane modele turbulencji	60
3.5.1 Model bez lepkości – <i>Inviscid</i>	61
3.5.2 Model Boussinesq’a	61
3.5.3 Hipoteza długości mieszania	61
3.5.4 Spalart-Allmaras	62
3.5.5 Model $k-\epsilon$	63
3.5.6 Model $k-\omega$	64
3.5.7 $k-\omega$ SST	64
3.5.8 Metody symulacji dużych wirów – LES	66
3.6 Warunki brzegowe	66
3.7 CFD – inne możliwości	68
4 Walidacja numeryczna badań eksperymentalnych	69

4.1	Charakter analiz numerycznych.....	69
4.2	Siatka.....	70
4.3	Modele wstępne – próba zakończona niepowodzeniem.....	73
4.4	Przebieg pracy.....	74
4.5	Interpretacja wyników.....	77
4.6	Prosty przypadek opływu walca kołowego dla $Re < 10^5$	80
4.6.1	Gęstość siatki.....	80
4.6.2	Wielkość kroku czasowego.....	85
4.6.3	Opływ walca kołowego.....	89
4.7	Modele przejściowe.....	92
4.7.1	Model 15.....	93
4.7.2	Model 16.....	97
4.7.3	Model 17.....	105
4.7.4	Podsumowanie modeli przejściowych.....	110
4.8	Obliczenia numeryczne chłodni w tunelu aerodynamicznym.....	111
4.8.1	Metody obliczeniowe i siatka.....	112
4.8.2	Podsumowanie obliczeń.....	112
4.8.3	Siła nośna oraz siła oporu aerodynamicznego.....	113
4.8.4	Rozkład ciśnienia na powierzchni walca.....	116
4.8.5	Pola prędkości za badanym modelem.....	122
4.8.6	Przekroje poprzeczne.....	124
5	Badania laboratoryjne.....	128
5.1	Stanowisko badawcze.....	128
5.1.1	Tunel aerodynamiczny.....	128
5.1.2	Aparatura pomiarowa.....	130
5.1.3	Kalibracja stanowiska pomiarowego.....	132
5.2	Profil prędkości wewnątrz tunelu badawczego.....	132
5.3	Przebieg badania.....	137
5.4	Przetwarzanie danych z badania PIV.....	138
5.5	Interpretacja wyników i porównanie z obliczeniami.....	140
5.5.1	Opis jakościowy przepływu.....	144
6	CFD - oddziaływanie wiatru na rzeczywisty obiekt.....	148
6.1	Model obliczeniowy.....	148
6.2	Założenia.....	149
6.3	Siatka dyskretna.....	150
6.4	Metody obliczeń.....	152
6.5	Wyniki obliczeń i ich interpretacja.....	152
6.5.1	Siła nośna i siła oporu.....	152
6.5.2	Rozkład ciśnienia.....	155
6.5.3	Pola prędkości.....	161
7	Zgłoszenie patentowe – waga aerodynamiczna.....	164
7.1	Zasada działania urządzenia.....	164
7.2	Budowa i zastosowanie wagi.....	165
7.3	Schemat podłączenia elektrycznego.....	166

7.4	Przetwarzanie danych i proces kalibracji wagi	168
8	Wnioski końcowe	171
8.1	Podsumowanie	171
8.2	Możliwe kierunki rozwoju pracy.....	172
8.3	Inne osiągnięcia.....	172
	Afiliacje i granty.....	173
	Załączniki.....	173
	Wykaz piśmiennictwa	174
	Literatura	174
	Normy i standardy	180
	Strony internetowe oraz materiały firm.....	180

1 Wstęp

1.1 Cel i zakres pracy

Celem pracy jest zbadanie, metodami numerycznymi i za pomocą eksperymentu, wpływu kształtu powłoki katenoidalnej chłodni kominowej na stawiany przez nią opór przepływu powietrza (opór aerodynamiczny). W procesie projektowania konstrukcji i wyznaczania obciążenia wiatrem, zakłada się rozkład ciśnienia jak dla bryły o kształcie walca. Badania mają na celu wykazanie, że stosowane dotychczas metody oparte na przepływie wokół walca nie odpowiadają rzeczywistym rozkładom ciśnienia. Sformułowano tezę:

Powłoka katenoidalna stawia przepływowi powietrza opór aerodynamiczny istotnie różniący się od tego, który stawia walec.

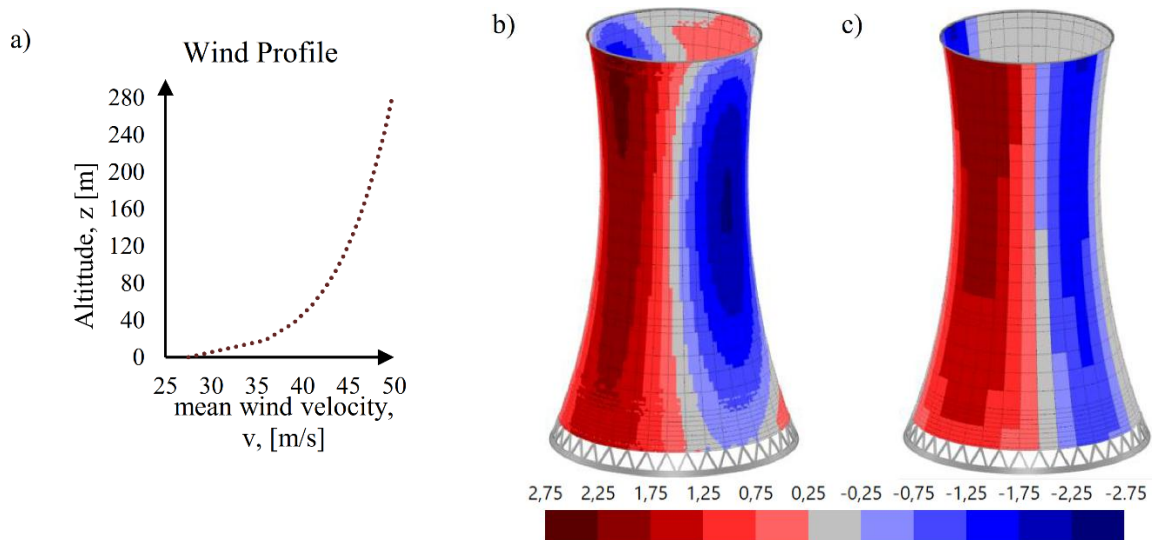
Powłoka katenoidalna wymusza inny rozkład ciśnienia na powierzchni niż walec.

W celu udowodnienia tezy i osiągnięcia wyżej wymienionego celu przeprowadzono badanie laboratoryjne w tunelu aerodynamicznym z użyciem zaprojektowanego stanowiska badawczego. Zbudowano również i zweryfikowano na podstawie badań modele aerodynamiczne z wykorzystaniem zaawansowanego oprogramowania komputerowego. Obliczenia były prowadzone między innymi z wykorzystaniem sieci komputerów PL-Grid, na komputerze ARES w PLG/2024/017500 oraz PLG/2023/016590.

1.2 Geneza powstania pracy

Wstępne autorskie badania numeryczne (rys. 1.1) [1] wykazały, że występują pewne różnice pomiędzy rozkładem ciśnienia na walcu oraz hiperboloidzie (lub podobnym kształcie z przewężeniem w środkowej części). Tymczasem w normach i literaturze technicznej powszechnie spotyka się aproksymowanie geometrii chłodni kominowych kształtem walca (Eurokody, Standard VGB [N-1] czy literatura [73]). Kolejnym aspektem jest potraktowanie ciśnienia wewnętrznego jako stałej wartości, które to również budzi pewne zastrzeżenia i było już przedmiotem rozważań innych badaczy [15].

Obserwując rozkłady ciśnień na powierzchniach powłok chłodni kominowych (rys. 1.1 – b), można zauważyć pewne tendencje do występowania ekstremum ssania na ścianach bocznych w miejscu przewężenia. Nie jest to zgodne z normową procedurą obliczenia oddziaływania wiatrem (rys. 1.1 – c), ponieważ według normy, ciśnienie wzrasta wraz z wysokością. Zatem największe oddziaływanie powinno wystąpić znacznie wyżej. Ta tendencja została zaobserwowana zarówno dla hiperboloidalnej, katenoidalnej jak i paraboloidalnej konstrukcji.



rys. 1.1 – Porównanie rozkładu ciśnienia na powierzchni chłodni kominowej [kPa], b) według wstępnej analizy CFD w programie konsumenckim RWIND, oraz Erokodu c), dla założonego profilu prędkości wiatru a). Ilustracje na podstawie autorskiej publikacji [1].

Jak podaje niemiecka instrukcja VGB do projektowania chłodni kominowych [N-1], obciążenie wiatrem odgrywa rolę wiodącego obciążenia w projektowaniu chłodni kominowych. Miarodajną kombinację stanu granicznego nośności, zgodną również z Eurokodem, zapisuje się w postaci (1-1):

$$\gamma_G \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (1-1)$$

w której miarodajne kombinacje obliczeniowe w projektowaniu chłodni kominowych zawierają właśnie obciążenie wiatrem:

$$\begin{aligned} & \gamma_G \cdot G + 1,5 \cdot W + \gamma_Q \cdot B + \gamma_Q \cdot S \\ & \gamma_G \cdot G + 0,9 \cdot W + \gamma_Q \cdot T + \gamma_Q \cdot B + \gamma_Q \cdot S \end{aligned} \quad (1-2)$$

W powyższym zestawie kombinacji zostały przyjęte oznaczenia, oraz wartości częściowych współczynników kombinacji – zgodnie z oznaczeniami normy [N-1].

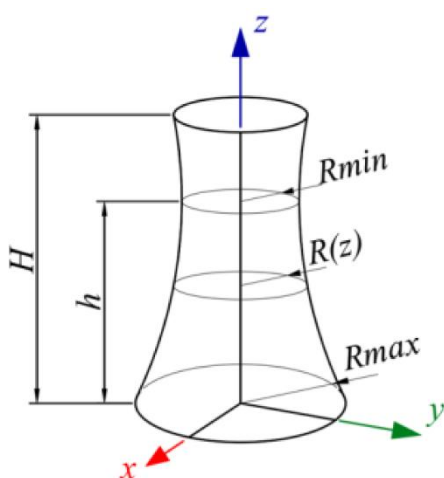
- G – obciążenie ciężarem własnym, obciążenia stałe
- W – obciążenie wiatrem. Zawiera już obciążenie wewnętrzne i zewnętrzne.
- T – obciążenie temperaturą. Wyróżnia się T^{op} – temperaturę roboczą, T^{S} – letnią temperaturę zewnętrzną, T^{W} – zimową temperaturę zewnętrzną. Temperatura T powinna zawierać najbardziej niekorzystną sytuację.
- B – obciążenie spowodowane nierównomiernym osiadaniem gruntu. W szczególności daje znaczne wartości w przypadku nierównomiernego osiadania.
- S – obciążenie spowodowane skurczem betonu.

Tablica 1.1 – Częściowe współczynniki kombinacji wg [N-1].

Oddziaływanie	γ_G, γ_Q	ψ_0	ψ_1	ψ_2
G	1,0 / 1,35	-		
W	0 / 1,5	0,6	0,5	0
T	0 / 1,5	0	0,7	0,5
T	0 / 1,5	0	0,5	0
B	0 / 1,5	1,0	1,0	1,0
S	0 / 1,5	1,0	1,0	1,0

* Wartości współczynników częściowych należy jeszcze wymnożyć z uwagi na współczynnik 1,1 wynikający z klasy konsekwencji CC3.

Kształt chłodni kominowej można opisać zestawem równań:



$$\begin{cases} X(z, \varphi) = R(z) \cdot \cos \varphi \\ Y(z, \varphi) = R(z) \cdot \sin \varphi \\ z' \end{cases} \quad (1-3)$$

rys. 1.2 – Oznaczenia do równań

(1-3): h – wysokość przewężenia, H – wysokość całkowita, R_{min} – promień w przewężeniu ($z=h$), R_{max} – promień u podstawy ($z=0$). Ilustracje na podstawie autorskiej publikacji [1].

Funkcja krzywizny promienia $R(z)$ może być opisana wzorem (1-4) w przypadku hiperboloidy lub (1-5) dla katenoidy. Rzędna z przyjmuje tutaj wartości od 0 do H .

$$R_{hyp}(z) = R_{min} \sqrt{1 + \frac{(z-h)^2}{h^2} \cdot \left(\frac{R_{max}^2}{R_{min}^2} - 1 \right)} \quad (1-4)$$

$$R_{cat}(z) = R_{min} \cdot \cosh \left(\frac{z-h}{h} \cdot \operatorname{arc} \cosh \frac{R_{max}}{R_{min}} \right) \quad (1-5)$$

Rozważania niniejszej pracy zostały poświęcone chłodni kominowej wzorowanej na konstrukcji wzniesionej na terenie Elektrowni Opole o wysokości 185m. Jej średnica w miejscu przewężenia to 65m i jest zlokalizowana na wysokości 122m. Średnica u podstaw to ok 102m. Hiperboloidalny kształt został zamieniony katenoidą, jak zaproponowano w pracy [2]. Badania w tunelu zostały wykonane na tym samym modelu pomniejszonym w skali.

2 Oddziaływania wiatru na konstrukcje

2.1 Ogólna charakterystyka ciśnienia wywołanego wiatrem

Aby dobrze zrozumieć sposób przykładania obciążenia wiatrem należy przybliżyć jego charakterystykę. Obciążenie wiatrem jest bez wątpienia jednym z bardziej złożonych i trudnych w opisie. Analiza konstrukcji budowlanych niemal zawsze sprowadza się do analizy statycznej, a obciążenia dynamiczne są sprowadzane do równoważnych obciążeń statycznych lub są uwzględniane przez współczynniki zwiększające dla statycznych oddziaływań. Prowadzenie obliczeń konstrukcji z uwzględnieniem faktycznego przebiegu czasowego obciążenia jest bardzo trudne i czasochłonne. Dodatkowo wymaga bardziej rozbudowanego oprogramowania, a to zazwyczaj jest bardzo kosztowne. Zagadnienie sprowadzania oddziaływań do obciążeń statycznych dotyczy również wiatru.

Obciążenie wiatrem jako oddziaływanie środowiskowe na przegrody zewnętrzne budynków zależy zarówno od prędkości wiatru, rzeźby terenu i geometrii samej budowli. Średnia prędkość wiatru w atmosferze zmienia się wraz z wysokością nad poziomem terenu. Wykres zmiany średniej prędkości wiatru po wysokości nazywany jest profilem prędkości wiatru. Zazwyczaj jest opisywany funkcją logarytmiczną [4][11], wykładniczą (na przykład jak podaj Żurański, [5], równania 2-24a), lub kombinacją obu. We wszystkich przypadkach jest to empiryczne uogólnienie. Pomiar prędkości średniej prowadzi się w uśrednionych czasach 3s do 10minut (na przykład rys 5.15 w [4] lub Eurokod 1-1-4 [N-2]).

$$\bar{v}_m(z) = \bar{v}_o \cdot \left(\frac{z}{z_o}\right)^\alpha + v_b \quad (2-1)$$

$$\bar{v}_m(z) = k \cdot \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) + v_b \quad (2-2)$$

Gdzie k oraz α to pewne współczynniki określone empirycznie na podstawie badań, w zależności od lokalizacji.

Ponadto obciążenie wiatrem ma charakter dynamiczny, wielokrotnie zmienny. Charakter zmian prędkości wiatru (porywów wiatru) opisuje tak zwana intensywność turbulencji. Intensywność turbulencji według normy obciążenia wiatrem ([N-2], wzór (4.7)) jest zdefiniowana jako średnie odchylenie standardowe prędkości wiatru od średniej:

$$I(z) = \frac{\sigma_v}{\bar{v}_m(z)} = \frac{k_t}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_o)} \quad (2-3)$$

Gdzie:

- $k_t c_o$, – współczynnik turbulencji, zależne od lokalizacji.

- z - wysokość nad poziomem terenu.

W drugiej części wzoru norma uwzględnia zmienność intensywności turbulencji w zależności od wysokości nad poziomem terenu. Intensywność turbulencji, podobnie jak średnia prędkość wiatru nie jest wielkością stałą.

Nieco bardziej dokładnie profil turbulencji podał Żurański (równanie 2-11 w [5]):

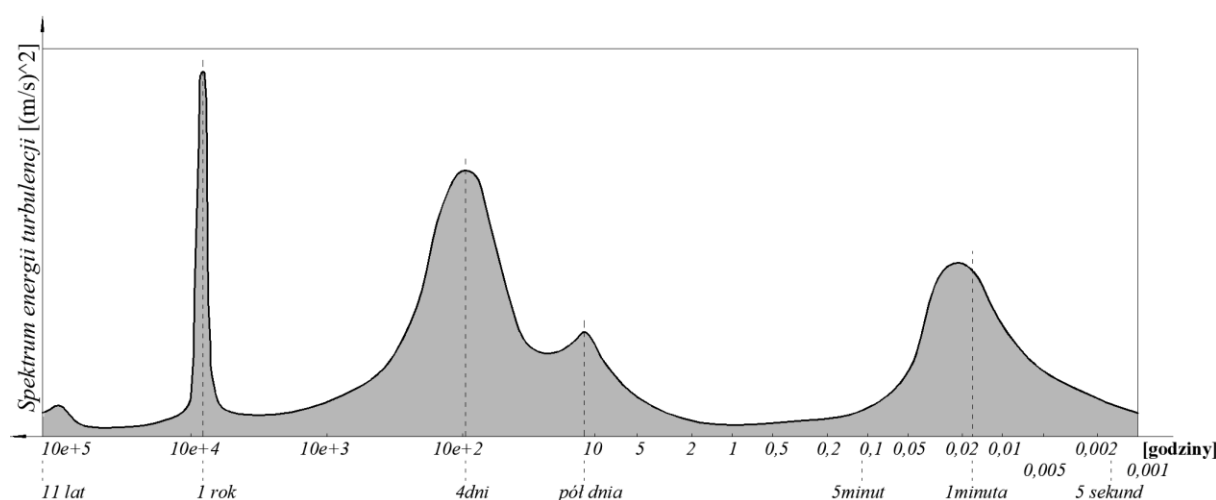
$$I = \frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma_u + \sigma_v + \sigma_w}{\bar{v}_m} \quad (2-4)$$

Gdzie σ_i to składowe odchylenia standardowe fluktuacji a $\bar{v}_m$ to prędkość średnia. Natomiast u , v , i w to składowe prędkości wiatru w lokalnym układzie – wzdłuż głównego kierunku wiatru. Zazwyczaj jednak dominującym składnikiem jest składnik wzdłuż kierunku wiatru - σ_u (równanie 2.3.1 w pracy [5]).

Wielkość porywów wiatru w czasie:

Pomiar prędkości lub ciśnienia wiatru zależy w dużym stopniu od przyjętego czasu trwania pomiaru. W praktyce stosuje się czasy uśredniania od 2s do 1 godziny. Z uwagi na porywisty charakter wiatru, zmierzona wielkość będzie zależała od długości czasu pomiaru. Krótki czas uwzględni chwilowy wzrost lub spadek prędkości. Długi czasu uśredni cały pomiar i uzyskana wielkość będzie mniejsza. Aktualnie, zgodnie z zaleceniami World Meteorological Organisation (WMO), w europejskich normach (Eurokody) oraz starszych Polskich normach [N-6] podaje się prędkość wiatru wynikającą z pomiaru 10 - minutowego.

Obszerne badania ruchów powietrza prowadził Davenport [6]÷[9]. W pracy [7] opisał rozkład wielkości porywów w domenie ich czasu trwania. Poniższy wykres ilustruje rozkład energii turbulencji wiatru w zależności od czasu trwania porywów. Energia turbulencji jest rozumiana jako ilość energii kinetycznej zawartej w turbulentnych ruchach powietrza.



rys. 2.1– Spektrum poziomych prędkości wiatru wg Davenporta [7].

Można z powyższego wykresu odczytać, że największe zmiany prędkości wiatru pojawiają się w cyklu rocznym. Następnie w cyklach 4-dniowych. Davenport opisuje te zmiany jako zakres makrometeorologiczny. Pojawiają się również spore porywy wiatru (w cyklu 2-minutowym). Zakres ten nazwano porywami, a ich energia osiąga niemal tę samą wielkość co zmiany 4-dniowe. Żurański [5] rozgraniczył, że porywy wynikają z chropowatości podłoża, natomiast zmiany prędkości w okresach powyżej $2 \div 3$ h z ogólnych zmian pogody. Warto zwrócić też uwagę na niezerową wartość na wykresie (rys. 2.1) na samym końcu osi poziomej – wartości poniżej 5 sekund. W przypadku budowli smukłych, cienkich powłok lub wiotkich przęseł, częstotliwości drgań własnych mogą wynosić poniżej 1 Hz. Wówczas porywy wiatru z podobną częstotliwością mogłyby prowadzić do zjawiska rezonansu.

Ostatecznie, stosowane w normach profile wiatru, zawierają często obwiednie ze wszystkich pomiarów, a nie średnie. Dlatego w analizie globalnej konstrukcji – zwłaszcza dla wielkich konstrukcji – zakładane siły wywołane wiatrem mogą być zawyżone.

Wielkość porywów wiatru w przestrzeni:

Porywy wiatru mają charakter lokalny – porywy mają rozmiar w przestrzeni. Można rozróżnić wielkości porywów:

- długość
- szerokość
- wysokość

Wielkości porywów różnią się od siebie, w zależności od chropowatości terenu. Przykładowo, w normie europejskiej [N-2] wyróżniono 5 kategorii chropowatości terenu, na podstawie których oblicza się rozkład prędkości powyżej terenu - $v(z)$ na wysokości z .

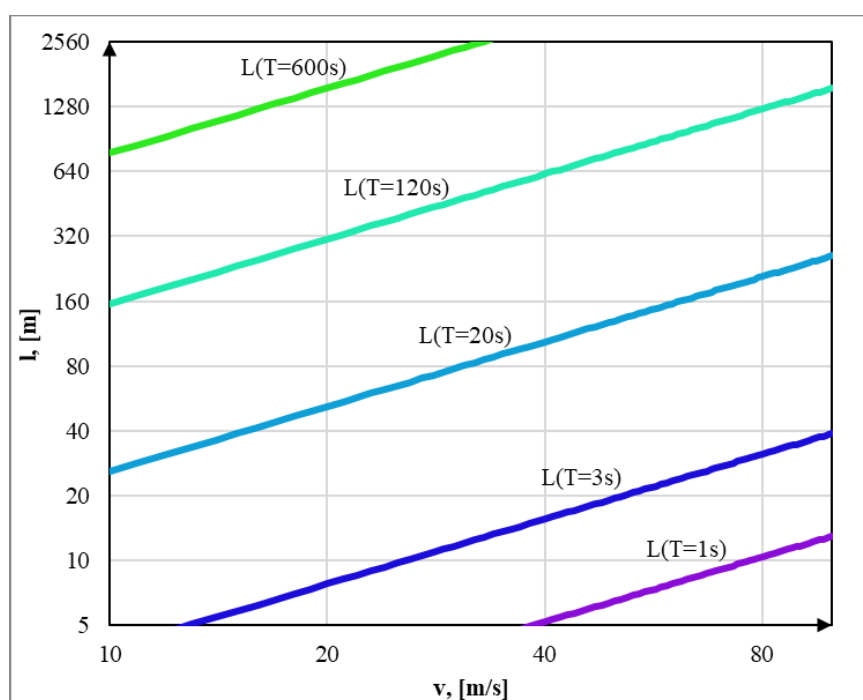
Wielkość porywów można zbadać wykonując kilka jednoczesnych pomiarów, w punktach oddalonych od siebie o pewną wielkość – na przykład równo rozmieszczonych na maszcie. Żurański (równanie 2-22 w pracy [5]) opisał wielkość porywów wiatru funkcją wykładniczą:

$$R(n, l) = e^{-C \cdot \frac{nl}{\bar{v}}} \quad (2-5)$$

Gdzie n to częstotliwość pulsacji ($n = 1/T$, przy czym T to czas pomiaru), l to odległość między dwoma punktami pomiaru a $\bar{V}$ to średnia mierzona prędkość wiatru. Współczynnik C wyznacza się eksperymentalnie, na podstawie badań. Przy czym dla długości porywów mierzonej wzdłuż kierunku wiatru C przyjmuje wartości z zakresu od 6 do 8. Wielkość $R(n, l)$ opisuje szerokość prostokąta reprezentującego poryw wiatru. Przyjmując za stałą $R(n, l) = e^{-1}$ otrzymujemy zależność, którą możemy wykorzystać do wyznaczenia szerokości porywów wiatru:

$$\frac{n \cdot l}{\bar{v}} = \frac{1}{C} \rightarrow l = \frac{\bar{v}}{C \cdot n} \quad (2-6)$$

Na podstawie tej zależności można sporządzić wykres wielkości porywów, w zależności od prędkości i uśrednionego czasu pomiaru. Przykładowo – dla prędkości wiatru 40 m/s porywy mają szerokość ok 3 km, przy pomiarze 10 - minutowym. Jednak przy pomiarze 3 - sekundowym poryw wiatru ma szerokość 3 m. Aktualna Europejska norma stosuje pomiar 10 - minutowy. Jednak inne normy, na przykład Amerykańska proponują pomiar 3-sekundowy, dla którego rozmiar porywu jest zupełnie inny. Można tym tłumaczyć różne podejścia projektowe norm przy wyznaczaniu obciążenia wiatrem.



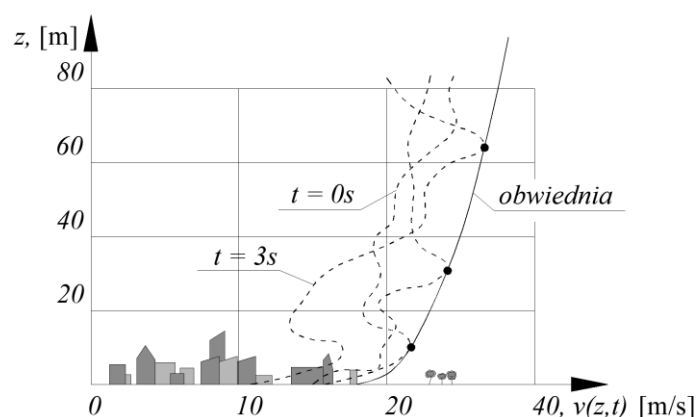
rys. 2-1 – Wielkości porywów wiatru wg rys 2-12 w pracy [5].

Pionowy profil prędkości wiatru:

Średnia prędkość wiatru wzrasta wraz z wysokością nad poziomem terenu do pewnego poziomu, po czym utrzymuje stałą wartość. Zostało to opisane w licznych pracach naukowych i normach. Powstały również szerokie opracowania w języku polskim [4][5][11]. Dzieje się tak dlatego, że chropowata powierzchnia terenu wyhamowuje wiatr blisko powierzchni. Sam wiatr jest objawem ogólnej cyrkulacji powietrza w atmosferze, spowodowanej nierównomiernym nagrzewaniem skorupy ziemskiej, siły Coriolisa i innym zjawiskom synoptycznym. Z tego punktu widzenia można stwierdzić, że wiatr nie wzrasta z wysokością, a maleje przy powierzchni terenu.

Według [5] wiatr atmosferyczny – powyżej strefy wpływu chropowatego terenu nazywa się wiatrem gradientowym. Zależy on od lokalizacji geograficznej. Nie zależy natomiast od lokalnej chropowatości terenu. Prędkość wiatru, licząc od powierzchni terenu wzrasta – od minimalnej wielkości – zależnej od chropowatości terenu do osiągnięcia prędkości wiatru gradientowego na wysokości ok 300÷600 m. Wysokość ta zależy od chropowatości terenu.

Warto zaznaczyć, że stosowane przez Europejskie normy profile prędkości nie są rzeczywistymi zmierzonymi profilami prędkości czy turbulencji, a są obwiedniami z wielu pomiarów w czasie. Jest to o tyle istotne, że normowe oraz literaturowe profile prędkości są tak naprawdę zawyżone względem rzeczywistego sumarycznego obciążenia wiatrem. W analizie statycznej konstrukcji budowlanych jest to podejście bezpieczne, choć nie zawsze dające rzeczywiste wielkości obciążenia, przy budowłach monumentalnych – takich jak na przykład chłodnie kominowe, wieżowce, pylony mostów.



rys. 2.2 – Profil prędkości wiatru, jak podaje Flaga [4].

2.1.1 Charakterystyka terenu

W praktyce projektowej, według różnych europejskich i światowych norm [N-1]÷[N-8], spotykamy się z pionowym profilem prędkości oraz turbulencji wiatru. Turbulencja wiatru to pewne umowne określenie, odnoszące się do odchylenia standardowego mierzonej prędkości wiatru. Uszczegółowienie turbulencji wiatru jest opisane w rozdziale 3.4. Prędkość wzrasta wraz z wysokością mierzoną od poziomu terenu. Turbulencja natomiast osiąga pewne ekstremum nisko nad poziomem terenu, a następnie maleje wraz z dalszym wzrostem wysokości. Eurokod opisuje turbulencję jako iloraz odchylenia standardowego składowych fluktuacyjnych i średniej prędkości wiatru.

Jak podaje Lipecki [11], w praktyce są stosowane dwie rodziny opisów matematycznych profili prędkości wiatru. Wyróżnia się profile logarytmiczne oraz profile potęgowe. Ogólną postać wzoru logarytmicznego przedstawia równanie (2-7), a wzoru potęgowego (2-8).

$$\frac{U(z_2)}{U(z_1)} = \frac{\ln z_2 - \ln z_0}{\ln z_1 - \ln z_0} \quad (2-7)$$

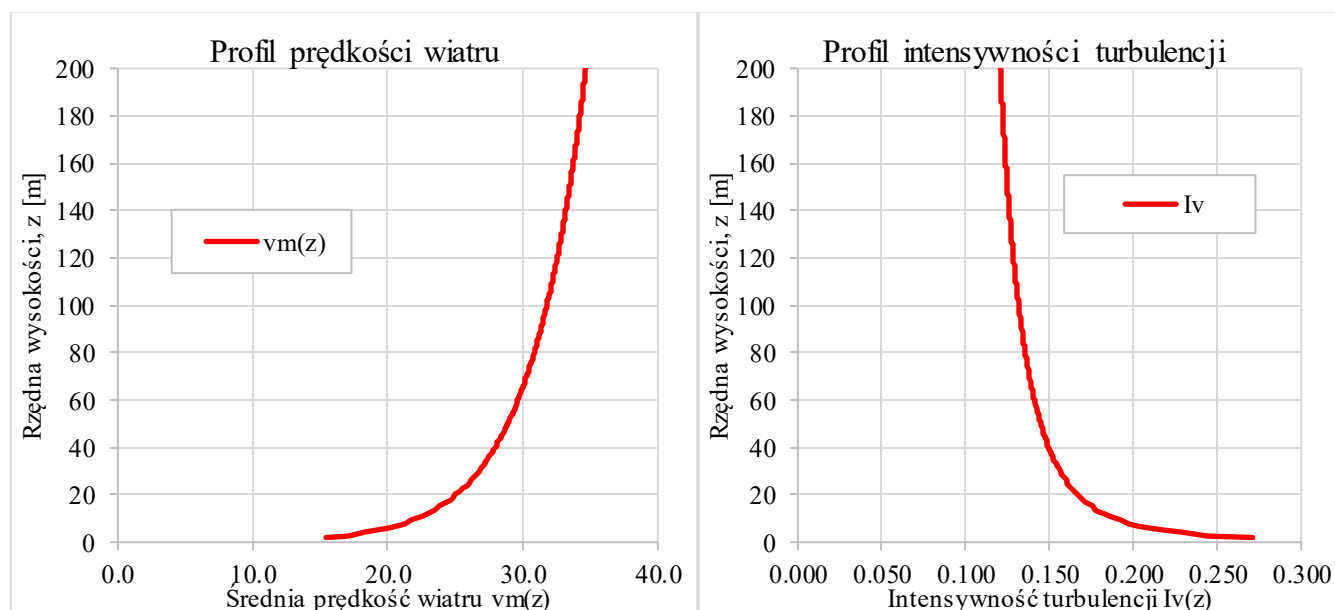
$$\frac{U(z_2)}{U(z_1)} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^\alpha \quad (2-8)$$

Gdzie z_0 to parametr chropowatości natomiast z_1 i z_2 wysokości mierzone nad poziomem terenu. Według załącznika krajowego do Eurokodu [N-2] (Tablica NA.6 w normie) wzór na profil prędkości wiatru ma postać wykładniczą (2-9). Według ciała normy z pominięciem załącznika, profil prędkości jest produktem mnożenia profilu logarytmicznego i wykładniczego. Wzór ma postać (2-10)

$$c_e(z) = c \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad (2-9)$$

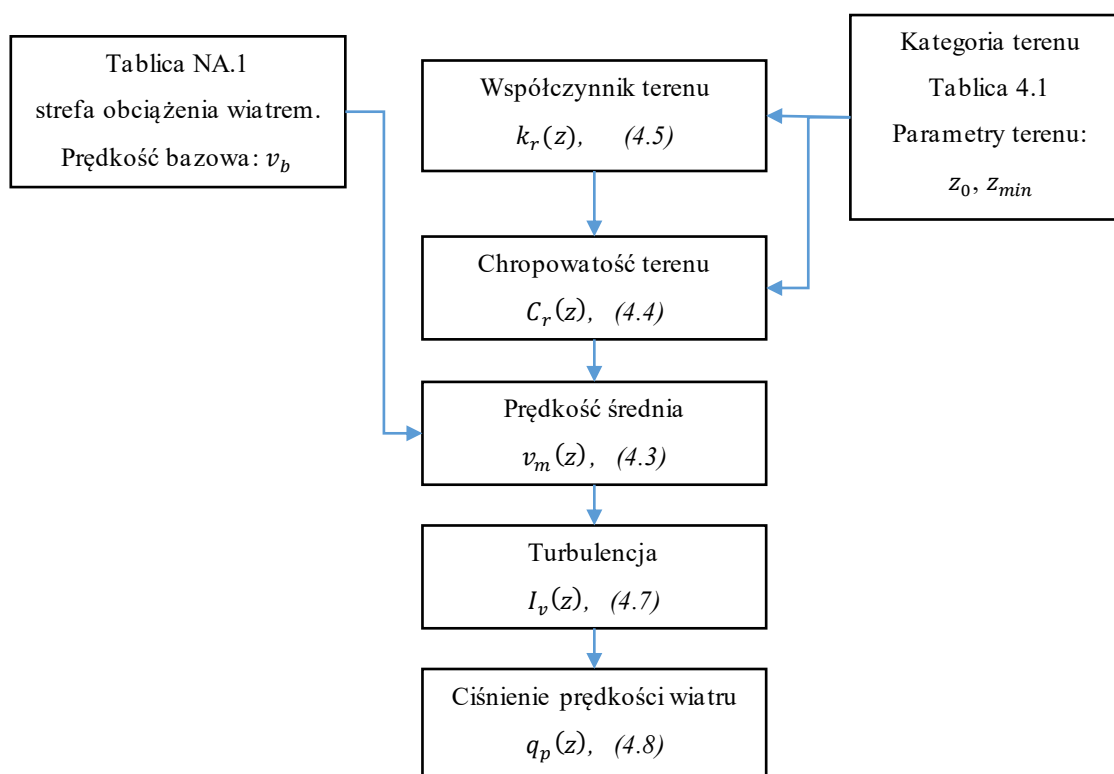
$$c_r(z) = c \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2-10)$$

Odpowiednie współczynniki z_0 , c i α dobiera się na podstawie tablic. Profile prędkości i turbulencji zmieniające się na pewnym obszarze blisko powierzchni według Eurokodu [N-2] są przedstawione na rys. 2.3. Zostały one sporządzone przy założeniu płaskiego terenu, bez większych zabudowań. Jest to typowy obszar wiejski. Do tego typu kategorii terenu odnosi się również większość prowadzonych pomiarów prędkości wiatru w terenie. W kolejnych rozdziałach są zestawione profile wiatrowe według innych norm, przy założeniu podobnych warunków brzegowych.



rys. 2.3 – Profil prędkości i turbulencji, dla II-kat. terenu i prędkości bazowej 22m/s wg. [N-1].

W Eurokodzie jest podana kompletna procedura (rys. 2.4) wyznaczania profilu prędkości wiatru. Dodatkowo załącznik krajowy do tego samego Eurokodu podaje alternatywną, dużo prostszą procedurę. Wiele załączników krajowych do Eurokodu wskazuje narodowe preferencje co do wyznaczania profilu prędkości wiatru. Nie jest to niczym zaskakującym, ponieważ lokalne warunki, w zależności od regionu mogą się zmieniać. Poniższe równania (2-11) przedstawiają procedurę wyznaczania normowego profilu prędkości wiatru wg. Eurokodu [N-2]. W obliczeniach pominięto wpływ kierunku wiatru (współczynnik kierunkowy), okoliczne wzniesienia (współczynnik orografii), odpowiedź dynamiczną budowli (współczynnik konstrukcyjny).



rys. 2.4 – Procedura obliczania obciążenia wiatrem wg Eurokodu.

Tablica 2.1 – Warunki brzegowe obliczenia profilu wiatru na podstawie załącznika krajowego [N-2].

Strefa obciążenia wiatrem	$v_{b,0}$ [m/s]	$q_{b,0}$ [kPa]
1	22	0,3
Kategoria terenu	z_{min} , [m]	z_{max} , [m]
II	200	300

W równaniu (2-11, [2]), podstawiono wzór na współczynnik terenu $k_r(z)$, na podstawie zależności (4.5) i (4.5) w Eurokodzie. Równanie (2-11, [3]) przedstawia faktyczny profil prędkości średniej. To właśnie tej prędkości oraz intensywności turbulencji (2-11, [4]) używa się do definicji napływu powietrza w analizach CFD. W przypadku obliczeń analitycznych wyznacza się ciśnienie szczytowej prędkości wiatru (2-11, [5]). Tę właśnie wartość przemnaża się przez właściwy współczynnik kształtu konstrukcji w celu wyznaczenia obciążenia na przegrodę. Metoda alternatywna, przedstawiona w załączniku krajowym, sprowadza się do obliczenia profilu współczynnika ekspozycji (2-11, [6]) i pomnożenia przez bazowe ciśnienie – również na podstawie załącznika krajowego. Metoda podana w załączniku nie pozwala wprost na obliczenie profilu prędkości średniej.

$$[2] \quad c_r(z) = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

$$[3] \quad v_m = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$$

$$[4] \quad I_v = \frac{k_1}{C_0(z) \cdot \ln \frac{z}{z_0}} \quad (2-11)$$

$$[5] \quad q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z)$$

$$[6] \quad c_e(z) = 2,3 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,34}$$

$$[7] \quad q_p^{NA}(z) = q_b \cdot c_e(z)$$

Tablica 2.2 – Obliczenia procedury ciśnienia prędkości wiatru na podstawie równań (2-11).

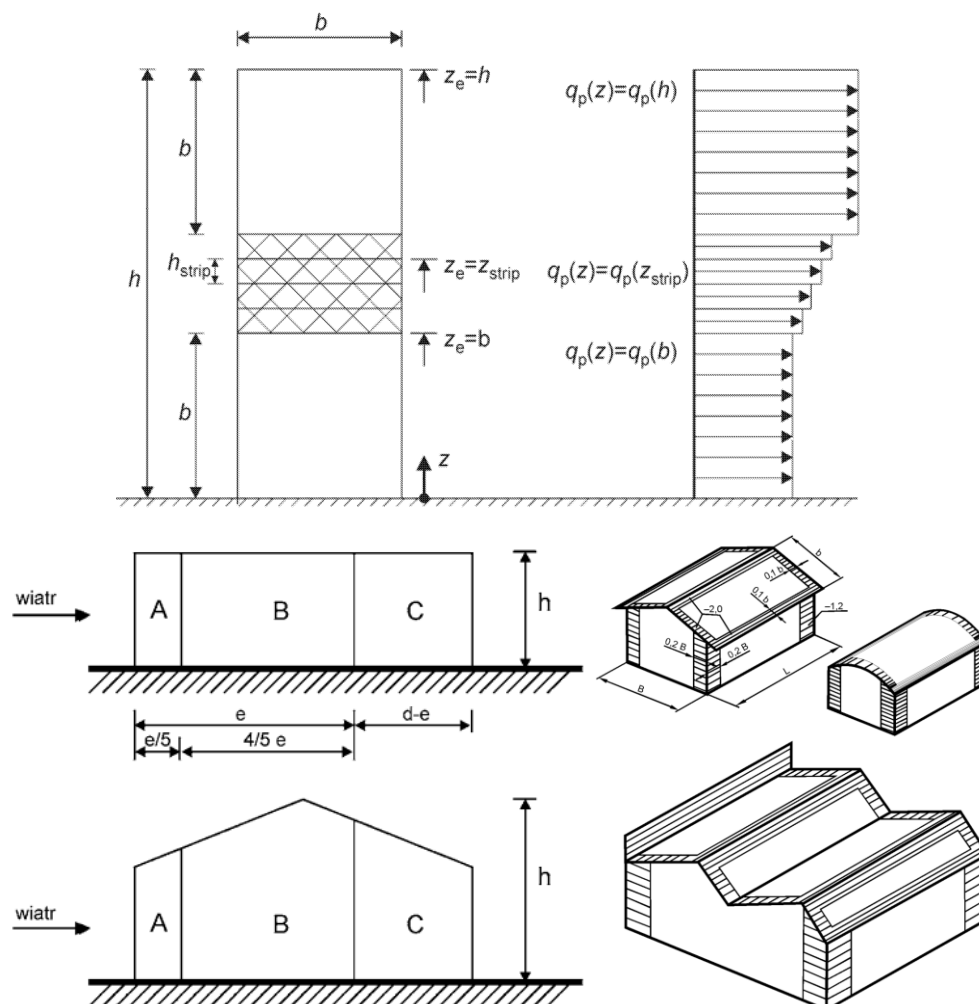
Rzędna wysokości	Ciśnienie prędkości wiatru wg Eurokodu. 2 procedury.					
	EC-1-1-4				EC1-1-4 + NA	
1	2	3	4	5	6	7
z [m]	$c_r(z)$ [-]	$v_m(z)$ [m/s]	I_v [-]	$q_p(z)$ [kPa]	$c_e(z)$ [-]	$q_p^{NA}(z)$ [kPa]
0	0.701	15.4	0.271	0.431	1.56	0.473
2	0.701	15.4	0.271	0.431	1.56	0.473
5	0.875	19.2	0.217	0.584	1.95	0.589
10	1.007	22.1	0.189	0.712	2.30	0.696
20	1.138	25.0	0.167	0.850	2.72	0.822
30	1.215	26.7	0.156	0.936	2.99	0.906
40	1.270	27.9	0.150	0.999	3.21	0.970
50	1.312	28.9	0.145	1.049	3.38	1.024
80	1.402	30.8	0.136	1.158	3.79	1.146
100	1.444	31.8	0.132	1.212	4.00	1.209
120	1.479	32.5	0.128	1.256	4.18	1.263
150	1.521	33.5	0.125	1.312	4.41	1.333
200	1.576	34.7	0.121	1.385	4.72	1.428
250	1.618	35.6	0.117	1.443	4.98	1.506
300	1.653	36.4	0.115	1.491	5.20	1.574

2.1.2 Wpływ geometrii na wielkość obciążenia

Konstrukcje budowlane zostały dosyć szeroko i skrupulatnie opisane w normach, w zakresie oddziaływania wiatru na ich przegrody. Zdecydowana większość budowli przybiera dosyć podobne – ostrokrawędziste kształty – prostopadłościennych brył lub brył ze spadzistymi dachami. Opisane w normach parcie/ssanie wiatru na przegrody jest podane w postaci współczynników dla ciśnienia

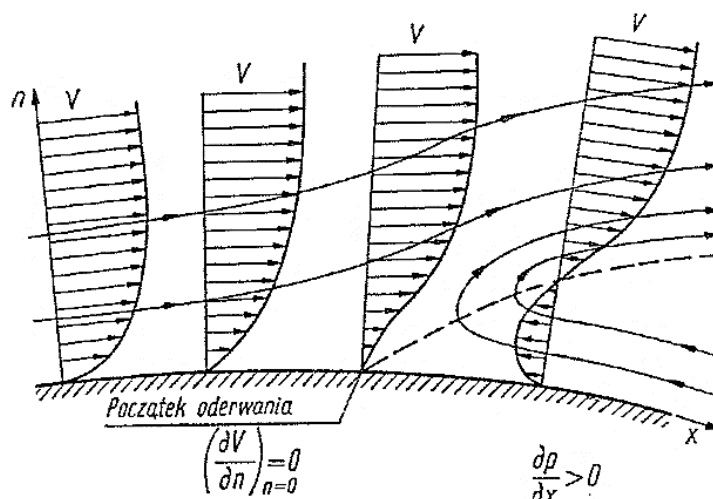
prędkości wiatru - $q_p(z)$. Są one dobrym przybliżeniem, o ile ciśnienie prędkości wiatru nie zmienia się harmonicznie w czasie, oraz dla większości brył o pionowych ścianach.

W przypadku konstrukcji o ostrych krawędziach, sprawa opisu wiatru jest w miarę prosta, gdyż krawędzie rozdzielają strefy te, na które wiatr napiera oraz te, które ssie. Jeżeli analizowana połącz jest na tyle duża, że warto różnicować ciśnienie, normy określają specjalne strefy i ich granice.



rys. 2.5 – Zróżnicowane pola ciśnienia wiatru wg [N-2] i [N-6] – przykłady.

Nieco bardziej skomplikowany jest opis rozkładu ciśnienia na budowle bez ostrych krawędzi. Na ścianie nawietrznej zawsze jest parcie wiatru, na ścianach bocznych zazwyczaj obserwuje się ssanie wiatru. W przypadku budowli bez krawędzi, trudno jest wskazać miejsce zmiany znaku ciśnienia. Dodatkowo, struga powietrza opływająca budynki, od zawietrznej strony odrywa się od przegrody. To zjawisko nie musi wystąpić zawsze, ale jest obserwowane w większości przypadków. Miejsce oderwania strugi laminarnej od powierzchni (rys. 2.6, na przykład powierzchni walca) również nie jest jednoznaczne. Za miejscem oderwania strugi laminarnej, ciśnienie (ssanie) gwałtownie spada. Dlatego to właśnie miejsce ma istotny wpływ na wielkość siły oporu aerodynamicznego.



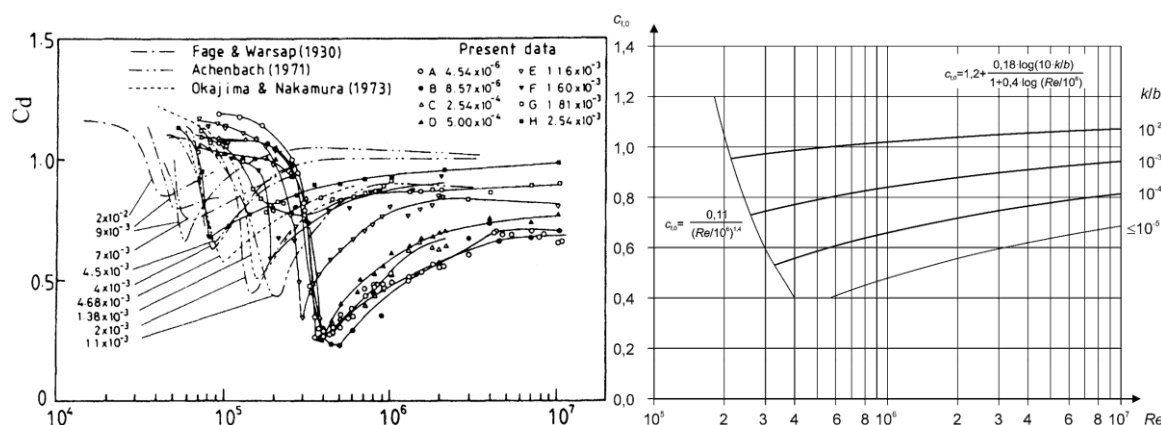
rys. 2.6 – Oderwanie strugi laminarnej od zakrzywionej powierzchni bez ostrej krawędzi, [12],[52].

2.1.3 Ciśnienie wiatru na budowie o rzucie w kształcie koła

Silosi, kominy, chłodnie kominowe, wieże, budynki wysokościowe, iglice, pylony mostów – wysokie konstrukcje budowlane, o okrągłym kształcie w planie z punktu widzenia aerodynamiki prawie zawsze aproksymuje się walcem. Bisymetria przekroju oraz brak ostrych krawędzi przekroju często prowadzą do nieustalonego przepływu za badaną konstrukcją. Charakter przepływu oraz rozkład ciśnienia na samej powierzchni są zależne od liczby Reynoldsa. Na wielkość siły oporu oraz siły nośnej ma dodatkowo istotny wpływ chropowatość powierzchni.

Wypadkowe siły oraz ciśnienie w literaturze wyraża się w odniesieniu do ciśnienia statycznego w postaci właściwego współczynnika (2-12).

$$p = C_p \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (2-12)$$

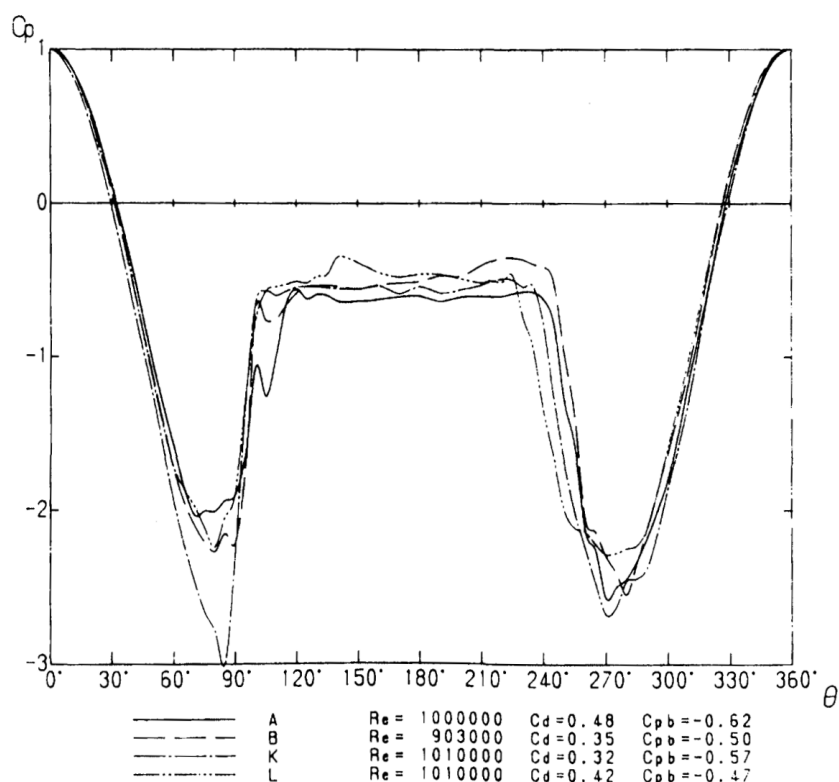


rys. 2.7 – Wartość współczynnika siły oporu na podstawie badań, według pracy [10], oraz według Normy Eurokod [N-2]

Siłę oporu walca na podstawie badań zestawiono w pracy [10]. Siła oporu przy niskich liczbach Reynoldsa ($Re < 2 \cdot 10^5$ – przepływ laminarny) osiąga największą wartość $C_p = 1,2$. Przy przepływie krytycznym ($2 \cdot 10^5 < Re < 2 \cdot 10^6$) opór walca osiąga minimum $C_p = 0,25$. W przepływie całkowicie turbulentnym ($Re > 10^6$) siła oporu wzrasta asymptotycznie wraz z liczbą Re . W tym też zakresie chropowatość ma istotne znaczenie na wielkość siły oporu. W Normie [N-2] siła oporu została uzależniona właśnie od liczby Re oraz proporcji chropowatości do średnicy (k/b) i wyraża się ona równaniem (2-13), przy czym wartości C_p ogranicza się do zakresu $(0,4 \div 1,2)$.

$$c_p = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,11}{(Re/10^6)^{1,4}} \\ 1,2 \cdot \frac{0,18 \log(10k/b)}{1 + 0,4 \log(Re/10^6)} \end{array} \right. \quad (2-13)$$

Siłę oporu oraz siłę nośną wystarczy wyznaczyć głównie w przypadku małych średnic, dla których rozkład ciśnienia na powierzchni nie ma znaczenia, ale ma znaczenie sumaryczna wielkość obciążenia. W przypadku konstrukcji o większych średnicach i względnie cienkich ścianach wyznacza się rozkład ciśnienia na powierzchni w przekroju poprzecznym.



rys. 2.8 – Rozkład ciśnienia na powierzchni walca według [10].

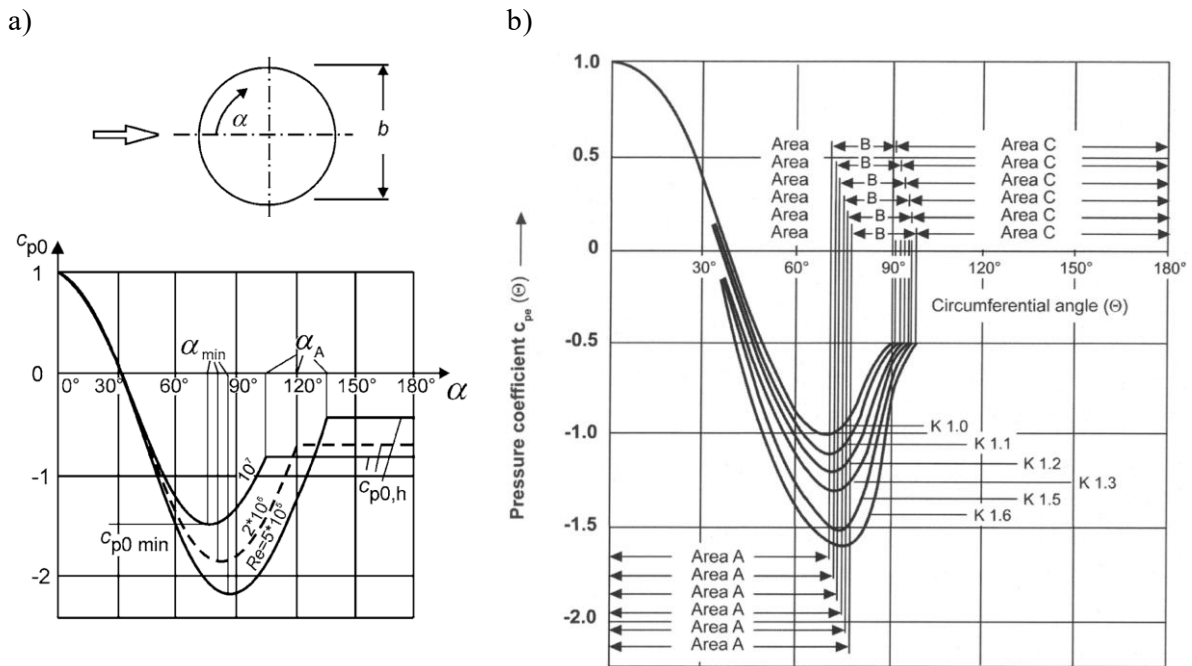
Powyższy wykres przedstawia rozkład ciśnienia, wyrażony współczynnikiem C_p na przekroju przez walec. Wykres przedstawia wyniki badań podsumowane w pracy [10]. Na poziomej osi został

podany kąt, mierzony od strony nawietrznej. Ponieważ opływający walec jest symetryczny, często podaje się rozkład ciśnienia dla kątów α ($0^\circ \div 180^\circ$). Rozkład ciśnienia zależy głównie od liczby Reynoldsa, jednak w każdym wypadku ma pewne punkty charakterystyczne. Na stronie nawietrznej zazwyczaj $C_p \cong 1,0$. Następnie na ścianach bocznych pojawia się ekstremum ssania. Ekstremum występuje na bocznej powierzchni, przy kącie w zakresie $\alpha = 85^\circ \div 105^\circ$. Jego wartość waha się w zakresie $C_p = -1,0 \div -3,0$. Wielkość i lokalizacja ekstremum zależą od liczby Re . Za ekstremum laminarna struga powietrza opływającego walec odrywa się od jego powierzchni (rys. 2.6). Pojawia się lokalnie przyścienny przepływ zwrócony przeciwnie do głównego kierunku wiatru. Dalej, wraz z kątem, spada wielkość ssania, aż do osiągnięcia stałej wartości ssania na zawietrznej stronie.

Według aktualnej polskiej normy [N-2] rozkład ciśnienia wyznacza się na podstawie wykresu rys. 2.9 a). Zostały przedstawione 3 krzywe w zakresie liczb $Re = 5 \cdot 10^5 \div 10^7$. Bardzo często zdarza się, że rozpatrywane konstrukcje znajdują się poza przedstawionym zakresem liczb Re . Norma nie podaje równania do wyznaczenia współczynnika rozkładu ciśnienia C_p , przez co wyznaczanie jego wartości może być obarczone dodatkowym błędem. Eurokod nie podaje bardziej precyzyjnej metody wyznaczania obciążenia wiatrem dla chłodni kominowych. Można go jednak wyznaczać posługując się innymi źródłami. Specjalnie na potrzeby projektowania chłodni powstała niemiecka instrukcja VGB-610, w której podano bardziej szczegółową procedurę wyznaczania ciśnienia wiatru na powierzchnię. Rozkład ciśnienia jest w niej uzależniony od chropowatości płaszcza chłodni (z uwzględnieniem ewentualnego żebrowania). Zostały również podane równania matematyczne do wyznaczenia obciążenia – osobno dla każdej kategorii chropowatości powierzchni. Rozkład ciśnienia (według rys. 2.9 b)), jest podzielony na trzy segmenty, dla których podano niezależne równania. Dla gładkiej powierzchni chłodni (bez żebrowania), rozkład ciśnienia wyznacza się według wzorów (2-14).

Area A	$0^\circ < \theta < 76^\circ$	$C_p = 1 - 2,6 \cdot \left(\sin \frac{90}{76} \cdot \theta \right)^{2,085}$	
Area B	$76^\circ < \theta < 104^\circ$	$C_p = -1,6 + 1,1 \left(\sin \left(\frac{90}{28} (\theta - 76) \right) \right)^{2,395}$	(2-14)
Area C	$104^\circ < \theta < 180^\circ$	$C_p = -0,5$	

Według innych norm oraz literatury, do aproksymowania rozkładu ciśnienia stosuje się jeszcze bardzo często szereg Fouriera o liczbie wyrazów $4 \div 6$. Takie równanie pozwala bardzo dokładnie dopasować funkcję aproksymacyjną do wyników pomiarów.



rys. 2.9 – Rozkład ciśnienia na powierzchni walca w ujęciu normowym. a) według Eurokodu [N-2], b) według standardu VGB, do projektowania chłodni kominowych [N-1].

2.2 Obciążenie wiatrem w ujęciu różnych norm

2.2.1 Norma brytyjska BS 6399-2:1997

Podejście normy brytyjskiej BS 6399-2:1997 [N-3] jest uproszczone względem Eurokodowej procedury. Wyznaczenie ciśnienia wiatru sprowadza się bowiem do znanego równania $\rho \cdot v^2/2$. To podejście jest jednak obwarowane wieloma ograniczeniami, takimi jak wysokość budynku czy podatność na dynamiczne oddziaływanie. Warto zaznaczyć, że norma stosuje wiatr 60-minutowy, z prawdopodobieństwem przekroczenia w ciągu roku 2%. W Brytyjskim standardzie zabrakło jednak procedury wyznaczenia profilu prędkości i turbulencji wiatru.

Wielkość obciążenia wiatrem:

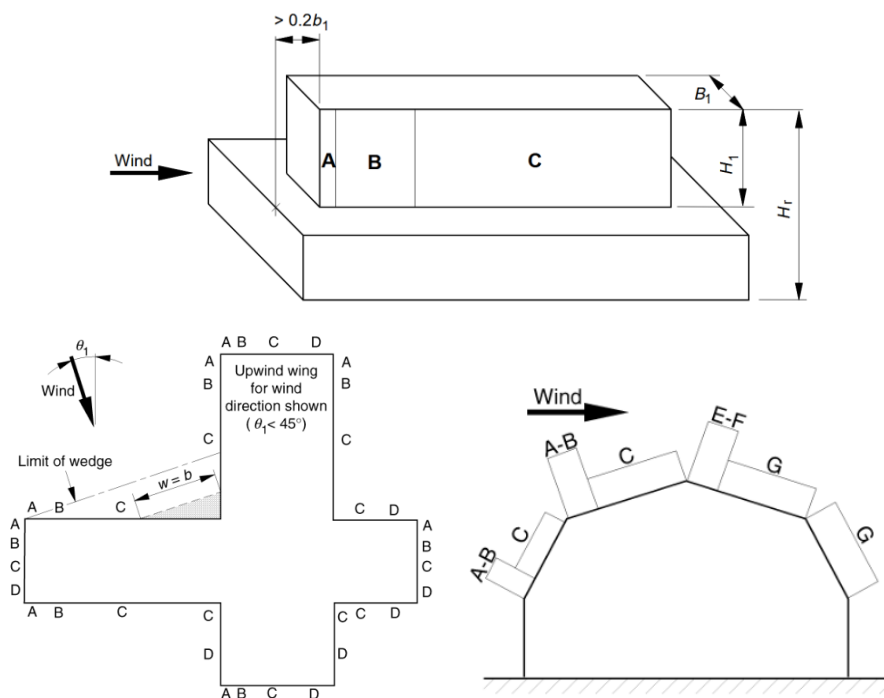
$$\begin{aligned} p_e &= q_s C_{pe} C_a \\ p_i &= q_s C_{pi} C_a \\ p &= p_e - p_i \end{aligned} \quad (2-15)$$

Lub:

$$\begin{aligned} p &= q_s C_p C_a \\ q_s &= 0,613 \cdot v^2 \end{aligned} \quad (2-16)$$

Gdzie: q_s – dynamiczne ciśnienie wiatru, C_{pe} , C_{pi} – współczynnik rozkładu ciśnienia, C_a – współczynnik z uwagi na wielkość, v – prędkość wiatru.

Dodatkowo pojawiają się w normie współczynniki zwiększające ciśnienie dynamiczne wiatru, z uwagi na topografię (tak jak współczynnik orografii w Eurokodzie), odległość od morza, porywistość (uwzględniające wysokość).



rys. 2.10 – Przykłady geometrii ujętych w normie.

W normie bardziej szczegółowo opisano niektóre kształty, takie jak złożone prostopadłościennne bryły, dachy mansardowe i mansardy wklęsłe. Poświęcono również rozdział przyrzmatycznym budowłom o nie-prostopadłych kształtach. Przykłady brył budynków na rys. 2.10.

2.2.2 Norma włoska NTC

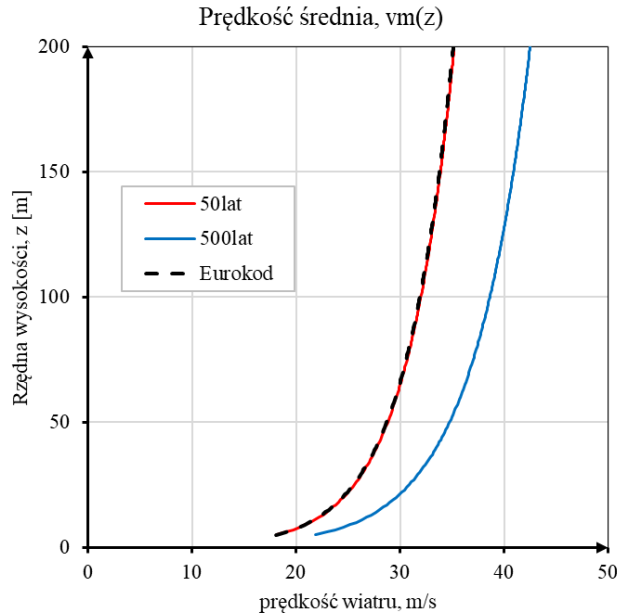
Na uwagę zasługuje również włoskie opracowanie [N-4]. Poza standardowym zestawem norm projektowych Eurokod, włoskie przepisy wskazują dodatkowy dokument do projektowania konstrukcji, wydany przez NTC (*Norme tecniche per le costruzioni*). Wskazana procedura i metodologia są spójne z Eurokodem, chociaż same równania nieco różnią się od ciała podstawowego Eurokodu.

W normie szczegółowo opisano dodatkowe zagadnienia, takie jak powstawanie wiatrów monsunowych, cyklonów czy wirów. Opisano również ich mechanizmy tworzenia się. Poza dokładnym wyjaśnieniem zjawisk, w normie znalazł się rozdział na temat prowadzenia badań aerodynamicznych w tunelach wiatrowych. Opisano w nim podstawowe wymagania, techniki pomiarowe, rodzaje mierzonych wielkości. W normie [N-4] znajdują się również przykłady zastosowań i przykłady obliczeniowe.

Poniższe równania (2-16) przedstawiają procedurę obliczeniową oraz przykładowy profil wiatru. Warto zwrócić uwagę na to, że norma NTC [N-4] zaleca okresy powrotu inne niż 50lat. W celu

zmiany okresu powrotu norma zwiększa prędkość bazową poprzez współczynnik c_{return} (2-17). Poza tym, procedura wyznaczania profilu prędkości jest niemal identyczna jak ta w Eurokodzie [N-2]. Na rys. 2.11 zaś zostało przedstawione porównanie profilu prędkości dla okresu powrotu 50 i 700lat.

$$c_{\text{return}} = 0,65 \cdot \left(1 - 0,138 \cdot \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{TR} \right) \right) \right) \quad (2-17)$$



rys. 2.11 – Porównanie profili prędkości dla okresu powrotu 50 i 500lat.

$$\begin{aligned}
 c_r &= 0,65 \cdot \left\{ 1 - 0,138 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{TR} \right) \right] \right\} \\
 v_b &= v_{b,0} \cdot c_a \\
 v_r &= v_b \cdot c_r \\
 c_e(z) &= k_r^2 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \cdot c_t(z) \cdot \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \cdot c_t(z) + 7 \right] \\
 q_p^{\text{NTC}}(z) &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \cdot C_e(z) \\
 c_m(z) &= k_r \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \cdot c_t(z) \\
 v_m(z) &= v_r \cdot c_m(z) \\
 I_v(z) &= \frac{1}{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \cdot c_t(z)}
 \end{aligned} \quad (2-18)$$

Gdzie: TR – okres powrotu; c_a , k_r , k_a , - parametry na podstawie tablic lub wartości zalecanych; $v_{b,0}$ – prędkość bazowa wiatru, c_t – współczynnik orografii.

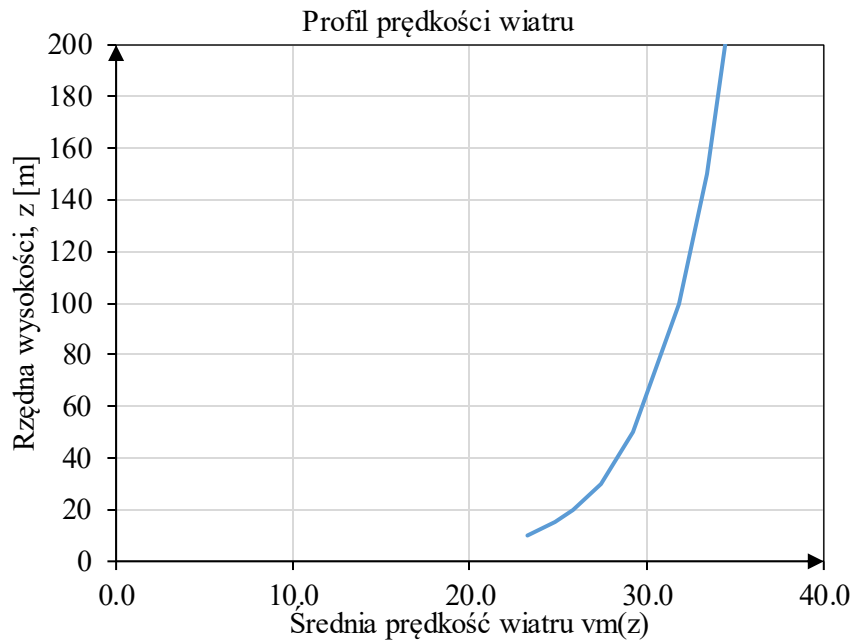
2.2.3 Norma indyjska

Norma indyjska (IS 875-3) [N-7] stosuje nieco uproszczone podejście obliczeniowe, jednak w istocie osiąga podobny efekt jak Eurokod. Norma indyjska jako podstawową prędkość stosuje prędkość 3-sekundową, mierzoną 10m n.p.t. Prędkość jest mierzona w terenie wolnym od zabudowań (kategoria terenu II wg [N-7] – odpowiadająca II kat. wg Eurokodu. Następnie poprzez dodanie współczynników uwzględniających turbulencję oraz wysokość nad poziomem terenu sprowadza tę prędkość do średniej godzinowej obliczeniowej prędkości na wysokości Z , nad poziomem terenu. Dodatkowo norma zwiększa obliczeniową prędkość z uwagi na klasę konstrukcji oraz znaczenie strategiczne budowli (budynki zwykłe, obiekty przemysłowe, obiekty o znaczeniu post-cyklonowym). Wykazuje w ten sposób podobieństwo do normy amerykańskiej [N-5].

Ponadto norma indyjska podaje współczynniki zwiększające prędkość w formie tabelarycznej, poniekąd upraszczając procedurę obliczeniową. Została też sprecyzowana intensywność turbulencji, jednak nie bierze ona udziału w wyznaczaniu obliczeniowego ciśnienia. Należy tutaj zwrócić uwagę, że norma indyjska, w przeciwieństwie do innych zwiększa obliczeniową prędkość wiatru a nie ciśnienie prędkości. W praktyce, osiąga ten sam efekt, ale należy być bardzo ostrożnym podczas stosowania metodologii obliczeniowej z norm europejskich oraz prędkości podawanej przez normę indyjską. Nieświadome łączenie tych norm może doprowadzić bowiem do dwukrotnego uwzględnienia współczynników bezpieczeństwa, lub w drugą stronę – pominięcia ich. Pozostałe spostrzeżenia dotyczące normy indyjskiej:

- uwzględnia topografię (współczynnik $K3$ – podobny do Eurokodowego współczynnika orografii),
- uwzględnia obecność cyklonów (poprzez dodatkowy współczynnik bezpieczeństwa),
- bardziej niż Eurokod kładzie nacisk na współczynnik kierunkowy wiatru,
- zwiększa prędkość wiatru współczynnikiem $K4$, zależnym od typu konstrukcji.

Poniższy wykres przedstawia profil prędkości wiatru, obliczony przy założeniu II kategorii terenu oraz prędkości bazowej (3-sekundowej) 33m/s. Podobne warunki brzegowe odpowiadają prędkości bazowej według Eurokodu 22m/s i II kategorii terenu.



rys. 2.12 – Profil średniej prędkości wiatru wg normy indyjskiej.

2.2.4 Norma amerykańska

Ciśnienie prędkości wiatru

Norma amerykańska ASCE 7-10 [N-5] – podobnie jak poprzednie, podaje prędkość wiatru mierzoną na wysokości 10m n.p.t. Stosuje jednak pomiar 3-sekundowy. Norma kładzie duży nacisk na spiętrzanie prędkości wiatru za wzniesieniami (w Eurokodzie zjawisko to opisuje się współczynnikiem orografii). Ciśnienie prędkości wiatru (velocity pressure) jest dane wzorem (29.3-1) wg [N-5]:

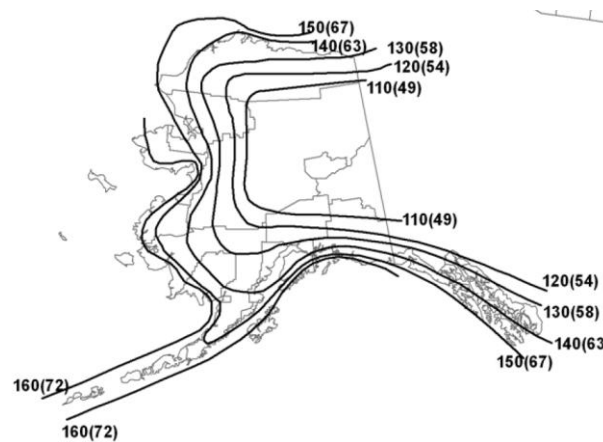
$$q_z = 0,613 \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_d \cdot V^2 \quad (2-19)$$

Gdzie:

- K_d – współczynnik kierunkowy (przyjmuje wartości od 0,85 dla budowli o ostrych krawędziach, do 0,95 – dla budowli obłych),
- K_z – współczynnik ekspozycji, uwzględniający wysokość n.p.t.,
- K_{zt} – współczynnik orografii,
- V – prędkość wiatru. Prędkość wiatru jest podana na mapach prędkości sporządzonych osobno dla każdej z kategorii budowli.

Norma stosuje prędkości 3-sekundowe, mierzone na wysokości 10m n.p.t. Dodatkowym utrudnieniem, jest konieczność stosowania liniowej interpolacji do wyznaczania obliczeniowej prędkości wiatru w lokalizacjach pomiędzy danymi izoliniami. Podano prędkości z prawdopodobieństwem wystąpienia 7% w ciągu okresu 50 lat, co przekłada się na okres powrotu 700lat.

Co ciekawe, podane są 3 zestawy map prędkości wiatru dla różnych kategorii konstrukcji (Risk Category).



rys. 2.13 – Mapa prędkości wiatru, wg [ASCE 7-10], Fig. 26.5-1 A.

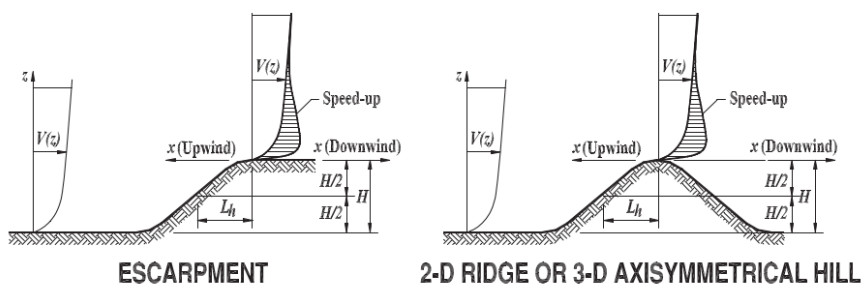
Norma podaje 3 kategorie chropowatości terenu:

- B: Regiony miejskie, podmiejskie, zalesione i inne z dużą ilością przeszkód.
- C: Otwarty teren, o przeszkodach poniżej 33ft (9,1m)
- D: Płaski teren, bez przeszkód lub powierzchnia wody.

Kategoria terenu dotyczy kierunku nawietrznego, a zatem możemy mieć różne kategorie chropowatości terenu dla różnych kierunków wiatru – podobnie jest w przypadku stosowania Eurokodów.

Efekt spiętrzania prędkości wiatru za wzniesieniami uwzględnia współczynnik K_{zt} . Wzór wiąże 3 składowe odpowiadające za wysokość wzniesienia (H/L_h), odległość od wzniesienia (x/L_h), oraz wysokość nad poziomem terenu (z/L_h):

$$K_{zt} = (1 + K_1 \cdot K_2 \cdot K_3)^2 \quad (2-20)$$



Topographic Multipliers for Exposure C										
H/L _h	K ₁ Multiplier			x/L _h	K ₂ Multiplier		z/L _h	K ₃ Multiplier		
	2-D Ridge	2-D Escarp.	3-D Axisym. Hill		2-D Escarp.	All Other Cases		2-D Ridge	2-D Escarp.	3-D Axisym. Hill
0.20	0.29	0.17	0.21	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00
0.25	0.36	0.21	0.26	0.50	0.88	0.67	0.10	0.74	0.78	0.67
0.30	0.43	0.26	0.32	1.00	0.75	0.33	0.20	0.55	0.61	0.45
0.35	0.51	0.30	0.37	1.50	0.63	0.00	0.30	0.41	0.47	0.30
0.40	0.58	0.34	0.42	2.00	0.50	0.00	0.40	0.30	0.37	0.20
0.45	0.65	0.38	0.47	2.50	0.38	0.00	0.50	0.22	0.29	0.14
0.50	0.72	0.43	0.53	3.00	0.25	0.00	0.60	0.17	0.22	0.09
				3.50	0.13	0.00	0.70	0.12	0.17	0.06
				4.00	0.00	0.00	0.80	0.09	0.14	0.04
							0.90	0.07	0.11	0.03
							1.00	0.05	0.08	0.02
							1.50	0.01	0.02	0.00
							2.00	0.00	0.00	0.00

rys. 2.14 – ASCE 7-10, 26.8.1.

W zależności od różnych typów konstrukcji oraz ich wysokości norma ASCE podaje kilka różnych tablic z wartościami współczynnika ekspozycji, przedstawionymi w kolejnych rozdziałach normy:

- rozdział 26 – informacje ogólne o charakterze wiatru,
- rozdział 27 – procedura dla budynków wszystkich wysokości,
- rozdział 28 – procedura dla budynków „Low risk Buildings”,
- rozdział 29 – pozostałe budowle, wszystkich wysokości oraz elementy wyposażenia,
- rozdział 30 – cladding i elementy wyłącznie osłonowe,
- rozdział 31 – obliczenia wspomagane badaniami w tunelu wiatrowym.

Dla analizowanych w rozprawie konstrukcji właściwą procedurą jest ta, podana w rozdziale 27.

Obciążenie na konstrukcje

Opisane powyżej parametry stosowane są dla wszystkich typów konstrukcji i elementów.

Współczynnik ekspozycji K_z podany w rozdziale 27 wyraża się wzorem:

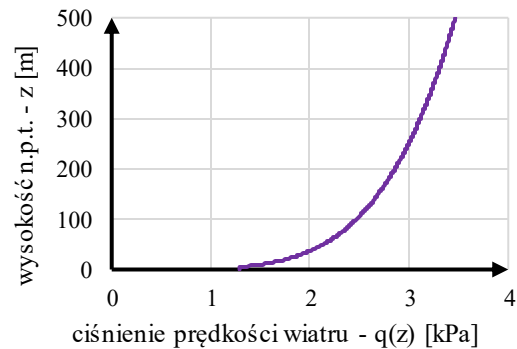
$$K_z = 2,01 \cdot (z/z_g)^{2/\alpha}$$

W którym parametry z_g oraz α podano w tablicy 26.9-1 indywidualnie do każdej z kategorii terenu.

In metric

Exposure	α	z_g (m)	$\hat{a}$	$\hat{b}$	$\bar{\alpha}$	$\bar{b}$	c	ℓ (m)	$\bar{\epsilon}$	z_{min} (m)*
B	7.0	365.76	1/7	0.84	1/4.0	0.45	0.30	97.54	1/3.0	9.14
C	9.5	274.32	1/9.5	1.00	1/6.5	0.65	0.20	152.4	1/5.0	4.57
D	11.5	213.36	1/11.5	1.07	1/9.0	0.80	0.15	198.12	1/8.0	2.13

* z_{min} = minimum height used to ensure that the equivalent height $\bar{z}$ is greater of $0.6h$ or z_{min} .
For buildings with $h \leq z_{min}$, $\bar{z}$ shall be taken as z_{min} .



rys. 2.15 – Parametry profilu wiatru oraz profil ciśnienia prędkości wiatru wg [N-5].

Dalej, w normie można znaleźć wzór w rozdziale 27.4.2 na obciążenie na przegrody:

$$p = q \cdot G_f \cdot C_p - q_i \cdot (G \cdot C_{pi}) \quad (2-21)$$

W którym:

q to ciśnienie prędkości wiatru na wysokości z (q_z),

q_i to ciśnienie na wysokości h

G_f oznacza współczynnik porywistości wiatru,

Druga część wzoru odnosi się do ciśnienia wewnętrznego – $G \cdot C_{pi}$ = współczynnik ciśnienia wewnętrznego.

Z uwagi na to, że w normie amerykańskiej [N-5] zastosowano pomiar 3-sekundowy, uzyskany z tej normy profil prędkości ma o wiele większe wartości ciśnienia niż z Eurokodu. Ostatecznie jednak wielkości obciążenia przykładanego na przegrody budowli przyjmują podobne wielkości jak w przypadku stosowania Eurokodów, gdyż wzór (2-21) redukuje w znaczący sposób wielkość ciśnienia poprzez współczynniki G_f oraz uwzględnienie wewnętrznego ciśnienia $q_i \cdot (G \cdot C_{pi})$. Z tego jednak względu trudno jest porównywać profile prędkości wiatru z normy amerykańskiej i Europejskiej.

2.2.5 Spojrzenie starej Polskiej normy na obciążenie wiatrem.

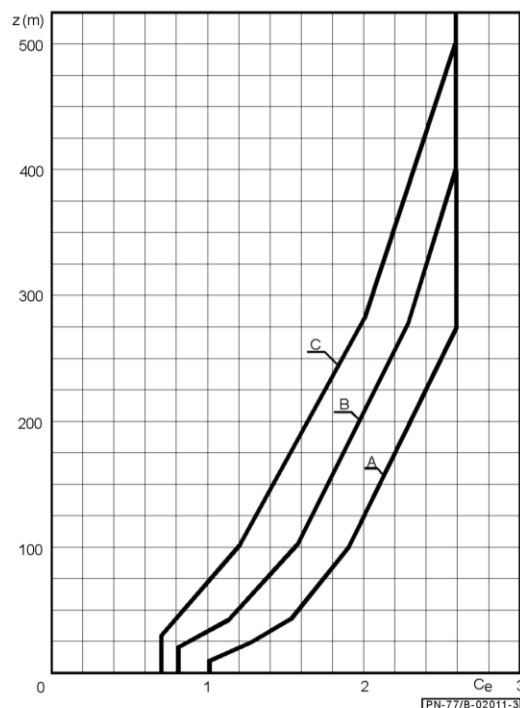
Procedura obliczeniowa podana w PN-77/B-02011 [N-6] jest o wiele prostsza niż ta podana w Eurokodzie. Podobnie jak w przypadku normy ASCE norma zmusza do uwzględnienia lokalnych wzniesień w pobliżu przez odpowiedni współczynnik. Dodatkowo podano współczynniki rozkładów ciśnienia dla wielu typowych kształtów budowli.

- Obciążenie wiatrem wyznacza się z zależności:

$$p_k = q_k \cdot C_e \cdot C \cdot \beta \quad (2-22)$$

W której:

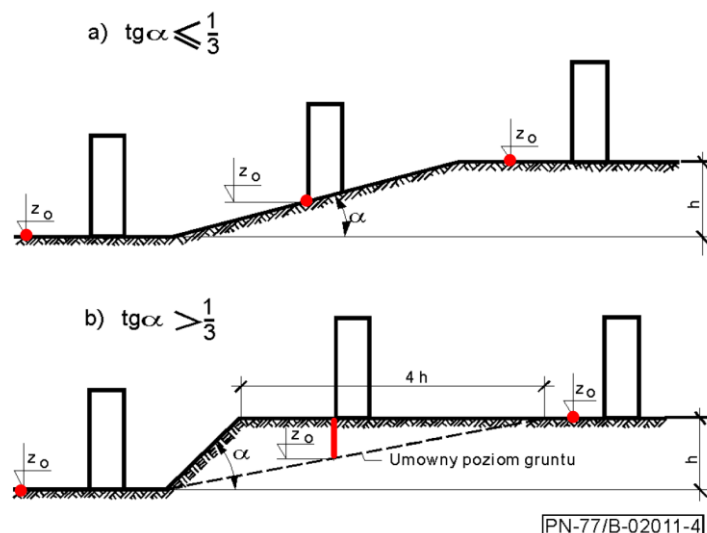
- q_k to charakterystyczne ciśnienie prędkości wiatru. Oblicza się je tylko na podstawie prędkości wiatru odczytanej z mapy,
 - C_e – współczynnik ekspozycji, uwzględniający wysokość nad terenem,
 - C – współczynnik oporu aerodynamicznego (zależny od kształtu budowli),
 - β – współczynnik działania porywów wiatru, zależny od podatności budowli na działania dynamiczne.
- Wg „starej” normy współczynnik obciążenia wiatrem to $\gamma_f = 1,3$ (pkt 2.3, w [N-6])
 - PN-B wyraża profil wiatru przez współczynnik ekspozycji, który już uwzględnia turbulencję. PN-B podaje C_e jako krzywe punktowe i wzory do nich – osobno dla każdej kategorii terenu.



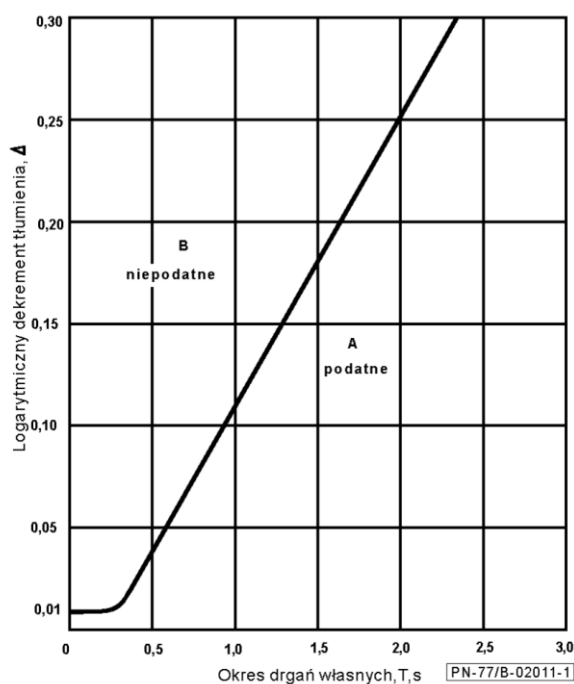
rys. 2.16 – Współczynnik ekspozycji w zależności od wysokości dla różnych kategorii terenu [N-6].

Zostały rozróżnione 3 kategorie terenu z uwagi na chropowatość: A – obszar z nielicznymi przeszkodami, B – obszar z niskimi budynkami lub zalesiony, C – obszar zabudowany budynkami o wysokości powyżej 10m. Nie ma w tej normie osobnej kategorii dla otwartych przestrzeni przy zbiornikach wodnych.

Norma nie podaje bezpośrednio współczynnika zwiększającego obciążenie wiatrem z uwagi na wzniesienia, ale uwzględnia porywy wiatru poprzez zwiększenie wysokości odniesienia (poziomu terenu) z_0 – rys. 2.17.



rys. 2.17 – Uwzględnienie ukształtowania terenu. Rys 4 w normie [N-6].



rys. 2.18 – Kryterium podatności na działanie wiatru wg [N-6], uzależniające podatność od parametru tłumienia oraz okresu drgań własnych.

Dodatkowo dynamiczne zachowanie konstrukcji uwzględnia się współczynnikiem β , jeśli konstrukcja wykazuje podatność – według ustalonego kryterium (rys. 2.18). Porywistość wiatru jest uwzględniona współczynnikiem β dla konstrukcji niepodatnych równym 1,8 oraz dla konstrukcji podatnych wyrażony równaniem (2-23). Norma zaleca również zwiększenie/ zmniejszenie ciśnienia wiatru dla stref, dla budowli monumentalnych / tymczasowych.

$$\beta = 1 + \psi \cdot \sqrt{\frac{r}{C_e} \cdot (k_b + b_r)} \quad (2-23)$$

Przedmiotem pracy są bryły obrotowe poddane obciążeniu wiatrem, dlatego wato zwrócić uwagę na podejście normy [N-6] do tych brył. Siłę nośną określa się wzorem (2-24). Norma dodaje, że siła nośna powinna być traktowana jako wielokrotnie zmienna, o okresie drgań własnych konstrukcji.

$$P_y = \frac{\pi}{\Delta} \cdot C_y \cdot \frac{V_{kr}^2}{1,63} \cdot D \cdot \frac{z}{H} \quad (2-24)$$

$$V_{kr} = \frac{n \cdot D}{St} \quad (2-25)$$

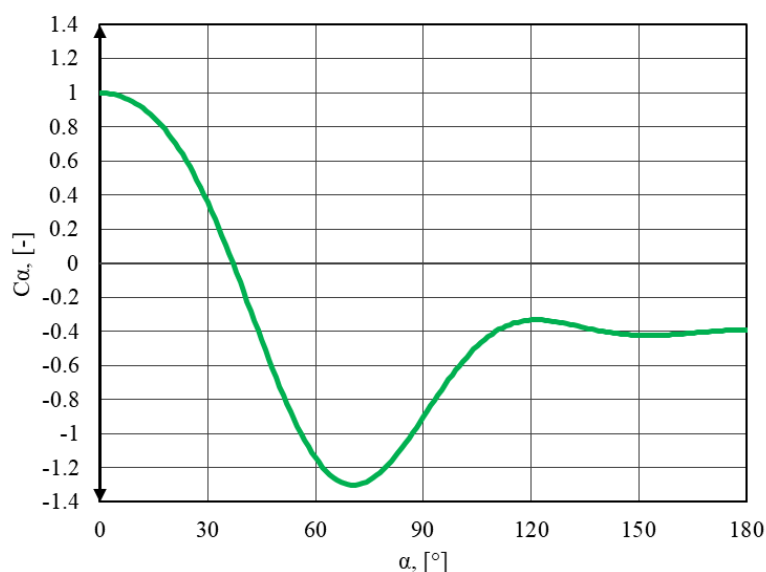
Gdzie: D to średnica walca, $St = 0,2$ – liczba Strouhala, $q_{kr} = V_{kr}^2/1,63$ – ciśnienie odpowiadające prędkości krytycznej, C_y – współczynnik zależny od kształtu i prędkości, przyjmuje wartości z zakresu od 0,2 do 0,5, Δ – logarytmiczny dekrement tłumienia konstrukcji (wartości od 0 do 1, jeśli $\Delta = 1$ tłumienie nie występuje).

Siła oporu aerodynamicznego jest określona w zależności od chropowatości, średnicy i ciśnienia prędkości wiatru. Współczynnik siły oporu C_x opisany równaniem (2-26) dany wg [N-6] uwzględnia chropowatość powierzchni (C_x w zakresie od 0,7 do 1,3) oraz smukłość walca (k w zakresie od 0,65 do 1,0).

$$C_x = k \cdot C_{inf} \quad (2-26)$$

Rozkład ciśnienia na powierzchni walca jest podany podobnym równaniem jak siła oporu. Została uwzględniona smukłość walca $k = 0,94 - 0,2 \cdot \log[D/H]$ oraz współczynnik rozkładu ciśnienia na walcu. Rozkład na powierzchni walca jest podany za pomocą szeregu Fouriera (3-16) i osiąga wartości od 1,0 na stronie nawietrznej do -1,2 na bocznych ścianach, przy kącie $\alpha = 70^\circ$ (Rys. 3.6). W normie podano jeden rozkład ciśnienia dla wszystkich chropowatości i liczb Reynoldsa.

$$C_\alpha = -0,356 + 0,322 \cdot \cos(\alpha) + 0,636 \cdot \cos(2\alpha) + 0,501 \cdot \cos(3\alpha) + 0,058 \cdot \cos(4\alpha) - 0,128 \cdot \cos(5\alpha) - 0,034 \cdot \cos(6\alpha) \quad (2-27)$$



rys. 2.19 – Rozkład ciśnienia na powierzchni walca wg równania (2-27) podanego w [N-6].

2.2.6 Chińska norma obciążenia wiatrem

Chińska norma GB 50009 – 2012 [N-8] stosuje potęgowy profil prędkości wiatru. Stosuje 10 - minutowy pomiar prędkości na wysokości 10m n.p.t. Wykazuje spore podobieństwo do Eurokodów. Wyróżniono 4 klasy chropowatości, dla których zdefiniowano parametry funkcji ciśnienia prędkości wiatru:

Tablica 2.3 – kategorie terenu wg [N-8]

Klasa	Opis
Klasa I	teren otwarty, np. wybrzeża
Klasa II	teren półotwarty, np. tereny rolnicze
Klasa III	teren zabudowany, np. przedmieścia
Klasa IV	teren silnie zabudowany, np. centra miast

Ogólnie, ciśnienie wywołane wiatrem określa się ze wzoru:

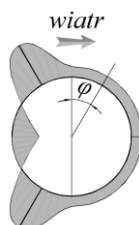
$$w_k = \beta_z \cdot \mu_s \cdot \mu_z \cdot w_0 \quad (2-28)$$

Gdzie β_z uwzględnia dynamiczną odpowiedź konstrukcji, μ_s to współczynnik odpowiedzialny z kształt konstrukcji a μ_z to współczynnik ekspozycji. Profil prędkości wiatru można określić wzorem (3-18) (na podstawie załącznika E do [N-6]) przy czym, na potrzeby projektowania konstrukcji procedura tego nie wymaga.

$$v(z) = v_{ref} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad (2-29)$$

Dodatkowo w normie podano wzór na uwzględnienie lokalnego spiętrzenia wiatru – przez dodatkowy współczynnik μ_B , odpowiadającego współczynnikowi orografii w Eurokodzie. Norma Chińska nieco prościej podchodzi do obciążania wiatrem brył obrotowych. Rozkład obciążenia na walec jest aproksymowany równaniem (2-30). Rozkład jest uzależniony od kąta φ (wg rys. 2.20) oraz kąta poziomego nachylenia Φ .

$$\mu_s = 0,5 \cdot \sin \varphi \cdot \sin^2 \Phi - \cos^2 \Phi \quad (2-30)$$

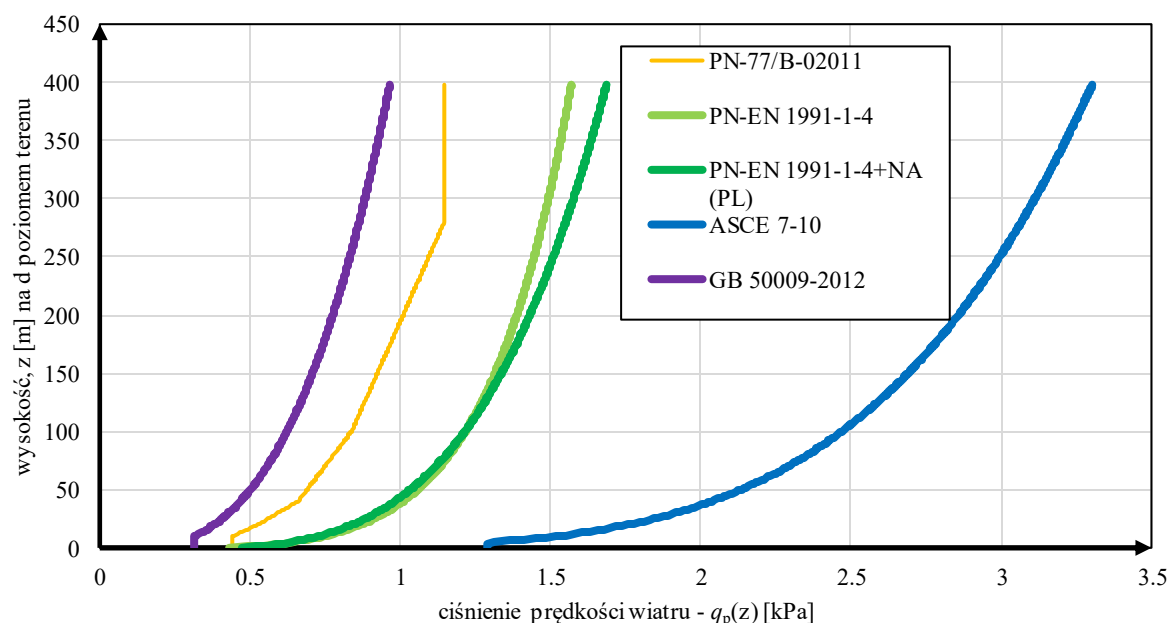


rys. 2.20 – Oznaczenie kąta do równania (2-30) wg [N-8].

Częściowy współczynnik dla obciążenia wiatrem w kombinacjach stanu granicznego nośności wynosi dla chińskiej normy 1,4.

2.2.7 Porównanie profili wiatru według różnych norm

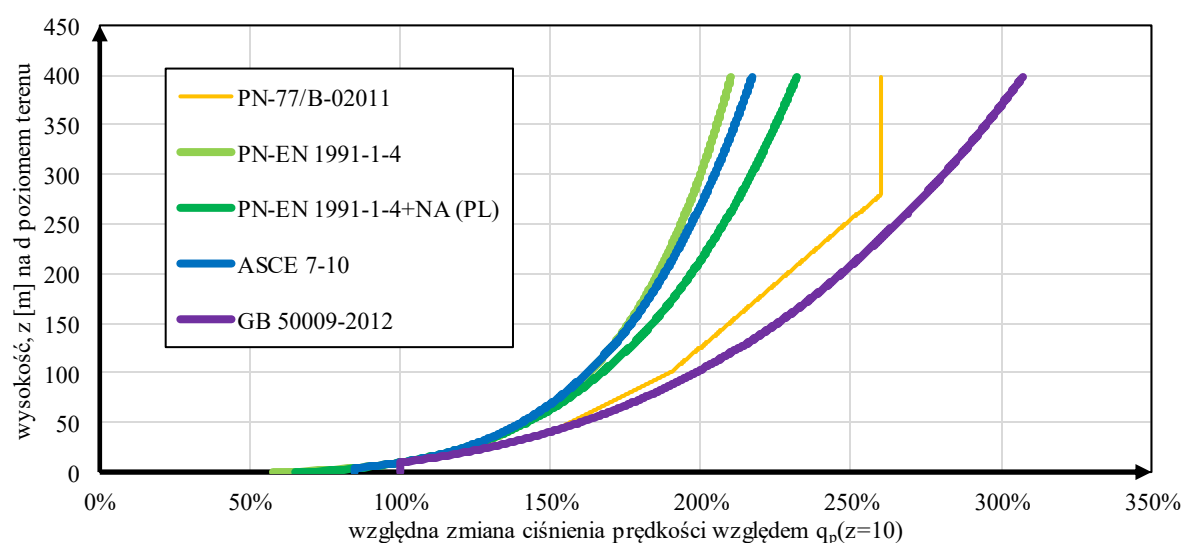
Poniższy wykres przedstawia zestawienie profili ciśnienia prędkości stosowany przez różne normy. Profile są obliczone dla podobnych warunków brzegowych. Nie jest możliwe obliczenie profili wiatru dla identycznych warunków brzegowych z uwagi ich niejednakową definicję według przytoczonych norm. Dodatkowo, normy posługują się innymi typami danych meteorologicznych (pomiar 10-minutowy, lub 3-sekundowy). Z uwagi na to, że normy uwzględniają intensywność turbulencji na innych etapach, porównanie profili ciśnienia prędkości wiatru będzie lepsze, gdyż wszystkie profile ciśnienia uwzględniają już turbulencje.



rys. 2.2 – Zestawienie projektowych ciśnień prędkości dla różnych norm.

Podane prędkości wiatru, choć dla podobnych warunków brzegowych potrafią się różnić w znaczący sposób. Poza różnicami w definicji norm, jest to spowodowane też lokalnymi warunkami klimatycznymi – indywidualnymi dla każdego z regionów. Poniższy wykres przedstawia względną zmianę profilu prędkości, wobec prędkości ustalonej na poziomie 10m.

Wykres z rys. 2.10 doskonale ilustruje podobieństwa pomiędzy normowymi profilami. Na wysokości do ok 100m n.p.t. możemy zaobserwować największe zmiany w wielkości ciśnienia prędkości wiatru. Oddziaływanie wiatru (zależnie od chropowatości terenu) powyżej 100m rośnie nieco łagodniej, aż w końcu na ok 400÷600m wiatr osiąga tzw. prędkość gradientową i jego oddziaływanie stabilizuje się. Można stąd wywnioskować, że dla budowli o wysokościach powyżej 50m, różnicowanie oddziaływania wiatru po wysokości może przełożyć się istotnie na ekonomię projektowania.



rys. 2.3 – Zestawienie (względne) projektowych ciśnień prędkości dla różnych norm.

Pokazane profile ciśnienia prędkości wiatru na wykresach rys. 2.6 i rys. 2.10 dotyczą obwiedni ciśnienia, bez uwzględnienia wpływu samej konstrukcji na oddziaływanie wiatru.

Tablica 2.4 – Zestawienie typowych geometrii konstrukcji uwzględnionych w normach.

Geometria	PN-EN 1991-1-4	PN-77/B 02011	ASCE 7-10	GB 50009 – 2012
Ściany pionowe budynków	x	x	x	x
Dachy jednospadowe i płaskie	x	x	x	x
Dachy dwuspadowe	x	x	x	x
Zaokrąglone krawędzie dachu	x	-	-	-
Dachy czterospadowe (kopertowe)	x	-	x	-
Dachy szedowe i wielospadowe	x	x	x	x
Dachy łukowe	x	x	x	x
Kopuły	x	-	x	x
Wiaty	x	x	x	-
Tablice i ściany wolnostojące	x	x	x	x
Belki – przekroje o ostrych krawędziach	x	x	-	x
Walce kołowe	x	x	-	x
Przekroje kratowe	x	x	-	x
Mosty (efekt podrywania)	x	-	-	-
Okapy dachów	-	x	x	-
Attyki	-	x	x	-
Niższe dachy przylegające do wyższych budowli	-	x	x	x
Hiperboloidalne/ katenoidalne chłodnie kominowe	-	-	-	-

Sytuacja jest nieco bardziej ciekawa w przypadku geometrii bez wyraźnie zaznaczonych krawędzi. Skomplikowanie sytuacji wynika z tego, że nie jest jednoznaczne miejsce oderwania się strugi laminarnej od powierzchni budowli. W tym miejscu następuje też zmiana znaku ciśnienia (parcia na ssanie). W normach można znaleźć wytyczne do obciążenia konstrukcji o przekroju kołowym – na przykład kominów, masztów, rurociągów, kopuł oraz dachów łukowych. Na tym jednak kończą się normatywne wytyczne. Wiele konstrukcji o kształtach będącymi bryłami obrotowymi, w tym chłodnie kominowe, są traktowane jako walce kołowe przy wyznaczaniu obciążenia wiatrem. Jest to jednak

pewne uproszczenie. Wybrane typowe kształty konstrukcji uwzględnione w normach są zestawione w tab. 2.4.

Normy krajowe i światowe zbudowane są w taki sposób, że w wyznaczonym obciążeniu wiatrem rozgraniczone są trzy główne aspekty:

- ciśnienie wiatru z uwagi na otoczenie,
- geometria konstrukcji,
- dynamiczna odpowiedź konstrukcji (o ile konstrukcja jest podatna).

Dzięki takiemu podziałowi można wyznaczać rozkłady ciśnienia na poszczególne przegrody budowli o skomplikowanych geometriach nie uwzględnionych w normach. Do dyspozycji projektantów są oddane 4 główne narzędzia. Badania na istniejących budowlach, badania laboratoryjne, na modelach zmniejszonych w skali wewnątrz tuneli aerodynamicznych, obliczenia numeryczne i przede wszystkim literatura techniczna.

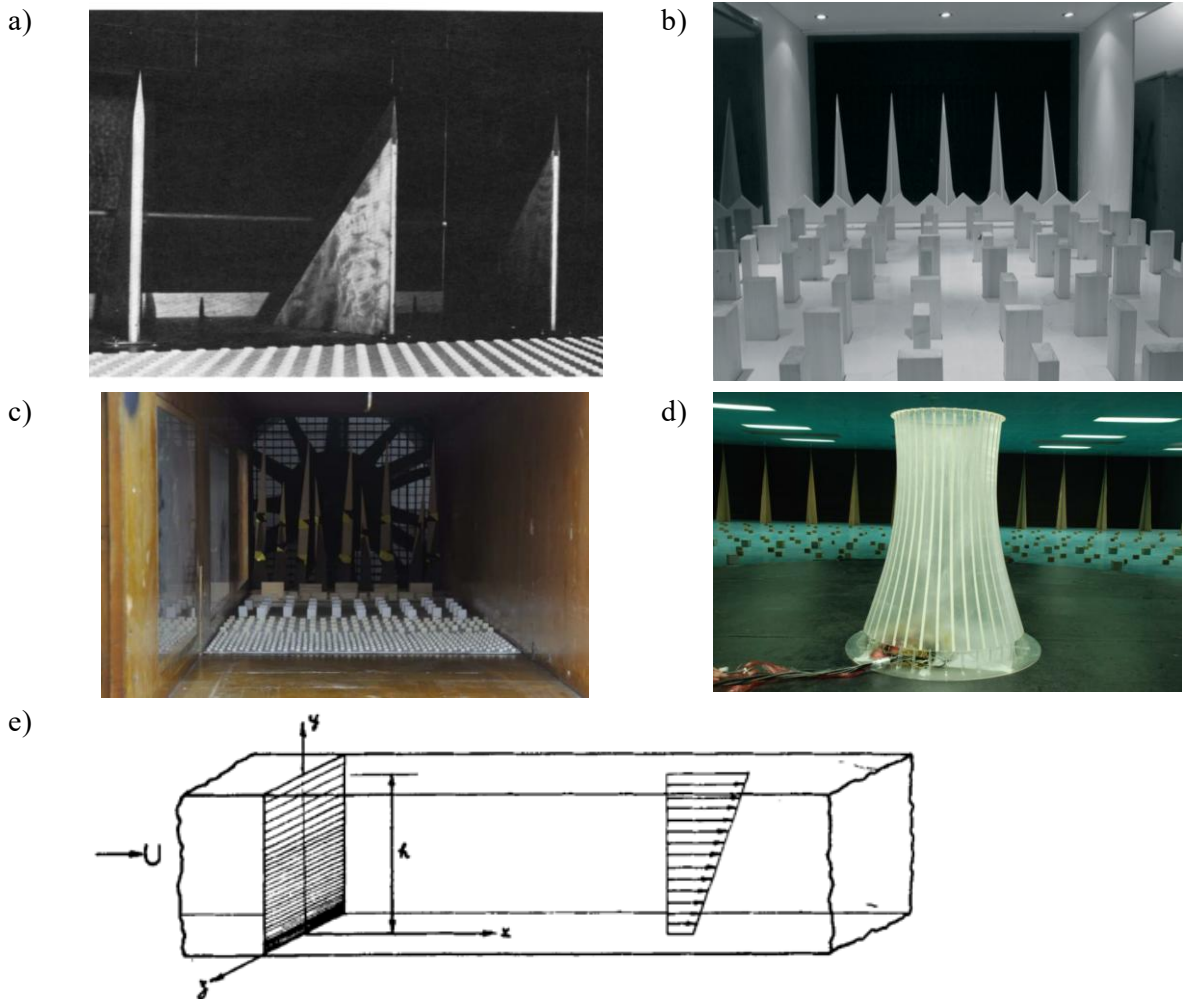
2.3 Badania in-situ

Określanie rozkładu ciśnienia na istniejących konstrukcjach jest możliwe, ale również jest bardzo kosztowne i niepraktyczne – w przypadku nowych budynków. Rozkład ciśnienia do projektowania powinien bowiem być znany przed powstaniem budowli. Dodatkowo trudno jest kontrolować warunki w terenie (prędkość wiatru). Badanie rozkładu ciśnienia wiatru in-situ może jednak być bardzo pomocne w sytuacji oceny stanu istniejących budowli, oraz optymalizacji dla większej ilości, kiedy projektowana budowla ma powstać w wielu egzemplarzach. Można bowiem wykonać próbną budowlę a następnie zoptymalizować projekt przed jej powieleniem. Obszerne kompleksowe badania na istniejących chłodniach kominowych przeprowadziła grupa badaczy z Chin [3], w 2017r. Między innymi zaprezentowali pomiary prędkości wiatru in-situ przed i po wzniesieniu chłodni kominowej. Badania były uzupełnione o eksperyment w tunelu wiatrowym oraz symulację numeryczną.

2.4 Badania laboratoryjne

Podstawowym narzędziem do badań laboratoryjnych konstrukcji pozostaje tunel wiatrowy. Przykładowo badania w tunelach wiatrowych zostały opisane w pracach [13]–[28]. Dodatkowo prace [3], [15] i [16] są poświęcone badaniom właśnie nad chłodniami kominowymi. W tunelu można w pewnym zakresie kontrolować warunki. W przypadku większych tuneli można tworzyć profile prędkości wiatru oraz profile turbulencji, w celu jak najdokładniejszego odwzorowania warunków przepływu wiatru i jego oddziaływania na konstrukcje. Istnieją również normy pomocne do prowadzenia badań w tunelu wiatrowym. W normie ASCE/SEI 49-12 [N-5] opisano model profilu

wiatrowego, podano zalecenie co do jakości aparatury pomiarowej, umożliwiającej m.in. wychwycenie efektów dynamicznych i przepływów niestacjonarnych – o ile występują. Podano również na jakie zjawiska należy zwracać uwagę w trakcie badań. Norma ASCE daje ogólne wytyczne i pozostawia badaczowi wiele możliwości a nie wytycza konkretnej ścieżki. W załączniku do normy zostały podane profile wiatru jakie należy uzyskać. Z uwagi na to, że każdy tunel wiatrowy jest inny, żadna norma nie podaje jak taki profil uzyskać. Każdorazowo konieczna jest kalibracja.



rys. 2.21 – Przeszkody stosowane do uzyskania ABL wewnątrz tunelu. a) iglice przy wlocie do komory pomiarowej tunelu [23], b) zestaw iglic oraz kostek wg [24], c) [18], d) kostki [16], e) poziome pręty generujące profil turbulencji wg [25].

Procedura uzyskiwania profilu wiatru w tunelu – z ang. Atmospheric Boundary Layer (ABL) została opisana między innymi w pracach [19],[21]÷[23],[25],[26]. Badacze skupili się na uzyskaniu pożądanych profili. Do uzyskania właściwego profilu wiatrowego stosuje się zestaw przeszkód w świetle tunelu, umieszczony na jego podłodze. Głównie stosuje się:

- prostokątne kostki – na długim obszarze przed modelem,

- iglice – w rejonie bliżej wlotu do tunelu,
- blokady przepływu na ulownicy przy wlocie do komory pomiarowej tunelu [25],

W pracach [21]÷[23] autorzy uzyskiwali profil prędkości oraz turbulencji (rys. 2.22). Zauważyli, że ciężko jest uzyskać pożądany profil prędkości i turbulencji jednocześnie a wybór jest efektem kompromisu pomiędzy dokładnością odwzorowania profilu prędkości i turbulencji. Autor podkreślił, że odwzorowanie turbulencji w tunelu ma większy wpływ na wyniki niż odwzorowanie warstwy przyściennej. Bardzo istotna w odwzorowaniu profili jest też długość tunelu wiatrowego. W tunelu o długości 30m, strefa przyścienna wytwarza się samoistnie [21], ale i tak zaleca stosowanie dodatkowych turbulizatorów. [27] podał, że zmiana warunków wewnątrz tunelu odbywa się z gradientem 1:10. Pomimo tego, są podejmowane próby zaadaptowania krótkich tuneli do tworzenia profili wiatru. Przykładem tego są badania opisane w pracy [26].

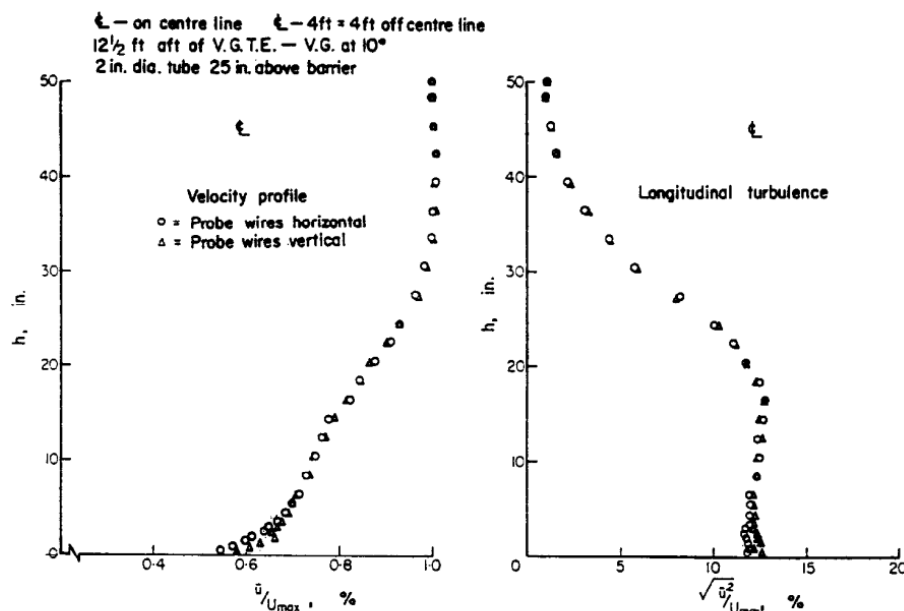
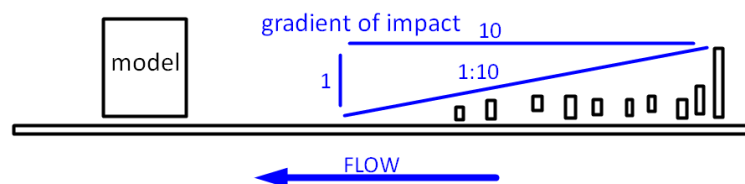


FIG. 2. Variation of velocity and turbulence intensity with height.

rys. 2.22 – Profile prędkości i turbulencji uzyskane w pracy [21].



rys. 2.23 – Gradient zmiany profilu wewnątrz tunelu wg [27].

W przypadku brył obrotowych (takich jak chłodnie kominowe) poza polem do strefy przyściennej przed badanym modelem istotna jest też szerokość tunelu oraz obszar za tunelem, do obserwacji wirów Bernarda von Kármán'a [21]. Przytoczone powyżej prace są starsze niż 50lat, jednak pewne problemy związane z kalibracją profilu wiatru pozostają aktualne. W nowej pracy [3] autorzy

również zaznaczają problemy z uzyskaniem profilu. Na podstawie badań zasugerowano również, że stosowanie normowych profili wiatrowych nie zawsze jest zasadne, gdyż są to obwiednie i powodują znaczne zawyżanie obciążenia wiatrem. W zamian autor proponuje jako warunek brzegowy stosowanie wyników lokalnych pomiarów. Takie podejście wymaga jednak wiedzy i doświadczenia wychodzących poza możliwości przeciętnego projektanta konstrukcji budowlanych.

Ustalanie obciążeń na podstawie badań, zwłaszcza w przypadku brył bez ostrych krawędzi, budzi pewne wątpliwości związane z pomniejszaniem modeli w skali. Jak podaje [4] oraz [11] poza podobieństwem geometrycznym samego modelu konieczne może być spełnienie bezwymiarowych warunków podobieństwa. Są to między innymi:

- liczba Froude'a* $\frac{f \cdot D}{V^2}$
- liczba Reynoldsa* $\frac{D \cdot \rho \cdot V}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu}$
- liczba Strouhala* $\frac{f \cdot D}{V}$
- liczba Eulera* $\frac{p}{\rho \cdot V^2}$
- liczba Prandta $\frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}$
- liczba Eckerta $\frac{V^2}{T \cdot C_p}$
- liczba Richardsons $\frac{\Delta T}{T} \cdot \left(\frac{g \cdot D}{V} \right)$

Gdzie: V – prędkość przepływu, f – częstotliwość odrywania wirów, D – wymiar charakterystyczny opływającego obiektu, μ i ν – lepkość dynamiczna i kinematyczna, ρ – gęstość, C_p – ciepło właściwe, T – temperatura. Symbolem „*” oznaczono wielkości bezwymiarowe, które wg [4] powinny być zachowane, aby uzyskać podobieństwo dynamiczne przepływów.

Jednoczesne spełnienie wszystkich warunków podobieństwa bardzo często nie jest możliwe, ale nie jest też konieczne. Dlatego skupia się na kluczowych warunkach podobieństwa [4][21][29]. Z punktu widzenia brył obrotowych najbardziej istotne jest zachowanie liczby Reynoldsa. Dla różnych liczb Re inaczej kształtuje się rozkład siły nośnej i oporu w czasie, oraz rozkład ciśnienia na powierzchni zakrzywionej. Często jednak nie jest możliwe spełnienie podobieństwa liczby Reynoldsa. Rozważmy model chłodni kominowej, o wysokości 80m. Zmniejszony w skali 1:100 na potrzeby badań w tunelu wiatrowym, musiałby zostać poddany prędkości 100× większej niż rzeczywista budowla, aby zachować liczby Re . Prędkość wiatru atmosferycznego na wysokości ok 80m wynosi 40m/s. Zatem konieczne byłoby uzyskanie w tunelu prędkości 4 000m/s, co nie jest możliwe. Alternatywą do uzyskania właściwej liczby Re jest zmiana gęstości, przez zwiększenie ciśnienia wewnątrz tunelu. Takie tunele na świecie istnieją, ale badania z ich użyciem są znacznie droższe. Powszechną praktyką w prowadzeniu badań walców, jest dobieranie chropowatości powierzchni tak, aby siła oporu aerodynamicznego dla modelu rzeczywistego i zmniejszonego w skali były sobie równe.

Samo odwzorowanie przepływu nie daje żadnych wyników badań, jeśli nie dokona się żadnego jego pomiaru. W badaniach aerodynamicznych mierzy się głównie:

- prędkości przepływu (punktowe, oraz całe pola prędkości),
- kierunków przepływu,
- siły (nośnej, oporu...),
- ciśnienia,
- częstotliwości harmoniczných zachowań przepływu.

Wybrane metody są opisane w kolejnych rozdziałach pracy.

2.4.1 Techniki pomiarowe przepływu stosowane w warunkach laboratoryjnych

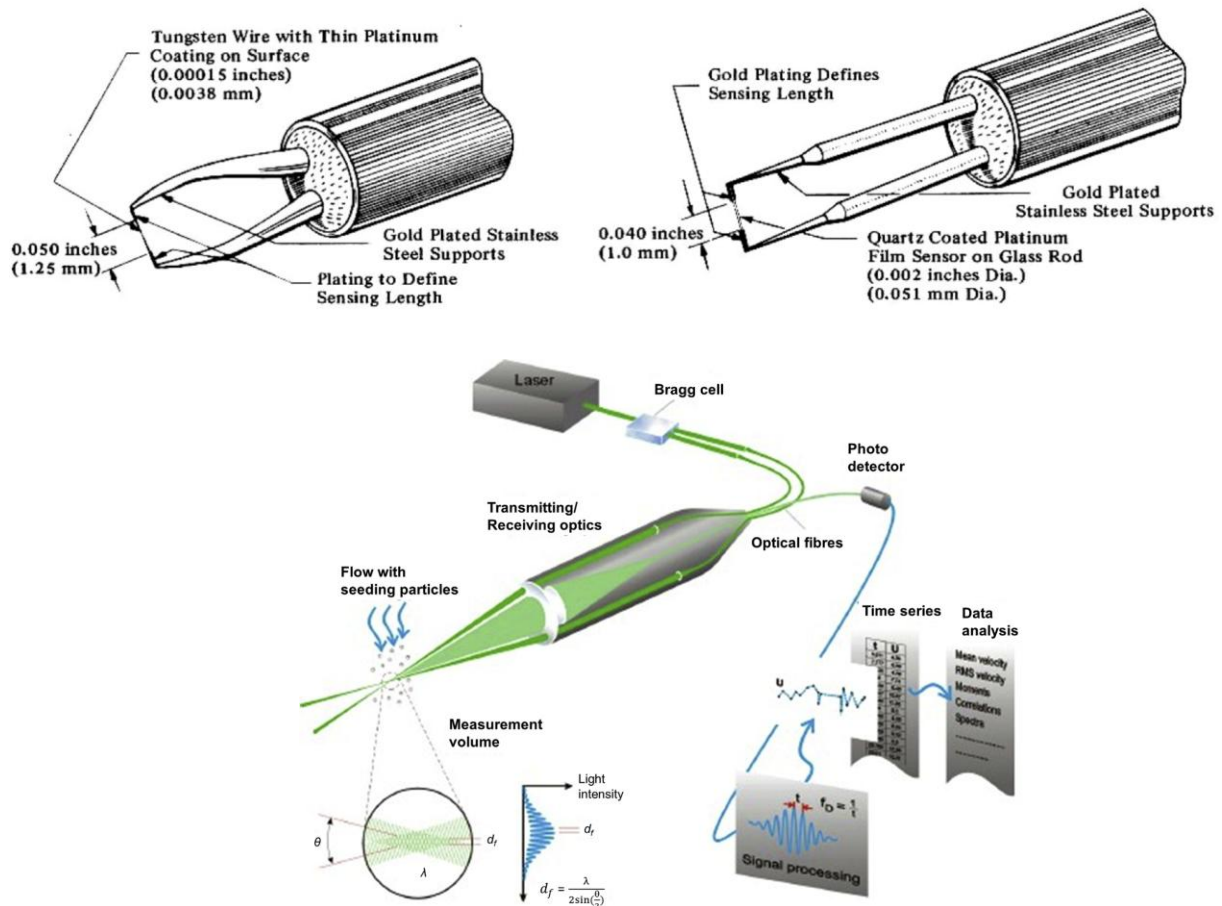
Jedną z najprostszych i najstarszych technik pomiarowych jest metoda saltacji piaskowej. Przykładowo została ona wykorzystana w pracy [18] do zbadania ogólnego charakteru przepływu powietrza w gęstej zabudowie miejskiej warszawskiej dzielnicy. Ta oraz inne metody pomiarowe, zostały zestawione i opisane w pracy [29] pod kątem wykorzystania do badania komfortu pieszych. Metoda saltacji piaskowej polega na rozsypaniu w obszarze modelu równomiernie rozłożonych drobnych cząstek, a następnie ich obserwacji pod wpływem ruchów powietrza w trakcie badania. Chociaż metoda jest dosyć stara, jest powszechnie stosowana do zagadnień związanych z komfortem pieszych (Predestian Level Wind – PLW) [30]. Metoda obrazuje miejsca w których prędkość przepływu przy powierzchni jest większa oraz ogólny kształt linii przepływu przy powierzchni (rys. 2.24). Nie daje jednak informacji o prędkościach przepływu.



rys. 2.24 – Metoda saltacji piaskowej przedstawiona w pracy [30]. Kolejno model przed rozpoczęciem badania, po 60s nawiewu 6m/s i po 60s nawiewu 7m/s.

Inną metodą jest metoda Hot Wire / Hot film Anemometry [29] (HWA, HFA), w której można mierzyć prędkość przepływu przyściennego poprzez obserwację „ochładzania” rozgrzanego elementu. Tę technikę zastosowano w pracy [31]. Metody HWA/ HFA polegają na pomiarze temperatury nagrzanego czujnika. Przepływające powietrze odbiera ciepło z czujnika a ten ochładza się. Wskutek zmiany temperatury zmienia się opór elektryczny przewodu w czujniku. Opór jest rejestrowany i

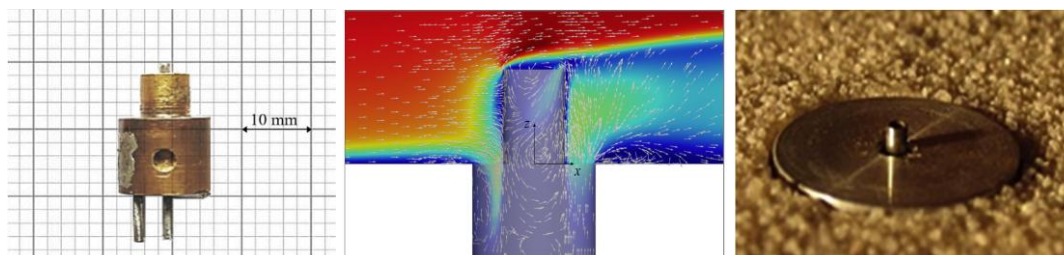
przeliczany na prędkość przepływu. Hot film Anemometry zastępuje pojedynczy drucik cienką warstwą (filmem) naniesioną na powierzchnię cienkiego pręta. Prędkość jest rejestrowana przez ochładzanie się filmu przez przepływające powietrze. Metoda HFA znajduje zastosowanie tam, gdzie przepływające powietrze / ciecz mogłaby uszkodzić pojedynczy drucik. Przykłady zastosowania można zleźć w pracach [31][32] a szkice czujników prezentuje rys. 2.25.



rys. 2.25 – Czujniki HWA i HFA oraz LDA przedstawione w pracy [29].

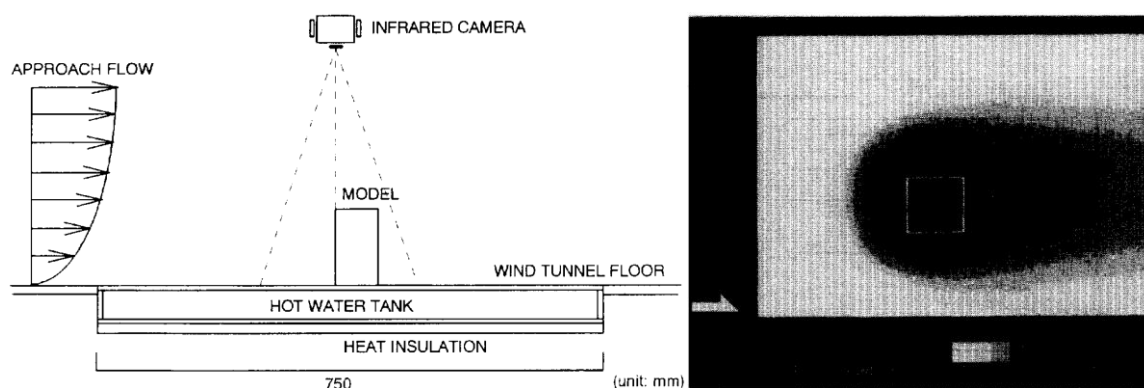
Inną metodą do pomiaru prędkości jest metoda Laser-Doppler Anemometry (rys. 2.25), która wykorzystuje efekt Dopplera na wiązce światła laserowego przechodzącego przez posiane powietrze. Posiew można wykonać na przykład generatorem dymu. Jej przykładowe użycie zostało zastosowane w pracy [33]. Sama aparatura jest dość droga, ale również bardzo dokładna i nie powoduje zaburzeń do badanego przepływu. Cechą tego czujnika jest kierunkowość pomiaru – czujnik dokonuje pomiaru prędkości w ustalonym kierunku.

Kolejna metoda – *Irwin Probe* została zaprezentowana w pracy [34]. Czujnik przytwierdza się do powierzchni modelu. Urządzenie składa się z dwóch rurek (z których węższa, dłuższa umieszczona jest wewnątrz szerszej rurki). Mierzy się różnicę ciśnień pomiędzy nimi i w ten sposób ustala się prędkość przepływu przy powierzchni. Badania nad zachowaniem czujnika przedstawiono w pracy [35]. Szkic urządzenia pokazano na rys. 2.26.



rys. 2.26 – Sensor Irwin, oraz zachowanie przepływu w jego okolicy, według pracy [35] oraz [29].

W pracy [36] zaproponowano wykorzystanie termografii do ustalania prędkości przepływu przy powierzchni (praca pochodzi z 1996r, ale jest tłumaczeniem oryginalnej wersji w języku japońskim z 1988r). W metodzie używa się kamery termowizyjnej do pomiaru temperatury przy powierzchni. Powierzchnia modelu musi być pod kontrolowaną temperaturą. Do utrzymania temperatury używa się masy o dużej bezwładności cieplnej i podgrzewania elektrycznego. Przepływające powietrze powoduje ochładzanie się ścian. Wykorzystuje się tutaj ścisłą zależność pomiędzy oddawaniem ciepła do powierza z przegród a prędkością przepływu. Mapy temperatur można przekonwertować na mapy prędkości przypowierzchniowych. Zależności temperatura-prędkość na potrzeby tej metody były przedmiotem odrębnych badań [37].



rys. 2.27 – schemat metody Infrared Thermography oraz przykładowy wynik badania przedstawione w pracy [36].

Metoda termografii sprawia wrażenie dającej spore możliwości, należy jednak pamiętać, że lokalne wprowadzanie zmiany temperatury do tunelu aerodynamicznego może w istotny sposób wpływać na sam przepływ. Pozostałe wyżej opisane metody również nie pozostają bez wpływu na przepływ. Rozsypany na dnie tunelu piasek w przypadku metody saltacji będzie zmieniał położenie i lokalnie zwiększał chropowatość powierzchni, a w przypadku odłożenia większej ilości nawet wpłynie jako zmiana geometrii. Czujniki HFA/HWA oraz Irwina choć są bardzo małe, stanowią miejsca lokalnie powstających turbulencji.

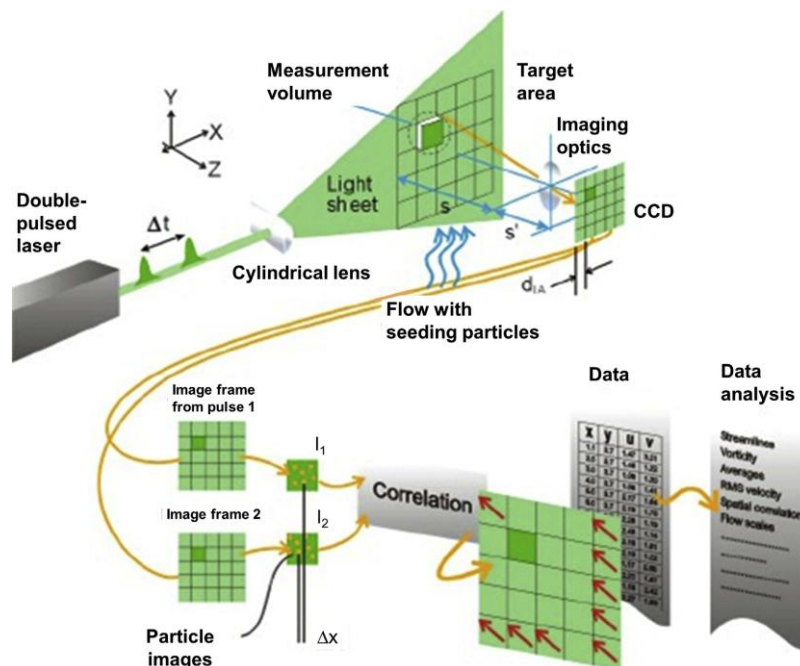
Opisane powyżej metody pomiaru wartości prędkości (za wyjątkiem termografii) dokonują pomiaru w jednym ustalonym punkcie. Metoda saltacji piaskowej i jej podobne obrazują w pewnym zakresie kształt przepływu, bez podania wartości prędkości. Bardziej nowoczesną i zaawansowaną

metodą jest metoda PIV (Particle Image Velocimetry), która pozwala na uzyskanie pól prędkości w ustalonych płaskich przekrojach. Zastosowanie PIV wymaga jednak posiania przepływającego w tunelu gazu pewnym wtrąceniem oraz dostępu (widoczności) ze ścian tunelu aerodynamicznego z dwóch wzajemnie prostopadłych kierunków. O ile posianie nie wpływa na charakter przepływu, uznaje się, że metoda PIV nie wpływa na mierzony przepływ [29].

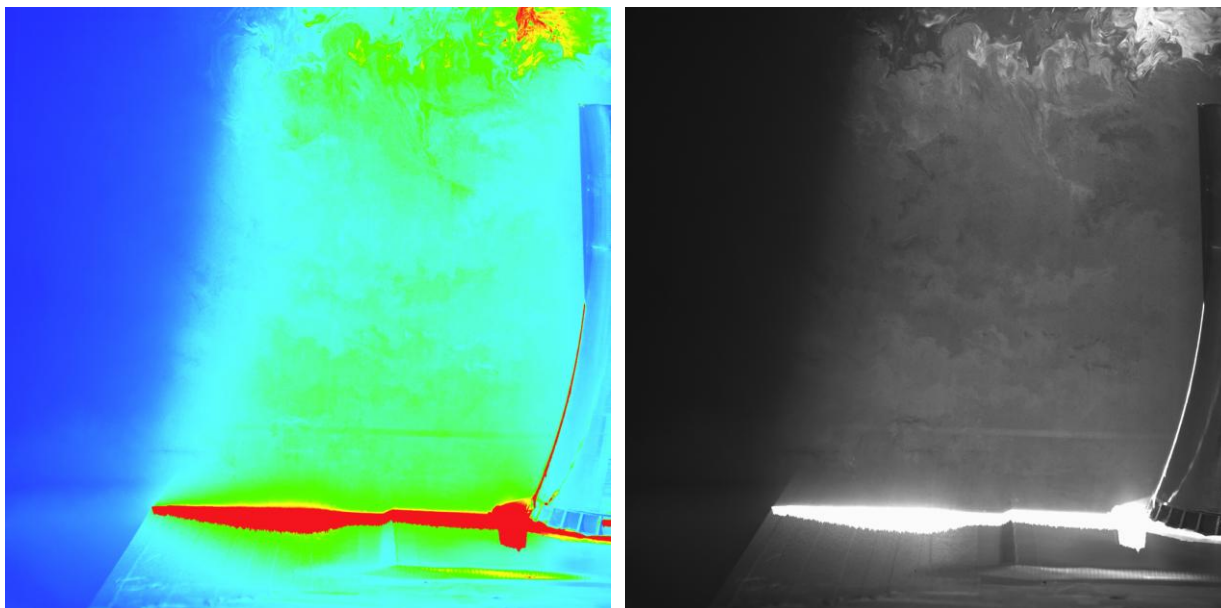
Zasada działania jest aparatury wydaje się tutaj prosta. Jak podają [29] lub [39], wiązką światła laserowego naświetla się przekrój, na którym ma być utworzony przekrój. Następnie w kierunku prostopadłym do płaszczyzny przekroju wykonuje się sekwencyjne fotografie kamerą o bardzo dużej szybkości wykonywania zdjęć. Jedna próba pomiarowa składa się z dwóch fotografii wykonanych po sobie w bardzo krótkim czasie. Przykładową fotografię z posianego dymem przepływu zaprezentowano na rys. 2.29. Następnie po dokonaniu pomiarów, w ramach pracy komputera z par zdjęć są tworzone pola prędkości.

W pamięci komputera obraz jest dzielony na kwadratowe sekcje o wymiarze 2^n (od 32 do 256) pikseli. Dwa obrazy, z pary zdjęć dla każdego sektora są nakładane. Jest wykonana operacja splotu (ang. Convolution) lub korelacji wzajemnej (ang. Cross-Correlation). W pracy [39] przedstawiono równanie (3-28). Produktem obliczeń jest para składowych wektora prędkości w płaszczyźnie pomiarowej światła lasera [39],[E-1].

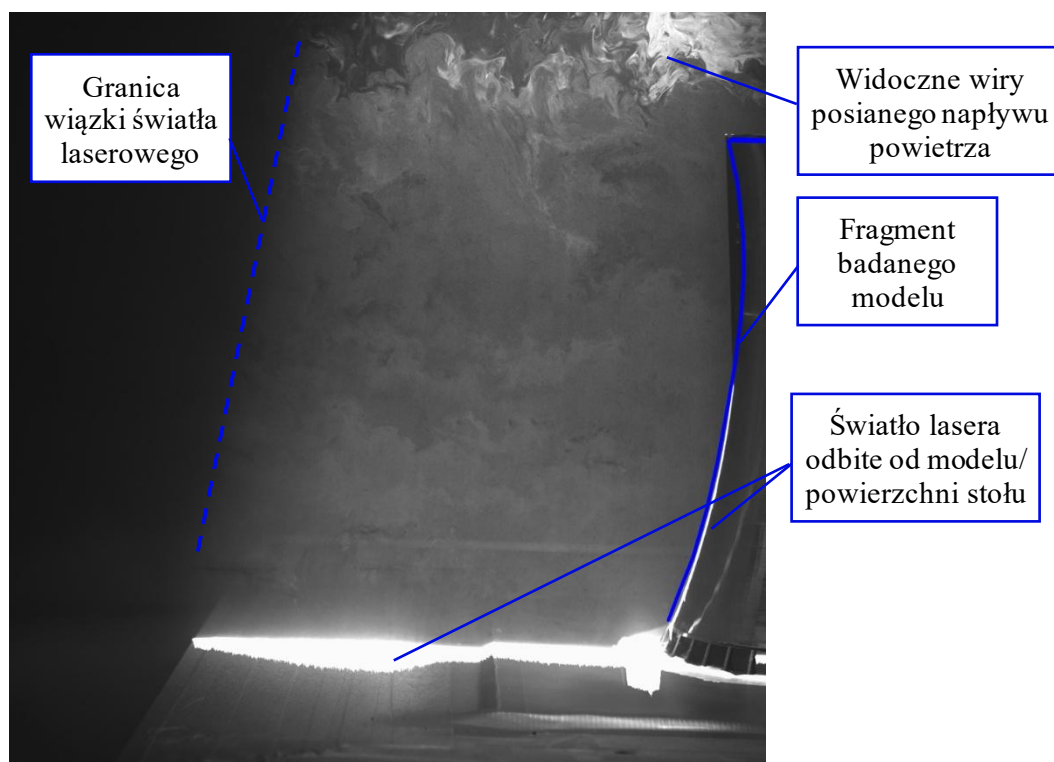
$$R(\delta_\xi, \delta_\eta) = \sum_{\xi} \sum_{\eta} I_1(\xi, \eta) I_2(\xi - \delta_\xi, \eta - \delta_\eta) \quad (2-31)$$



rys. 2.28 – Schemat działania metody PIV przedstawiony w pracy [29].



rys. 2.29 – Przykładowa fotografia kamerą PIV z autorskich badań. Obraz w skali szarości i skali kolorów RGB. Obszary o jaśniejszej barwie dają większą wartość funkcji I_n w równaniu (3-28).



rys. 2.30 – objaśnienia do rys. 2.29.

2.4.2 Techniki pomiarowe ciśnienia stosowane w badaniach

Do pomiaru ciśnienia w badaniach wykorzystuje się manometry. W przypadku badań laboratoryjnych na modelach pomniejszonych w skali umieszcza się w przygotowanych otworach rurki miedziane (rurki Pitota [E-2]), połączone przewodami z manometrem. Takie manometry umożliwiają jednoczesny pomiar dla wielu punktów. Przykładowo takie badania zaprezentowano w pracy [3], gdzie autor badał ciśnienie wewnątrz chłodni kominowej w trakcie oddziaływania wiatru. Korzystając z zależności pomiędzy ciśnieniem a prędkością, rurki Pitota są też wykorzystywane pośrednio do pomiaru prędkości.



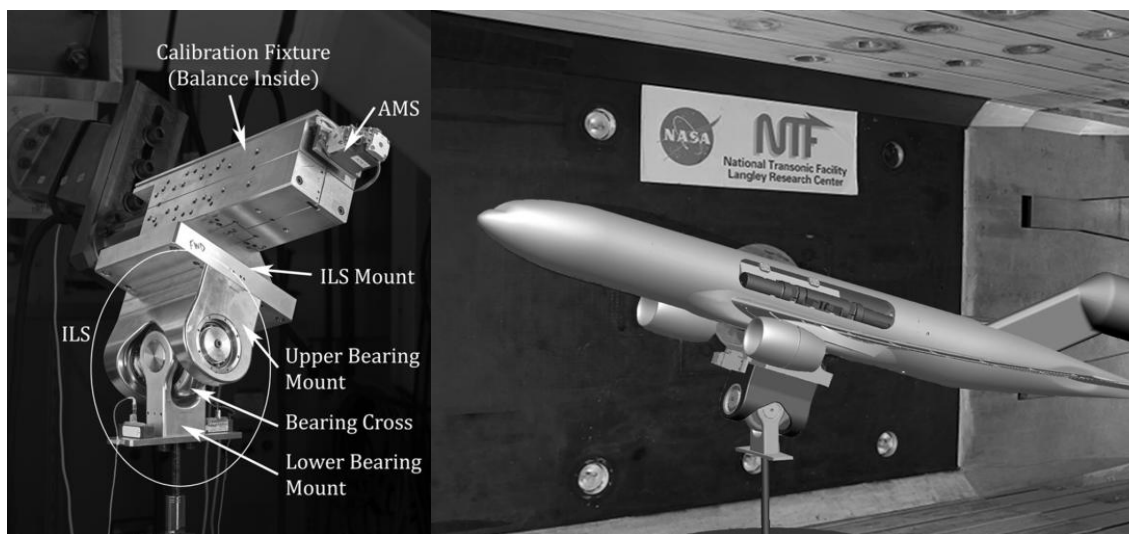
rys. 2.31 – Pomiar ciśnienia na modelu chłodni kominowej w badaniach [3]. Autor badał ciśnienie wewnątrz chłodni kominowej spowodowane zewnętrznym przepływem.

Pomiary ciśnienia są powszechnie stosowane w badaniach laboratoryjnych w tunelach, ale nie zostały wykorzystane w ramach tej pracy. Dlatego też nie zostaną szerzej omówione. W ramach pracy zostały natomiast podjęte działania mające na celu kompleksowy pomiar sił oddziałujących na model. Do tego celu został zbudowany prototyp wagi aerodynamicznej, do jednoczesnego pomiaru trzech niezależnych składowych siły i trzech składowych momentu działających na model. Chociaż ostatecznie nie udało się uzyskać wartościowych wyników, spora część uwagi poświęconej pracy przypadła właśnie na budowę wagi aerodynamicznej. O odrzuceniu wyników pomiarów zdecydowały spore wewnętrzne tarcia urządzenia, które uniemożliwiły powrót wagi do wskazania „zera” po zdjęciu obciążenia.

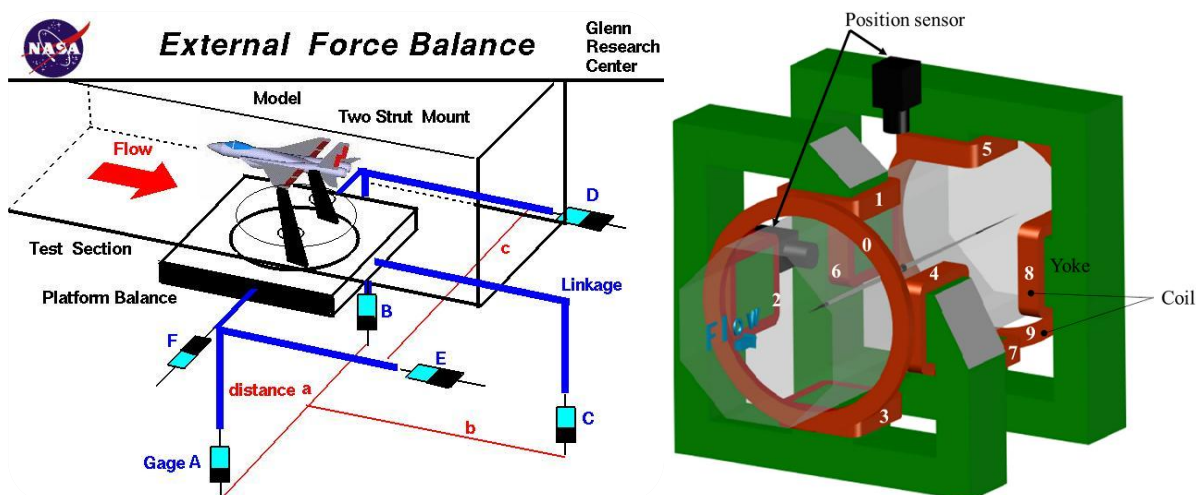
2.4.3 Pomiar sił oddziałujących na model

Na wypadkową siłę oddziałującą na badany model w tunelu aerodynamicznym złożone są 3 składowe siły i 3 składowe momenty. Do jednoczesnego pomiaru tych składowych z zadowalającym próbkowaniem służą wagi aerodynamiczne (z ang. *aerodynamic balance*, *aerodynamic scale*). Waga aerodynamiczna dokonuje jednoczesnego pomiaru siły z określonym próbkowaniem i określoną dokładnością. Ogólnie, wagi można sklasyfikować jako przetworniki siły. Z punktu widzenia aerodynamiki, wyróżnia się dwa podstawowe typy wag aerodynamicznych [40]:

- zewnętrzny – umieszczone na zewnątrz modelu, o ustalonej orientacji, rys. 2.32,
- wewnętrzny – zazwyczaj umieszczany wewnątrz badanego modelu, rys. 2.33.

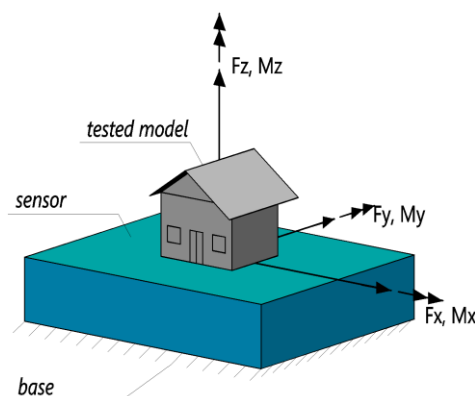


rys. 2.32 – Waga aerodynamiczna typu wewnętrznego wg zgłoszenia patentowego NASA 176[42], fotografie [43].



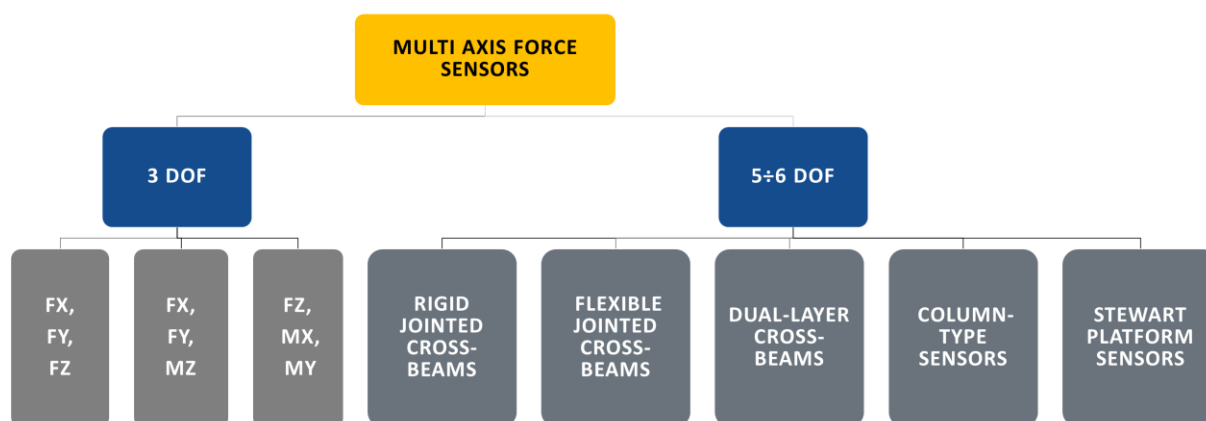
rys. 2.33 – Waga aerodynamiczna typu zewnętrznej wg [44].

Z uwagi na specyfikę, wewnętrzne przetworniki znajdują zastosowanie raczej w badaniach lotniczych czy balistycznych. Zewnętrzne przetworniki mają większy potencjał na wykorzystanie w budownictwie, chociaż są też stosowane w lotnictwie. Każda budowla opiera się na fundamencie lub innej konstrukcji wsporczej. Punkt oparcia modelu jest idealnym miejscem do umieszczenia wagi aerodynamicznej.



rys. 2.34 – proponowana lokalizacja dla zewnętrznej wagi aerodynamicznej [45].

Z technicznego punktu widzenia, urządzenia te stanowią zespół tensometrów umieszczony na odkształcalnym ciele w taki sposób, żeby było możliwe jednoczesne mierzenie składowych siły. Szeroki przegląd różnych rodzajów przetworników sił o wielu mierzonych składowych przedstawił Tempelman w 2020r [46]. W tej pracy zaproponowano również umowny podział – na czujniki 3-osiowe oraz 6 lub 5-osiowe rys. 2.35. Taki podział jest zaproponowany z uwagi na widoczne różnice w budowie i stopniu skomplikowania.

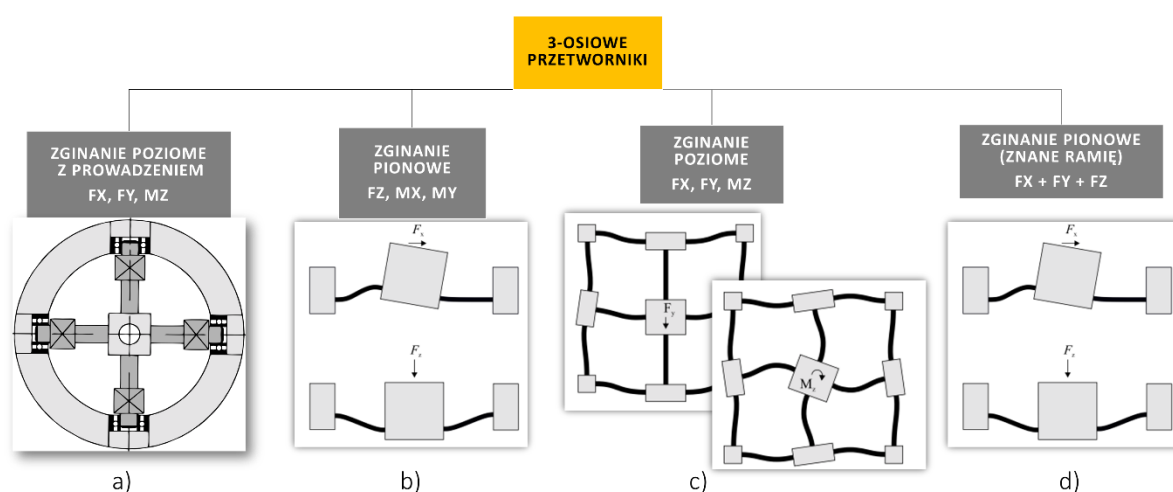


rys. 2.35 – Podział przetworników siły wg [46], ilustracja [45]. F_x, F_y, F_z , odpowiadają składowym siły wg. kierunków na Rys. 3.22, M_x, M_y, M_z – składowe momentów.

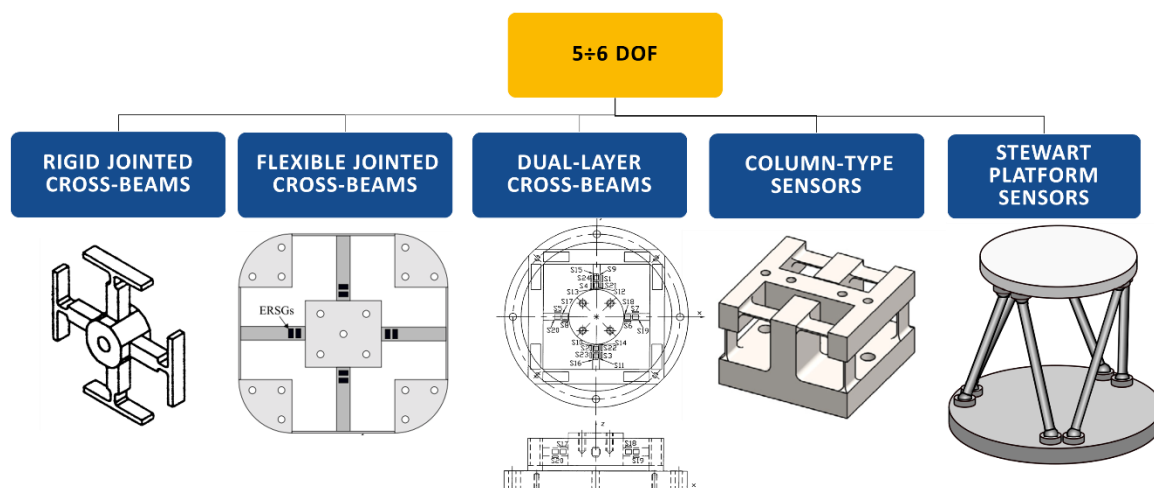
Przetworniki siły 3-osiowe wymagają 3÷4 odkształcalnych elementów, na których umieszczone są tensometryczne czujniki odkształcenia. Czujników może być więcej, ale większa ich ilość komplikuje kalibrację oraz wymusza większą liczbę kanałów zasilacza. W przypadku 3-osiowego czujnika,

opisanego na rys. 2.36, typów b) oraz d) różnica polega na znajomości ramienia działania siły. Jeśli ramię siły oddziałującej na urządzenie nie jest znane, zostanie zmierzona siła pionowa oraz pewien moment. Jeśli jednak ramię działania jest znane dokonuje się pomiar siły poziomej. Jak podaje 177[46] takie przetworniki znajdują zastosowania np. w manipulatorach (urządzeniach wskazujących, sterujących), gdzie mierzy się siłę nacisku palca, a ramię sił jest znane, bowiem wynika z budowy kontrolera.

Czujniki 5 i 6-osiowe są nieco bardziej złożone, ale nie konieczne skomplikowane. Stanowią one zazwyczaj złożenie dwóch różnych czujników 3-osiowych rys. 2.37. W ramach pracy został zaproponowany autorski przetwornik siły, do jednoczesnego pomiaru 6 składowych siły. Jego budowa jest opisana w rozdziale 7.



rys. 2.36 – Rodzaje 3-osiowych przetworników siły wg [46], oraz prac [47][48].



rys. 2.37 – Przetworniki 6-osiowe, podział zaproponowany przez Tempelmana [46].

Rysunki na podstawie 1 - Chen 1997 [47], 2 - Tempelmann 2020 [46], 3,4 - Kim 2007 [48], 5 - Tempelmann 2020 [46].

2.5 Numeryczne symulacje do wyznaczania rozkładu ciśnienia

Istnieje możliwość symulowania przepływów wokół geometrii budowli w pamięci komputera z zastosowaniem CFD (Computational Fluid Dynamics). Możliwości wykorzystania w dużej mierze ograniczają się do wyboru dostępnego oprogramowania. Niewątpliwą przewagą CFD nad badaniami w tunelu i czy in-situ jest ich niższy koszt oraz czas. Nie jest też wymagana specjalistyczna aparatura, kalibracja warunków brzegowych czy skalowanie modeli w celu zmieszczenia ich w tunelu aerodynamicznym. Wymagane jest jednak specjalistyczne oprogramowanie oraz dostępna duża moc obliczeniowa. Wykonywanie obliczeń przepływów, wymaga znacznie większej mocy obliczeniowej oraz dostępnej pamięci niż metoda elementów skończonych w zagadnieniach mechaniki w budownictwie i MES. Symulowanie przepływów często wiąże się z koniecznością prowadzenia analizy czasowej (transient) a przez wymagane zagęszczanie siatki bardzo szybko rośnie liczba węzłów siatki dyskretnej.

2.5.1 Podstawy teoretyczne i właściwości fizyczne

Dynamika płynów jest dziedziną nauki poświęconą zachowaniu się i przepływowi cieczy. Z punktu widzenia tej dziedziny powietrze jest właśnie cieczą, z dodatkowym parametrem – ściśliwością. W ujęciu komputerowym, przepływami zajmuje się „Computational Fluid Dynamics” (CFD). Pod pojęciem CFD kryje się bardzo szeroka dziedzina. Głównymi metodami są:

- Metoda Objętości Skończonych MOS / Finite Volume Method FVM
- Metoda Elementów Skończonych MES / Finite Element Method FEM
- Metoda Elementów Brzegowych MEB / Boundary Element Method BEM

W kolejnym rozdziale zostaną przedstawione wybrane zagadnienia z jej zakresu CFD, w tym podstawy fizyczne oraz metody rozwiązywania.

3 Wybrane zagadnienia z zakresu dynamiki płynów

3.1 MOC – mechanika ośrodków ciągłych

Dynamika płynów jest odłamem mechaniki ośrodków ciągłych (MOC). Z tego względu na początku rozdziału zostaną omówione wybrane podstawowe zagadnienia mechaniki ośrodków ciągłych. Przywołane w dalszej części prawa i wzory, zostały omówione w wielu książkach, artykułach, rozprawach oraz wykładach [52][53][54][55][58][59][60][61][62][E-7][E-8]. Ogólnie zajmuje się ona opisem zachowania (ruchem, odkształceniem, przepływem...) ciał odkształcalnych, cieczy lub gazów w skali makroskopowej. Traktuje się w niej ciała jako pewne homogeniczne objętości o jednorodnych właściwościach. MOC nie analizuje zatem ciał jako zbiorów cząstek wzajemnie na siebie oddziałujących. Do opisu matematycznego stosuje się rachunek tensorowy. Ten, z uwagi na swoją specyfikę oraz wymagany rygorystyczny reżim formalny zyskał miano odrębnej dziedziny matematyki.

Tensor – to obiekt matematyczny, uogólnienie pojęcia wektora. Jest stosowany powszechnie do opisu pól naprężeń lub odkształceń i innych wielkości. Tensor uniezależnia od przyjętego układu współrzędnych. Oznacza to, że nie zmienia się w zależności od przyjętego układu współrzędnych. Zmienia się natomiast jego reprezentacja w przyjętym układzie. Tensory mogą mieć wiele wymiarów – w zależności od potrzeb. Powszechnie stosowanym do opisu pola naprężeń jest „tensor Cauchy’ego” (3-1).

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

rys. 3.1 – Reprezentacja graficzna składowych tensora Cauchy’ego, na podstawie [E-6].

Układ współrzędnych, współrzędne krzywoliniowe – są stosowane do jednoznacznego wskazania punktu w przestrzeni. W przestrzeni trójwymiarowej, stosuje się dwa rodzaje opisów. Opis Eulera i Lagrange’a. W opisie Eulera układ odniesienia pozostaje nieruchomy, podczas gdy obserwowane ciało / ośrodek deformuje się. W opisie Lagrange’a śledzi się każdą cząstkę. W dynamice płynów powszechnie stosuje się opis Eulera. W zadaniach rozwiązywanych numerycznie wygodnie jest posługiwać się kartezjańskim układem współrzędnych, ale wynika to ze specyfiki oprogramowania, gdzie łatwo wprowadzać współrzędne w formacie X, Y, Z.

3.2 Operacje i specjalne symbole

W celu uproszczenia zapisu, wprowadza się specjalne operatory matematyczne do równań [52][E-5]. Symbol Nabla, Gradient, Rotacja, Dywergencja i Laplasjan.

- Symbol Nabla „ ∇ ” – operator matematyczny, wykorzystywany w definicji gradientu, rotacji i dywergencji.

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (3-2)$$

- Gradient jest wielkością tensorową. Oznacza zmianę wielkości w określonym kierunku – w przypadku przestrzeni 3-wymiarowej x , y lub z .

$$\nabla \Phi = \mathbf{i} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \text{grad} \Phi \quad (3-3)$$

- Dywergencja „ $\text{div } \mathbf{A}$ ” jest iloczynem skalarnym Nabla i wektora $\mathbf{A}$ (jest zatem wielkością skalarną).

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{\partial A_1}{\partial x} + \frac{\partial A_2}{\partial y} + \frac{\partial A_3}{\partial z} = \text{div } \mathbf{A} \quad (3-4)$$

- Rotacja „ $\text{rot } \mathbf{A}$ ” to iloczyn wektorowy Nabla oraz wektora $\mathbf{A}$.

$$\nabla \times \mathbf{A} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_1 & A_2 & A_3 \end{vmatrix} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (3-5)$$

- Laplasjan zwraca wartość powstałą w wyniku iloczynu skalarnego dwóch symboli Nabla.

$$\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3-6)$$

- Delta Kroneckera – jednostkowy tensor II-rzędu:

$$\delta_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{lub} \quad \delta_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{dla } i = j \\ 0 & \text{dla } i \neq j \end{cases} \quad (3-7)$$

W dalszej części pracy będą stosowane wprowadzone powyżej operatory matematyczne.

3.3 Podstawowe zależności i równania dynamiki płynów

(a) Skalarne i wektorowe pola właściwości ośrodka

Dynamika płynów jest dziedziną nauki, która zajmuje się zachowaniem i opisem przepływów cieczy oraz gazów. Jest ona jedną z dziedzin należących do mechaniki ośrodków ciągłych. W pewnym zakresie ma wiele elementów wspólnych z mechaniką ciał sprężystych. Przepływ płynu lub gazu można scharakteryzować za pomocą m. in. pól prędkości, ciśnienia, gęstości, temperatury. W opisie Eulera, pola te mają postać jak niżej:

$$\mathbf{w} = w(x, y, z, t) \quad (3-8)$$

$$\mathbf{p} = p(x, y, z, t) \quad (3-9)$$

$$\boldsymbol{\rho} = \rho(x, y, z, t) \quad (3-10)$$

W kartezjańskim układzie odniesienia i trójwymiarowej przestrzeni składowe pola prędkości można wyrazić w postaci jak niżej.

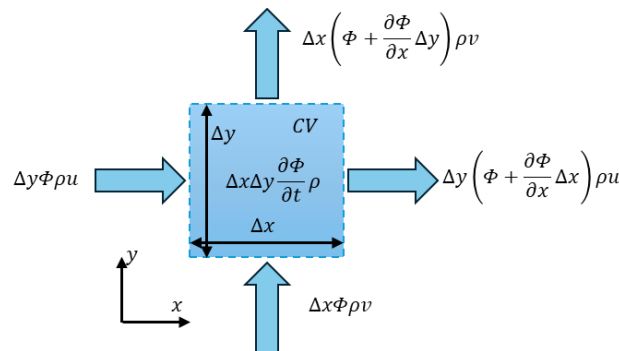
$$\begin{aligned} w_1 &= f_1(x, y, z, t) \\ w_2 &= f_2(x, y, z, t) \\ w_3 &= f_3(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (3-11)$$

Pola opisujące przepływ są zatem funkcjami położenia w trójwymiarowej przestrzeni oraz czasu. Opis staje się nieco prostszy w przypadku przepływu stacjonarnego. Wówczas pola nie są zależne od zmiennej czasu.

Wielkości takie jak gęstość, energia właściwa, prędkość, ciśnienie to wielkości niezależne od masy (intensywne). Do ich opisu stosuje się ogólny symbol Φ . Energia, składowe pędu, oraz sama masa to wielkości ekstensywne, czyli zależne od masy. Do ich opisu używa się symbolu F .

$$F = \int_{CM} \rho \Phi d\Omega \quad (3-12)$$

Gdzie CM / CV – to masa / objętość kontrolna a ρ to gęstość. F i Φ to kolejno wielkość ekstensywna i intensywna. W kartezjańskim układzie współrzędnych i dwuwymiarowej przestrzeni, jak podaje [58], przyrost zmiennej intensywnej wyraża równaniem podanym na poniższej ilustracji.



rys. 3.2 – Oznaczenia sił masowych działających na wyodrębnioną cząstkę ośrodka.

Opisane w poniższych punktach grupy wynikają z fundamentalnych praw i zasad, jak zasada zachowania pędu, zasada zachowania masy, I, II i III prawa dynamiki Newtona.

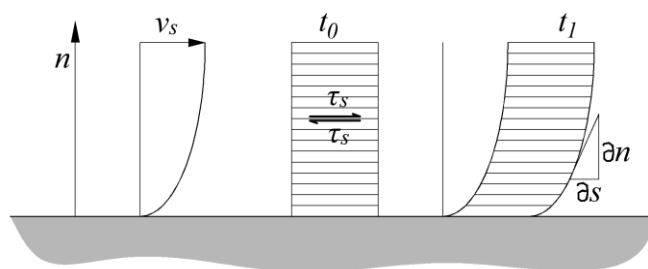
(b) Lepkość – równania konstytutywne

Płyny i gazy, w przeciwieństwie do ciał stałych nie wykazują sztywności postaciowej. Niemniej jednak w płynach występuje tarcie. Dzieje się tak za sprawą lepkości, która to jest cechą dynamiczną płynów, gdyż ujawnia się dopiero w momencie faktycznego ruchu. Opis lepkości różni się dla przepływów laminarnych i turbulentnych. Jak podaje Flaga [4], różnica pomiędzy zachowaniem laminarnym (uwarstwionym) a turbulentnym (burzliwym) ujawnia się w sposobie wymiany cząstek między kolejnymi „warstwami” płynu (rys. 3.3, „warstwy” – wydzielone myślowo pasma płynu, w których ruch płynu odbywa się w tym samym kierunku, lecz z inną prędkością).

- w przepływie laminarnym nie występuje wymiana cząstek, pomiędzy warstwami,
- w przepływie turbulentnym, pomiędzy warstwami następuje wymiana cząstek.

Powyższe zdanie dotyczy makroskopowego opisu ruchu, gdyż wymiana cząstek następuje zawsze, ale w skali mikroskopowej, przez co nie uwzględnia się jej w opisie ruchu ośrodka, a jedynie wyraża poprzez lepkość.

Z definicji, lepkość przypomina siłę tarcia pomiędzy warstwami. Różnica polega na tym, że lepkość jest zależna wprost proporcjonalnie od prędkości przepływu a nie do siły docisku jak w przypadku tarcia.



rys. 3.3 – Oznaczenia do wzoru (3-32). Tarcie pomiędzy wydzielonymi „warstwami” w przepływie laminarnym. Układ „warstw” w chwili początkowej t_0 i po chwili – t_1 .

$$\tau_s = \mu \cdot \frac{\partial v_s}{\partial n} \quad (3-13)$$

Gdzie τ_s oznacza naprężenie styczne pomiędzy warstwami, μ to właśnie lepkość, v_s to prędkość, różniczkowana po kierunku normalnym do „warstw” – n . Zatem naprężenie styczne jest tutaj wprost proporcjonalne do właściwej składowej prędkości.

Lepkość może być wyrażona w formie lepkości dynamicznej μ lub lepkości kinematycznej $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, gdzie ρ to gęstość. Opisywana powyżej lepkość ujawnia swoje właściwości przy ruchu

przypominającym „ściskanie” cieczy lub gazu. Obserwuje się jeszcze jeden rodzaj lepkości, zwany lepkością dylatacyjną lub drugą lepkością – ζ , (lub czasem ϵ , ξ , μ'). Lepkość dylatacyjna jest związana ze zmianą objętości, dotyczy zatem wyłącznie ośrodków ściśliwych. Podczas ściskania (i zmiany objętości), pewna część energii jest bezpowrotnie tracona, w wyniku dyssypacji energii. Tę właśnie dyssypację energii określa się mianem drugiej lepkości.

Tensor naprężenia można (3-15) rozłożyć na część odpowiedzialną za ciśnienie statyczne (3-15), oraz tensor prędkości odkształcenia postaciowego $s_{k,l}$ (3-16). μ jest natomiast tensorem IV rzędu, złożonym z 2 niezależnych składowych – μ i λ

$$\mu_{i,j,k,l} = \lambda \delta_{i,j} \delta_{k,l} + \mu (\delta_{i,k} \delta_{j,l} + \delta_{i,l} \delta_{j,k}) \quad (3-14)$$

$$\sigma_{i,j} = -p \cdot \delta_{i,j} + \mu_{i,j,k,l} s_{k,l} \quad (3-15)$$

$$s_{k,l} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_k}{\partial x_l} + \frac{\partial w_l}{\partial x_k} \right) \quad (3-16)$$

W II rozdziale pracy [4] Flaga (2007) podał wyprowadzenie wzoru Stokesa, na składowe tego tensora $\sigma_{i,j}$ (3-17). Poniższe równania, to równania konstytutywne płynu lepkiego. Równanie (3-18) i (3-19) to wersje rozpisane dla 3-wymiarowej ortogonalnej przestrzeni.

$$\sigma_{i,j} = -p \cdot \delta_{i,j} + 2\mu s_{i,j} - \frac{2}{3}\mu s_{k,k} \delta_{i,j} \quad (3-17)$$

$$\begin{aligned} p_x &= p - 2\mu \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{2}{3}\mu \operatorname{div} \mathbf{v} \\ p_y &= p - 2\mu \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{2}{3}\mu \operatorname{div} \mathbf{v} \\ p_z &= p - 2\mu \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{2}{3}\mu \operatorname{div} \mathbf{v} \end{aligned} \quad (3-18)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \mu \cdot \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \\ \tau_{zx} &= \mu \cdot \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\ \tau_{yz} &= \mu \cdot \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3-19)$$

$$\sigma_{i,j} = \begin{bmatrix} p_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \dots & p_y & \tau_{yz} \\ \dots & \dots & p_z \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

W których $p = \frac{1}{3}(p_x + p_y + p_z)$ jest wynikiem zwiężenia tensora ciśnienia $\sigma_{i,j} = -p \cdot \delta_{i,j}$.

(c) Siły działające na ciecz

W sytuacji, gdy ciecz lub gaz znajduje się w grawitacyjnym polu, lub nieinercyjnym układzie odniesienia, na ciecz oddziałuje siła masowa. Można ją zapisać w postaci (3-21), gdzie pod symbolami $\mathbf{F}$ i $\mathbf{a}$ kryją się wektory kolejno siły i przyspieszenia, a pod Ω rozpatrywana skończona objętość. Poza siłami masowymi występują również obciążenia powierzchniowe – przekazywane przez powierzchnię A umownie wyodrębnionej przestrzeni (rys. 3.2). Zgodnie z II zasadą dynamiki Newtona, jeżeli suma sił oddziałujących na cząstkę jest różna od zera, cząstka porusza się ruchem przyspieszonym.

$$\mathbf{F} = \mathbf{a} \cdot m$$

$$d\mathbf{F} = \mathbf{a} \int_{\Omega} \rho(x, y, z, t) d\Omega \quad (3-21)$$

$$\sigma = \frac{d\mathbf{F}_n}{dA}$$

$$\tau = \frac{d\mathbf{F}_t}{dA} \quad (3-22)$$

(d) Zasada zachowania pędu – równania ruchu

Równania ruchu wynikają z II zasady dynamiki Newtona. W opisie Eulera, wektor przyspieszenia w danym miejscu jest dany wzorem (3-23), w którym $\mathbf{F}$ z prawej strony równania oznacza wypadkowy wektor sił masowych oddziałujących na cząstkę.

$$\mathbf{a} = \frac{D\mathbf{w}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} + \mathbf{w}_x \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial x} + \mathbf{w}_y \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial y} + \mathbf{w}_z \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial z}$$

$$= \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p \quad (3-23)$$

$$\frac{Dw_x}{Dt} = \frac{\partial w_x}{\partial t} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{Dw_y}{Dt} = \frac{\partial w_y}{\partial t} + w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3-23-b)$$

$$\frac{Dw_z}{Dt} = \frac{\partial w_z}{\partial t} + w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

Z powyższych zależności można wyprowadzić równania Naviera-Stockesa (3-24). Są one szczególnym przypadkiem równań ruchu – właściwym dla płynu newtonowskiego (nieściśliwego). Równanie (3-25) uwzględnia lepkość i ściśliwość powietrza, co za tym idzie, jest właściwe do opisu ruchu powietrza. Zaprezentowane wzory w pracach [56][57] opisują zachowanie płynu newtonowskiego. Wiążą prędkość, ciśnienie i gęstość płynu, oraz zewnętrzne oddziaływania. Po rozpisaniu prawej strony równania na składowe, otrzymujemy zależności (3-26)(3-27), w których lewą stronę zastąpiono skróconym zapisem (3-27).

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{w}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{w}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{w}} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{\mathbf{w}} + \mathbf{F} \quad (3-24)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{w}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{w}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{w}} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{\mathbf{w}} + \left(\zeta + \frac{\mu}{3} \right) \nabla (\nabla \cdot \bar{\mathbf{w}}) + \mathbf{F} \quad (3-25)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{dw_x}{dt} &= \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) + \left(\zeta + \frac{\nu}{3} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + F_x \\ \rho \frac{dw_y}{dt} &= \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) + \left(\zeta + \frac{\nu}{3} \right) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + F_y \\ \rho \frac{dw_z}{dt} &= \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) + \left(\zeta + \frac{\nu}{3} \right) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + F_z \end{aligned} \quad (3-26)$$

Gdzie $\mathbf{w}$ to pole prędkości, ρ – gęstość, $\mathbf{F}$ – siły zewnętrzne (masowe), p – pole ciśnienia, μ – lepkość dynamiczna, ζ – lepkość dylatacyjna. Lepkość dynamiczną można wyrazić jeszcze w odniesieniu do gęstości $\nu = \mu/\rho$, wówczas zmienia się nieco kształt wzorów, ale istota pozostaje taka sama. Sens fizyczny lepkości zostanie przybliżony w następnym rozdziale. Lewą stronę równania, w skrócie, można zapisać krócej, jako $\rho \frac{d\bar{\mathbf{w}}}{dt}$ - równanie (3-27).

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{w}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{w}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{w}} \right) = \rho \frac{d\bar{\mathbf{w}}}{dt} \quad (3-27)$$

(e) Zasada zachowania masy – równanie ciągłości

Zasada zachowania masy zakłada, że w każdej chwili czasu t ilość materii pozostająca w rozpatrywanym obszarze nie zmienia się:

$$m = \text{const} \quad (3-28)$$

$$m = \int_{\Omega} \rho(x, y, z, t) d\Omega$$

Jeżeli w czasie nie następuje zmiana masy, prawdziwym jest równanie (3-29). Podstawiając powyższe równania (3-28) otrzymuje się zależność (3-30)

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (3-29)$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho(x, y, z, t) d\Omega = 0 \quad (3-30)$$

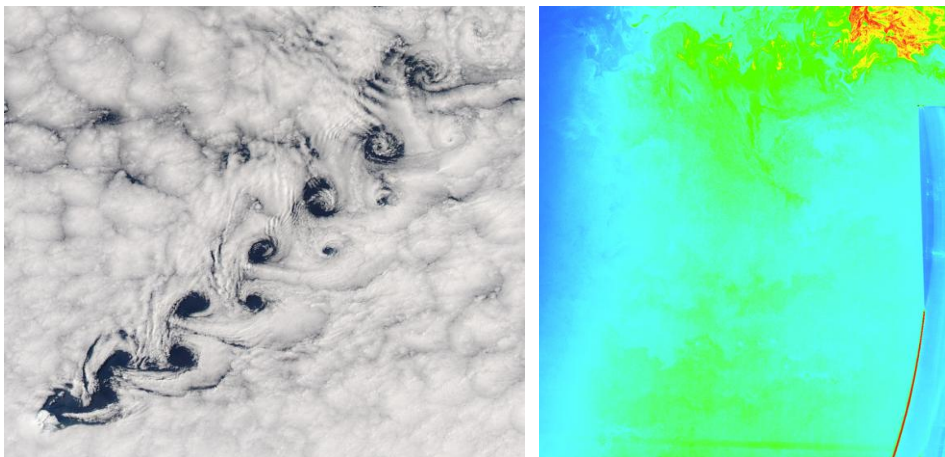
Jak podaje [4] rozwiązanie tej całki w formie (3-31) lub [52] w postaci (3-32) jest nazywane równaniem ciągłości, w którym $\mathbf{w}$ odnosi się do pola prędkości. Rozwiązanie jest możliwe, o ile $\mathbf{w}$ jest różniczkowalne. Rozwiązanie zostało opisane w pracy

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \mathbf{w} = 0 \quad (3-31)$$

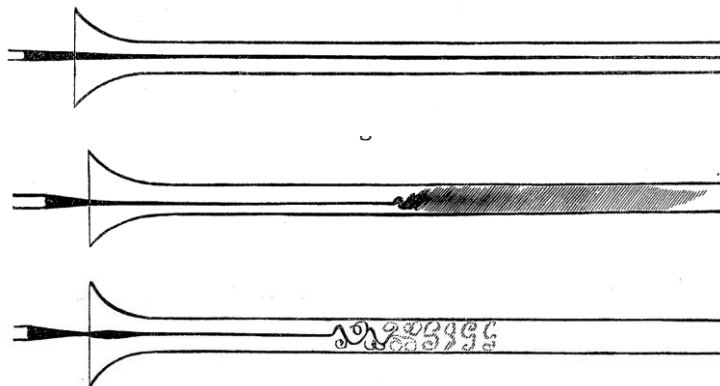
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial \mathbf{w}_1}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{w}_2}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{w}_3}{\partial z} \right) = 0 \quad (3-32)$$

3.4 Turbulencja

Z uwagi na pewne mikroskopowe ruchy ośrodka (gazu), nie jest możliwe opisanie wszystkich ruchów powietrza i fluktuacji. W poruszających się cieczach lub gazach, występują wiry. Osiągają one wymiary od bardzo dużych – łatwo obserwowalnych gołym okiem poprzez bardzo małe – ledwo widoczne, aż po te w skali mikroskopowej (rys. 3.4 ÷ rys. 3.6 zawierają przykłady). Bezpośrednie uwzględnienie wszystkich zawirowań, wymagałoby posługiwania się prawie nieskończenie małą siatką. Ograniczeniem rozmiaru siatki praktycznie mogłaby być wielkość atomów, ale rozpatrujemy ciecz jako ośrodek ciągły a nie oddziałujące między sobą cząstki. Stosowanie przesadnie małych siatek nie jest właściwe, gdyż znacząco zwiększa liczbę elementów, tak że rozwiązanie staje się niemożliwe oraz rośnie numeryczny błąd zaokrągleń rozwiązania.



rys. 3.4 – Wiry obserwowane za przeszkodą. Po lewej wiry von Karmana odbite na chmurze [E-9], po prawej drobne zawirowania uchwycone za badanym modelem.

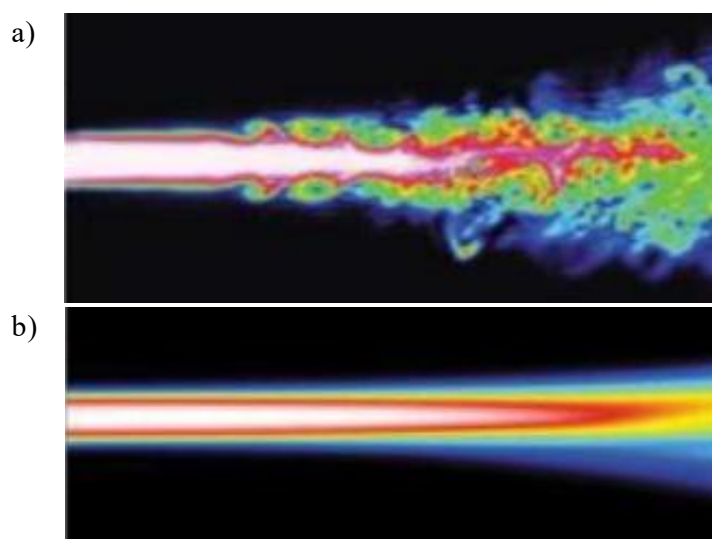


rys. 3.5 – Różne rodzaje przepływu zaobserwowane przez Reynoldsa [63]. Przepływ laminarny, oraz przepływ turbulentny.

Powszechną praktyką stosowaną w numerycznych rozwiązaniach jest uśrednianie pól. Obliczone pola wyników (prędkości, ciśnienia...) są uśredniane, więc traci się pewne informacje. W zamian dodaje się pole, które zawiera średnie odchylenie standardowe. W tym celu do opisu wprowadza się dodatkowe pola – turbulencji. Od tej pory pola wyników zawierają dwie główne składowe – wartość średniej oraz turbulencji.

Pola prędkości, ciśnienia, gęstości (i inne) można wyrazić jako sumę uśrednionego pola $\hat{\varphi}$ oraz pola turbulentnego φ' (3-33) [4]. rys. 3.6 ilustruje różnice pomiędzy polem uśrednionym oraz dokładnie (lub raczej „dokładniej”) odwzorowanym.

$$\varphi = \hat{\varphi} + \varphi' \quad (3-33)$$



rys. 3.6 – Przepływ turbulentny: a) odwzorowany z dużą dokładnością,
b) odwzorowany za pomocą turbulencji

Stosuje się uśrednianie wyników w czasie (3-34) oraz w pewnej przestrzeni geometrycznej (3-35). Uśrednianie wartości powoduje ujednolicenie mierzonej wielkości w wybranym obszarze i całym wybranym kroku uśrednienia. Poniższe równania określają zależność pomiędzy polem rzeczywistym a uśrednionym.

$$\hat{\varphi}(r, t)|_{t^*, \Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t^* - \frac{\Delta t}{2}}^{t^* + \frac{\Delta t}{2}} \varphi(r, t) dt = \bar{\varphi}(r, t^*, \Delta t) \quad (3-34)$$

$$\hat{\varphi}(r, t)|_{r^*, \Delta \Omega} = \frac{1}{\Delta \Omega} \int_{\Delta \Omega(r^*)} \varphi(r, t) d\Delta \Omega = \varphi^{sr}(r^*, \Delta \Omega, t) \quad (3-35)$$

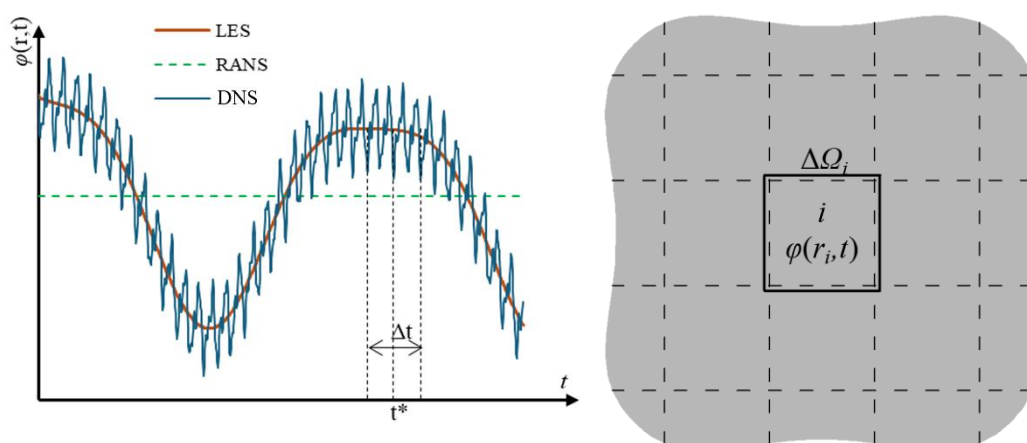
Gdzie Δt to przedziały czasu uśredniania, tożsame z założonymi w analizie krokami przyrostu czasu, a $\Delta \Omega$ to obszary uśredniania przestrzennego – odpowiadające rozpatrywanym elementom skończonym w przypadku obliczeń metodą FVM.

Istnieje wiele metod rozwiązywania przepływów z uwzględnieniem turbulencji. Noszą one ogólną nazwę modeli turbulencji. Na początek, wszystkie modele turbulencji można podzielić na trzy ogólne grupy [4],[E-10]:

- DNS (Direct Numerical Simulation – obliczanie pełnych równań N-S bez modelu turbulencji),
- LES (Large Eddy Simulation – modeluje tylko duże wiry, małe traktuje modelem turbulencji),
- RANS, uRANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes, Unsteady RANS – pełne symulowanie wirów turbulencją),

Poza wyżej wymienionymi istnieją jeszcze alternatywne metody, na przykład metody bezsiatkowe, które nie korzystają z klasycznych siatek metody objętości skończonych. Niemniej jednak wybór modelu turbulencji oraz budowa siatki objętości skończonych są ze sobą powiązane. Już na etapie siatkowania modelu trzeba bowiem wiedzieć do jakiego typu turbulencji siatka jest tworzona. Przykładowo, zgrubna siatka właściwa dla modelu RANS, k- ϵ nie będzie dostatecznie dokładna dla modeli LES. W modelach turbulencji najistotniejszą rolę odgrywa siatka zlokalizowana najbliżej ściany przegrody.

O doborze modelu turbulencji decydować powinny modelowane warunki. Różne modele turbulencji sprawdzają się w innych warunkach przepływu (geometria, prędkość, lepkość, gęstość). Najczęściej odnosi się modele turbulencji do liczb Reynoldsa Re . Dodatkowo w pewnych zakresach liczb Re przepływ odznacza się znaczną zmiennością w czasie, dlatego konieczne jest rozwiązywanie zagadnienia przepływu niestacjonarnego (analiza „transient”).



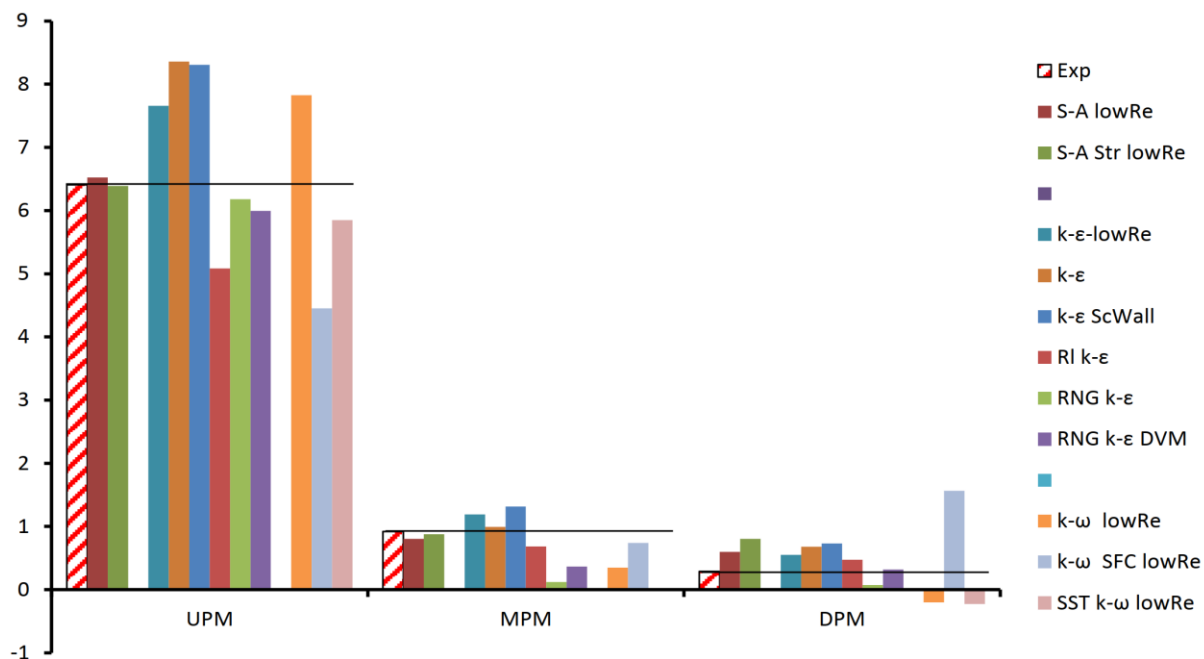
rys. 3.7 – Oznaczenia do równań (3-34) i (3-35) według [4].

Istnieje wiele modeli turbulencji zaproponowanych na przestrzeni ostatnich 80 lat. Listę wybranych znaczących modeli zawiera tablica 3.1. Jest to lista modeli zaimplementowanych w programie Ansys Fluent 2024R1, uzupełniona o modele, które dokładniej opisał Flaga [4]. Poza wymienionymi poniżej modelami turbulencji oprogramowanie oferuje jeszcze model „Laminar” pod

którym nie kryje się żaden dedykowany model, ale jest rozwiązywany pełny zestaw równań Naviera-Stockesa (N-S) z pominięciem pól turbulencji.

Tablica 3.1 – zestawienie wybranych modeli turbulencji

Model / podmodel		Liczba równań
Inviscid – pominięcie lepkości [E-13] (rozdział 9.5)		0
hipoteza długości drogi mieszania	Prandtl [4]	0
	Baldwin-Lomax [E-11]	
Spalart-Allmaras [64],[E-14] (rozdział 4.2)		1
k- ε [4]	Standard	2
	RNG	
	Realizable	
k- ε / k- ω	SST [E-16]	2
k- ω [4]	Standard	2
	Generalized (GEKO)	2
	BSL	2
	WJ-BSL-EARSM	>2
Transition k-k ℓ - ω [E-12]		3
Transition SST [E-14] (rozdział 4.7)		4
Reynolds Stress	Linear pressure-strain	7/8
	Quadratic pressure-strain	
	Stress-Omega	
	Stress-BSL	
Scale-Adaptive Simulation (SAS)		2
Detached Eddy Simulation (DES)	Realizable k- ε	2
	k- ω SST	
Large Eddy Simulation [4], 4.16.2 w podręczniku [E-14]	Smagorinsky-Lilly [4], [E-14]	0
	WALE/WMLES [70], [E-14]	
	RNG-LES model [E-17]	
	Algebraic Dynamic model [69]	
	Kinetic Energy Transport [E-14]	1
Discrete Vortex Method (DVM) [4]		



rys. 3.8 – Porównanie siły oporu otrzymanych z zastosowaniem wybranych modeli turbulencji wg [65]. Na osi pionowej poziom mierzonej siły – pierwszy słupek danych to badanie laboratoryjne.

Pewnego porównania zestawionych niektórych z powyższych modeli dokonali Li, Liu, Luo i Man [65] (rys. 3.8). Porównanie modeli na podstawie wielkości siły oporu działającej na walec.

3.5 Wybrane modele turbulencji

Warto na początku wprowadzić kilka pojęć i zmiennych, które zostaną wywołane później w dalszych podrozdziałach. Jak podaje [4], z uśrednienia czasowego klasycznych równań N-S wynikają równania ruchu uśrednionego (3-36), czyli głównego, bez turbulencji:

$$\rho \cdot \frac{\partial w_i}{\partial t} = f_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{i,j} + \tau_{i,j}^*) \quad (3-36)$$

Tensor naprężeń występujących w płynie $\tau_{i,j} = -\rho \overline{v_i \cdot v_j}$, natomiast $\bar{\tau}_{i,j}$ wynika z równania (3-16). w_i to składowe wektora prędkości.

$$\bar{\tau}_{i,j} = \mu \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) \quad (3-37)$$

Należy jeszcze dodać, że część turbulentna przepływu średnio daje wartość zero, a zatem:

$$\frac{\partial w_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3-38)$$

3.5.1 Model bez lepkości – *Inviscid*

W tym wypadku analiza pomija lepkość płynu. W przypadku programu *Ansys Fluent*, na podstawie rozdziału 9.5 podręcznika [E-13] model *Inviscid* znajduje zastosowanie, na przykład dla bardzo dużych prędkości, kiedy to siły spowodowane ciśnieniem gazu znacząco przewyższają siły lepkościowe. Ponieważ nie wprowadza dodatkowych równań, ta analiza jest szybka. Model płynu bez lepkości sprawdza się w obliczeniach wstępnych, procesach optymalizacji (kiedy konieczne jest wielokrotne powtórzenie obliczeń), lub do wstępnego szacowania pól (można wykonać pewną liczbę kroków obciążenia tym modelem, następnie przełączyć na bardziej złożony model turbulencji).

3.5.2 Model Boussinesq’a

Na podstawie hipotezy Boussinesq’a (przytoczona w [4]), która zakłada, proporcjonalność naprężeń turbulentnych $\tau_{i,j}$ do wektora prędkości (3-39). Współczynnikiem proporcjonalności pomiędzy naprężeniami turbulentnymi a prędkością jest wielkość skalarna $\mu_{i,j}$ – turbulentny dynamiczny współczynnik lepkości, wielkość skalarna.

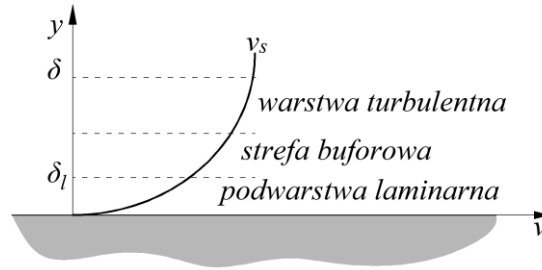
$$\tau_{i,j} = \mu_{i,j} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} - \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) \quad (3-39)$$

Model Boussinesq’a bezpośrednio nie jest stosowany w programach obliczeniowych, ale stanowi podstawę teoretyczną do innych modeli.

3.5.3 Hipoteza długości mieszania

Została zaproponowana przez Prandta w 1904 jak podaje Flaga [4]. Na jej podstawie powstały modele, np. Prandtla oraz jego dalsze rozwinięcie Baldwin-Lomax. W całym przepływie największe gradienty prędkości przepływu występują właśnie w warstwach przyściennych. Gradient prędkości w kierunku normalnym do opływanej powierzchni powoduje powstanie znacznych naprężeń stycznych. Model zakłada, że w obszarach odległych od powierzchni lepkość ma pomijane znaczenie, a dominują siły spowodowane ciśnieniem. Podstawowe założenia modelu:

- droga mieszania rośnie liniowo, wraz z odległością od opływanej przegrody,
- w warstwie przyściennej naprężenie styczne ma stałą wartość,
- w warstwie laminarnej, za naprężenia styczne odpowiada lepkość a w pozostałej części turbulencja.



rys 3.1 – Podział strefy przyściennej [4], δ_l – grubość warstwy przyściennej.

Profil prędkości jest dany wzorem

$$\frac{\bar{w}_i}{w_{ref}} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left[\frac{y}{y_{ref}} \right] \quad (3-40)$$

$$\tau_{x,y} = \mu \frac{v_l}{\delta_l} = \text{const}$$

W którym w_{ref} , y_{ref} i κ to parametry chropowatości powietrza (stałe, wielkości skalarne).

Baldwin-Lomax To model do rozwiązywania zagadnień przyściennych. Nie oblicza profilu prędkości w strefie przyściennej, lecz z góry go zakłada. Ten model również nie wprowadza dodatkowych równań. Lepkość w strefie przyściennej jest zmienną z góry założonej funkcji.

$$\mu_t = \begin{cases} u_{in} & \text{jeżeli } y \leq y_{lim} \\ u_{ext} & \text{jeżeli } y > y_{lim} \end{cases} \quad (3-41)$$

W którym lepkość przyścienna jest dana równaniem Prandtl'a – Van Driest'a:

$$\mu_{in} = \rho l^2 \left| \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} - \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) \right| \quad (3-42)$$

Wielkość l jest tutaj wartością obliczaną na podstawie przyjętej stałej oraz odległości od strefy przyściennej. To ta wielkość kształtuje profil lepkości przyściennej i można ją obliczyć na podstawie wzoru van Driesta, w którym A to parametr odniesienia.

$$l = \kappa y \left[1 - e^{\left(-\frac{y w_{ref}}{w A} \right)} \right] \quad (3-43)$$

Model dobrze radzi sobie z szybkim rozwiązaniem zadań przy dużej prędkości przepływu oraz cienkiej warstwie przyściennej. Wymaga jednak dobrej siatki i pierwszego elementu przyściennego o $y^+ < 1$.

3.5.4 Spalart-Allmaras

Został opisany dokładniej w rozdziale 4.2 podręcznika [E-14]. To model 1-równaniowy, w którym występuje równanie (3-44) transportu dla kinetycznej lepkości wirowej (*Kinetic Eddy Viscosity*). Modeluje się lepkość turbulentną, a nie energię turbulencji. Znajduje zastosowanie

w obliczeniach przy dużych prędkościach i małych warstwach przyściennych. W swojej pierwotnej formie jest podatny na siatkę warstwy przyściennej (wymaga $y^+ = 1$). Wymaga warstwy przyściennej podzielonej na co najmniej 15 warstw.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\mathbf{v}}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{\mathbf{v}} u_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_v} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{\mathbf{v}}) \frac{\partial \tilde{\mathbf{v}}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\mathbf{v}}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + C_{\tilde{\mathbf{v}}} \quad (3-44)$$

Gdzie G_w – skala wytwarzania lepkości turbulentnej, Y_w – skala zanikania lepkości turbulentnej w strefie przyściennej. σ_v i C_{b2} to stałe modelu.

3.5.5 Model k-ε

To jeden z najbardziej popularnych modeli. Jest modelem wprowadzającym 2 dodatkowe równania i 2 dodatkowe niewiadome – energię kinetyczną turbulencji k oraz dyssypację tejże energii ε . Opis modelu został przedstawiony między innymi w [4] oraz [E-15]. Tensor turbulentnej składowej naprężeń może być dany wzorem (3-45):

$$\tau_{i,j}^* = \mu_t \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} - \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{i,j}$$

$$\mu_t = \frac{\rho c_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (3-45)$$

Gdzie c_μ to stała.

Wprowadzone zmienne – ε i k są również niewiadomymi polami, nie stałymi. Wprowadza się dodatkowe równania transportu do układu równań z uwagi na energię turbulencji (3-46) i dyssypację (3-47). Poniższe równania odnoszą się do klasycznej postaci modelu (k-ε – Standard). Doczekał się on jednak kilku modyfikacji, dla których zmieniają się poniższe równania.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k w_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3-46)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon w_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1,\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{3,\varepsilon} P_b) - C_{2,\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3-47)$$

$$\text{Gdzie: } \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad P_k = -\rho \overline{w'_i w'_j} \frac{\partial w_j}{\partial x_i}, \quad P_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{\rho \Gamma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad \beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

Natomiast stałe modelu przyjmują wartości: $C_{1,\varepsilon} = 1,44 \div 1,45$, $C_{2,\varepsilon} = 1,92 \div 2,0$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,30$. Wartości mogą się nieznacznie różnić w zależności od źródła. Model k-ε doczekał się bowiem wielu wariantów.

Model k- ϵ znajduje szerokie zastosowanie w modelowaniu przepływu płynu nieściśliwego przy małych prędkościach. Przykładowo w przepływach wewnątrz przewodów powietrza / spalin. Sprawia jednak problemy modelowanie przepływów przy skomplikowanych geometriach oraz jest wrażliwy na przyjęte warunki brzegowe. Ten model nie odwzorowuje również dobrze przepływów przyściennych – używa do nich matematycznych funkcji dla przyściennych profili prędkości.

3.5.6 Model k- ω

jak podaje [4] założeniem modelu k- ω jest uzależnienie od siebie wirowatości i energii kinetycznej turbulencji.

$$\omega = \frac{ck^2}{l_m}, \quad \mu_k = \frac{\rho k}{\omega} \quad (3-48)$$

Model wprowadza dwa nowe równania: (3-49) (3-50) oraz dwa nowe pola zmiennych: k oraz ω . Parametry modelu

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{w}_i k)}{\partial x_j} = \frac{\partial(\tau_{i,j}w_j)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(w + \sigma\mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \beta^* k \omega \bar{\rho} \quad (3-49)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\omega) + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{w}_i \omega)}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \frac{\partial(\tau_{i,j}w_j)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(w + \sigma\mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - \beta \omega^2 \bar{\rho} \quad (3-50)$$

Tablica 3.2 – stałe parametry modelu k- ω , na podstawie [4]

$\alpha = 5/9$	$\beta = 0,075$	$\beta^* = 0,09$	$\sigma = 0,5$	$\sigma^* = 0,5$
----------------	-----------------	------------------	----------------	------------------

Model turbulencji k- ω dobrze odwzorowuje przepływ w pobliżu przegród, w tym przyścienne gradienty prędkości. Jest również skuteczny w modelowaniu oderwania strugi laminarnej od powierzchni walca. Z drugiej strony k- ω kiepsko radzi sobie z odwzorowaniem turbulencji z dala od powierzchni przegród oraz przepływem swobodnym. Model k- ω , podobnie jak model k- ϵ , jest szybki w rozwiązaniu.

3.5.7 k- ω SST

To w praktyce inżynierskiej na potrzeby budownictwa najczęściej stosowany model. Został sformułowany w 1993 przez F. R. Menter'a [66][67]. To model hybrydowy, który łączy modele k- ω i k- ϵ poprzez funkcje mieszania. W skrócie model SST w zależności od potrzeb przełącza się pomiędzy modele turbulencji k- ω i k- ϵ . Dzięki temu z jego zastosowaniem można dobrze odwzorować turbulencję swobodnego przepływu, ale również gradienty prędkości w strefach przyściennych opływanych kształtów (również cylindrycznych). Kosztem stosowania modelu k- ω SST jest jednak nieco większa pracochłonność maszyny, dodatkowo spotęgowana gęstszą niż w przypadku pozostałych modeli k- ω

i k-ε. Z uwagi na swoją uniwersalność pozostaje jednak najszerzej wykorzystywanym narzędziem na stacjonarnych stanowiskowych komputerach.

Równania transportu dla modelu SST zostały przytoczone na podstawie referatu [68] współautorstwa Menter'a. Jest to wersja zmodyfikowana i ulepszona względem pierwowzoru po 10 latach od wdrożenia.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{w}_i k)}{\partial x_j} = P_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma\mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - \beta^* \rho k \omega \quad (3-51)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{w}_i k)}{\partial x_j} = \\ = \alpha \rho S^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma\mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - \beta^* \rho k \omega + 2 \cdot (1 - F_1) \rho \sigma_{w2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (3-52)$$

F_1 to wielkość skalarna, zwana funkcją mieszania. Jest zależna od odległości od ściany y .

$$F_1 = \tanh \left\{ \left(\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}; \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right); \frac{4\rho\sigma_{w2}k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right)^4 \right\} \quad (3-53)$$

gdzie

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{w2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}; 10^{-3} \right) \quad (3-54)$$

Funkcja F_1 przyjmuje wartość zerową daleko od opływanej powierzchni. Wówczas algorytm korzysta z modelu turbulencji k-ε. W najbliższym otoczeniu powierzchni funkcja mieszania F_1 osiąga wartość bliską 1. W mianowniku funkcji mieszania w każdym przypadku znajduje się odległość od ściany y , więc dla $y \rightarrow 0$ liczby rosną do nieskończoności, ale ułamek został zagnieżdżony wewnątrz funkcji $\tanh$, dlatego funkcja mieszania przyjmuje wartości z zakresu od 0 do 1.

Autor referatu [68] określa lepkość również wzorem z udziałem funkcji mieszania.

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(SF_2)} \quad (3-55)$$

Gdzie S jest inwariantną miarą odkształcenia a funkcja mieszania F_2

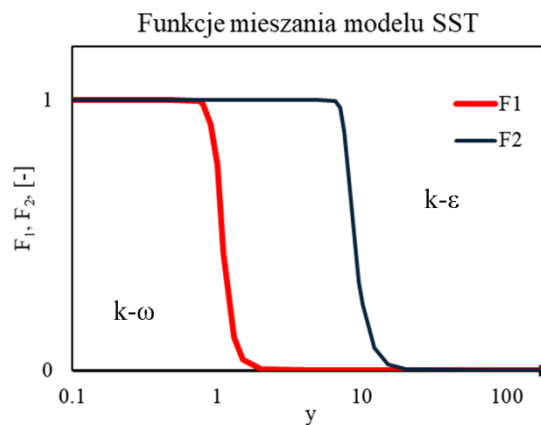
$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}; \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (3-56)$$

Dodatkowo, w modelu jest wprowadzony składnik P_k , który odpowiada za ograniczenie turbulencji w regionach prawie zerowej prędkości – tam gdzie prędkość jest naturalnie mniejsza (nie wliczając w to regionów przyściennych):

$$P_k = \mu_t \frac{\partial w_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) \quad (3-57)$$

Zmienne, wspólne dla modeli k- ϵ i k- ω (α , β , ...) są wyliczane z udziałem funkcji mieszania, na podstawie oryginalnych zmiennych modeli k- ϵ i k- ω .

Funkcje mieszania (3-53), (3-56) nie są ciągłymi w całym przedziale funkcjami – zawierają bowiem funkcje logiczne (min, max). Mamy zatem do czynienia z przedziałami. Niemniej jednak zostały zbudowane tak, aby w otoczeniu pewnych warunków płynnie przełączyć model. Poniższa ilustracja obrazuje zmianę wartości funkcji obliczoną na jednostkowych wartościach pól. Wartości na osi poziomej są jedynie orientacyjne, gdyż wyliczenia pomijają wielkości z pól, które występują we wzorach.



rys. 3.9 – Funkcje mieszania modelu SST (3-53), (3-56), obliczone na jednostkowych wartościach ω , k , ν , σ , CD .

3.5.8 Metody symulacji dużych wirów – LES

Large Eddy Simulation (LES), czyli metody symulowania dużych wirów. Jak podaje [3][E-14][E-18] polegają na uśrednianiu przestrzennym równań N-S. W LES rozgranicza się małe wiry od dużych wirów. Małe wiry są traktowane jako tracona energia turbulencji, duże są w pełni modelowane. Najmniejszy rozmiar wiru jaki można zaobserwować ma rozmiar rzędu wielkości oczka siatki. Modele do opisu małych wirów noszą wspólną nazwę SGS (Subgrid Scale). W programie Ansys Fluent jako SGS została wykorzystana hipoteza Boussinesq'a.

3.6 Warunki brzegowe

Autorzy prac poświęconych modelowaniu zagadnień przepływów [4][52] zwracają jeszcze uwagę na istotę warunków brzegowych. Z perspektywy inżyniera budownictwa, obiektem

zainteresowań jest budowla. Z perspektywy wiatrowej obiektem zainteresowań jest przestrzeń wokół budowli, w której porusza się przepływające powietrze. Ta przestrzeń nosi nazwę domeny obliczeniowej (lub *Enclosure* w literaturze anglojęzycznej). Domena obliczeniowa jest zatem wirtualnym ograniczeniem swobodnego przepływu. W rzeczywistości, wokół rozpatrywanych budowli nie ma ścian ograniczających przepływ. Z tego powodu domena powinna być utworzona tak, aby nie wpływać na rozpatrywany przepływ powietrza. Aby tak się stało należy zapewnić odpowiednio dużą ilość miejsca pomiędzy modelem a ścianami ograniczającymi przestrzeń – wynikającymi z rozmiaru domeny. Z drugiej strony, zbyt duża domena obliczeniowa oznacza większą liczbę objętości skończonych, a tym samym większą pracochłonność i czas obliczeń. Zwiększa się też wymaganie co do ilości potrzebnej pamięci komputera.

Wyróżniamy kilka podstawowych typów warunków brzegowych.

- Inlet (wlot)
- Outlet (wylot)
- Wall (przegroda, bez możliwości przenikania)
- Internal (przegrody wewnętrzne z całkowitym lub częściowym przenikaniem powietrza)

Wlot w przypadku opływu brył obrotowych powinien znajdować się w odległości co najmniej $(8 \div 10)D$ od bryły [71] (choć przyjęcie wielkości $15 \cdot D$ daje lepsze wyniki). Wlot powinien odzwierciedlać warunki napływu powietrza na rozpatrywany model [4]. Z reguły stosuje się na wlocie wymuszenie prędkości przepływu w kierunku normalnym do jego powierzchni (zwróconą w stronę modelu). Ponieważ prędkość wiatru zmienia się z wysokością nad terenem, stosuje się prędkość napływu zmienną na powierzchni. Dodatkowo na wlocie definiuje się intensywność turbulencji napływającego powietrza. Na powierzchni wlotu nie jest konieczne stosowanie dodatkowych zagęszczeń siatki, gdyż nie występują tutaj duże gradienty prędkości.

Wylot z domeny obliczeniowej w przypadku brył obrotowych należy lokalizować znacznie dalej. Dla mniejszych liczb Reynoldsa zazwyczaj odległość $30D$ jest wystarczająca. W przypadku większych turbulencji należy wydłużyć domenę do $(40 \div 50)D$. Na wylocie, w odpowiedniej odległości warunki (prędkość, ciśnienie) powinny odpowiadać warunkom napływu. Nie jest to jednak reguła, dlatego stosuje się najczęściej warunek zerowego ciśnienia [4],[52],[E-3] (Gauge pressure = 0). Wylot również nie wymaga dodatkowego zagęszczania siatki.

Ściany możemy podzielić na standardowe przegrody typu „wall” lub typu „symetria” / „symmetry”. Różnica polega na występującej na powierzchni prędkości [4]. Z uwagi na lepkość gazu, prędkość przy powierzchni ($y = 0$) powinna być zerowa. Jak podaje [4] wynika z tego również zerowe naprężenie normalne (w płaszczyźnie ściany) na powierzchni.

$$w_i(y=0) = 0$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

Do odwzorowania stosuje się warunek „no-slip”. Dodatkowo na powierzchni przegród definiuje się parametr chropowatości powierzchni k [m].

Ściany boczne należy lokalizować w odległości minimum $10D$ od modelu (przy $15D$ otrzymuje się jednak nieco lepsze wyniki). Zaleca się również stosowanie zagęszczenia siatki, w formie strefy przyściennej (boundary layer), w zależności od liczby Re i przyjętego modelu turbulencji.

Symetria jest warunkiem podobnym do ściany. Różnica polega na tym, że na jej powierzchni, prędkość w płaszczyźnie jest różna od zera. Składowa prędkości prostopadłej do powierzchni pozostaje zerowa.

$$v_x(y=0) \neq 0 \quad v_y(y=0) \neq 0 \quad v_z(y=0) \neq 0 \quad (3-58)$$

Warunek symetrii nie wymaga stosowania zagęszczenia siatki ani warstwy przyściennej na jego powierzchni. Często sytuuje się go w połowie symetrycznych modeli, w celu zredukowania o połowę pracochłonności zadania. Należy jednak robić to rozważnie, gdyż nawet symetryczna geometria modelu, przy symetrycznym napływie i pozostałych warunkach może generować niesymetryczny przepływ. Najlepszym tego przykładem jest zagadnienie opływu walców kołowych.

Warunek symetrii może jednak znaleźć zastosowanie do symulowania wirtualnych ścian domeny obliczeniowej, nie przylegających do powierzchni. Wówczas takie przegrody, choć ograniczają przepływ, nie powodują jego zahamowania.

3.7 CFD – inne możliwości

Dynamika płynów zajmuje się jeszcze wieloma innymi zagadnieniami. Stosując CFD można jeszcze rozwiązywać zagadnienia związane z przemianami termodynamicznymi, ośrodkami o właściwościach zależnych od temperatury, a więc również zmianami stanów skupienia [E-3]. Dostępne są również narzędzia do modelowania tzw. ośrodków rozproszonych lub wielofazowych (Multiphase) – do modelowania na przykład drobin pyłu niesionych przez powietrze. Powszechnym jest również modelowanie zjawisk związanych z konwekcją oraz oddawaniem ciepła, lub swobodnych powierzchni cieczy (na przykład fale morskie).

Oczywiście modelowanie bardziej złożonych fizyk wymaga dodatkowych równań rozwiązania, a zatem wzrasta pracochłonność obliczeń. Niemniej jednak rozwój komputerów osobistych sprawia, że obliczenia są coraz łatwiej dostępne w praktyce inżynierskiej. Najlepszym przykładem tego, jest uruchomiona niedawno możliwość prowadzenia obliczeń w programie Ansys Fluent na kartach graficznych, która niemal zrównuje prędkość obliczeń na komputerze stacjonarnym i klastrze obliczeniowym. Obserwuje się również od jakiegoś czasu wzrost zainteresowania metodami bez-siatkowymi, na przykład DVM (Discrete Vortex modeling [72]).

4 Walidacja numeryczna badań eksperymentalnych

W ramach tego rozdziału są opisane obliczenia numeryczne metodą CFD, prowadzone w programie Ansys Fluent. Celem obliczeń jest sporządzenie wiarygodnego modelu, który odwzorowuje przeprowadzone badania. Na podstawie wiarygodnego modelu obliczeniowego będzie możliwe utworzenie kolejnego modelu, który daje wiarygodne wyniki obciążenia budowli wiatrem. W rozdziale jest opisana procedura i kolejne wykonane kroki powstawania modelu. Zostały zaprezentowane wybrane analizy wrażliwości rozwiązania oraz odniesienie do badań na podstawie literatury.

4.1 Charakter analiz numerycznych.

W swojej budowie, chłodnia kominowa o kształcie hiperboloidy lub katenoidy, przypomina walec. Chłodnia jest bryłą obrotową z pionową osią. Co odróżnia ją od walca, to zmienna z wysokością średnica. Do tej pory, powszechną praktyką jest aproksymowanie chłodni kominowych kształtem walca w celu wyznaczenia obciążenia wiatrem. Wstępne badania pokazały jednak, że to podejście może zostać bardziej uszczegółowione dla konstrukcji takich jak chłodnie kominowe.

Odwzorowanie badań:

Do wyznaczenia właściwych współczynników ciśnienia wiatru na powierzchnię można posłużyć się narzędziami takimi jak – Badania In Situ, modelowanie numeryczne (CFD), badania zmniejszone w skali w tunelu aerodynamicznym. Badania In Situ mogą dostarczyć najlepsze wyniki, gdyż nie są one obciążone efektem skali ani błędami obliczeniowymi. Problematiczne jednak może być ustalenie faktycznej prędkości (i profilu prędkości) wiatru. Ponadto takie badania byłyby bardzo czasochłonne (trzeba „czekać na wiatr”, zebrać odpowiednią ilość danych do utworzenia statystyk) i kosztowne (aparatura, prace na wysokości, koszt budowy modelu).

Alternatywnie, konstrukcję można przebadать w tunelu aerodynamicznym. Pojawiają się tutaj jednak zagadnienia związane ze zmniejszeniem skali budowli. Sprowadza się to do niemożliwości zachowania wszystkich warunków podobieństwa [4],[52]. Problematiczne może być także ustabilizowanie właściwego profilu prędkości wiatru oraz dostępność odpowiednich do tego typu zadań laboratoriów.

Najtańszą i najszybszą metodą wyznaczenia współczynników ciśnienia prędkości wiatru są obliczenia numeryczne. Jednak to zależy czy dysponuje się odpowiednią mocą obliczeniową, oprogramowaniem oraz wiedzą. Największą wadą obliczeń numerycznych jest wrażliwość wyników na parametry (na przykład wielkość siatki) oraz konieczność walidacji eksperymentem. W przypadku nowo projektowanych budowli można jednak odwzorować dowolne warunki brzegowe (profil

prędkości, model otoczenia, geometria badanej konstrukcji) i to bez konieczności czekania na pożądany wiatr.

W tym rozdziale opisano obliczenia numeryczne podjęte w celu odwzorowania badań w tunelu aerodynamicznym za pomocą CFD (Computational Fluid Dynamics).

Analiza numeryczna opływu chłodni kominowej o kształcie hiperboloidy lub katenoidy porusza podobne zagadnienia co opływ walca kołowego. Jest to symetryczna bryła bez ostrych krawędzi. Miejsce oderwania strugi laminarnej powietrza od powierzchni na zawietrznej stronie nie jest jednoznaczne i zależy od kilku czynników, m. in. liczby Re oraz chropowatości powierzchni. Co więcej w pewnym zakresie Re miejsce oderwania zmienia swoje położenie w czasie. Powstaje zatem konieczność stosowania bardzo małych przypowierzchniowych elementów, co prowadzi do bardzo gęstych siatek i czasochłonnych obliczeń.

4.2 Siatka

Siatka dyskretna ma kluczowe znaczenie w prawidłowym odwzorowaniu przepływu. Szczególną rolę odgrywa tutaj siatka w elementach przyściennych i okołosciennych. Blisko powierzchni prędkość przepływu znacząco zmniejsza się. Empiryczna wielkość Y^+ (lub Y^+ w zależności od zapisu) służy do określenia jakości siatki w strefie przyściennej. Wielkość Y^+ zależy od gęstości ρ i lepkości μ gazu/cieczy, prędkości swobodnego przepływu v , wielkości charakterystycznej opływającego elementu D i grubości pierwszego elementu FLT (Oznaczenie FLT – z ang. *First Layer Thickness*, zostało wprowadzone na potrzeby niniejszej pracy, i nie występuje w literaturze). W celu oszacowania Y^+ , na początku należy określić liczbę Re . Następnie określa się empiryczną wielkość *Skin Friction*. Dla walca może być dana wzorem (4-1) [E-19]:

$$C_f = (2 \cdot \log Re - 0,63)^{-2,3} \quad (4-1)$$

Kolejno wyznacza się „wall sheat stress” τ_w oraz „friction velocity” u :

$$\tau_w = C_f \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (4-2)$$

$$u = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4-3)$$

Ostatecznie wartość Y^+ wyznacza się wzorem dla znanej grubości warstwy FLT :

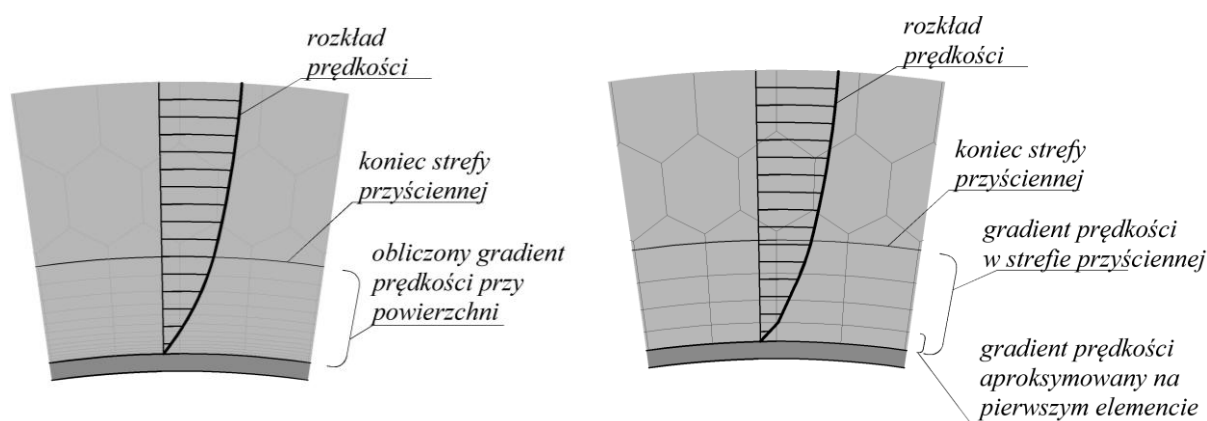
$$Y^+ = \frac{y \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (4-4)$$

Gdzie $y = 0,5 \cdot FLT$.

W drugą stronę, znając pożądane Y^+ , można oszacować grubość pierwszej warstwy:

$$FLT \cong 2y = \frac{2 \cdot Y^+}{\rho \cdot v} \quad (4-5)$$

Wielkość siatki powinna być wstępnie ustawiona tak, aby wartość Y^+ znajdowała się w zakresie $1 \div 10$ lub $30 \div 300$. Stosowanie siatki o Y^+ równym ok 1,0 pozwala na otrzymanie gradientu prędkości przy powierzchni walca poprzez stopniową zmianę prędkości w kolejnych elementach. Y^+ w zakresie $30 \div 300$ pozwala na aproksymowanie całego gradientu blisko powierzchni wewnątrz jednego elementu skończonego, za pomocą tzw. funkcji przyściennej. Pojawia się tutaj pewne ryzyko, związane z wystąpieniem Y^+ w zakresie $10 \div 20$. W tym zakresie siatka jest zbyt mało dokładna, aby uzyskać prawidłowy gradient na kolejnych elementach. Z drugiej strony, pierwszy element jest za mały, aby aktywowały się funkcje przyścienne tworzące gradient. Liczba Y^+ jest zależna również od prędkości przepływu, dlatego ustalenie jednej siatki nie będzie jednakowo dobre dla całego spektrum prędkości.

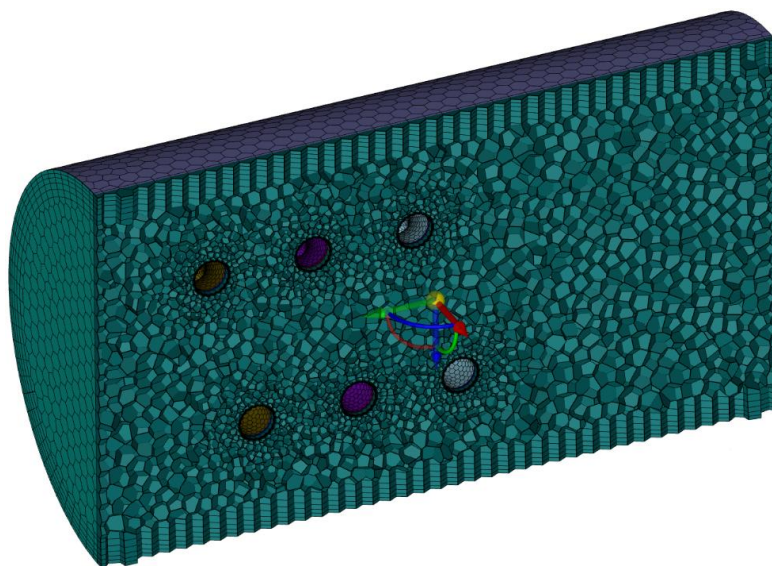


rys. 4.1 Rozkład prędkości w warstwie przyściennej dla $Y^+ = 1$; dla $Y^+ > 30$.

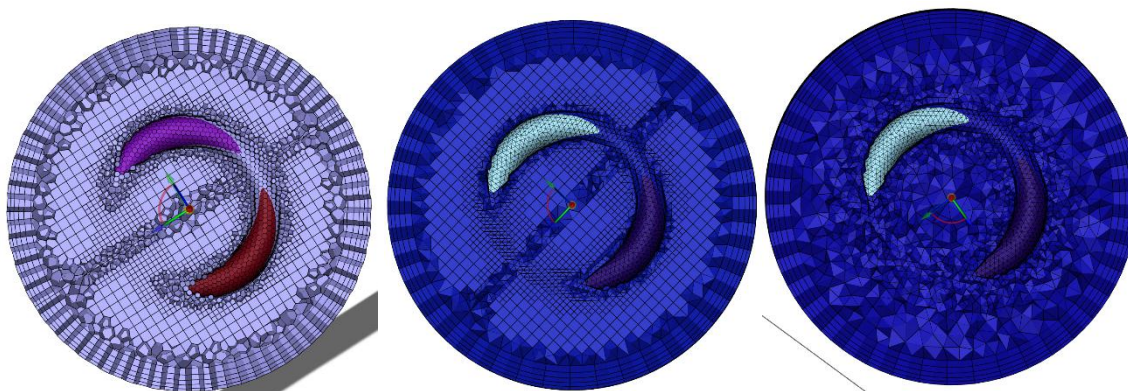
Podjęcie związane ze stosowaniem drobnej siatki zapewnia lepszą dokładność odwzorowania przepływu w strefie przyściennej. Jednak z punktu widzenia celu analizy, sam przepływ nie jest tak istotny jak efekty przepływu w postaci rozkładu ciśnienia oraz wypadkowej siły nośnej i ciągu. Zastosowanie mniej dokładnej siatki i tym samym Y^+ w zakresie powyżej 30 redukuje liczbę elementów, a tym samym czas obliczeń oraz wymaganą minimalną moc obliczeniową. Przy małych modelach, gdzie liczba $Re < 10^5$ (zakres podkrytyczny) liczba elementów siatki zazwyczaj jest mniejsza od 10^7 , przez co model można policzyć nawet na pojedynczej stacji roboczej. Dla dużych modeli, liczba elementów rośnie znacząco, niekiedy do obliczeń będzie wymagane zastosowanie klastra (HPC – High Performance Computing), a i tak czas obliczeń będzie długi.

Siatka dyskretna do obliczeń CFD różni się nieco od siatek stosowanych w popularnej metodzie elementów skończonych. Różnią się również wymagania co do samej siatki. Najbardziej widoczną różnicą jest, daleka od jedności, proporcja długości boków elementów. W strefach przyściennych dopuszcza się stosowanie spłaszczonych elementów, o bardzo wysokiej proporcji długości boków $L/H > 20$, podczas gdy w metodzie elementów skończonych ogranicza się zazwyczaj L/H do 2,0.

Dodatkowo, z uwagi na złożoność geometrii oraz konieczność siatkowania brył 3 – wymiarowych, często było konieczne stosowanie elementów tetrahedralnych. Z uwagi na mnogość elementów i skomplikowane geometrie można stosować siatki polihedralne w strefach przy przegrodach. Elementy polihedralne tworzy się przez sklejenie elementów tetrahedralnych (czworościennych), co owocuje siatką przypominającą w przekroju wzór plastra miodu. A zatem są to elementy o większej liczbie ścian niż 6, których nie stosuje się w metodzie elementów skończonych na potrzeby obliczeń mechanicznych. Powszechnie stosowane są również siatki typu hexacore (elementy czworosiennie), które przypominają siatki w MES, jednak różnią się znacząco w strefach, gdzie siatka zmienia swój rozmiar, gdyż elementy zawierają dodatkowe węzły na ścianach płaskich. Siatka o prostych elementach (hexacore) jest mniej skomplikowana i modele o takich elementach są obliczane szybciej niż siatki polihedralne. Nie zawsze jednak jest możliwe utworzenie siatki tylko heksagonalnej. Dlatego do algorytmu siatkowania w programie Fluent Meshing dodano również siatki „poly-hexacore”, które przy ścianach brył tworzą siatki polihedralne, a wewnątrz bryły elementy zawierają elementy prostopadłościennie. Tym samym umożliwiają posiatkowanie niemal dowolnej geometrii i „oszczędzają” elementy tam, gdzie to możliwe.



rys. 4.2 – Siatka polihedralna w przekroju.



rys. 4.3 – Siatka poly-hexacore, polihedralna i tetrahedralna w przekroju poprzecznym.

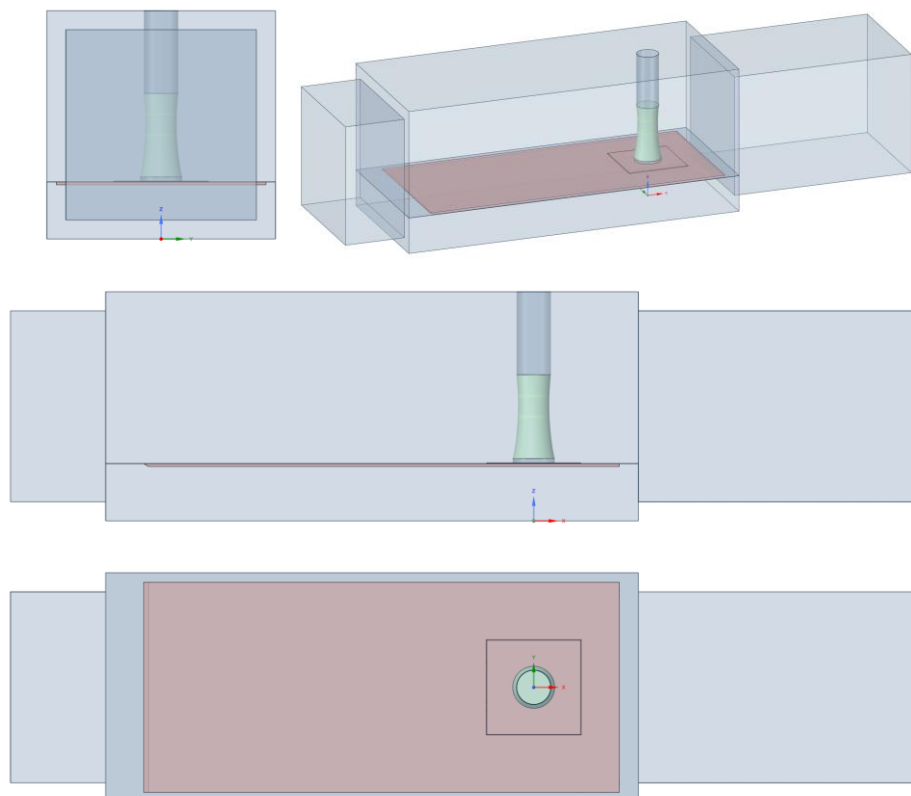
W programie Ansys Fluent wbudowane są narzędzia do oceny jakości siatki [E-3][E-4]. Kontroluje się głównie minimalną oraz średnią skośność. Przyjmuje się, że siatka jest dobrej jakości, jeśli:

- Minimalna jakość $> 0,1$
- Średnia jakość $> 0,9$
- Aspect ratio < 10

4.3 Modele wstępne – próba zakończona niepowodzeniem

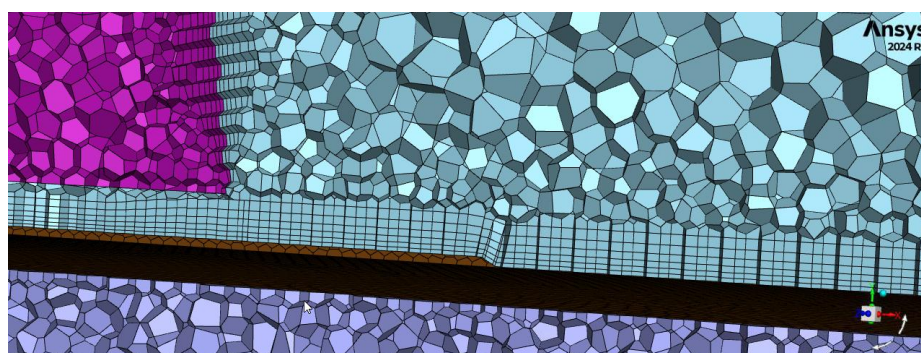
W celu wykonania obliczeń numerycznych został przygotowany model trójwymiarowy w programie *SpaceClaim*. Model uwzględniał geometrię tunelu aerodynamicznego, składającego się z:

- Komory badawczej
- Części wlotowej
- Części wylotowej
- Stołu
- Modelu chłodni
- Płyty centrującej model



rys. 4.4 – Geometria modelu wstępnego.

To podejście odwzorowania badań w tunelu wiatrowym za pomocą CFD zakończyło się fiaskiem. Problematiczne okazało się nawet siatkowanie modelu z uwagi na zbyt dużą liczbę szczegółów oraz detali, które generowały zaburzenia regularnej siatki i mocno zniekształcone elementy. Gdy udało się już wygenerować siatkę, wyniki obliczeń budziły spore wątpliwości co do ich poprawności (kształt przepływu niesymetryczny, brak ciśnienia na powierzchni). Były też powodem zwiększenia całkowitej liczby elementów, a zatem pracochłonności maszyny i potrzebnej ilości pamięci RAM.



rys. 4.5 - Zniekształcone elementy w modelu.

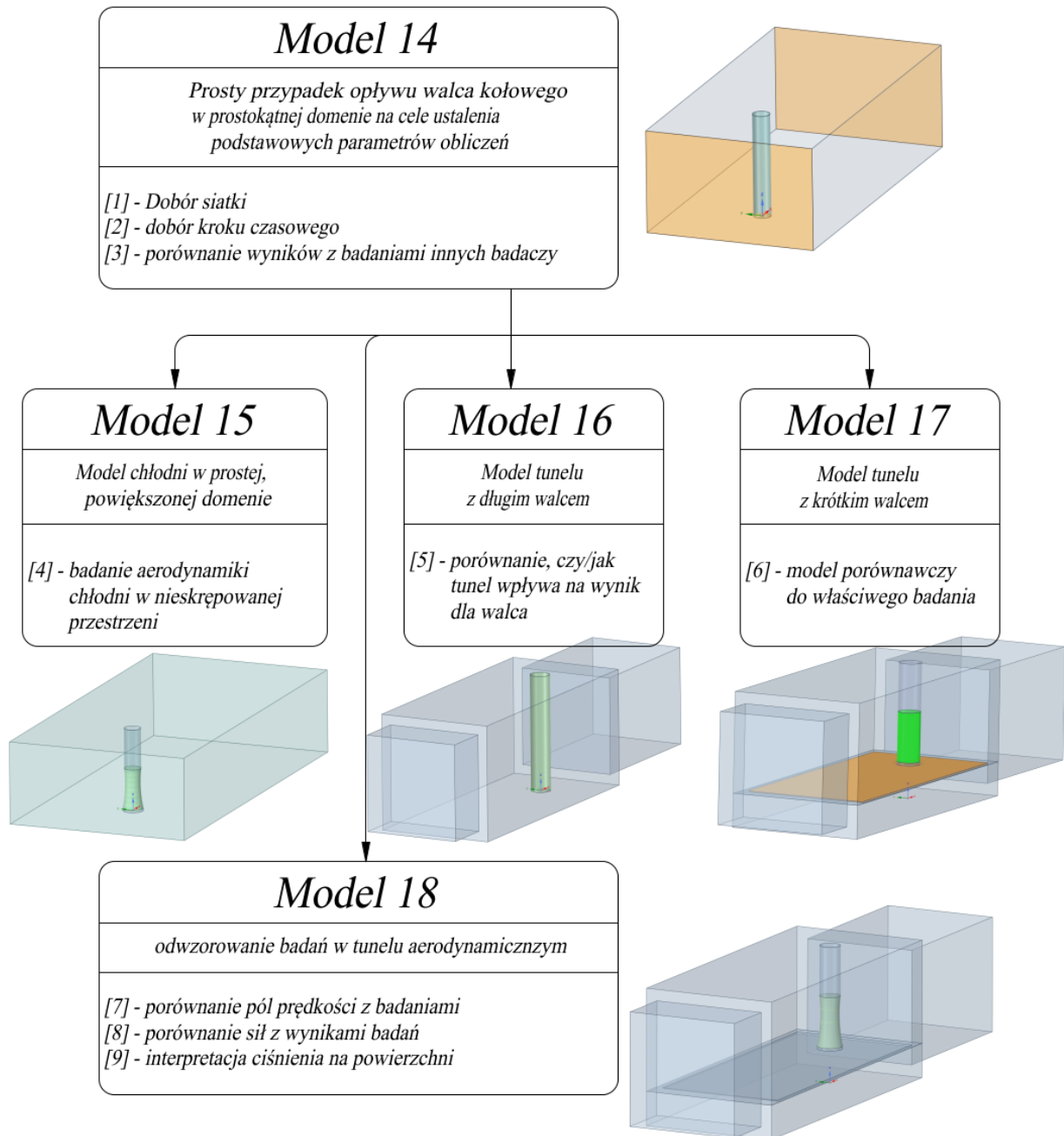
Nadmierna liczba szczegółów negatywnie wpłynęła na jakość prowadzonych obliczeń. Na tak szczegółowym modelu nie było również możliwe prowadzenie analiz wrażliwości rozwiązania na zmianę różnych parametrów (takich jak Y^+ , czas przyrostu (time step), zastosowany model, etc.). Z tego względu zdecydowano się na odwzorowanie w pierwszej kolejności uproszczonego modelu – katenoida została zastąpiona walcem, o zbliżonym gabarycie [model 11]. Jednak i ten model okazał się zbyt skomplikowany. Analizę należało rozpocząć od przypadku prostego walca kołowego w prostopadłościennym domenie, bez dodatkowych wypustów na ścianach zewnętrznych.

4.4 Przebieg pracy

Na kolejnych prostych modelach należało ustalić kolejne istotne parametry analizy, takie jak:

- grubość warstwy przyściennej,
- docelowa wielkość elementów objętościowych,
- długość kroku przyrostu czasowego,
- wielkość domeny,
- oraz inne parametry.

Poniższy schemat przedstawia ścieżkę, która umożliwiła uzyskanie wiarygodnych wyników oraz ustalenie ich wrażliwości na wybrane parametry:



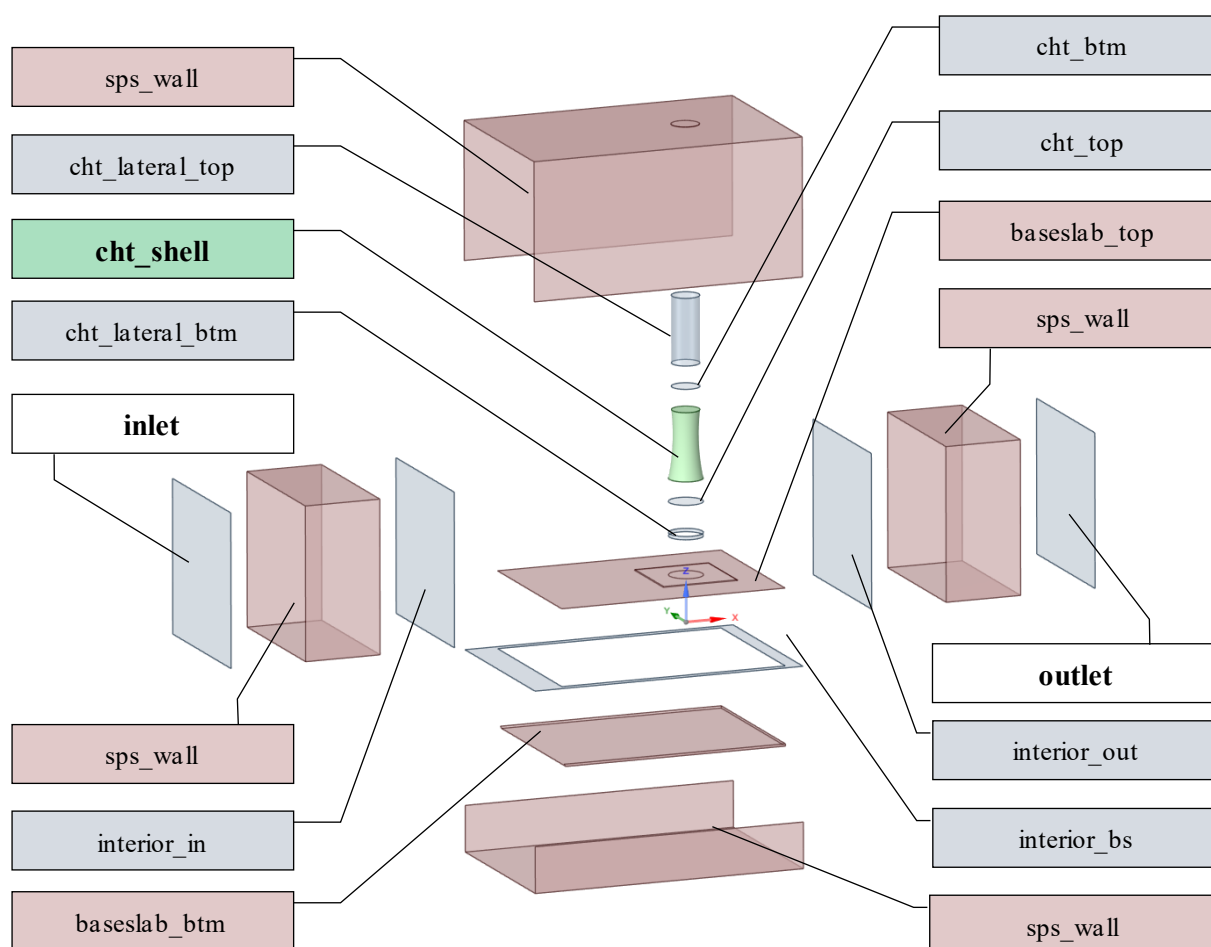
rys. 4.6 – Schemat pracy nad modelem walidacyjnym.

Przed opisem modeli wymaga jeszcze wyjaśnienia zastosowany system nazewnictwa modeli. Z uwagi na mnogość modeli obliczeniowych należało zastosować system nazewnictwa modeli numerycznych, umożliwiający jednoznaczne zidentyfikowanie modelu. Zastosowano tutaj 3-członowe nazwy modelu. Pierwszy człon nazwy odnosi się do wariantu geometrii modelu utworzonego w programie SpaceClaim. Drugi człon – oznaczany literą alfabetu łacińskiego, to numer siatki objętości skończonych. Modele siatek są tworzone w programie Fluent Meshing. Stosuje się różne siatki w celu prowadzenia analiz wrażliwości. Trzeci człon nazwy odnosi się do przypadku analizy utworzonego

w programie Fluent. Zastosowanie takiego systemu nazw, składającego się z trzech członów, przy czym za każdy człon odpowiada inny program, pozwala na zachowanie względnego porządku i umożliwia szybką identyfikację modelu.

Model 14	Model 15	Model 16
14_a	15_a	16_a
14_a_01	15_a_01	16_a_01
14_a_02		16_a_02
14_a_03	15_b	16_a_03
14_b	15_b_01	16_a_04
14_b_01	15_b_02	16_b
14_b_02	15_b_03	14_b_01
14_b_03	15_b_04	16_c
14_b_04	15_b_05	16_c_01
14_c	15_b_06	16_c_02
14_c_01	15_b_07	16_c_03
14_c_02	15_b_08	16_c_04
	15_b_09	

Wszystkie modele, pomimo istotnych różnic geometrycznych bądź różnic w szczegółowości mają pewne wspólne cechy. Prostokątną domenę, badany model w kształcie bryły obrotowej, stół do badań i inne. Z tego względu, dla zachowania porządku oraz możliwości tabelaryzacji parametrów, w całym rozdziale jest zastosowany wspólny system nazewnictwa poszczególnych regionów:



rys. 4.7 – System oznaczeń powierzchni w modelu.

Wyszczególnione NS zostały zestawione w tablicy poniżej.

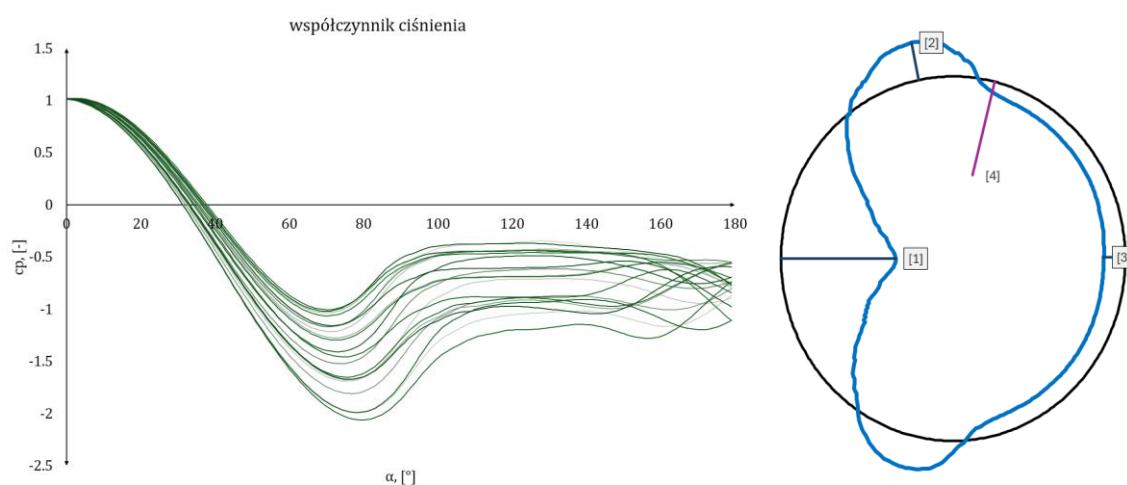
Tablica 4.1 – Opis powierzchni oraz ich indywidualne nazwy.

Powierzchnia / NS	typ	Opis
inlet	Velocity inlet	Wlot do tunelu
outlet	Gauge zero pressure outlet	Wylot z tunelu
cht_shell	„Wall” nie przepuszcza przepływu	Powierzchnia badanego modelu
sps_wall		Ściany zewnętrzne tunelu
baseslab_btm		Dolna powierzchnia stołu do badań
baseslab_top		Górna powierzchnia stołu do badań
cht_lateral_top	„Interior” Dopuszcza przepływ powietrza	Wewnętrzne podziały domeny, niestanowiące przegrody swobodnego przepływu powietrza. Przegrody wyznaczają podział kolejnych brył domeny powietrza.
cht_lateral_btm		
cht_btm		
cht_top		
interior_in		
interior_out		

4.5 Interpretacja wyników

Rozkład ciśnienia

Obciążenie wiatrem ma charakter dynamiczny lub wielokrotnie zmienny. W przypadku walca lub podobnych brył nawet przepływ powietrza o stałej prędkości może powodować zmienne obciążenie w postaci naprzemiennie odrywających się wirów. W tym przypadku, zmienia się wartość ssania na ścianie bocznej oraz przesuwa się miejsce największego ssania. Poniższa ilustracja prezentuje rozkład ciśnienia w przekroju przez walec, dla kilku wybranych kroków czasowych. W załączniku „Załącznik 1 – Rozkład Ciśnienia – GIF” znajduje się animacja z przebiegiem rozkładu ciśnienia. Rozkład ciśnienia w tej pracy jest opisywany na wykresie dla połowy walca, tak jak w punkcie 2.1.3 rozprawy.



rys. 4.8 – Rozkłady współczynnika ciśnienia otrzymane na modelu (14_b_01) dla różnych kroków oraz oznaczenia punktów charakterystycznych na wykresie.

Na powyższym wykresie można wyróżnić kilka charakterystycznych punktów:

- Maksymalne parcie – na stronie nawietrznej (przy $\alpha=0^\circ$) - [1],
- Maksymalne ssanie – po bokach (przy $\alpha = 75^\circ$ ÷ 85°) - [2],
- Ssanie za walcem – na stronie zawietrznej (przy $\alpha = 180^\circ$) - [3],
- Miejsce oderwania strugi laminarnej od powierzchni bryły (przy $\alpha = 100^\circ$ ÷ 115°) - [4],
- Miejsce występowania największego ssania ([2]) na walcu, jest w dalszej części pracy oznaczane jako [5].

Maksymalne parcie wiatru w każdym przypadku znajduje się na środku walca – od strony nawietrznej i współczynnik ciśnienia wynosi 1,0 – co jest zgodne z wartością podawaną przez Eurokod [N-2] i inne normy. Maksymalne ssanie na ścianach bocznych (punkt [2]), w zależności od liczby Re i kroku czasowego przyjmuje wartości od ok -0,5 (ssanie) do ok -2,5 (ssanie). Według Eurokodu ta wartość waha się w zakresie 1,5÷2,2, przy czym norma podaje współczynniki rozkładu ciśnienia dla innego zakresu liczb Reynoldsa ($Re = 5 \cdot 10^5$ ÷ 10^7). W dalszej części pracy Ssanie w punkcie [2] jest również wrażliwe na rozmiarprzyjętej siatki dyskretnej (Y+) oraz wielkość kroku czasowego w analizie „transient”.

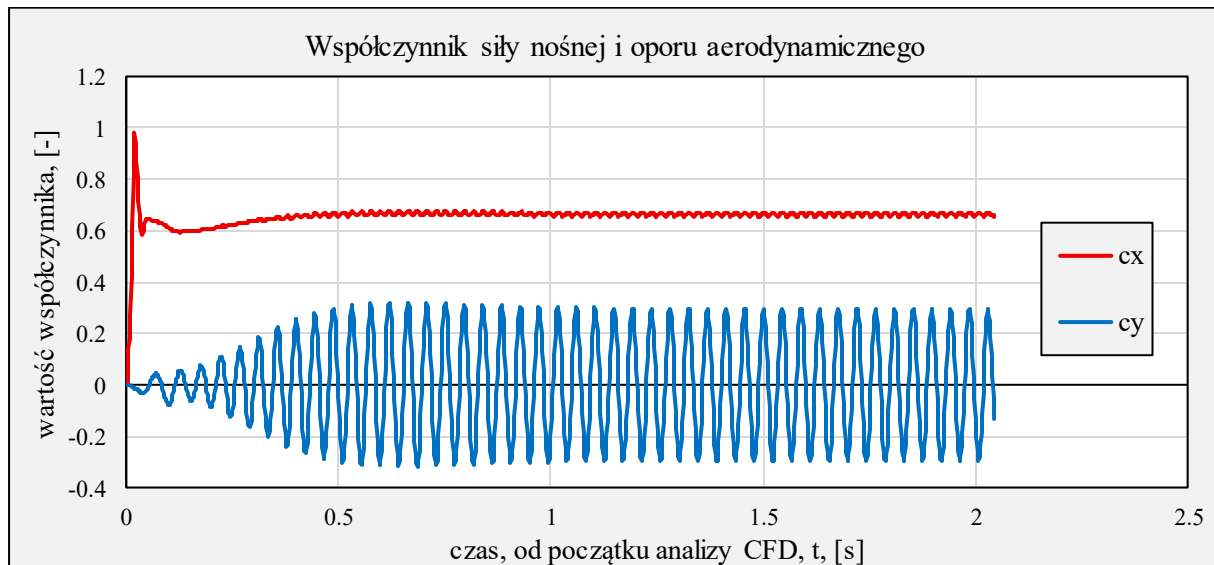
Wygenerowanie wielu wykresów dla kolejnych kroków przyrostu jest zadaniem czasochłonnym. Wymaga bowiem dla każdego kroku otwarcia pliku zawierającego wyniki. Rozmiar tych plików dla prowadzonych analiz zawiera się w przedziale od 60MB do 6 GB i jest podyktowany głównie rozmiarem siatki. Otwarcie pliku o wielkości 1 GB zajmuje ok 3minut. Na potrzeby zbierania wyników do programy Ansys Post-CFD został utworzony autorski skrypt w języku C#, który generuje zestaw instrukcji (makro) w formacie „.cse” do programu Post-CFD. Zastosowanie autorskiego skryptu poprawia również jakość pracy, z uwagi na wyeliminowanie błędów podczas ręcznego przepisywania nazw poszczególnym seriom danych.

Siła oporu / siła nośna:

Wiatr napierający na walec napotyka przeszkodę i oddziałuje na walec z siłą określaną *oporem* lub *siłą aerodynamiczną* [4],[5],[N-2]. Ta siła przy stałej prędkości wiatru ma stałą wartość. Naprzemiennie obracający się rozkład ciśnienia powoduje jednak powstawanie siły prostopadłej do kierunku przepływu powietrza (*siła nośna / lift force*). Wielkości siły nośnej (4-6) oraz siły oporu aerodynamicznego zależą od prędkości przepływu v , średnicy walca D , lepkości μ i gęstości ρ gazu opływającego oraz chropowatości powierzchni.

$$N = C_i \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot A_{\text{proj}} \quad (4-6)$$

Gdzie C_i to współczynnik siły – empiryczna wartość zależna od liczby Re i chropowatości powierzchni, natomiast A_{proj} to pole rzutu powierzchni na kierunku prostopadły do przepływu. W przypadku walca $A_{\text{proj}} = D \cdot L$. Różne wartości współczynnika siły dla szerokiego spektrum liczb Re pomierzone przez różnych badaczy zestawiał [50], [51]. Poniższy wykres ilustruje zachowanie współczynnika oporu (C_x) oraz siły nośnej (C_y) dla pierwszych 2s obliczeń dla modelu 14_d2_02.



rys. 4.9 – Przebieg czasowy dla siły nośnej i siły oporu aerodynamicznego.

W podawanych dalej zestawieniach i porównaniach, prezentowana *siła oporu aerodynamicznego* lub *współczynnik siły oporu* jest wyznaczany jako średnia zakresu, w którym wartość jest stabilizowana. Natomiast *współczynnik siły nośnej* lub *siła nośna* odnosi się do amplitudy siły (prostopadłej do kierunku przepływu) harmonicznie oddziałującej na walec (lub chłodnię).

Częstotliwość odrywania wirów

Naprzemienne odrywanie wirów odbywa się harmonicznie z pewną częstotliwością, zależną od liczby Re oraz prędkości wiatru. W przypadku walca kołowego częstotliwość tę uzależnia się od prędkości przepływu, średnicy oraz bezwymiarowego parametru – liczby Strouhala [5].

$$f = \frac{St \cdot V}{d} \quad (4-7)$$

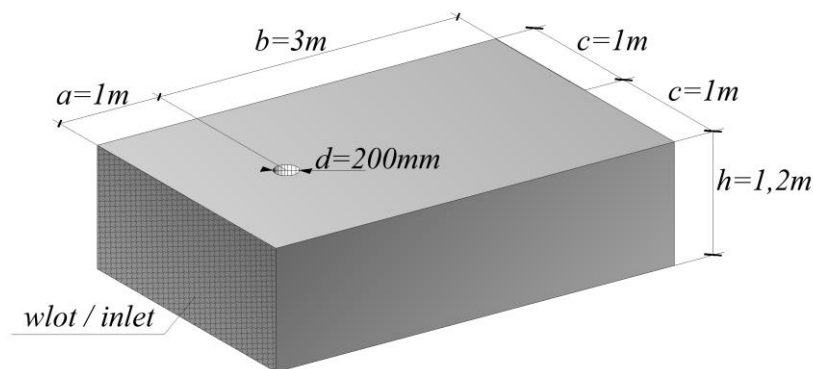
Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń, częstotliwość można wyznaczyć na dwa sposoby. O ile udało się otrzymać wizualnie regularny rozkład siły nośnej w czasie – jak na rysunku rys. 4.9., częstotliwość można wyznaczyć wprost, mierząc krok czasowy pomiędzy dwoma ekstremami dodatnimi lub ujemnymi (T_n , T_{n+1}). Częstotliwość jest równa:

$$f = \frac{1}{T_{n+1} - T_n} \quad (4-8)$$

Gdy przebieg czasowy ma charakter bardziej nieregularny, może być to efekt występowania równocześnie kilku częstotliwości odrywania wirów. Wówczas wyznaczenie częstotliwości (jednej lub kilku) wymaga zastosowania narzędzi matematycznych. W tej pracy była szeroko stosowana dyskretna transformata Fouriera (Fast Fourier Transmission – FFT).

4.6 Prosty przypadek opływu walca kołowego dla $Re < 10^5$

W drugim podejściu do analizy opływu powłoki chłodni kominowej praca rozpoczęła się od prostego przypadku - odwzorowania opływu walca kołowego (*Model 14*). Jest to dobrze znany i opisany przypadek opływu bryły przez wiatr. Dla uproszczenia zadania w tym przypadku pominięto wpływ swobodnego końca – walec ma długość całej domeny. Wyniki obliczeń dla prostej geometrii można porównać z badaniami oraz analizami CFD innych badaczy. Niestety, jak już wspomniano wcześniej, wyniki tych badań są dosyć mocno subiektywne oraz zależne od zastosowanych metod badań. Pozwalają jednak zauważyć pewną tendencję, w szczególności w rozkładzie sił ciągu i nośnej w zależności od liczby Re . Poniższa ilustracja przedstawia (*Model 14*) i (*Model 14i*):



rys. 4.10 – Opływ walca kołowego bez swobodnego końca (*Model 14*).

Model (14) to prosty walec, który znajduje się w dosyć wąskiej domenie. Niewielki rozmiar domeny wynika z rzeczywistego rozmiaru tunelu wiatrowego, który posłużył do badań eksperymentalnych. W tym modelu parametr *blockage ratio* wynosi dokładnie 10%. Dla porównania, w (*modelu 14i*) zastosowano domenę o szerokości 6m. W tym przypadku *blockage ratio* wynosi 3,(3)%. (*Model 14i*) został stworzony na potrzeby porównawcze i nie bierze udział w głównym wątku analizy.

4.6.1 Gęstość siatki

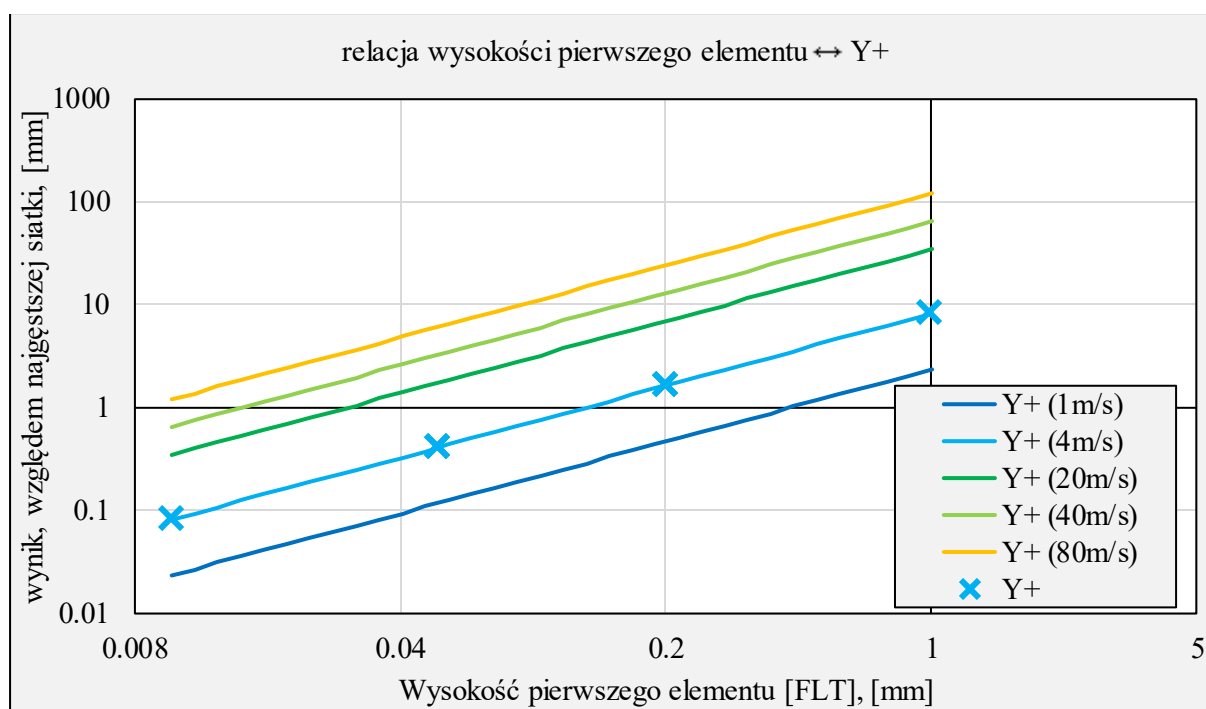
Na *modelu (14)* przeprowadzono w pierwszej kolejności analizę wrażliwości rozwiązania na dokładność siatki. W analizie wrażliwości zestawiono siłę nośną, siłę oporu aerodynamicznego oraz

największe ssanie na bocznej powierzchni walca. Przez dokładność siatki rozumiemy tutaj głównie wysokość pierwszego elementu przyściennego na powierzchni walca. Gęstość siatki przy innych powierzchniach nie ma aż tak znaczącego wpływu na otrzymywane wyniki, dlatego pozostałe parametry siatki zostały dopasowane tak, aby uzyskać jak najlepszą jakość siatki. Na potrzeby tej pracy, wysokość pierwszego elementu jest oznaczana symbolem „FLT” i jest wyrażona w jednostkach długości ([m], [mm]).

Tablica 4.2 – Zestawienie porównawcze wybranych siatek rozpatrzonych w analizie wrażliwości.

	Szczegóły / lokalizacja	14	14a	14b	14d	14g	
Zagęszczenia siatki na powierzchni [mm]	cht_shell	2	1	1	1.5	10	
	sps_wall	20				40	
Ustawienia siatkowania	Min. rozmiar siatki na powierzchni	120					
	Max. rozmiar siatki na powierzchni	4,6875					
Dodatkowe ustawienia siatki.	Zmiana przegród wewn. na typ “internal”	✓					
	“share topology”	✗					
	“Multizone meshing”	✗					
Zagęszczenia siatki – grubości elementów przyściennych	cht_shell	Grubość [mm]	0.5	0.05	0.01	0.2	1
		Typ zagęszczenia	uniform				
		Ilość warstw [-]	10	15	20	15	6
	sps_wall	Grubość [mm]	2	1	1	10	10
		Typ zagęszczenia	uniform				
		Ilość warstw [-]	5	2	2	5	5
Ustawiania siatkowania 3D	Model siatkowania	poly-hedra	poly-hexacore				

Poniższa ilustracja przedstawia zmianę wielkości Y^+ z wysokością pierwszego elementu dla różnych prędkości przepływu. Niebieskie symbole ✗ wskazują punkty, dla których zostały przeprowadzone obliczenia.



rys. 4.11 – Zależność pomiędzy prędkością przepływu, wielkością pierwszego elementu oraz Y^+ .

Tablica 4.3. zawiera zestawienie z kilkoma wybranymi wariantami siatek. Na tych siatkach wykonano analizę wrażliwości rozwiązania na gęstość siatki. W zestawieniu wskazano oszacowaną wartość Y^+ dla prędkości przepływu 4, 20 i 40 m/s. Kolorem zielonym oznaczono wartości poniżej wartości 10. Kolorem niebieskim powyżej 30. Wartości z zakresu niepożądanego (10÷30) oznaczono kolorem pomarańczowym. Warto również zwrócić uwagę na ilość elementów siatki. W modelu (14_b) siatkowanie powierzchniowe walca jest identyczne jak w modelu (14_a) (pomimo pięciokrotnie mniejszej wysokości elementu). To skutkuje pogorszeniem jakości siatki w tym rejonie, ale jest konieczne do redukcji ilości elementów. Model (14_d2) (pogrubiony w tabeli) został wybrany jako najlepszy spośród zaproponowanych.

Tablica 4.3 – Zestawienie porównawcze wybranych siatek rozpatrzonych w analizie wrażliwości.

Wariant siatki	Warstwa przyścienna		V	4m/s	20m/s	40m/s	Statystyki siatki		
	FLT	Warstwy	Re	5,73e+4	2.87e+5	5.74e+5	Ilość el.	Średnia jakość	Minimalna jakość
	[mm]	[szt]	Y+						
14_b	0.01	20		0.081	0.348	0.649	21 763 934	0.982	0.050
14_a	0.05	15		0.408	1.738	3.243	17 645 534	0.979	0.125
14_d2	0.2	13		1.633	6.952	12.973	4 834 489	0.968	0.073
14	0.2	10		1.633	6.952	12.973	3 728 020	0.979	0.164
14_g	1	6		8.165	34.760	64.864	303 089	0.939	0.179

W analizie wykorzystano solver typu „pressure-based”, a obliczenia prowadzone są w stanie nieustalonym (analiza „transient”). Wykorzystany jest model turbulencji $k-\omega$ SST. W celu skrócenia czasu obliczeń oraz z uwagi na dostępne zasoby sprzętowe, obliczenia są prowadzone na procesorach

GPU (Quadro P4000 lub 2×GTX1070). Wykorzystanie GPU do rozwiązania obliczeń choć skraca czas obliczeń, narzuca pewne ograniczenia w zakresie stosowanych metod rozwiązania. Zastosowane metody:

Tablica 4.4 – Metody rozwiązania.

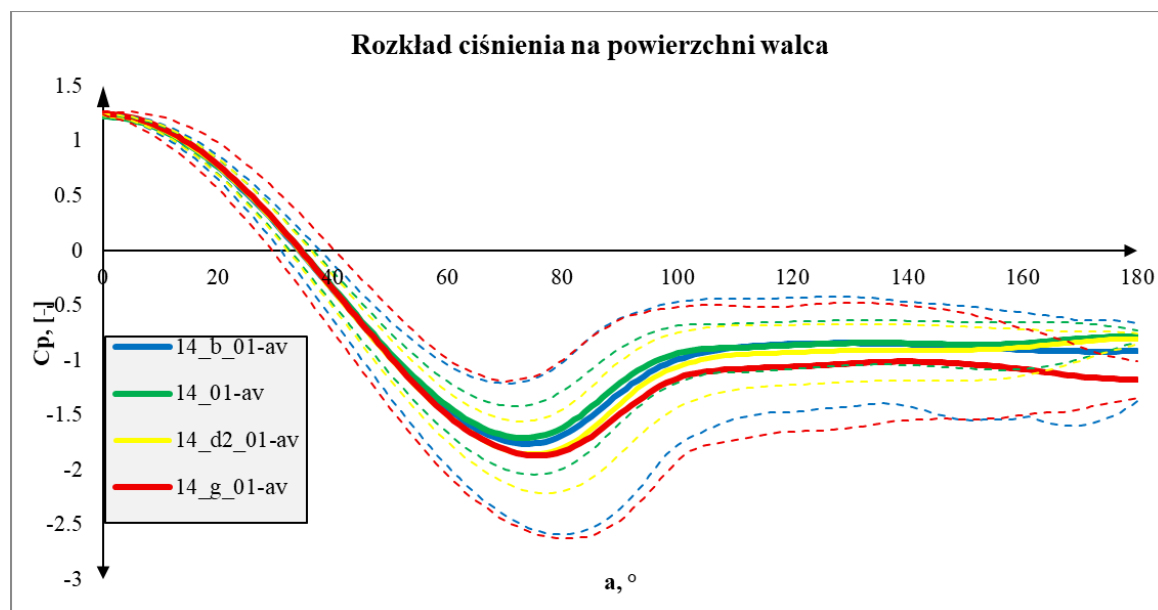
parametr	Metoda stosowana w obliczeniach na procesorze:	
	GPU	CPU
scheme	Simple	coupled
Spatial Discretization	Last Sequence Cell Based	
Pressure	Second Order	PRESTO!
Momentum	Second Order Upwind	
Turbulent Kinetic Energy		
Specific Dissipation Rate		
Transient Formulation	Second Order Implicit	

We wszystkich przypadkach analizy występuje „velocity-inlet”, ze stałą prędkością 4m/s oraz intensywnością turbulencji 5%. W kilku wariantach jest zastosowana prędkość 20 i 40m/s. Na ścianach zewnętrznych oraz powierzchni walca znajdują się warunki brzegowe z tarcie typu „no slip”. W tej części pracy przyjęta wartość intensywności turbulencji jest stała, ponieważ zauważono, że nie ma ona znacznego wpływu na odczytywane wyniki. W ostatniej części pracy jest uwzględniony normowy profil intensywności turbulencji.

Wyniki:

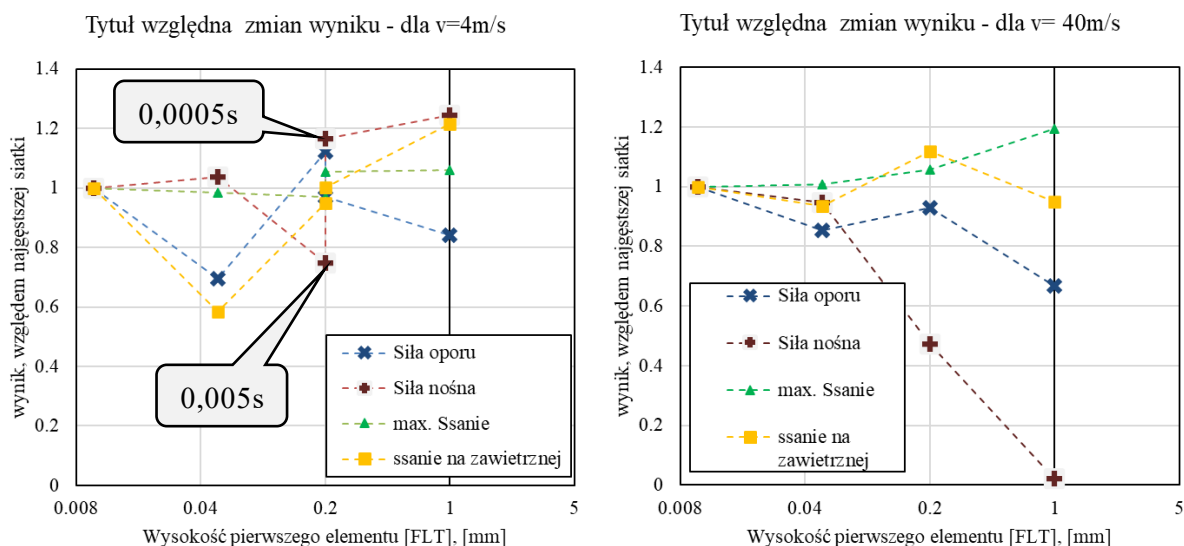
Na poniższym wykresie zestawiono rozkłady ciśnienia na połowie walca. Teoretyczny rozkład ciśnienia jest symetryczny względem osi walca, równoległej do kierunku przepływu, dlatego rozkład na połowie zawiera komplet informacji. Na osi poziomej oznaczono lokalizację na powierzchni walca w układzie kątowym, w którym początek znajduje się na nawietrznej stronie. Podobne wykresy można znaleźć w normach do wyznaczania obciążenia wiatrem, na przykład w Eurokodzie 1-1-4, Rys 7.27, lub VGB S610, Fig2.

Ciągłą linią oznaczono uśrednione ciśnienie, natomiast liniami przerywanymi oznaczono skrajne wartości ze wszystkich kroków czasowych. Dla różnych siatek otrzymano podobne uśrednione wartości, natomiast znacząco różnią się między sobą skrajne wartości.



rys. 4.12 – Rozkład ciśnienia na powierzchni walca dla różnych wariantów siatki.

rys. 4.12 zawiera zestawienie wyników otrzymanych z obliczeń modelu na siatkach, które zawierają tablice 4.2 i 4.3 Na poziomej osi zamieszczono w skali logarytmicznej wielkość pierwszego elementu przyściennego siatki. Na pionowej osi oznaczono względną wartość mierzonej wielkości w odniesieniu do wartości otrzymanej na siatce w modelu (14_b) (najdokładniejszą rozpatrywaną siatką).



rys. 4.13 – Względna zmiana siły nośnej, siły oporu, ssania na ścianach bocznych i zawietrznej stronie walca.

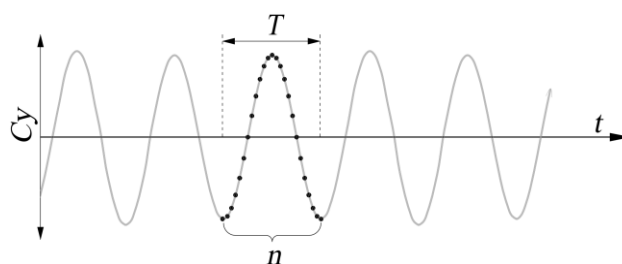
Na podstawie obserwacji wyników sił, pól prędkości oraz ciśnienia na przekrojach oraz rozkładów ciśnienia można wywnioskować, że każda z zastosowanych siatek daje ogólnie wyniki

o prawidłowym rozkładzie. Jednakowoż wyniki różnią się między sobą wartościami. Zastosowanie siatki o $FLT=0,2\text{mm}$ (*model 14_d2*) daje wyniki różniące się od najgęstszej siatki o $\pm 20\%$. Zastosowanie siatki o parametrach jak w *modelu (14_d2)* jest kompromisem pomiędzy czasem obliczeń i wymaganymi zasobami sprzętowymi a dokładnością prowadzenia obliczeń.

Spośród wszystkich zestawionych wyżej (rys. 4.13) wielkości, najbardziej miarodajną jest siła oporu. Jej przebieg w czasie jest najmniej zmienny, przez co generuje najmniejsze rozbieżności w czasie. Siła nośna ma przebieg zmienny w czasie. Nakładające się częstotliwości zmian siły nośnej mogą powodować takie zjawiska jak dudnienie, przez co amplituda siły nośnej w sposób niekontrolowany zmienia swoją wartość. Ciśnienie na nawietrznej stronie nie wykazało wrażliwości na dokładność siatki, przez co zostało pominięte w zestawieniu. Natomiast ssanie na bocznych ścianach, podobnie jak siła nośna jest zmienna i w kolejnych krokach czasowych może zmieniać swoją wielkość nawet o 20%.

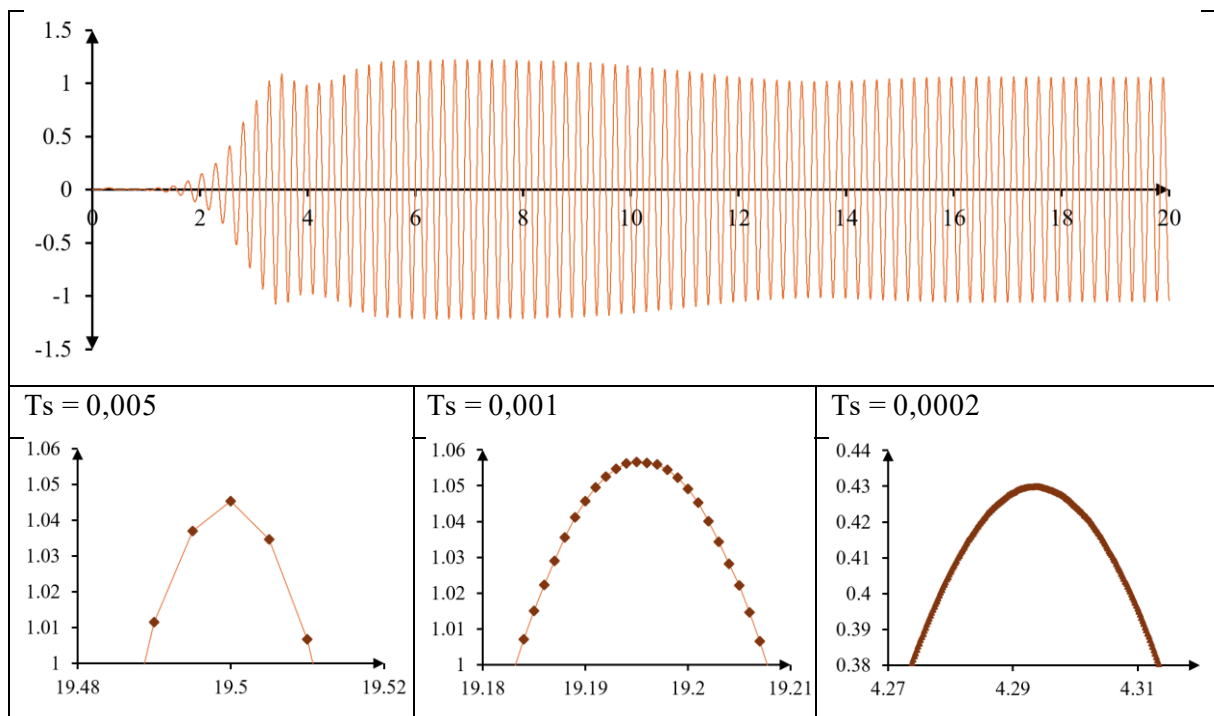
4.6.2 Wielkość kroku czasowego

Istotną wartością, którą należy określić przed rozpoczęciem obliczeń, jest wielkość kroku czasowego. W trakcie prowadzenia analizy wrażliwości rozwiązania na dokładność siatki, została zaobserwowana również pewna wrażliwość rozwiązania na wielkość tego założonego kroku czasowego. Wynik z obliczeń CFD zmienia się w czasie. Można to zaobserwować na przykład w postaci naprzemiennie odrywających się wirów za walcem. Najbardziej zmienną z mierzonych w obliczeniach wartości jest siła nośna (jak pokazano na rys. 4.9 lub rys. 4.15). Siła nośna nie ma jednej stałej wartości a harmonicznym zmienia znak działania. Podawana w opracowaniach wielkość siły nośnej jest amplitudą. Częstotliwość zmian znaku siły nośnej można powiązać z częstotliwością odrywania wirów za walcem.



rys. 4.14 – Podział okresu T zmiany siły nośnej na „ n ” kroków czasowych.

W numerycznym rozwiązaniu zagadnienia przepływu, wykres $C_y(t)$ otrzymuje się przez odczytanie C_y w kolejnych krokach czasowych. Na podstawie wstępnych obliczeń udało się ustalić, że można uzyskać „gładki” wykres $C_y(t)$, o ile jeden pełen okres będzie podzielony na około 50 kroków czasowych (rys. 4.14). Liczba „ n ” oznacza liczbę kroków czasowych przypadających na jeden pełny okres zmiany $C_y(t)$. W pracy [52] podano, że liczba n powinna wynosić nie mniej niż 20. Na rys. 4.15 widnieje przykładowy podział wykresu $C_y(t)$ przy różnych krokach czasowych – $T_s=0,005\text{s}$, $0,001\text{s}$ i $0,0002\text{s}$, które odpowiadają kolejno liczbie $n = 48$, 238 i 1190 .



rys. 4.15 – Podział okresu zmiany siły nośnej na kroki czasowe.

W celu określenia wielkości kroku czasowego konieczne jest oszacowanie analityczne częstotliwości odrywania wirów. Ta zależy od prędkości przepływu - v , średnicy walca - d , oraz stałej - Liczby Strouhala - St (lub Sr wg starszych źródeł [5]). Dla walca St przyjmuje wartość ok 0,205 [5].

$$f = St \cdot \frac{v}{d} \quad (4-9)$$

W książce [4] zestawiono bardziej dokładnie liczby Sr . Niemniej jednak na potrzeby doboru kroku czasowego przyjęcie $Sr = 0,205$ jest wystarczająco dokładne, co pokazuje tablica 4.5– okres oszacowany analitycznie pokrywa się z krokiem uzyskanym z obliczeń numerycznych.

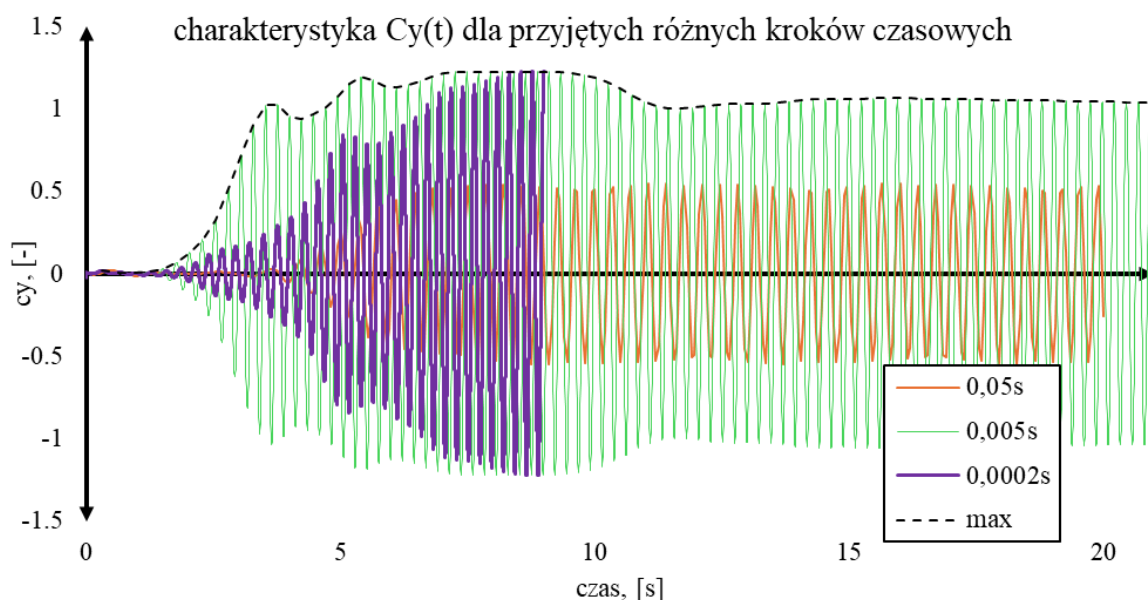
Znając prędkość przepływu powietrza oraz średnicę walca, można łatwo obliczyć okres odrywania wirów T_v [5].

$$T_v = \frac{1}{f} = \frac{d}{v \cdot St} \quad (4-10)$$

Wielkość kroku czasowego T_s , dla przyjętej liczby podziałów okresu odrywania wirów - n , można obliczyć korzystając z zależności:

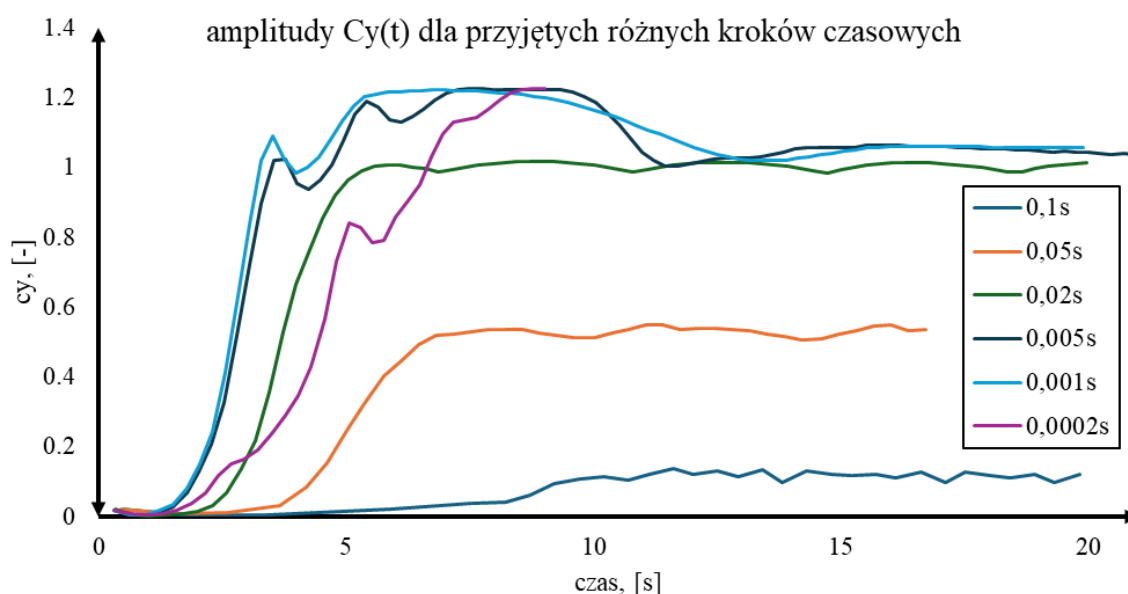
$$T_s = \frac{T_v}{n} = \frac{d}{v \cdot St \cdot n} \quad (4-11)$$

W ramach analizy wrażliwości rozwiązania na wielkość kroku czasowego zostały wykonane obliczenia dla *modelu (14_g_01)* (walec o średnicy 20cm, przepływ swobodny 4m/s, $y^+ \cong 60$, $Re \ 5,7e+4$). Obliczenia zostały przeprowadzone dla wariantów kroku czasowego 0,1s; 0,05s; 0,02s; 0,005s; 0,001s; 0,0002s. Poniższy wykres prezentuje charakterystykę czasową siły nośnej w czasie dla różnych wstępnie założonych kroków czasowych:



rys. 4.16 – Wykres zmian siły nośnej dla wybranych kroków czasowych.

Z uwagi na to, że nałożenie na siebie wykresów charakterystyk czasowych dla wielu przypadków uniemożliwiłoby odczytanie danych, poniższy wykres zawiera zestawienie amplitud siły nośnej dla przeanalizowanych kroków czasowych.



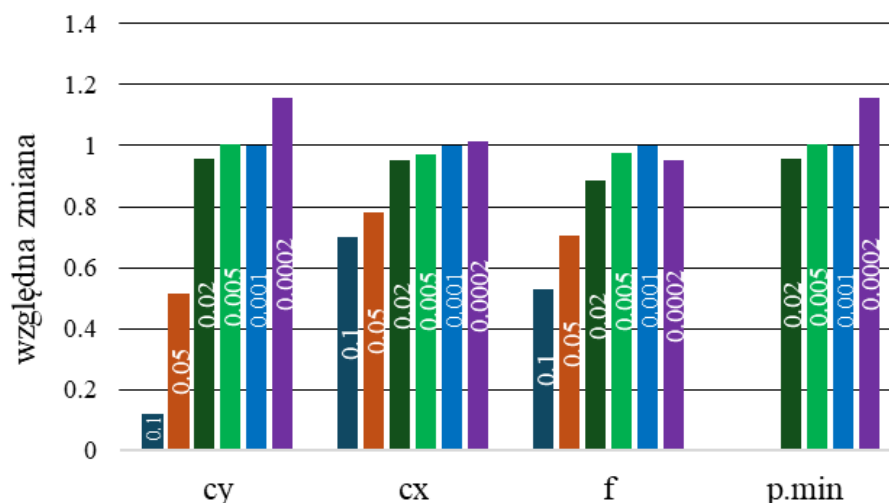
rys. 4.17 – Amplitudy siły nośnej dla analizowanych kroków czasowych.

Na podstawie powyższej zależności można wywnioskować, że wielkość założonego kroku czasowego ma wpływ na wielkość otrzymanych wyników. Dla kroków czasowych większych niż 0,02s wyniki zauważalnie odbiegają od pożądanej wartości. Amplitudy siły nośnej, po ustabilizowaniu się, mają zbliżone wartości o ile krok przyrostu $T_s \leq 0,02s$, co odpowiada liczbie podziałów okresu na ok. 13 części. Krok czasowy ma jednak znaczący wpływ na czas potrzebny do osiągnięcia stanu stabilizacji amplitudy siły nośnej. Zaobserwowano również, że dla kroków czasowych mniejszych niż 0,005s wykształtował się pozornie stan ustabilizowany i utrzymywał przez ok 5 s (od 5 do 10sekundy analizy). Taki stan mógłby zostać błędnie uznany za ustalony, a wyznaczona na jego podstawie amplituda byłaby zawyżoną wartością. W przypadku analizy z krokiem czasowym 0,0002s ($n = 1000$) nie dokończono obliczeń w celu zbadania tego pozornego stanu stabilizacji, gdyż obliczenia wymagają bardzo dużych nakładów czasu (przeprowadzone 9s obliczeń, to 45tys kroków).

Tablica 4.5 - Częstotliwość odrywania wirów – obliczona analitycznie oraz na podstawie obliczeń numerycznych przy prędkości przepływu 4m/s.

Krok czasowy	Liczba podziałów „n”	Częstotliwość obliczona	
		CFD	analitycznie
[s]	[-]	[Hz]	
0.1	2,4	2.292	4,1
0.05	4,9	3.043	
0.02	12,2	3.830	
0.005	48,8	4.221	
0.001	244	4.324	
0.0002	1220	4.115	

Tablica 4.5 zawiera obliczone częstotliwości odrywania wirów. Częstotliwość obliczona metodą analityczną zakłada liczbę $St = 0,205$ (przyjęto orientacyjnie na podstawie [5]). Poniżej zestawiono wrażliwość wybranych wyników na wielkość przyjętego kroku czasowego. Wielkość kroku czasowego została naniesiona na słupki danych. Wyniki przedstawiono w formie zmiany względem kroku czasowego $0,001s \left(\frac{1}{1000} s \right)$.



rys. 4.18 – Względna zmiana wybranych wyników względem kroku czasowego 0,001s. cy – siła nośna; cx – siła oporu aerodynamicznego, f – częstotliwość, p.min – maksymalne ssanie na ścianie bocznej.

Wnioski:

Podsumowaniem analizy wrażliwości na wielkość kroku czasowego jest przyjęcie założenia, że liczba podziałów pełnego okresu – n , powinna wynosić przynajmniej 12 (0,02s na powyższym wykresie). Wówczas przyjęta wielkość nie ma bezpośredniego wpływu na wielkości otrzymywanych wyników. Najbardziej wrażliwa na krok czasowy jest częstotliwość odrywania wirów, ta jednak jest pomijana w większości analiz (wynik zazwyczaj nie jest potrzebny). Krok czasowy ma istotny wpływ na czas obliczeń oraz ilość kroków potrzebną do stabilizacji rozwiązania. Krok czasowy (T_s) najlepiej dobierać tak, aby dzielił jeden okres $C_y(t)$ w ustabilizowanym rozwiązaniu na 50 części ($n = 50$). Przy czym, dla zachowania porządku wartości kroku czasowego w tej pracy są wybierane spośród liczb w typoszeregu (tablica 4.6).

Tablica 4.6 – Dobór wartości kroku czasowego T_s .

$T_s, [s]$					$T_s \cong \frac{d}{v \cdot St \cdot n \rightarrow 50}$
10	1	0,1	0,01	0,001	
5	0,5	0,05	0,005	0,0002	
2	0,2	0,02	0,002	0,0005	

4.6.3 Opływ walca kołowego

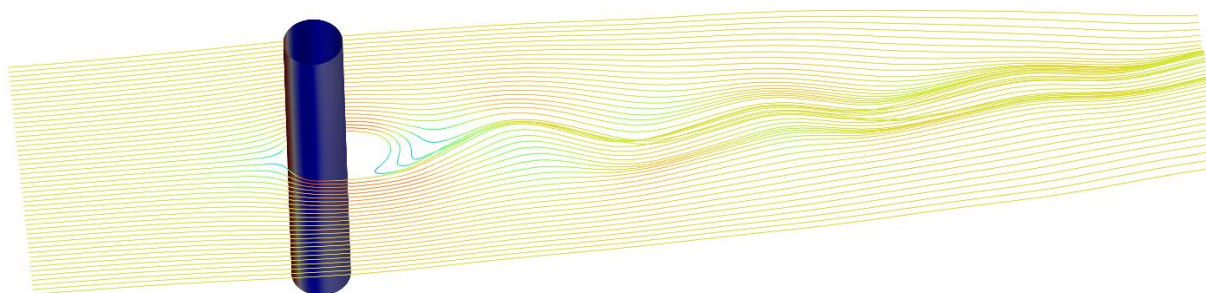
Analiza opływu walca kołowego stanowi punkt wyjściowy do dalszych obliczeń. Upewnienie się, że przyjęte metody oraz wielkości parametrów prowadzą do prawidłowych wyników, które są walidowane na podstawie badań, posłużą do potwierdzenia, że inne rozkłady ciśnienia oraz wartości siły nośnej czy ciągu są wynikiem zmiany geometrii bryły, a nie ewentualnego błędu numerycznego.

Do porównania wyników posłuży *model* siatki (14_d2), dla którego liczba Y^+ , przy prędkości 4 m/s osiąga wartość 1,63, co mieści się w pożądanym zakresie $0 \div 7$. Geometria jest przedstawiona na rys. 4.10. Tunel aerodynamiczny, który został wykorzystany do badań, generuje prędkości do 16 m/s, dlatego obliczenia numeryczne też ograniczają się do zakresu $1 \div 20$ m/s.

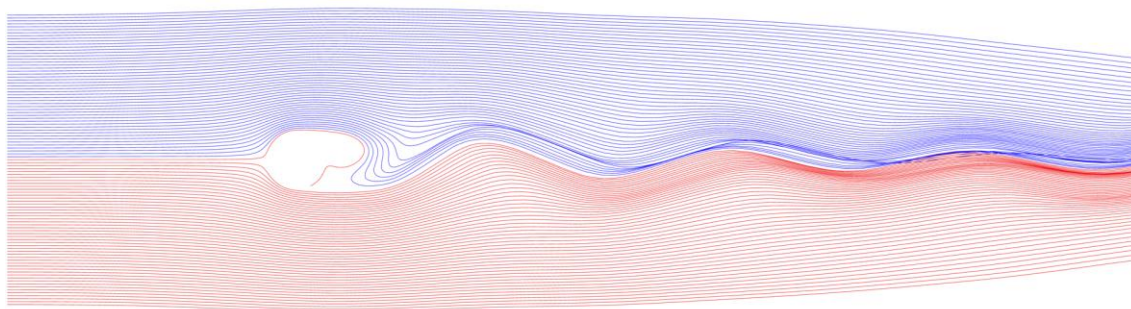
Tablica 4.7 – Zestawienie prędkości, liczb Re oraz Y^+ .

Prędkość	1	4	16	20	40	[m/s]
Re	1.43E+04	5.74E+04	2.30E+05	2.87E+05	5.74E+05	[-]
Y^+	0.469	1.633	5.687	6.952	12.973	[-]
Ts	20	5	-	0,5*	-	[ms]

W przypadku porównawczego modelu, przy prędkości 4 m/s i średnicy walca 20 cm liczba Reynoldsa wynosi $5,74 \cdot 10^4$. Wszystkie rozpatrywane przypadki ($1 \div 40$ m/s) mieszczą się w przedziale liczb Re $1 \cdot 10^4 \div 1 \cdot 10^6$. Jak podaje [4] oraz wiele przywołanych prac, w przypadku liczb $Re < 1 \cdot 10^5$ przepływ jest w zakresie podkrytycznym. Można tutaj zaobserwować między innymi Wiry Bernarda-Karmana. Przepływ za walcem jest nieustalony, dlatego w tym wypadku wymagana jest analiza w stanie nieustalonym (transient). Sam przepływ za walcem jest turbulentny. Za walcem pojawia się charakterystyczne „falowanie”. Grafika z programu Fluent na rys. 4.19 prezentuje linie prądu wokół walca oraz pole ciśnienia na jego powierzchni. Oznaczone kolorami strugi powietrza z lewej i prawej strony walca na rys. 4.20 pokazuje, jak zachowuje się struga za badaną bryłą. Przypadki analizy, dla których liczba Re przekracza 10^5 , dotyczą zakresu krytycznego. Granica pomiędzy zakresami jest oczywiście umowna. Ale modelowanie przepływu w zakresie krytycznym (przejściowym) jest trudniejsze, a praca nie skupia się na nim.

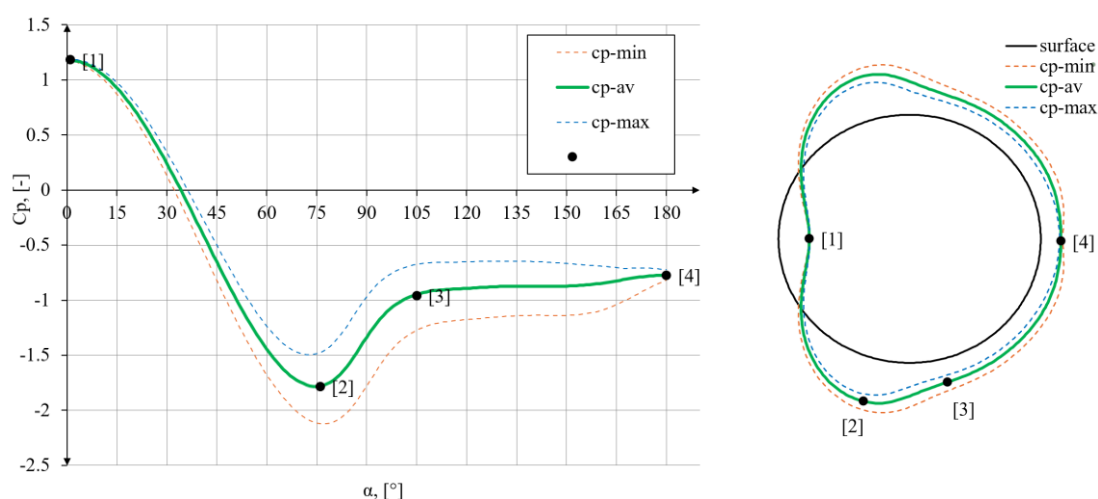


rys. 4.19 – Optyw walca w prostej domenie przy prędkości przepływu – 4 m/s.

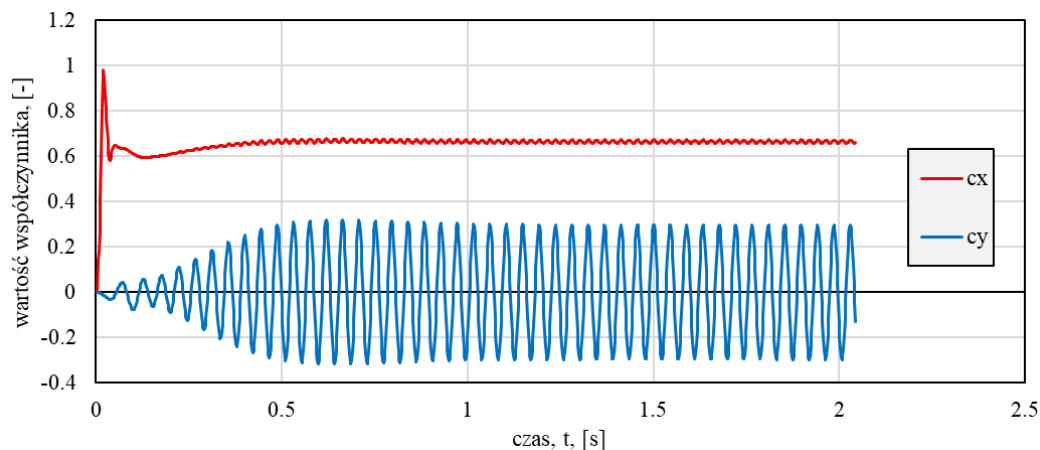


rys. 4.20 – Linie prądu wewnątrz domeny za walcem przy liczbie $Re \cong 5 \cdot 10^4$.

Uzyskany rozkład ciśnienia otrzymany z obliczeń na powierzchni walca, dla prędkości przepływu 4m/s jest przedstawiony na rys. 4.21. Przerywanymi liniami oznaczono obwiednię (cp-max, cp-min) natomiast linią ciągłą oznaczono wartość średnią (cp-av). Czarnymi punktami oznaczono charakterystyczne wielkości na wykresie. Wykres przedstawiono w układzie biegunowym $R(\alpha)$ i ortogonalnym $Y(X)$. Charakterystyczne punkty oznaczone numerami 1÷4 na rysunku zostały zestawione w tabelicy 4.8 dla różnych prędkości. W późniejszej części pracy posłużą jako porównanie do katenoidalnej chłodni.



rys. 4.21 – Rozkład ciśnienia na powierzchni modelu oraz numeracja punktów charakterystycznych.

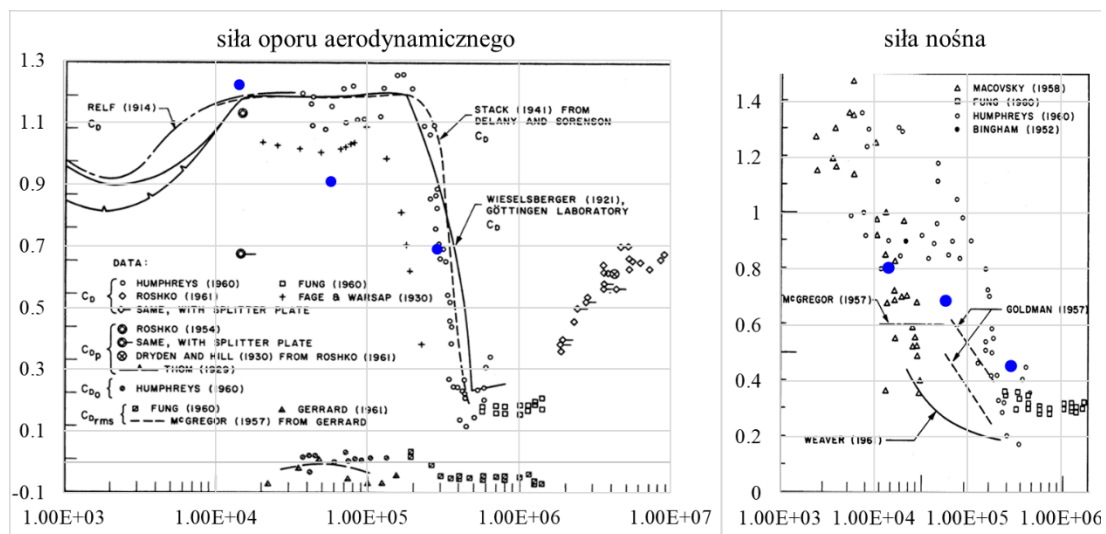


rys. 4.22 – Przebieg czasowy współczynnika siły oporu oraz siły nośnej.

W tabelicy 4.8 zestawiono wielkości charakterystyczne, otrzymane z obliczeń numerycznych dla walca w prostej domenie. Ta tablica jest podsumowaniem niniejszego rozdziału oraz stanowi punkt porównawczy dla wyników otrzymanych w następnych rozdziałach.

Tablica 4.8 – Porównanie wielkości charakterystycznych otrzymanych z obliczeń numerycznych

Prędkość [m/s]	Re	Cp [1]	Cp [2]	α [2]	α [3]	Cp [4]	Cx	Cy	Model
1	$1,43 \cdot 10^4$	1,254	-1,536	73	95	-1,026	1,223	0,807	14_d2_03
4	$5,74 \cdot 10^4$	1,182	-1,784	76	105	-0,773	0,908	0,689	14_d2_01
20	$2,87 \cdot 10^5$	1,143	-1,973	77	107	-0,709	0,689	0,455	14_d2_02



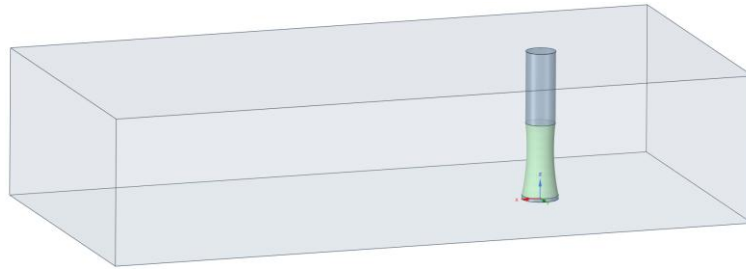
rys. 4.23 – Wyniki obliczeń C_x , C_y w odniesieniu do badań na podstawie zestawienia Lienhard'a [51].

Współczynniki siły nośnej C_y są obliczone jako percentyl 95% ze wszystkich znalezionych ekstremów na wykresie $C_y(t)$, natomiast C_x jest obliczony jako średnia arytmetyczna wartości funkcji $C_x(t)$ po ustabilizowaniu danych. Na wykresie (rys. 4.23) zostały zestawione wyniki otrzymanych obliczeń naniesione na wyniki badań, zestawione przez Lienhard'a [51]. Otrzymane z obliczeń wielkości sił są zbliżone do tych, uzyskanych z badań, na podstawie literatury.

4.7 Modele przejściowe

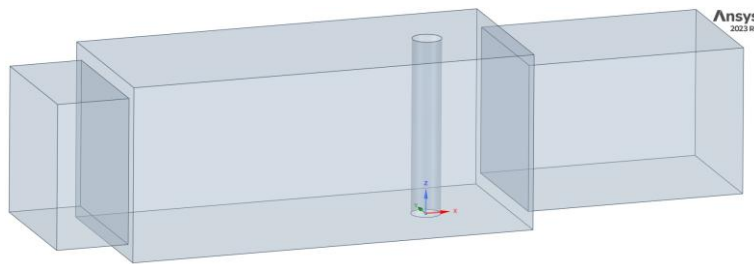
W kolejnym kroku pracy zostaną przedstawione 3 modele porównawcze, które przybliżają obliczenia numeryczne do kształtu badanego w tunelu aerodynamicznym.

- Model 15 – model chłodni o kształcie katenoidy w domenie o podobnych gabarytach jak model 14.



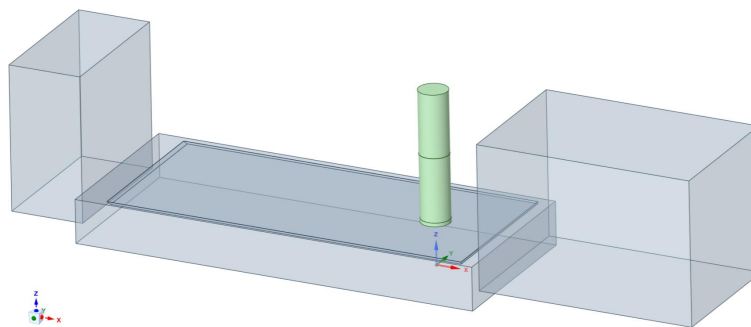
rys. 4.24 – Model 15

- Model 16 – model walca o średnicy D200 na całą długość domeny o kształcie komory badawczej tunelu aerodynamicznego.



rys. 4.25 – Model 16

- Model 17 - model walca o gabarytach chłodni (D200, H=400) wewnątrz domeny o kształcie komory badawczej tunelu aerodynamicznego.



rys. 4.26 – Model 17

4.7.1 Model 15

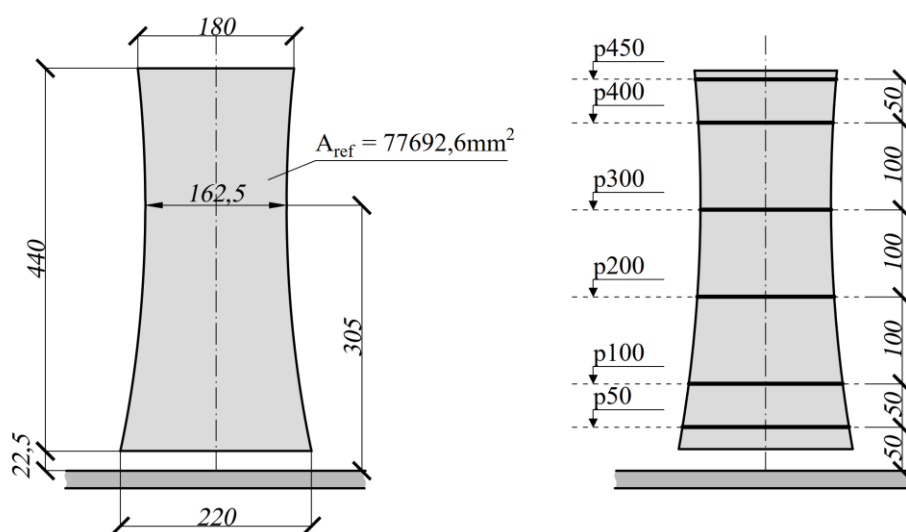
Model

Celem dla którego powstał *model (15)* jest porównanie, jak zmienia się rozkład ciśnienia oraz siła nośna i oporu aerodynamicznego, jeśli ciągły walec zostanie zastąpiony chłodnią kominową. W tym modelu zostanie zastosowana siatka o parametrach identycznych jak w *modelu (14_d2)*, wg. tablic 4.2 i 4.3. Wysokość pierwszego elementu przyściennego wynosi 0,2mm, co przy prędkości 4m/s i w wypadku walca daje liczbę $Y^+ = 1,63$. Dla tego modelu nie była prowadzona analiza wrażliwości rozwiązania na gęstość siatki czy wielkość kroku czasowego.

Geometria katenoidy wykorzystana do obliczeń jest pokazana na rys. 4.27. Model odziedziczył geometrię po chłodni kominowej zbudowanej w 2015 r. na terenie Elektrowni Opołe, zmniejszonej w skali 1:400. Grubość ściany modelu została sprowadzona do nieskończenie cienkiej powierzchni oddzielającej od siebie część zewnętrzną domeny od wnętrza. Powierzchnia nie pozwala na przepływ powietrza przez nią samą. Na potrzeby tej analizy wnętrze chłodni również zostało wyłączone.

Chłodnia kominowa jest ustawiona na szeregu słupów. Płaszcz rozpoczyna się na wysokości ok. 9m. W modelu obliczeniowym zostało to uwzględnione poprzez lukę pomiędzy podłogą tunelu a modelem. Same słupy zostały pominięte w analizie z uwagi na trudności w siatkowaniu i ryzyko powstania znaczących błędów numerycznych przez zniekształcone elementy. Nie mają one również istotnego wpływu na wynik obliczeń.

Model katenoidy ujawnia kilka dodatkowych zagadnień, które wymagają uszczegółowienia na tym etapie, a które nie dotyczyły walca. Katenoida zmienia swoją średnicę po wysokości. Co za tym idzie, jak zaobserwowano we wstępnych autorskich badaniach [1], będzie zmieniał się również rozkład ciśnienia po wysokości chłodni. Przy czym ta zmiana jest właśnie wynikiem zmiany geometrii. Z tego powodu, rozkład ciśnienia na poziomym przekroju zostanie odczytany na kilku wysokościach. Kolejne przekroje zostały oznaczone literą „p” oraz liczbą oznaczającą wysokość mierzoną od dna tunelu w [mm].

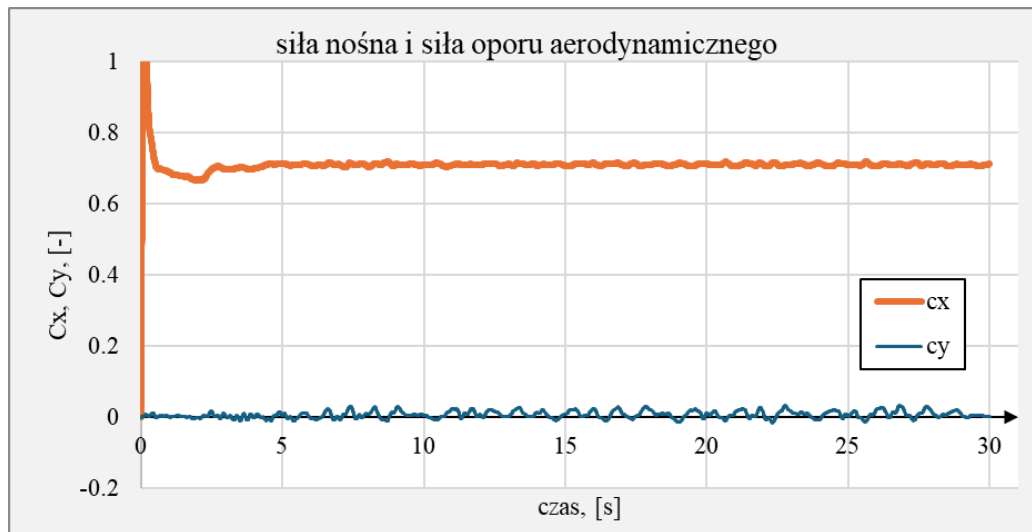


rys. 4.27 – Geometria modelu oraz oznaczenia przekrojów do odczytu wyników z modelu (15).

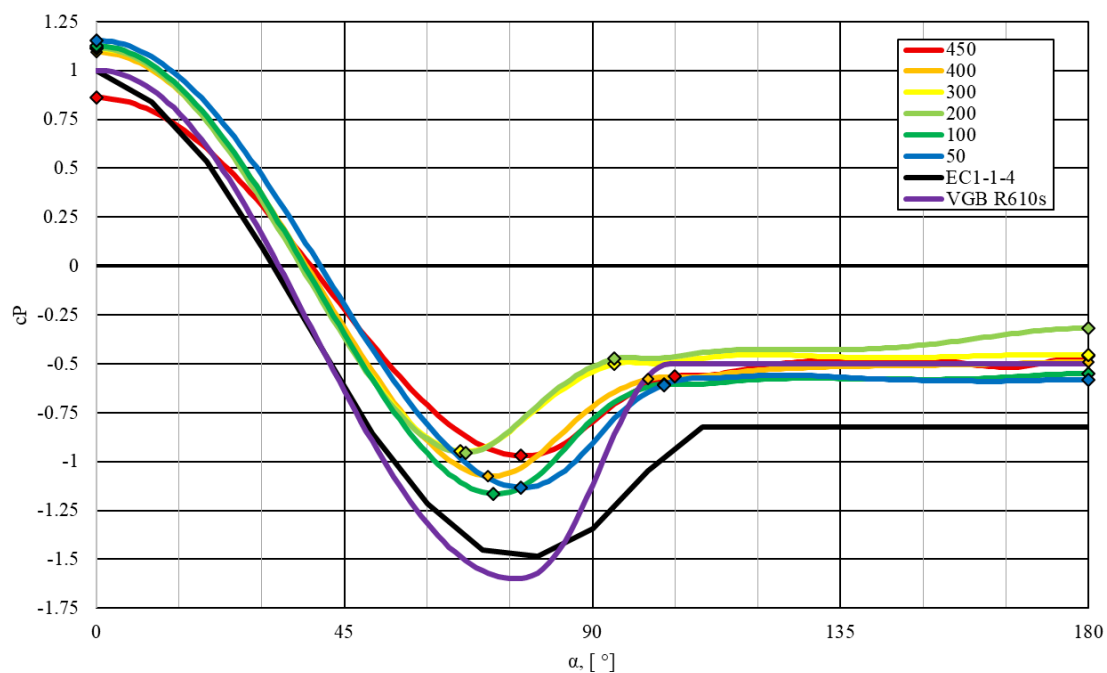
Rezultaty

Obliczenia zostały przeprowadzone dla jednej prędkości 4m/s. Pole powierzchni rzutu badanej bryły wynosi 0.077692 m². Charakterystyka zmienności w czasie dla siły nośnej i oporu aerodynamicznego zostały zestawione na rys. 2.35. Siła oporu po ok. 5s ustabilizowała się, a współczynnik siły osiągnął wartość średnią $C_x = 0,711$. Amplituda współczynnika siły nośnej – C_y wynosi 0,0302. Dla porównania, w przypadku walca osiągnięto wartości $C_x = 0,908$ i $C_y = 0,689$.

W przypadku siły oporu wartość jest mniejsza o 22%, natomiast siła nośna jest mniejsza o 95%. Siła nośna w przypadku kształtu katenoidy spadła niemalże do zera.



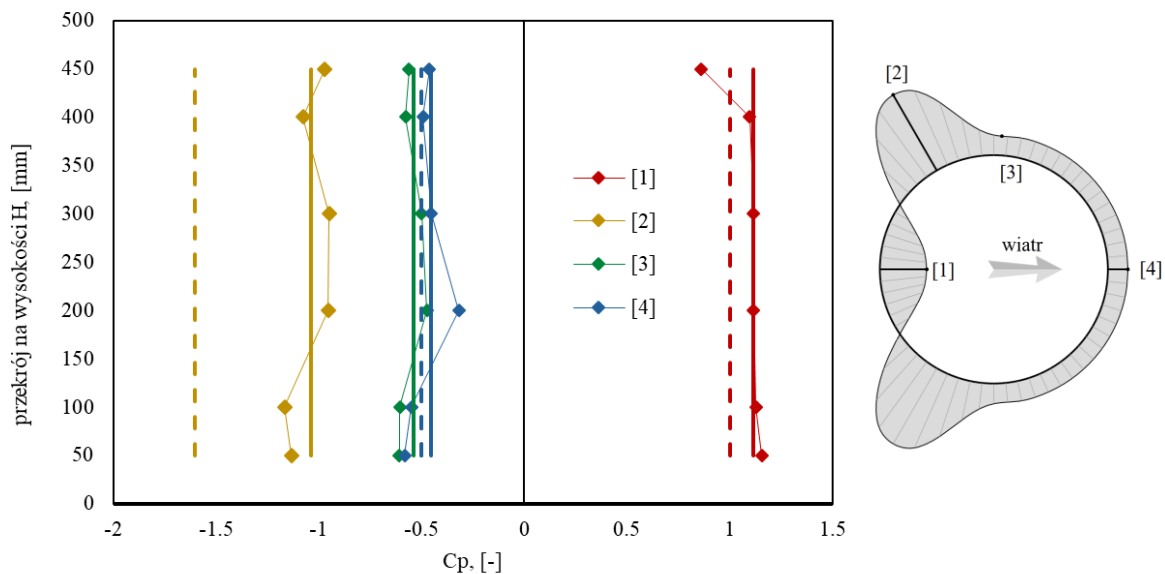
rys. 4.28 – Przebieg czasowy współczynnika siły oporu C_x oraz siły nośnej C_y .



rys. 4.29 – Rozkład współczynnika ciśnienia - C_p na powierzchni walca według badań oraz norm [N-1][N-2].

Rozkład współczynnika ciśnienia zmienia się w zależności od przekroju (50÷450mm). Charakterystyczne punkty (jak podaje rys. 4.29.), zostały oznaczone na wykresie kolorowymi rombami. Wykres na rys. 4.30, choć przedstawia wszystkie odczytane rozkłady ciśnienia, utrudnia zrozumienie – jak zmieniają się wielkości charakterystyczne ([1], [2], [3], [4]) z wysokością. Z tego względu, wielkości charakterystycznych punktów [1]÷[4] zostały pokazane na wykresie na rys. 4.30. Na pionowej osi jest oznaczona wysokość, na której zmierzono wartość. Na poziomej osi znajduje się współczynnik

ciśnienia. Kolejne serie [1]÷[4] są oznaczone kolorami. Czerwoną linią jest oznaczony współczynnik ciśnienia (parcie) na stronie nawietrznej [1]. Żółtą linią oznaczono współczynnik ciśnienia na powierzchniach bocznych [2]. Linie zielona [3] i niebieska [4] to parcie na zawietrznej stronie. Ciągłą grubą linią oznaczono średnią wartość na całej wysokości modelu a linią przerywaną – jako odniesienie oznaczono wielkość współczynnika ciśnienia obliczoną wg normy VGB [N-1].



rys. 4.30 – Zmiana rozkładu współczynnika rozkładu ciśnienia na wysokości modelu.

[1] – parcie na nawietrznej, [2] – ssanie na bokach, [3], [4] – ssanie na zawietrznej.

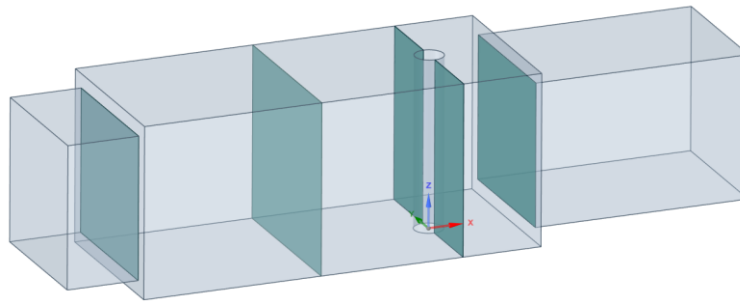
Na podstawie powyższego wykresu można zaobserwować, że wielkości charakterystyczne zmieniają się z wysokością nieznacznie. W przypadku ssania na ścianie bocznej ([2]), ciśnienie zmniejsza się w rejonie przewężenia modelu. Warto również zwrócić uwagę na porównanie obliczonych rozkładów do norm [N-2], [N-1]. Choć normy są dedykowane do obliczania wielkości ciśnienia dla liczb Re w zakresie $5 \cdot 10^5 \div 10^7$, to dla punktów charakterystycznych ([1], [3] i [4]) współczynniki ciśnienia niemal pokrywają się z normą. Pojawia się spora rozbieżność wielkości ssania na zawietrznej stronie. Za to zjawisko częściowo jest odpowiedzialna zbyt wąska domena, której ściany boczne zlokalizowane blisko modelu ograniczają rozływ powietrza na boki.

Podsumowanie

Dla modelu 15 udało się uzyskać rozkład ciśnienia na przekroju podobny jak dla walca. Ssanie na ścianie bocznej osiągnęło niższą wartość niż w przypadku walca. Pozostałe wielkości zachowują się podobnie. Całkowita siła oporu chłodni jest niższa od siły oporu dla ciągłego walca (o 22%), natomiast siła nośna działająca na chłodnię to zaledwie 5% siły nośnej działającej na walec.

4.7.2 Model 16

W (modelu 16) długi walec o średnicy 200mm znajduje się wewnątrz domeny o kształcie odpowiadającym geometrii tunelu wiatrowego, który został wykorzystany do badań. Celem tego modelu jest określenie, jak kształt domeny (tunelu aerodynamicznego) wpływa na wyniki obliczeń. W tym przypadku pojawia się dodatkowy problem związany z „Blockage Ratio”, czyli względną częścią powierzchni pola przekroju zajmowanym przez model. Na rys. 4.31 zaznaczono ciemniejszym odcieniem kolejne przekroje. Od lewej: Wlot do komory badawczej, przekrój przez komorę, przekrój przez komorę i model, przekrój na wylocie. Ponieważ wlot do komory badawczej ma wymiar mniejszy niż sama komora, powstaje kolejne pytanie – do której powierzchni należy się odnosić, wyliczając *blockage ratio* i ewentualną korektę wyników z uwagi na zmienny przekrój.



rys. 4.31 – Przekroje przez tunel

Tablica 4.9 – Pola przekroju przez kolejne elementy tunelu

przekrój	Pole powierzchni, [m ²]
Przez wlot	1,0
Przez komorę	1,44
Przez model	1,2
Przez wylot	1,0

Prędkość odniesienia

Założmy, że prędkość na wlocie to v_{in} . Pole powierzchni wlotu to A_{in} a pole powierzchni przekroju komory to A_{kom} . Zakładając, że prędkość na wlocie i gęstość jest stała, w każdym przekroju sumaryczna ilość przepływającego powietrza musi być taka sama. Jest to zgodne z zasadą zachowania masy.

$$A_{in} \cdot v_{in} = A_{kom} \cdot v_{kom} = A_{out} \cdot v_{out}$$

A zatem, średnia prędkość powietrza w komorze w przekroju, w którym się znajduje model wynosi:

$$v_{\text{kom}} = v_{\text{in}} \cdot A_{\text{in}} / A_{\text{kom}} \quad (4-12)$$

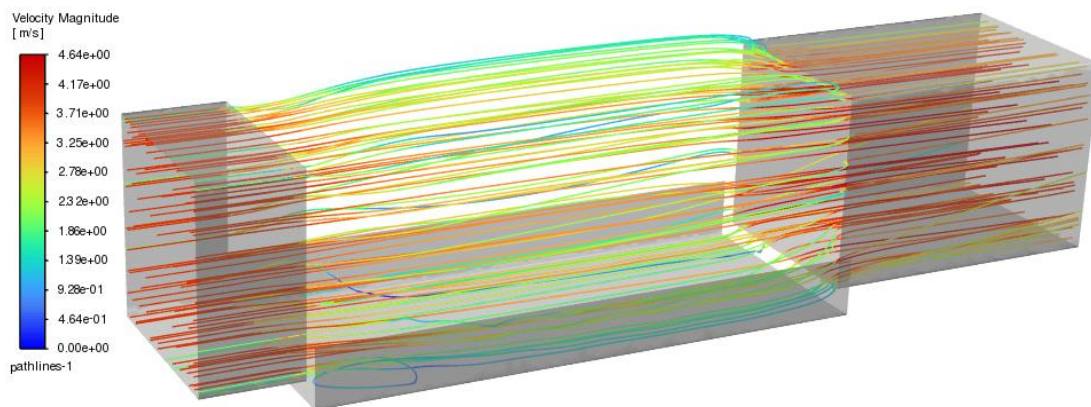
W analizowanym przypadku średnia prędkość wewnątrz komory wynosi $v_{\text{kom}} = \frac{v_{\text{in}}}{1,44} \cong 0,694 \cdot v_{\text{in}}$.

Prędkość odniesienia ma znaczący wpływ na interpretację wyników. Każdy wyznaczony współczynnik siły lub ciśnienia oblicza się w odniesieniu do bezwzględnych sił, poprzez podzielenie przez składnik:

$$(0,5 \cdot \rho \cdot v^2)$$

W tym wypadku, pomniejszenie prędkości odniesienia od wartości $0,694 \cdot v_{\text{in}}$ skutkuje dwukrotnym powiększeniem lub pomniejszeniem wyników, względem zastosowania prędkości v_{in} . Można zatem stwierdzić, że przyjęcie właściwej prędkości odniesienia ma znaczący wpływ na interpretację wyników. Wątpliwość budzi tutaj gradient prędkości w strefie przyściennej z uwagi na uskok na ścianie. Zjawisko zmniejszania się prędkości w strefach przyściennych jest dobrze rozpoznane i zostało opisane w wielu podręcznikach, na przykład [59] trudno jest jednak określić, w jakiej odległości za uskokiem na ścianie rozkład prędkości wewnątrz tunelu jest stały i jaka jest wartość prędkości w rejonie badanego modelu.

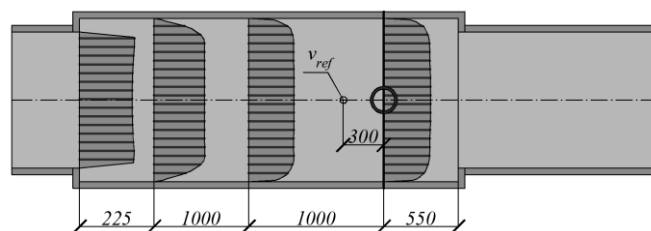
W celu wyznaczenia prędkości odniesienia został wykonany pomocniczy model tunelu aerodynamicznego bez walca / chłodni wewnątrz – (*model 18e_a*). Model zakłada identyczne warunki siatkowania jak właściwy model z walcem, z tą różnicą, że nie ma zagadnienia walca. Wynikiem obliczeń przepływu w tym modelu jest rozkład prędkości na kilku przekrojach przez środek domeny.



rys. 4.32 – Przepływ swobodny w tunelu bez modelu wewnątrz.

Zgodnie z oczekiwaniem, obliczona prędkość przepływu zmniejsza się w strefach przyściennych. W przedniej części komory badawczej, wielkość strefy gradientu prędkości jest znacznie większa. W odległości ok. 1 m od modelu strefa gradientu prędkości jest znacznie mniejsza i nie zmienia się na długości tunelu aż do miejsca, w którym znajduje się model. W końcowej części – za modelem,

gdzie przekrój zmniejsza się, na środku pojawia się pole wyższej prędkości. rys. 4.32 przedstawia linię przepływu wewnątrz tunelu, natomiast rys. 4.33 pokazuje na wybranych przekrojach rozkład prędkości wewnątrz komory.



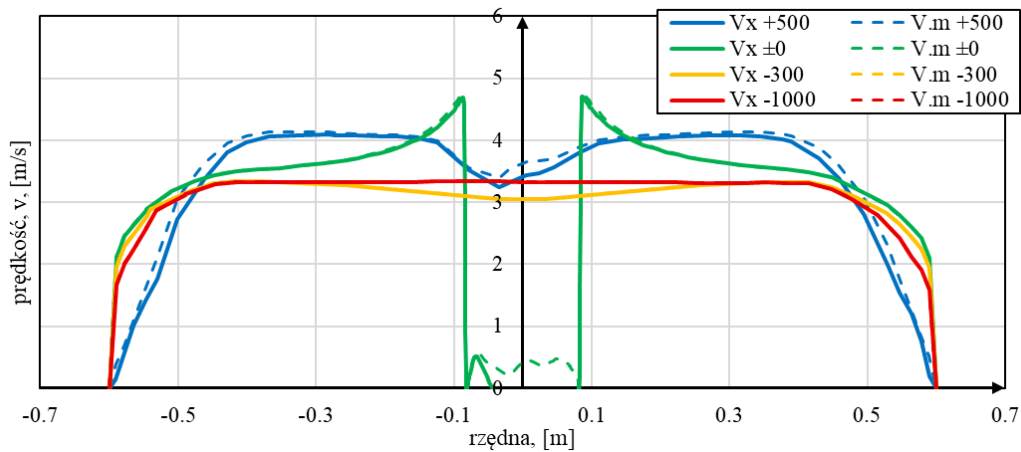
rys. 4.33 – Rozkłady prędkości wewnątrz tunelu na przekrojach w środku domeny. Czarnym kołem oznaczono pozycję, w której powinien znajdować się badany model.

Tablica 4.10– Prędkości w środku przekroju – 300mm przed badanym modelem.

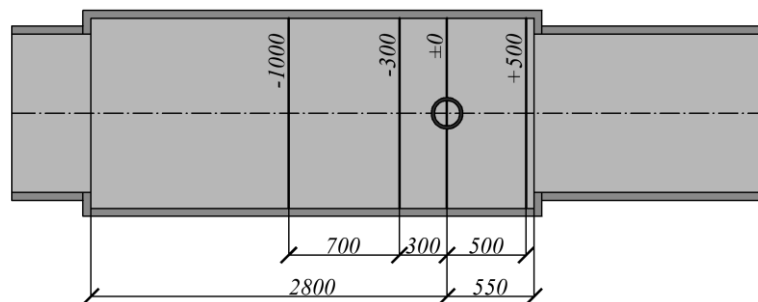
model	prędkość na wlocie v_{inlet}	prędkość 300mm przed modelem v_{ref}	$\frac{v_{300}}{v_{inlet}}$
	[m/s]	[m/s]	
18a_e_03	1	0.865	86.5%
18a_e_01	4	3.37	84.3%
18a_e_04	10	8.35	83.5%
18a_e_02	20	16.61	83.0%
wartość uśredniona			84%

Prędkość przepływu na wlocie nie ma istotnego wpływu na sam rozkład prędkości wewnątrz tunelu. Przyjęto, że uśredniona prędkość przepływu w środkowej części domeny, to 84% prędkości na wlocie. Tablica 4.10 zestawia prędkości odczytane przed modelem dla różnych prędkości na wlocie. Na rys. 4.33 oznaczono miejsce v_{ref} , z którego odczytywana jest prędkość w tablicy 4.10.

Prędkości odniesienia zestawione w tablicy 4.10 zakładają, że tunel jest pusty, a wyposażony jedynie w stół do badań (rys. 4.4). Sporządzenie rozkładu prędkości dla tunelu z modelem w środku nie byłoby wprost możliwe, z uwagi na to, że model zaburza przepływ, jak pokazano na rys. 4.34. Na rysunku pokazano, jak zmienia się wielkość składowej wektora prędkości wzdłuż głównego kierunku przepływu (V_x), oraz wielkość całego wektora prędkości ($V.m$). Wykresy sporządzono na przekroju przez środek tunelu, na przekrojach opisanych poniżej rys. 4.33.



rys. 4.34 – Rozkład prędkości wewnątrz tunelu.



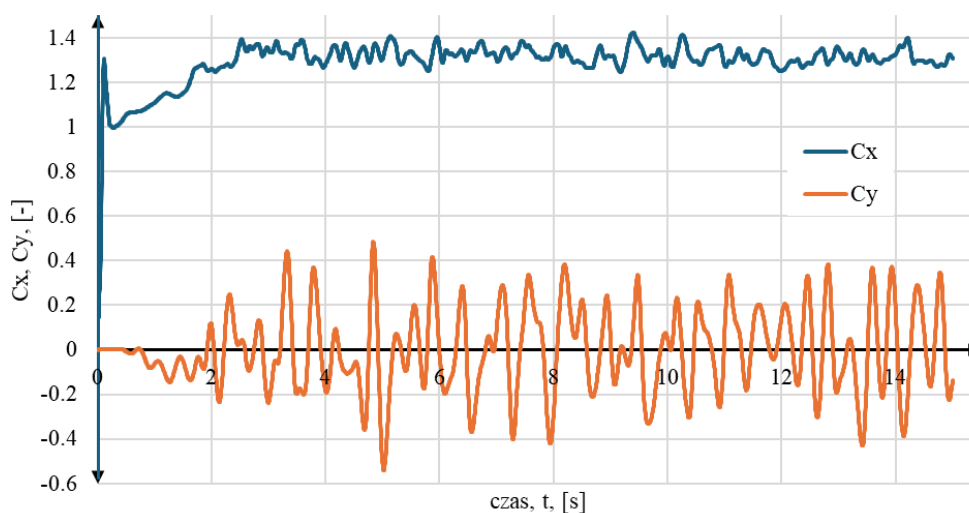
rys. 4.35 – Opis przekrojów do wykresu na rys. 4.33.

Prędkość odczytana z powyższego wykresu przed badanym modelem wynosi 3,33m/s, przy prędkości wlotowej 4m/s. W przypadku modelu obliczeniowego z pustą domeną było to 3,37m/s. W związku z tym wpływ obecności badanego modelu wewnątrz domeny obliczeniowej jest pomijany w całej pracy.

Dla przedmiotowego modelu (16) rozkład ciśnienia jest sprawdzany na środkowym przekroju walca, dlatego jako prędkość odniesienia została przyjęta $v_{\text{ref}} = 0,84 \cdot v_{\text{inlet}}$ zgodnie z tablicą 4.10. Siła ciągu oraz siła nośna są wyznaczane na podstawie całego walca (od ściany do ściany) a, nie tylko wąskiego przekroju w środku, dlatego jako prędkość odniesienia przyjmuje się $v_{\text{ref}} = 0,694 \cdot v_{\text{inlet}}$ zgodnie z równaniem (4-4).

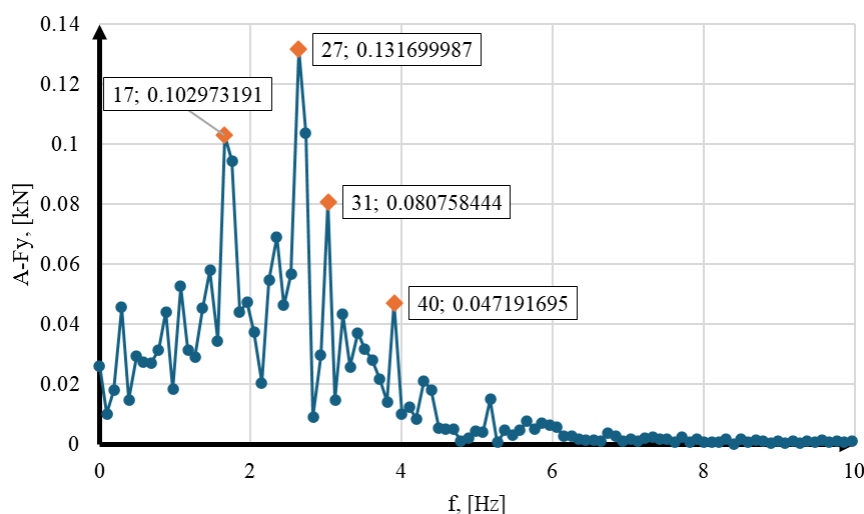
Wyniki obliczeń – model 16:

W analizowanym modelu rozpatrzono jeden przypadek prędkości – 4m/s. Poniżej przedstawiono rozkład w czasie siły nośnej oraz siły oporu w formie współczynników siły. Zaprezentowane współczynniki uwzględniają redukcję prędkości do 69,4% prędkości na wlocie. Po osiągnięciu pewnej stabilizacji przebiegu obliczono średni współczynnik siły oporu $C_x = 1,32$; oraz amplitudy siły nośnej $C_y = 0,406$.



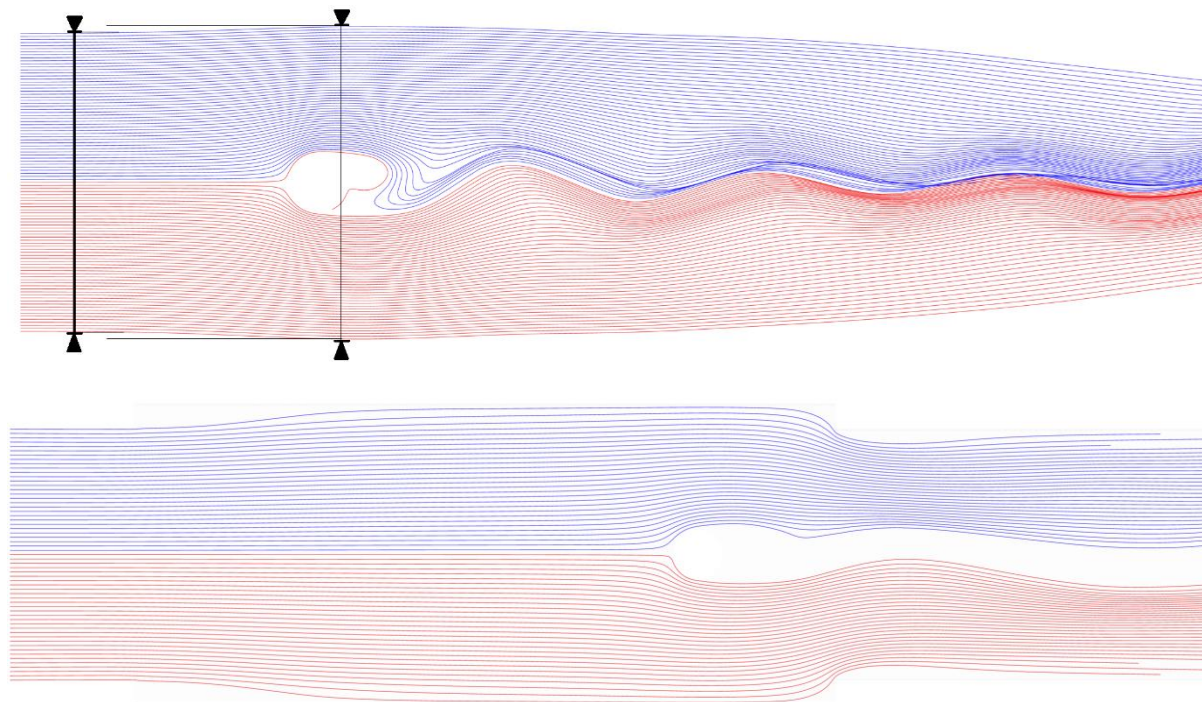
rys. 4.36 – Rozkład współczynnika siły oporu i siły nośnej

Pomimo że model walca jest tutaj identyczny jak w przypadku modelu (14_d2), wykres siły nośnej ma istotnie różny przebieg. W przypadku modelu walca w prostej domenie (14_d2) przebieg siły nośnej był niemal sinusoidalny. Wyznaczenie częstotliwości zmian siły nośnej dla takiego przebiegu jest możliwe bez użycia zaawansowanych technik (na przykład FFT). W rozpatrywanym przypadku wykorzystano dyskretną transformatę Fouriera (FFT) na liczbie punktów 2048 do wyznaczenia częstotliwości zmian siły nośnej. Wynik analizy Fouriera przedstawia rys. 4.37.



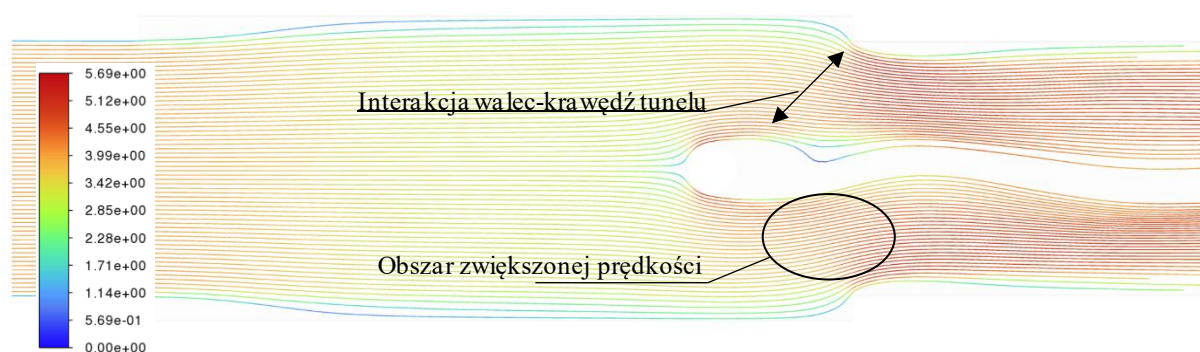
rys. 4.37 – Analiza Fouriera dla częstotliwości zmian siły nośnej.

Sposób w jaki kształt tunelu w pewnym stopniu ogranicza przepływ wokół walca, prezentuje rys. 4.38. Na pierwszej ilustracji przedstawiono przepływ w domenie o prostych ścianach bocznych. Można zauważyć, że linie przepływu wokół walca delikatnie rozchodzą się na wysokości walca. W przypadku modelu wewnątrz ograniczonej domeny, przepływające powietrze nie ma miejsca na rozejście się na boki.



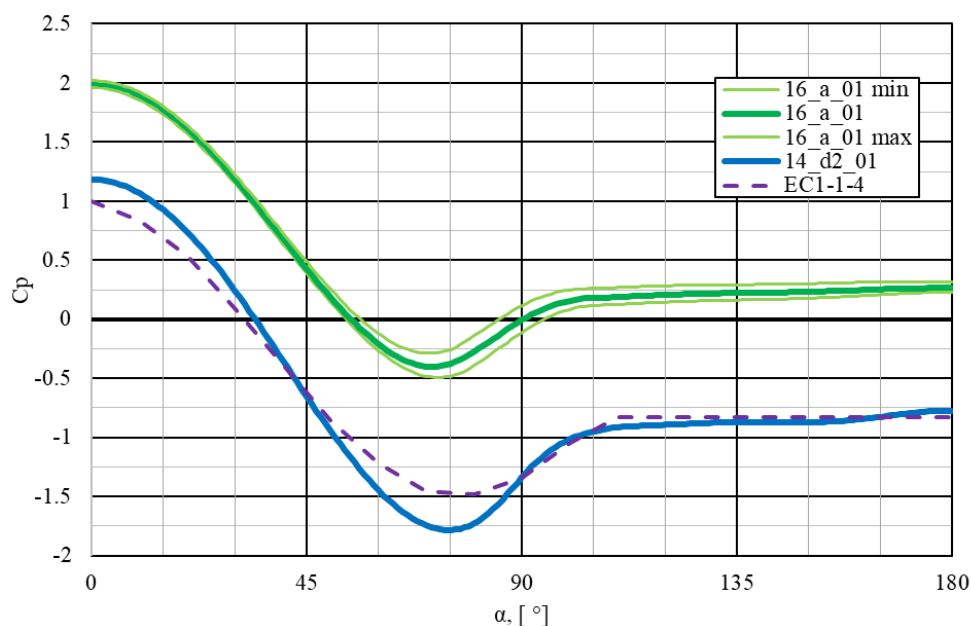
rys. 4.38 – Linie prądu (streamlines / pathlines) wokół walca w domenie prostej (model 14) oraz w domenie w kształcie tunelu (model 16).

Normalnym zjawiskiem towarzyszącym opływowi walca, jest wzrost prędkości przy ścianach walca. W omawianej domenie za walcem dodatkowo można zaobserwować pole o zwiększonej prędkości przepływu za walcem (rys. 4.39). W miejscu ponownego zwężenia przekroju tunelu, niemal w całym przekroju pojawia się zwiększona prędkość, za wyjątkiem stref przyściennych i cienia aerodynamicznego walca. W tym miejscu pojawia się interakcja pomiędzy walcem i krawędzią tunelu.



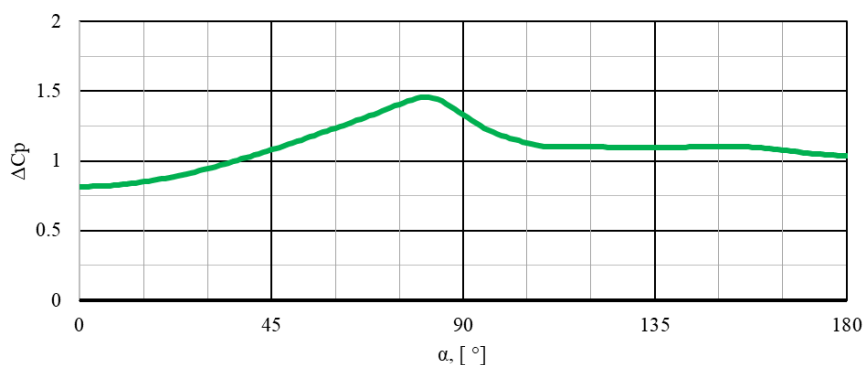
rys. 4.39 – Linie przepływu. Prędkość przepływu v , [m/s].

Bardzo ciekawy z punktu widzenia badań prowadzonych w tunelu jest rozkład ciśnienia na powierzchni walca. rys. 4.40 przedstawia rozkłady ciśnień dla omawianego modelu (16), który uwzględnia kształt tunelu. Kolorem zielonym jest oznaczony średni rozkład ciśnienia, natomiast kolorem jasnym zielonym jest oznaczona obwiednia (min / max) ze wszystkich rozkładów dla różnych kroków czasowych. Krzywa jest obliczona dla założenia, że prędkość odniesienia jest równa 84% prędkości na wlocie. Dla porównania wykres zawiera również rozkład dla modelu takiego samego walca, ale z podobną domeną oraz ciśnienia obliczonego wg. Normy [N-2].



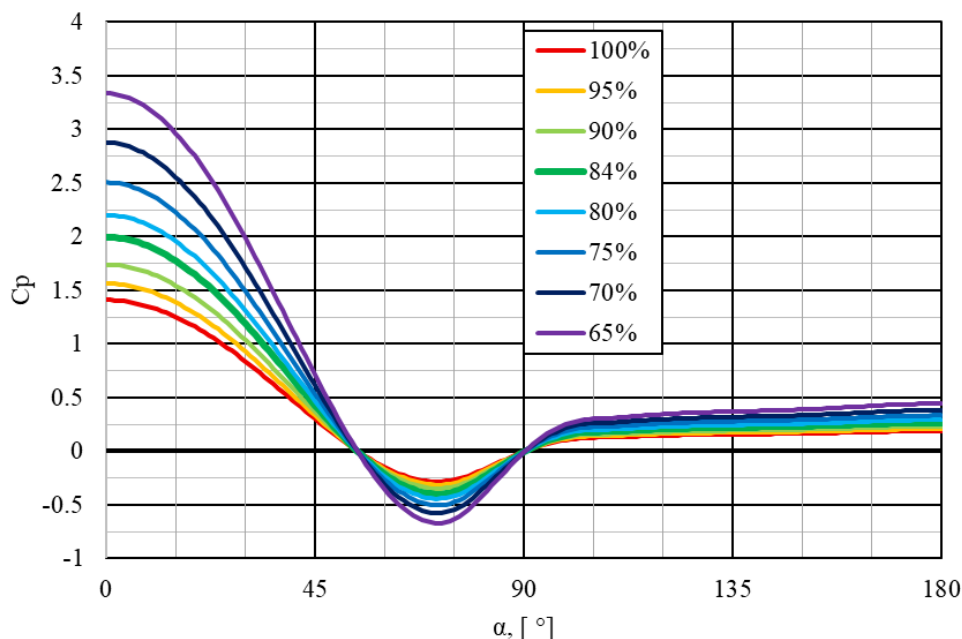
rys. 4.40 – Rozkłady ciśnień na przekroju dla modelu (16) oraz jako porównanie modelu (14) i Eurokodu [N-2].

Wykresy dla modeli z domeną o kształcie tunelu (model 16) i prostą domeną (model 14) sprawiają wrażenie linii przesuniętych względem siebie o pewną wartość. Wielkość przesunięcia nie jest stałą wartością i zmienia się na przekroju. rys. 4.41 przedstawia rozkład różnicy pomiędzy współczynnikiem ciśnienia dla modeli (16) i (14).



rys. 4.41 – Różnica pomiędzy rozkładem ciśnienia dla modelu z domeną uwzględniającą tunel aerodynamiczny i prostą domeną: ΔC_p .

Na uwagę zasługuje jeszcze w tym miejscu wrażliwość wyników na założoną prędkość odniesienia. Obliczenia współczynnika ciśnienia na powierzchni walca są wykonane przy założeniu, że prędkość powietrza nacierającego na walec wynosi 84% prędkości na wlocie do tunelu. Ta wielkość jest poparta wartością odczytaną i uśrednioną z modelu w miejscu przed walcem. Poniższy wykres przedstawia rozkłady ciśnienia na walcu dla różnych założonych prędkości odniesienia – od 100% v_{inlet} do 65% v_{inlet} .



rys. 4.42 – Rozkład ciśnienia na powierzchni walca w zależności od przyjętej prędkości odniesienia, wyrażonej jako procentowy udział prędkości na wlocie.

Wnioski:

Kształt domeny obliczeniowej, a zatem i kształt tunelu, mają istotny wpływ na otrzymywane wielkości wyników. Można wyodrębnić tutaj 3 główne problemy:

- zmiana prędkości odniesienia,
- blokowanie rozplywu powietrza na boki walca,
- wysoka wartość *blockage ratio*.

W rejonie walca prędkość jest stała i zmienia się dopiero w rejonie blisko ścian tunelu. W środkowej strudze powietrza wewnątrz tunelu prędkość ma stałą wartość i wynosi około 84% prędkości na wlocie. Wartość ta nieznacznie zmienia się dla różnych prędkości wlotowych, ale jest to bardzo mała zmiana, która może zostać zaniedbana.

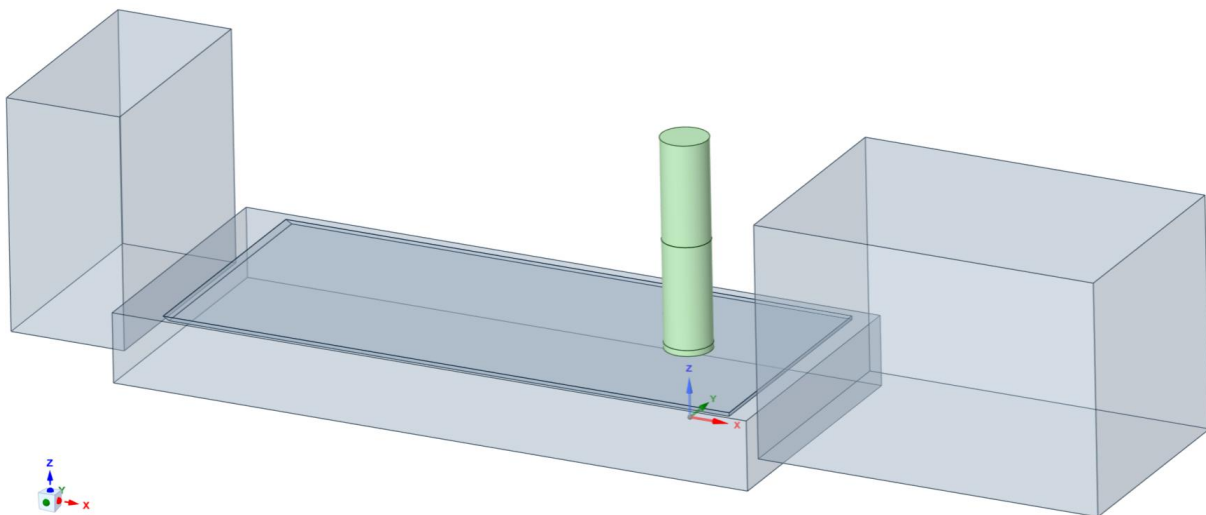
Większym problemem jest tutaj ograniczenie przestrzeni do rozchodzenia się przepływającego powietrza na boki oraz ostra krawędź na zewnątrz strony modelu. To powoduje przesunięcie rozkładu ciśnienia względem modelu w nieograniczonej domenie. Wielkość przesunięcia nie jest stałą wartością,

więc przeliczanie obliczonego rozkładu ciśnienia na walcu, na rzeczywisty rozkład na powierzchni budowli wymagałby dodatkowych zabiegów matematycznych.

Parametr *blockage ratio* (BR) wynosi w tym opisywanym modelu $0,24m^2/1,44m^2 = 16,67\%$. Jest to duża wartość, która powinna zostać uwzględniona w obliczeniu prędkości odniesienia. Niemniej jednak rozpatrywany model jest pewnym przejściowym przypadkiem, który służy jedynie do zbadania wpływu kształtu tunelu na wielkości wyników. Docelowy model ma o wiele mniejsze pole przekroju, przez co BR nie będzie miał aż takiego wpływu na wielkości wyników.

4.7.3 Model 17

Poprzednie trzy podrozdziały były poświęcone podstawowym zagadnieniom przepływu. Rozdział 4.6 jest poświęcony zagadnieniu opływu prostego walca w zakresie podkrytycznym/krytycznym liczb Reynoldsa ($Re < 5 \cdot 10^5$). Rozdział 4.7.1 skupia się na opływie modelu katenoidy w nieskrępowanej domenie. Poprzedni rozdział jest poświęcony interakcji tunelu i prostego walca. W tym rozdziale autor skupia się na zagadnieniu opływu krótkiego walca wewnątrz domeny o kształcie takim jak zastosowany tunel do badań. Zaprezentowany tutaj model obliczeniowy posłuży do porównania zachowania katenoidy i walca. Aby porównanie było jak najbardziej wartościowe, wszystkie warunki są zachowane, *model (17)* różni się od *modelu (18)* jedynie tym, że katenoida została zastąpiona walcem.



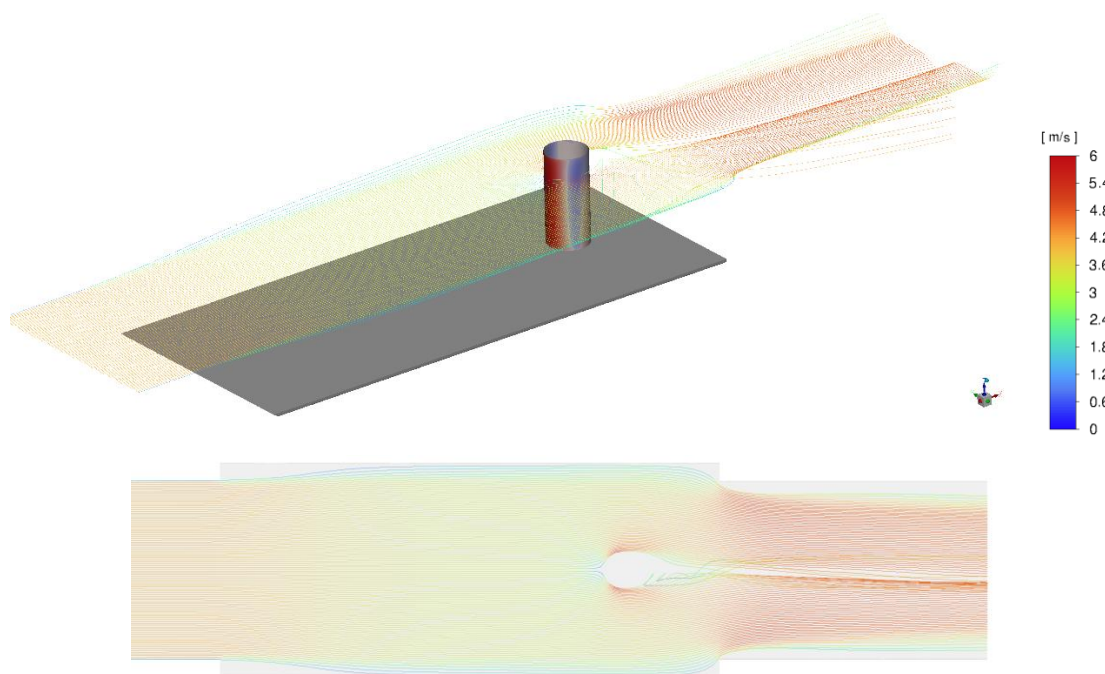
rys. 4.43 – Geometria (modelu 17). Dla lepszej widoczności, górna część domeny została ukryta.

W celu wymuszenia podziału siatkowania, domena jest podzielona na 7 części. Są to 4 prostopadłościennych brył, oraz 3 części walca wewnątrz domeny, z których środkowa to wspomniany walec o nieprzepuszczalnej powierzchni. Wszystkie pozostałe wewnętrzne przegrody mają przypisany typ przegrody „internal”. Dodatkowo w modelu pojawiła się pozioma bryła pod badaną bryłą – jest to

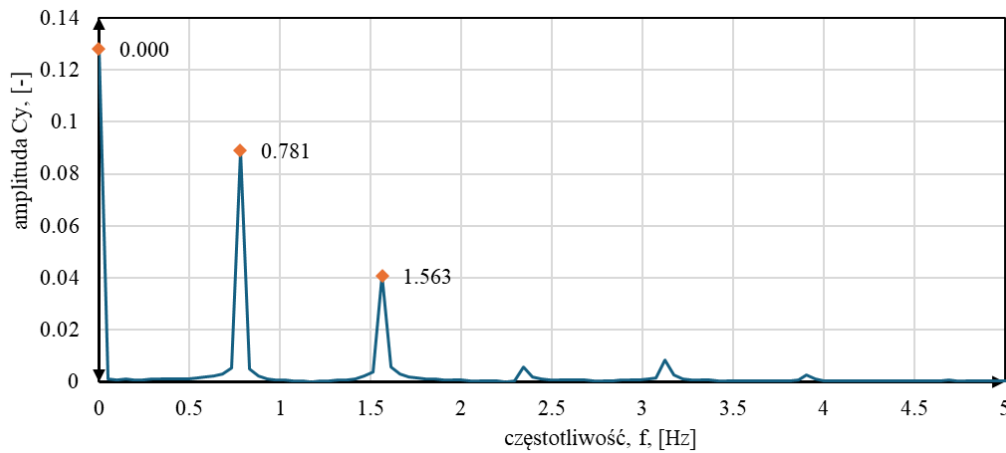
stół, na którym jest ustawiony model do badań. Opis poszczególnych przegród jest identyczny jak na Rys. 4.4, a metody obliczeń identyczne jak w poprzednich rozdziałach.

Wyniki obliczeń:

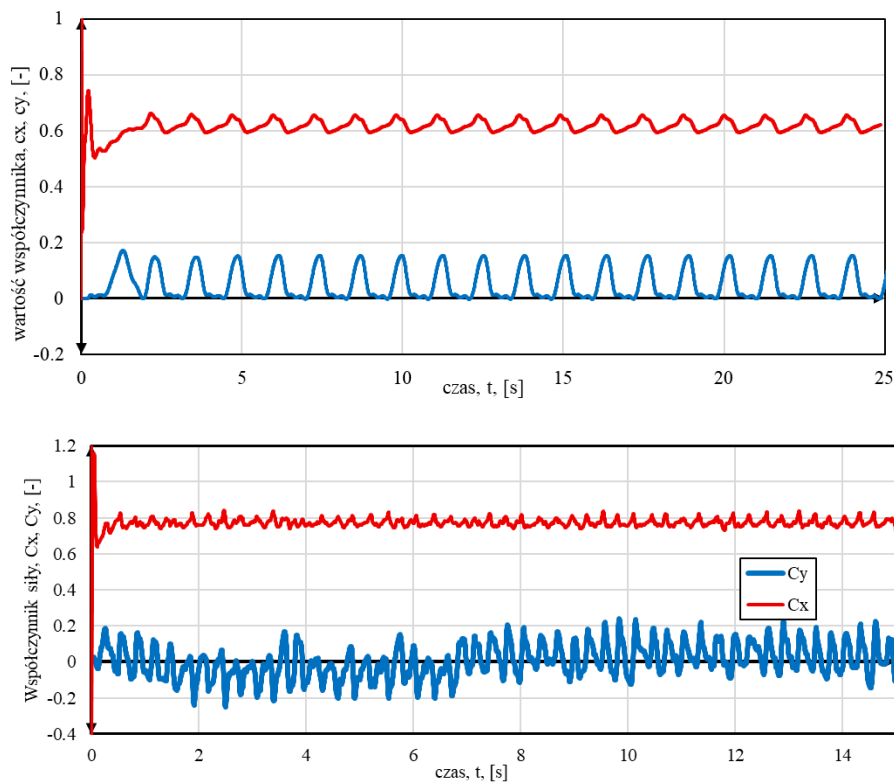
Obliczenia zostały wykonane dla prędkości na wlocie 1, 4 i 20m/s. Zestawienie liczb Re oraz Y^+ jest w tym przypadku identyczne jak w przypadku opływu prostego walca (tablica 4.7). Poniższe ilustracje (rys. 4.44) przedstawiają wyniki obliczeń w formie linii przepływu oraz map ciśnienia na powierzchni modelu. Co ważne, badany walec jest zakryty z góry i dołu, co oznacza, że powietrze przepływa również przez jego wnętrze. Zaobserwowano tutaj, że siła nośna nie oddziałuje symetrycznie na model (średnia siła nośna jest różna od zera). Pojawiła się wyraźna tendencja działania siły z jednej strony. Wykres siły nośnej w swoim przebiegu nie przypomina sinusoidy. Określenie częstotliwości odrywania wirów wymaga przeprowadzenia analizy Fouriera. W tym przypadku została ona wykonana na licznie 4096 punktów, a jej wyniki przedstawia rys. 4.45.



rys. 4.44 – Wyniki obliczeń na modelu (17). Opływ walca przy prędkości na wlocie 4m/s. Widok aksonometryczny, widok z góry. Kolorowanie linii przepływu wg. prędkości.

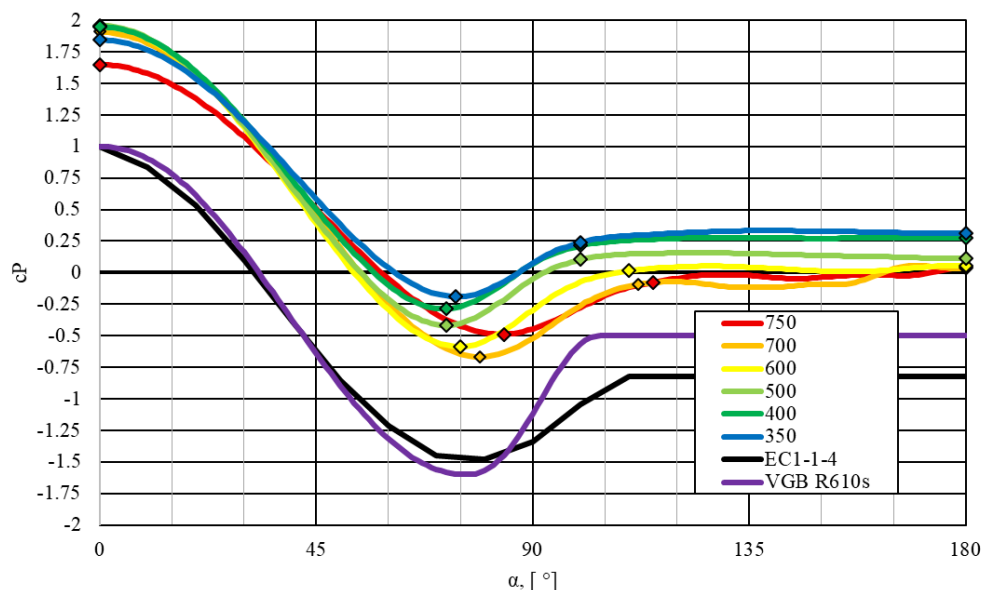


rys. 4.45 – Analiza Fouriera dla siły nośnej, przy prędkości 4m/s.



rys. 4.46 – Przebieg siły nośnej i siły oporu przy prędkości na wlocie kolejno 4m/s i 20m/s.

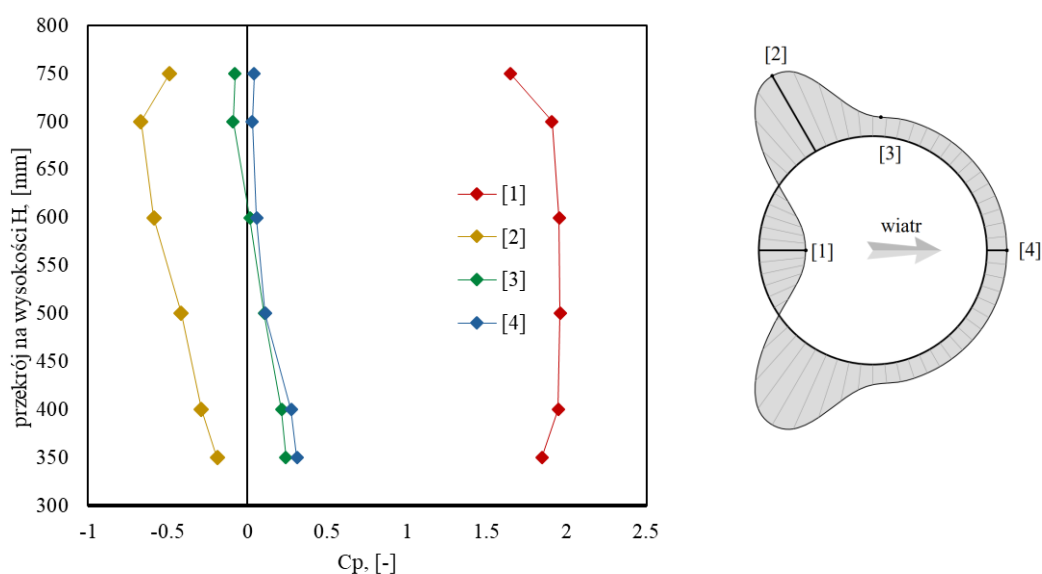
Model nie jest umieszczony symetrycznie względem domeny obliczeniowej. Dodatkowo poniżej modelu znajduje się stół do badań, który zaburza przepływ. Rozkład ciśnienia na powierzchni walca został zmierzony na 6 przekrojach poziomych przez walec, na poziomach 350, 400, 500, 600, 700 i 750mm mierzonych od dna domeny. Górna powierzchnia stołu do badań wewnątrz komory badawczej znajduje się 300mm powyżej dna domeny. Uśrednione, dla kilku wybranych kroków czasowych, rozkłady ciśnienia przez wszystkie 6 przekrojów walca są pokazane na rys. 4.47.



rys. 4.47 – Rozkład ciśnienia na powierzchni walca. Przekroje 350÷750mm, prędkość 4m/s

Wszystkie cztery rozkłady ciśnienia zachowują podobne tendencje. Główne różnice pojawiają się na skrajnym przekroju +750mm. Widać również pewien rozrzut pomiędzy ciśnieniami na zawiętrznej stronie dla każdego z przekrojów. Na wykresie, na rys. 4.47 symbolami $\blacklozenge$ oznaczono punkty charakterystycznych wartości na każdym z wykresów. Dla lepszej wizualizacji, jak zmieniają się ekstrema po wysokości, zostały one zestawione na wykresie, na rys. 4.48.

Czerwoną linią jest oznaczony współczynnik ciśnienia (parcie) na stronie nawietrznej [1]. Żółtą linią oznaczono współczynnik ciśnienia na powierzchniach bocznych [2]. Linie zielona [3] i niebieska [4] to parcie na zawiętrznej stronie.

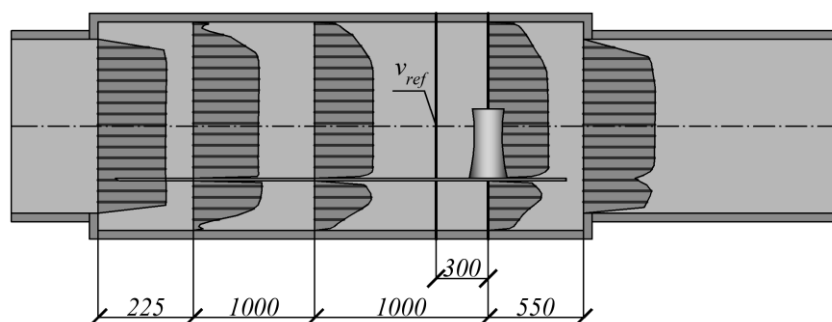


rys. 4.48 – Zestawienie współczynników ciśnień dla charakterystycznych punktów (na osi poziomej) odczytane na różnych wysokościach/przekrojach (na osi pionowej), dla prędkości 4m/s.

Na powyższym wykresie można zauważyć pewne tendencje.

- Ciśnienie na nawietrznej stronie nie zmienia się wraz z wysokością. Ale zaobserwowano zmniejszenie parcia w rejonach swobodnego końca walca.
- Ciśnienie na powierzchniach bocznych i na zawietrznej stronie zmniejsza się wraz z wysokością (na ścianach bocznych rośnie co do wartości, na zawietrznej następuje zmiana znaku).
- Ssanie na powierzchniach bocznych i na zawietrznej stronie zmniejsza swoją wielkość na swobodnym końcu – ale tylko na górze walca.

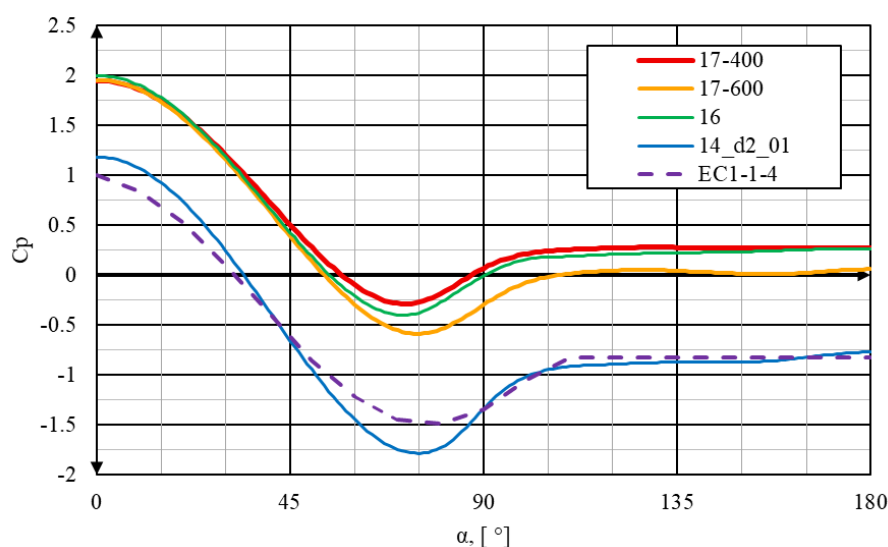
O ile zmniejszanie co do wartości ciśnienia przy swobodnym końcu jest zrozumiałe, zmniejszanie się ciśnienia na zawietrznej stronie sugeruje, że wraz z wysokością zmienia się również prędkość przepływu. Schemat na rys. 4.49 przedstawia charakter rozkładu prędkości wewnątrz tunelu. Prędkość nad stołem zmienia swoją wartość, ale stabilizuje się poniżej 10cm nad jego powierzchnią, osiągając stałą wartość 84% prędkości na wlocie. Niemniej jednak rozkład prędkości wewnątrz tunelu został sporządzony na pustym tunelu, wyposażonym jedynie w stół, ale bez właściwej badanej bryły. Z uwagi na *blockage ratio* = 6,1% badany model może dodatkowo ograniczać przepływ i powodować ograniczanie prędkości przepływu, zmniejszając tym samym prędkość w rejonie modelu.



rys. 4.49 – Rozkład prędkości wewnątrz tunelu – przekrój przez stół.

Skala rysunku 1m = 10m/s, prędkość na wlocie 4m/s.

Podobnie jak dla długiego walca (omówionego w rozdziale 4.7.2 – *model 16*) rozkład ciśnienia na powierzchni walca sprawia wrażenie „przesuniętego w górę”. Na Rys. 4.45 porównano rozkład współczynnika ciśnienia dla przedmiotowego modelu, na przekrojach +400 i +600mm, do modelu długiego walca oraz rozkładu normowego, według Eurokodu. Rozkład ciśnienia na powierzchni badanego krótkiego walca pokrywa się z rozkładem uzyskanym dla długiego walca w ograniczonej domenie. Tak jak poprzednio, wykres (dla modeli nr 17) sprawia wrażenie „przesuniętego w górę”, względem rozkładu normowego. Przesunięcie wykresu to efekt wpływu tunelu na wyniki badań.



rys. 4.50 – Porównanie rozkładu ciśnienia na walcu dla opływu wg normy Eurokod (EC1-1-4), w prostej domenie (model 14), długiego walca w ograniczonej domenie (model 16) oraz omawianego walca (model 17) na wysokościach 400 i 600mm.

Zarówno dla wyznaczenia współczynników ciśnienia, jak i dla współczynników siły nośnej i oporu, zastosowano prędkość odniesienia równą 84% prędkości na wlocie. Zebrane wielkości charakterystyczne dla przeanalizowanych prędkości zestawiono w tabelicy 4.11. Wielkości ciśnienia oraz kąty [1]÷[4] zaprezentowane w tabelicy są odczytane z przekroju na wysokości 600mm od dna (300mm od stołu).

Tabelica 4.11 – Porównanie wielkości charakterystycznych otrzymanych z obliczeń numerycznych

Prędkość wlotowa [m/s]	Re [-]	Cp [1] [-]	Cp [2] [-]	α [2] [°]	α [3] [°]	Cp [4] [-]	Cx [-]	Cy [-]	f [Hz]	Model
1	$1,43 \cdot 10^4$	1,950	-0,393	77	94	-0,251	0,9931	0,1010	0,220	17_a_03
4	$5,74 \cdot 10^4$	1,377	-0,414	75	110	0,0403	0,6176	0,1536	0,781	17_a_01
20	$2,87 \cdot 10^5$	1,867	-0,797	78	108	0,0299	0,7732	0,2360	3,320	17_a_02

4.7.4 Podsumowanie modeli przejściowych

W ramach rozdziału 4.7 przeprowadzono proste badania numeryczne czynników, które potencjalnie mogą mieć wpływ na badanie w tunelu aerodynamicznym. Od strony numerycznej są to:

- jakość siatki → największy wpływ,
- wielkość kroku czasowego → mniejszy wpływ, ale istotny dla czasu obliczeń i częstotliwości,
- metoda obliczeń → nieznaczny wpływ

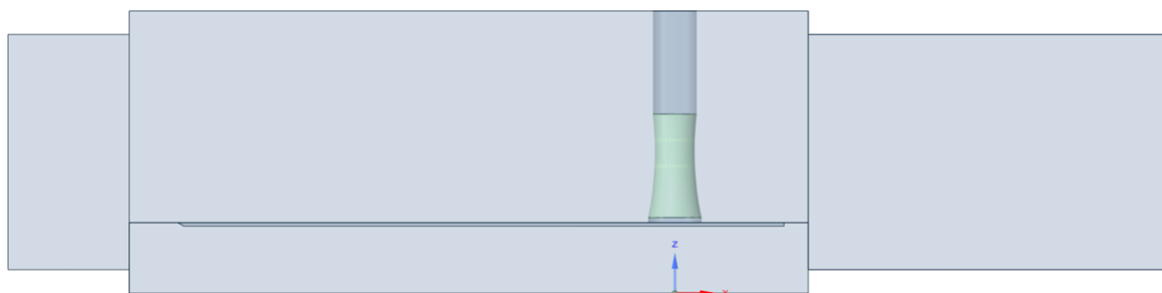
Od strony fizycznej, elementami, które mają wpływ na wynik są:

- szerokość komory oraz uskok na ścianach bocznych tunelu → bardzo duży wpływ na rozkład ciśnienia,
- długość komory badawczej → umiarkowany wpływ, głównie z uwagi na możliwość rozwinięcia profilu wiatru przed modelem oraz wystąpienia zawirowań za nim.

Dla przeprowadzonych modeli udało się ustalić, że geometria tunelu w istotny sposób wpływa na otrzymywane wyniki. Badania mają jednak na celu wykonanie walidacji, dlatego model przepływu jest odwzorowany jak najdokładniej względem badania.

4.8 Obliczenia numeryczne chłodni w tunelu aerodynamicznym

Ten rozdział jest poświęcony modelowi, który odwzorowuje numerycznie badania w tunelu aerodynamicznym (*model 18*). W obliczeniach został odwzorowany model chłodni kominowej, identyczny jak w przypadku *modelu (15)*, wg. rys. 4.27. Model jest ustawiony na przygotowanym stole, którego wysokość znajduje się 300mm powyżej dna tunelu. Pole powierzchni rzutu modelu na kierunek przepływu wynosi $0,077692m^2$. Domena obliczeniowa ma uproszczony kształt tunelu aerodynamicznego. Główna komora ma długość 2,8m oraz przekrój poprzeczny $1,2 \times 1,2m$. Okna wlotowe i wylotowe mają wymiar $1,0 \times 1,0m$. Długość wlotu została ograniczona do 0,5m przed komorą. Wylot z tunelu jest wydłużony do 1,5m za komorą. Jest to spowodowane pewnym wpływem ograniczenia geometrii na wielkość siły nośnej. Geometria stanowiska badawczego, na którym odwzorowano model numeryczny jest umieszczona w załączniku „Załącznik 3 – Stanowisk Badawcze”.



rys. 4.51 – Odwzorowanie przepływu wokół modelu chłodni w tunelu aerodynamicznym (*model 18*).

W tym modelu zaniechano również modelowania znajdujących się poniżej stołu podpór. Elementy znajdujące się poniżej stołu nie mają istotnego wpływu na przepływ powyżej (o ile nie stanowią znacznej blokady przepływu), natomiast znacząco utrudniają siatkowanie i wydłużają czas obliczeń.

4.8.1 Metody obliczeniowe i siatka

Siatka elementów skończonych zawiera ok 3,3mln elementów. Najważniejszy parametr – grubość pierwszego elementu przyściennego wynosi tutaj 0,2mm, a warstwa przyścienna rozwija się przez 13 warstw, wzrastając każdorazowo 1,2 raza, osiągając na końcu grubość $0,2mm \cdot 1,213 = 2,14mm$. Wielkość elementów siatki na powierzchni badanej bryły to 2mm. Na pozostałych przegrodach nieprzepuszczających powietrza pierwszy element ma wymiar 10mm. Do utworzenia siatki wykorzystano schemat siatkowania *Poly-Hexacore*, w celu uzyskania dokładnego dopasowania do modelu oraz uproszczenia siatki w pozostałych rejonach. Globalne wymiary siatki to $2 \div 128mm$. Co ważne, jakość siatki to średnio 0,973 a minimalna jakość siatki w modelu to 0,0933. Jakość siatki jest bezwymiarową miarą oceny elementów pod względem ich geometrii. Przyjmuje wartości z zakresu od 0 (zła siatka) do 1 (wyśmienita siatka). Przyjmuje się, że średnia jakość powyżej 0,9 i minimalna powyżej 0,1 pozwala na uzyskanie prawidłowych wyników.

Do wykonania obliczeń została zastosowana analiza w stanie nieustalonym (*transient*). Wykorzystano model turbulencji $k-\omega$ SST. Ustawienia metod rozwiązania zestawiono w tablicy 4.12.

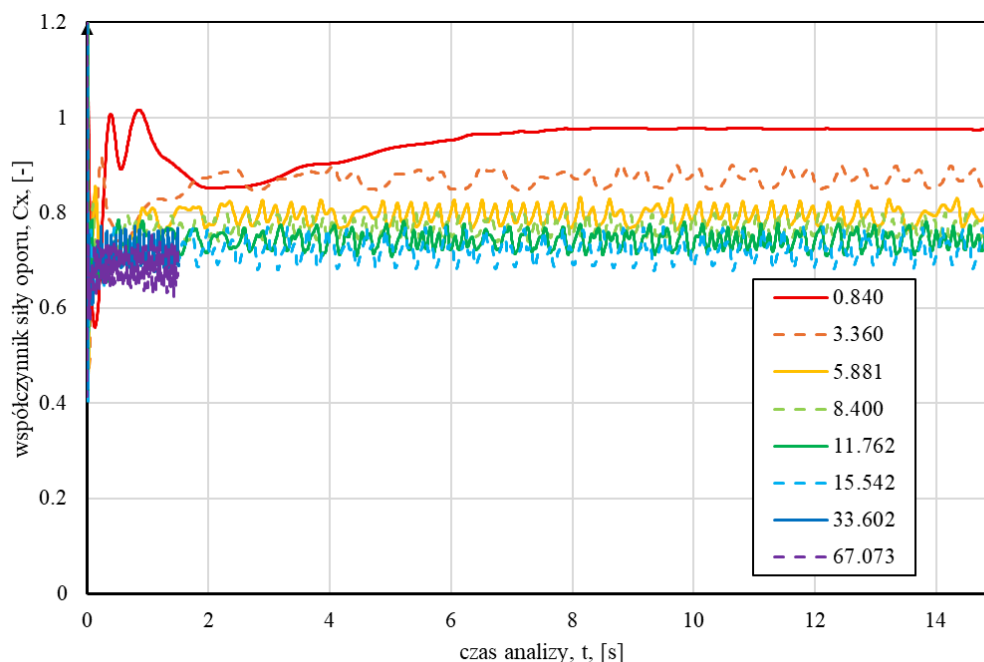
Tablica 4.12 – Ustawienia metod rozwiązania.

opcja		metoda
Pressure-Velocity Coupling	Scheme	Simple
Spatial-discretization	Gradient	Last sequence cel based
	Pressure	Second order
	Moment	Second order upwind
	Turbulent kinetic energy	
	Specific discretization rate	
	Transient formulation	First order implicate

4.8.2 Podsumowanie obliczeń

Obliczenia dla opisanego powyżej modelu zostały przeprowadzone dla prędkości wlotowej od 1 do 80m/s. Przy prędkościach powyżej 20m/s liczba $Y+$ przy powierzchni walca wynosi powyżej 10, co może prowadzić do błędnych wyników. Dlatego te prędkości są traktowane z większą ostrożnością. Nie są one jednak istotne, z uwagi na to, że w prowadzonych badaniach nie badano prędkości większej niż ok 18,5m/s. Dla przeanalizowanych przypadków zebrano siły nośne, siły oporu, częstotliwości zmian siły nośnej oraz uśrednione rozkłady ciśnienia na przekrojach poziomych modelu chłodni, opisanych na rys. 4.54, rys. 4.56 i rys. 4.58. Tabelaryczne zestawienie głównych wartości pokazano w tablicy 4.13.

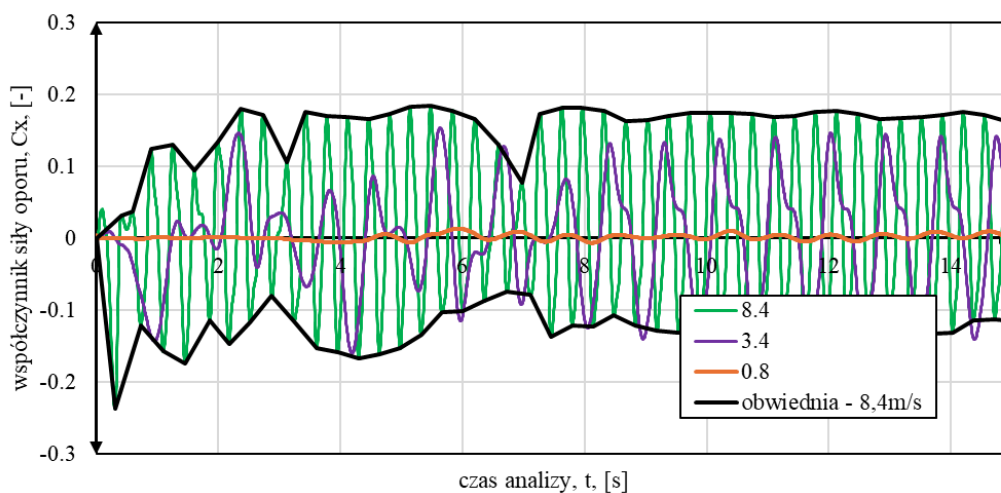
4.8.3 Siła nośna oraz siła oporu aerodynamicznego



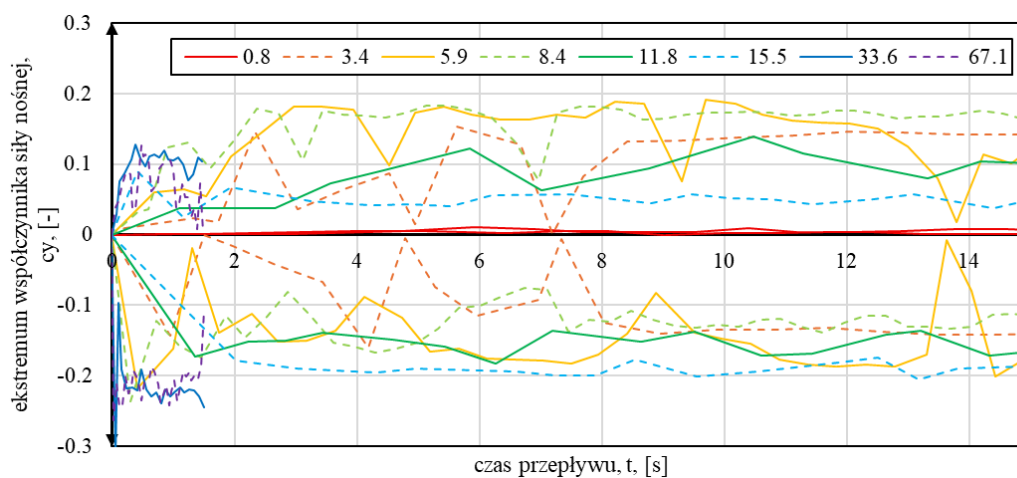
rys. 4.52 – Współczynnik siły oporu modelu chłodni dla różnych prędkości przepływu.

Dla wszystkich przeanalizowanych przypadków współczynnik siły oporu zawiera się w przedziale od 0,7 do 1,0. Przebiegi zmienności współczynnika siły oporu w czasie – $C_x(t)$ przedstawia rys. 4.52. W przypadku obliczeń wykonanych dla większych prędkości, z uwagi na bardzo mały krok czasowy, obliczenia zostały zakończone znacznie wcześniej, pomimo wykonania podobnej lub większej liczby kroków czasowych.

W przypadku siły nośnej prezentowanie nałożonych na siebie wszystkich wykresów $C_y(t)$ uniemożliwiłoby ich interpretację. Nakładające się na siebie liczne linie znacząco pogorszyłyby czytelność wykresu. Charakterystyki siły nośnej w czasie dla trzech wybranych prędkości wlotowych zostały przedstawione na rys. 4.53. Czarnym kolorem została oznaczona obwiednia siły nośnej – linia łącząca punkty ekstremalne na krzywej $C_y(t)$ dla prędkości odniesienia 8,4 m/s. Porównanie obwiedni dla wielu prędkości jest przedstawione na rys. 4.54. W przypadku kilku prędkości, można zaobserwować, że wykres jest przesunięty w dół. Oznacza to, że średnia siła nośna nie jest zerowa, lecz daje pewną uśrednioną siłę działającą w bok (na przykład przy prędkości odniesienia 15,5 m/s). Może być to efektem błędu numerycznego, ponieważ przy tej prędkości przepływ wokół walca jest w zakresie krytycznym ($Re > 10^5$). Ponadto, jak podaje [4], w krytycznym zakresie liczb Re opływ walca jest asymetryczny. Być może obliczenie znacznie większej liczby kroków pozwoliłoby na uzyskanie zerowej średniej siły nośnej. Ocena tego zagadnienia jest jednak subiektywna, gdyż analizowana figura nie jest idealnym walcem i wyznaczenie liczby Re może budzić wątpliwości.

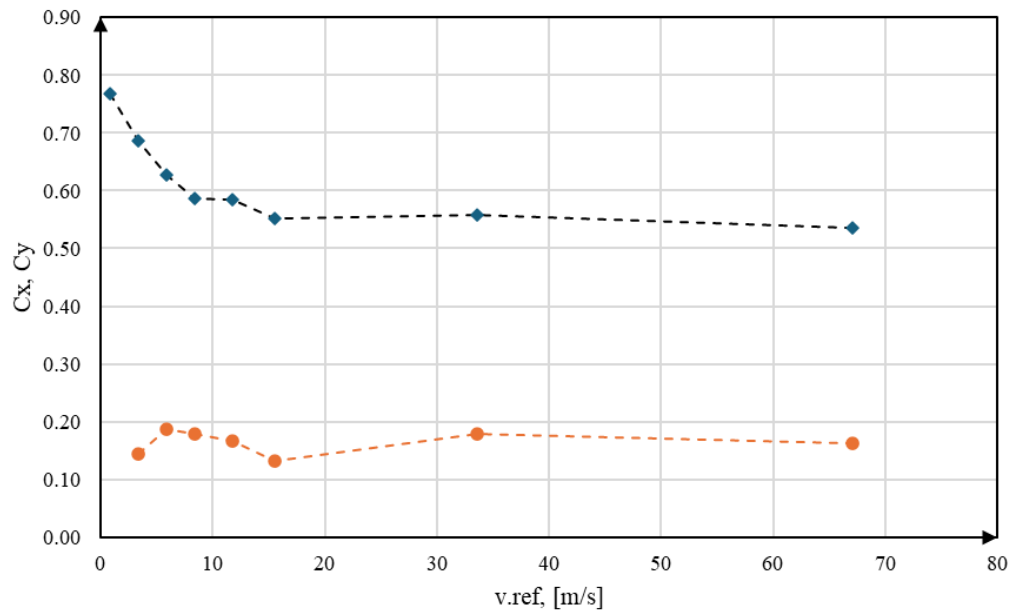


rys. 4.53 – Porównanie charakterystyk $Cy(t)$ dla prędkości 0,84, 3,34 oraz 8,4m/s.



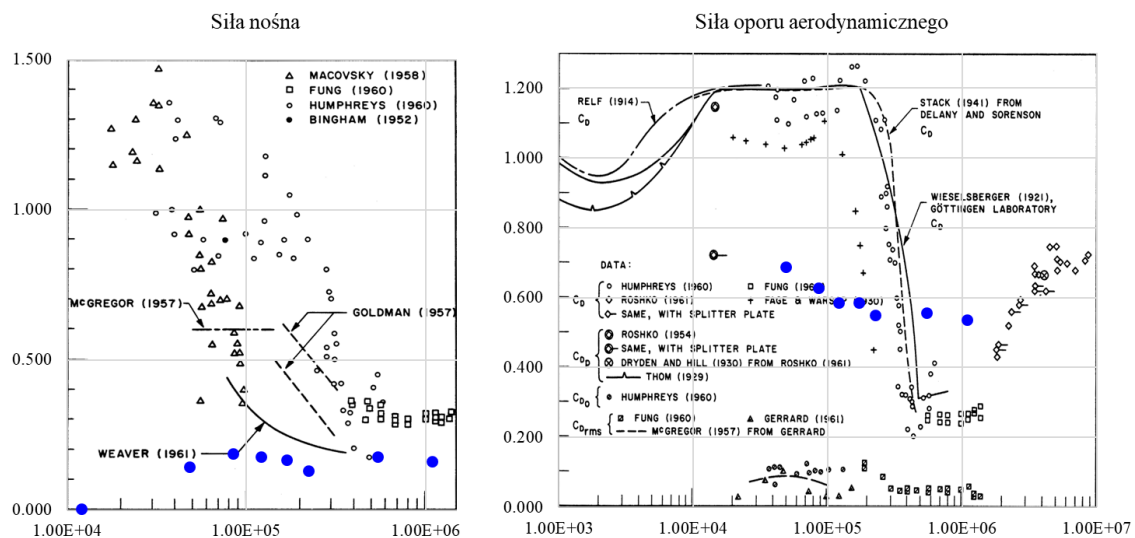
rys. 4.54 – Porównanie obwiedni siły nośnej dla wielu prędkości.

Podsumowaniem powyższych charakterystyk są 2 krzywe – zależności średniej siły oporu oraz amplitudy siły nośnej w zależności od prędkości przepływu (lub od liczby Re). Siły oporu oraz nośna reprezentowane przez odpowiednie współczynniki, są prezentowane na rys. 4.55. Na osi poziomej jest oznaczona prędkość przepływu, przy której dany współczynnik został wyznaczony.



rys. 4.55 – Wyznaczone zależności siły nośnej i oporu, wyrażone odpowiednimi współczynnikami, w zależność od prędkości odniesienia.

Te same wartości można zestawić z wynikami badań, zestawionymi w pracy [51], na rys. 4.56.



rys. 4.56 – Zestawienie wyników obliczeń dla modelu chłodni kominowej, z wynikami badań dla walca, na podstawie publikacji [51].

Otrzymane wyniki obliczeń nie są całkowicie zbieżne z wynikami badań dla walców. Niemniej jednak nie muszą być z nimi zbieżne. Wyniki badań przedstawione na powyższych ilustracjach są otrzymane dla długich walców. Analizowanym obiektem, jest krótka bryła obrotowa, dodatkowo z możliwością przepływu wewnątrz. Dodatkowym aspektem jest wpływ geometrii domeny obliczeniowej na jakość wyników. Wykres siły nośnej dla długiego walca wewnątrz rozpatrywanej

domeny (rys. 4.36) jest zaburzony, tymczasem dla tego samego walca w prostej domenie siła nośna ma podręcznikowy, sinusoidalny rozkład (rys. 4.22). Trudno zatem oczekiwać, że uda się uzyskać prosty rozkład siły nośnej dla modelu chłodni wewnątrz rozpatrywanej domeny.

Uzyskane wartości siły nośnej oraz siły oporu mogą zostać porównane z wynikami badań w tunelu. Niestety w ramach przeprowadzonych badań, nie udało się przeprowadzić pomiarów siły wagą aerodynamiczną. Ewentualne pomiary będą przedmiotem dalszych badań. Wartości zostały zestawione w tabelicy 4.13. Wielkości v_{inlet} oraz v_{ref} to kolejno prędkość na wlocie oraz prędkość odniesienia. Amplituda $p_{95}(C_y)$ to percentyl 95% z obwiedni siły nośnej a C_x to siła oporu. $f_{1,Cy}$ to wyznaczona za pomocą FFT pierwsza częstotliwość odrywania wirów. Liczby Re są obliczone orientacyjnie, jak dla walca, o średnicy $D = 200mm$.

Tablica 4.13 – Zestawienie wyników – siły nośnej i oporu aerodynamicznego dla modelu chłodni kominowej wewnątrz tunelu aerodynamicznego

v_{inlet}	[m/s]	1.0	4.0	7.0	10.0	14.0	18.50	40.0	79.8
v_{ref}	[m/s]	0.84	3.36	5.88	8.4	11.8	15.5	33.6	67.1
Amplituda $p_{95}(C_y)$	[-]	0.005	0.143	0.188	0.179	0.167	0.132	0.179	0.162
C_x	[-]	0.769	0.687	0.627	0.586	0.586	0.551	0.557	0.536
$f_{1,Cy}$	[Hz]	1.221	1.123	2.148	2.930	3.516	3.076	13.672	22.461
Re	[-]	$1.20 \cdot 10^4$	$4.82 \cdot 10^4$	$8.44 \cdot 10^4$	$1.20 \cdot 10^5$	$1.69 \cdot 10^5$	$2.23 \cdot 10^5$	$5.43 \cdot 10^5$	$1.08 \cdot 10^5$

4.8.4 Rozkład ciśnienia na powierzchni walca

Nieco bardziej złożonym zagadnieniem jest rozkład ciśnienia na powierzchni walca. Ciśnienie na powierzchni jest wartością zmienną, po wysokości oraz po jej obwodzie. Otrzymujemy różne rozkłady ciśnienia w zależności od prędkości przepływu powietrza. Dodatkowo wielkość ciśnienia dla każdego punktu to pewne statystyczne opracowanie, na podstawie wyników otrzymanych z kilku kroków obliczeniowych. Na podstawie prowadzonych obliczeń, ciśnienie na powierzchni walca jest funkcją trzech zmiennych – prędkości przepływu oraz dwóch rzędnych położenia.

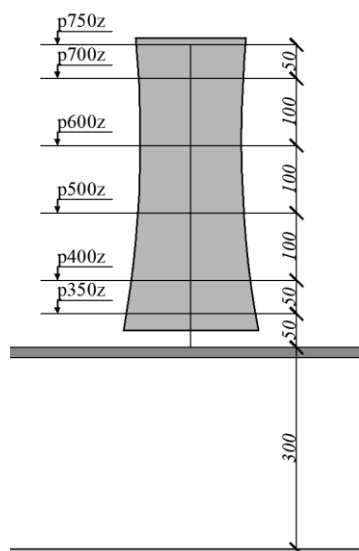
$$p_e = c_p(z, \alpha, v) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (4-13)$$

Gdzie v to prędkość przepływu, natomiast α i z to rzędne na powierzchni modelu w układzie walcowym.

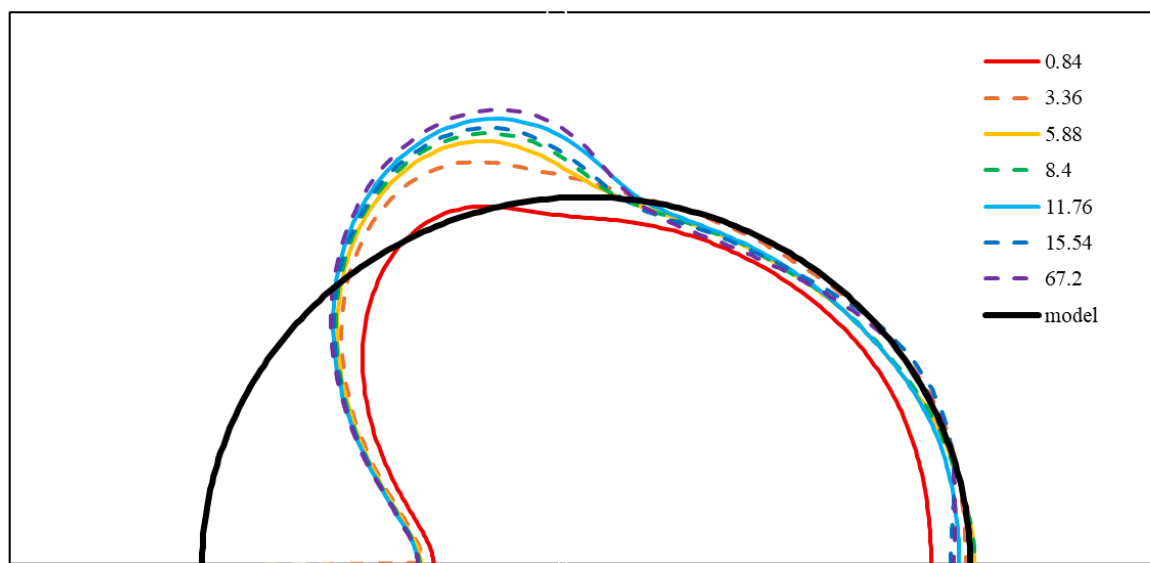
Podobnie jak w poprzednim rozdziale, dla uproszczenia rozkład ciśnienia na powierzchni modelu chłodni jest odczytany na sześciu przekrojach poziomych przez model chłodni. Lokalizacje przekrojów oraz ich oznaczenia, są przedstawione na szkicu

rys. 4.57). Przekrój p600z, znajdujący się w miejscu przewężenia, jest przekrojem charakterystycznym. Wyniki dla spektrum prędkości na tym przekroju są zobrazowane na rys. 4.58.

Zaprezentowane wyniki to wielkości średnie współczynników ciśnienia C_p wg równania (4-13), obliczone na podstawie wielu kroków czasowych, po względnym ustabilizowaniu się przepływu.

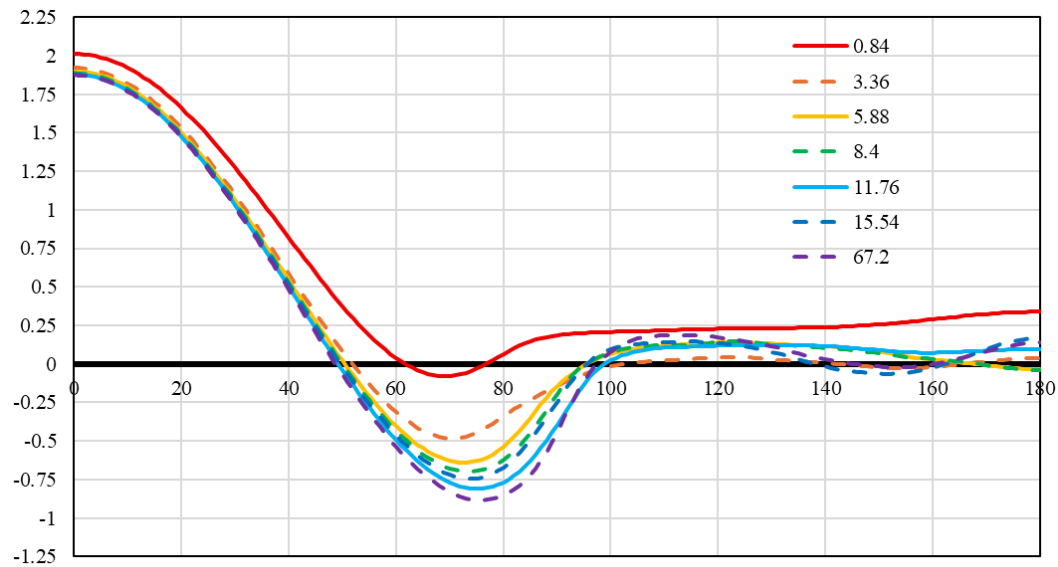


rys. 4.57 – Opis przekrojów na modelu do odczytu rozkładu ciśnienia.



rys. 4.58 – Rozkłady współczynnika ciśnienia na przekroju przez walec p600z dla różnych prędkości odniesienia – od 0,84 do 67,2m/s.

Odczytywanie wartości ciśnienia z powyższego wykresu nie jest możliwe, jednak taki rysunek dobrze ilustruje, jak zachowuje się rozkład ciśnienia na powierzchni bryły obrotowej. Te same zależności są przedstawione na rys. 4.59. Na osi poziomej jest opisana lokalizacja na przekroju w układzie kątowym. Kąt jest liczony od strony kierunku nawietrznego. Z poniższej ilustracji można już odczytywać wartości.



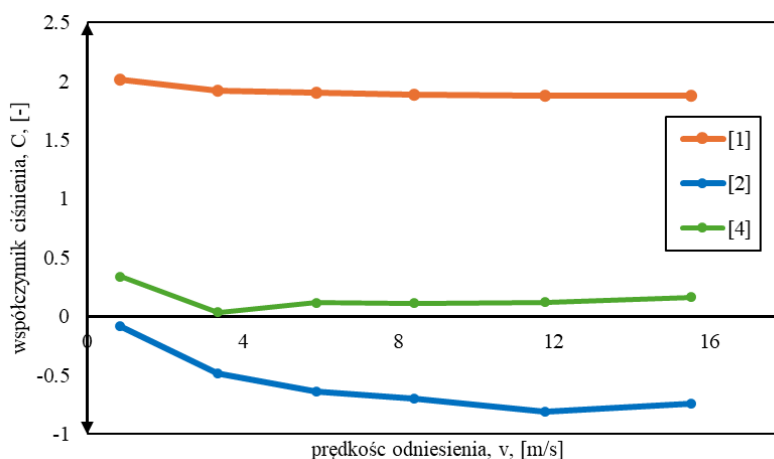
rys. 4.59 – Rozkłady ciśnienia na przekroju przez walec p600z dla różnych prędkości odniesienia – od 0,84 do 67,2m/s, jako zależność $C_p(\alpha)$

Wszystkie przebiegi mają podobny charakter, choć w przypadku wielkości ssania na ścianach bocznych można wyraźnie zaobserwować tendencję – im większa prędkość tym większa wielkość ssania na powierzchniach bocznych. W przypadku niższych prędkości (1 m/s) krzywa współczynnika ciśnienia C_p jest wyraźnie przesunięta w górę. Wykres na rys. 4.59 przedstawia rozkłady współczynnika ciśnienia dla przekroju p600z. Wykresy dla wszystkich przekrojów są zawarte w załączniku „Załącznik 4 – Rozkłady ciśnienia”. Podobnie jak na rys. 4.21 z powyższego wykresu można wyodrębnić charakterystyczne punkty. [1]÷[4]. Punkty [3] i [4] dają podobne wartości, dlatego punkt [3] jest pominięty. Wielkości są zestawione w poniższej tabeli 4.14 oraz na rys. 4.60.

Tablica 4.14 – zestawienie kluczowych wyników dla przekroju p600z

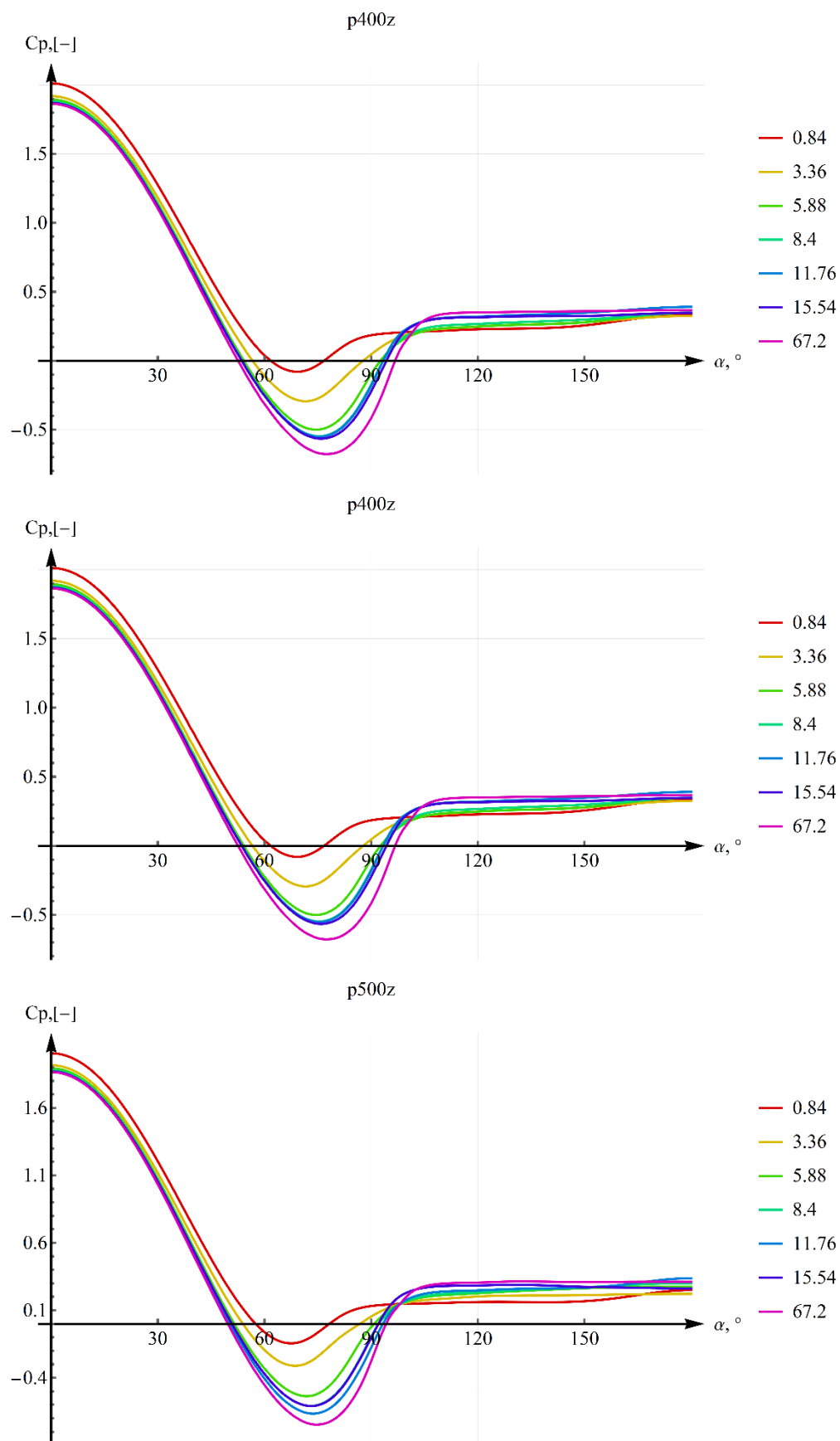
v_{ref}	0.84	3.36	5.88	8.4	11.76	15.54	67.2	[m/s]
[1]	2.013	1.920	1.899	1.887	1.878	1.877	1.874	[-]
[2]	-0.080	-0.483	-0.641	-0.699	-0.810	-0.743	-0.883	[-]
$\alpha^{[2]}$	69	71	73	73	75	74	76	[°]
[4]	0.338	0.0358	0.117	0.110	0.118	0.164	0.136	[-]

Poza charakterystycznymi wielkościami ciśnienia, zmienia się również miejsce największego ssania na ścianie bocznej. To miejsce jest określone kątem $\alpha^{[2]}$ w tablicy. Wraz ze wzrostem prędkości przepływu można zaobserwować również na rys. 4.58 i rys. 4.59 przesuwanie się ekstremum do tyłu modelu. W zakresie od 3,34 do 15,5 m/s kąt $\alpha^{[2]}$ zmienia się z 71° do 75° . Jest to niewielka zmiana, ale może skutkować zmianą całkowitej siły oporu bryły.

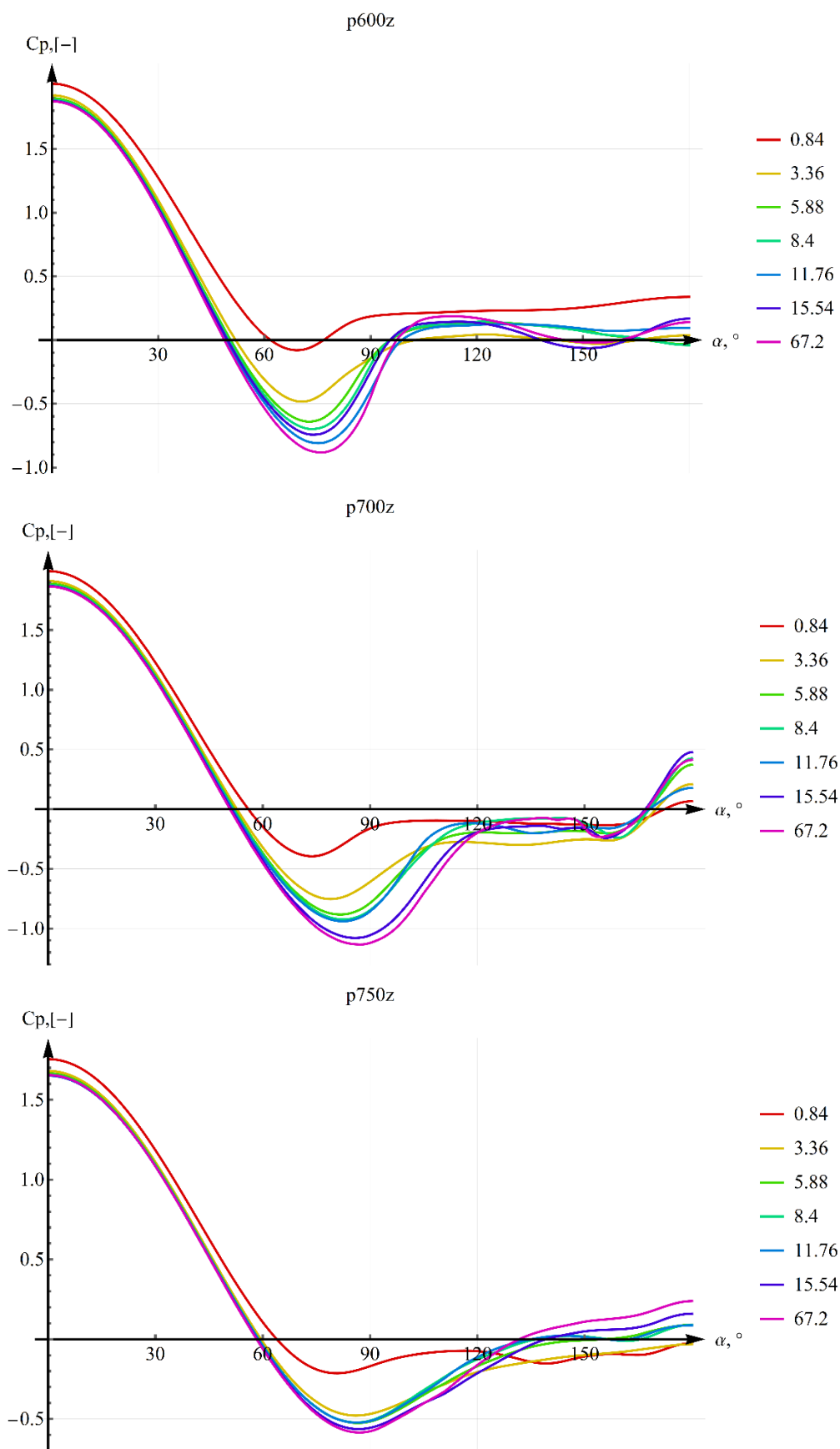


rys. 4.60 – Zmiana wielkości charakterystycznych w zależności od prędkości odniesienia, [1] – maksymalne parcie na nawietrznej, [2] – ssanie na ścianach bocznych, [3] – ssanie na zawietrznej.

Zestawienie średnich współczynników ciśnienia na powierzchni walca, dla wszystkich rozpatrywanych prędkości i na wszystkich przekrojach (p350z÷p750z) zostały zaprezentowane na rys. 4.61a i 5.59b.

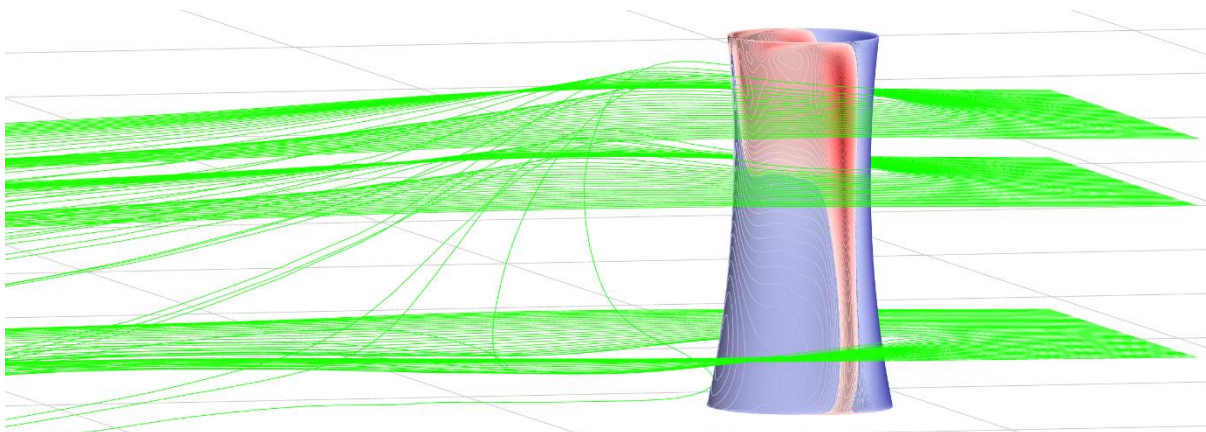


rys. 4.61a – rozkłady ciśnienia na przekrojach p350z, p400z, p500z,
dla spektrum prędkości od 0,84 do 67,2m/s



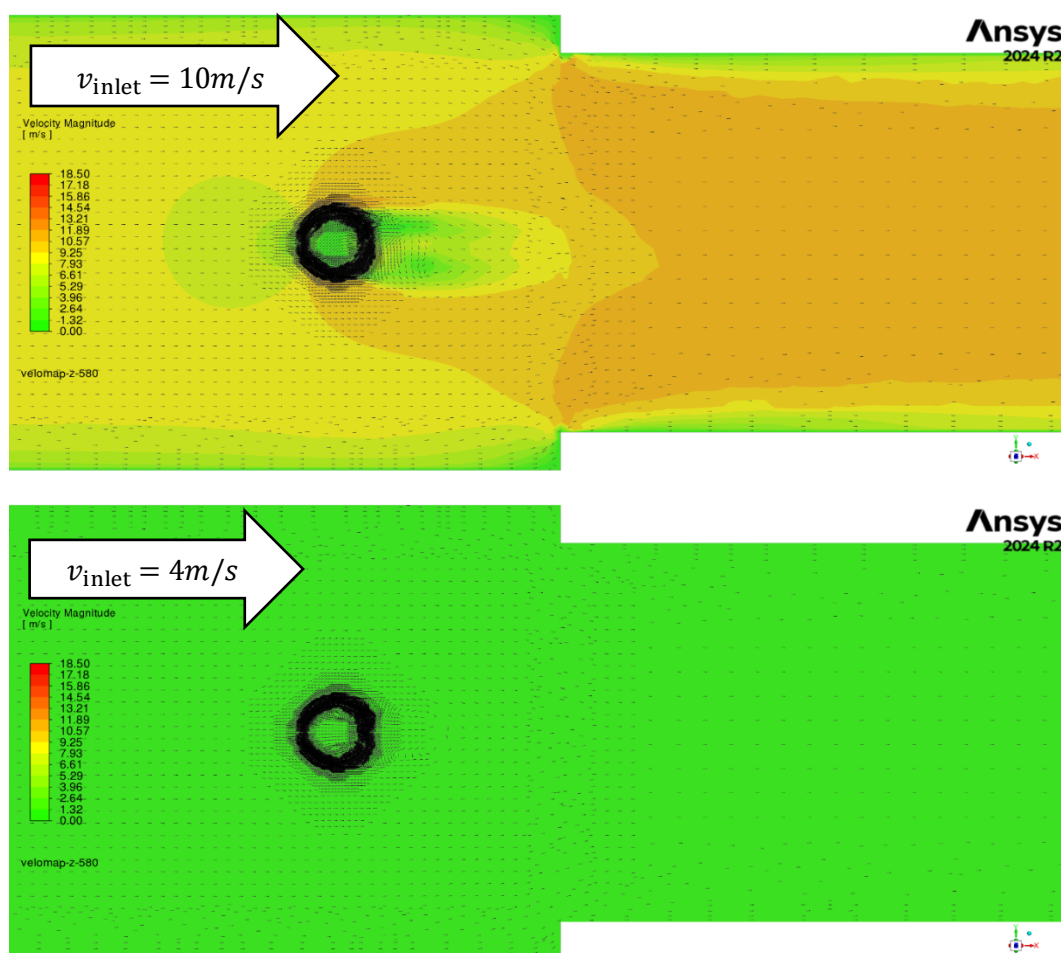
rys. 4.61b – rozkłady ciśnienia na przekrojach p600z, p700z, p750z,
dla spektrum prędkości od 0,84 do 67,2m/s

4.8.5 Pola prędkości za badanym modelem.

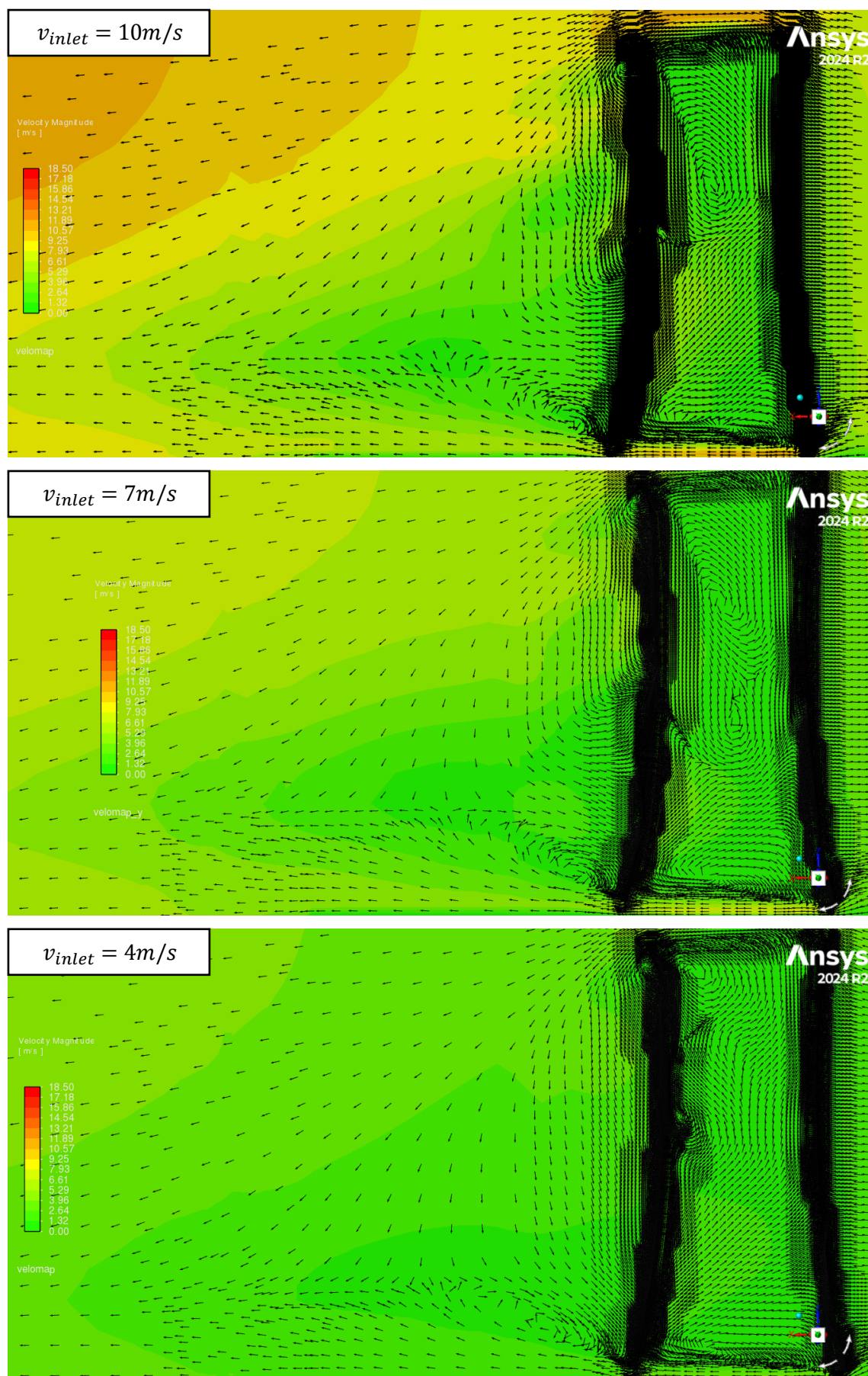


rys. 4.62 – Pole ciśnienia na powierzchni modelu oraz linie przepływu. Przepływ w lewą stronę.

Pola prędkości za rozpatrywanym modelem chłodni kominowej zostały zaprezentowane na rys. 4.63 dla prędkości na wlocie 10 i 4m/s. Kolorem jest oznaczona wartość prędkości wypadkowej, a czarne strzałki wskazują zwrot wektorów prędkości.



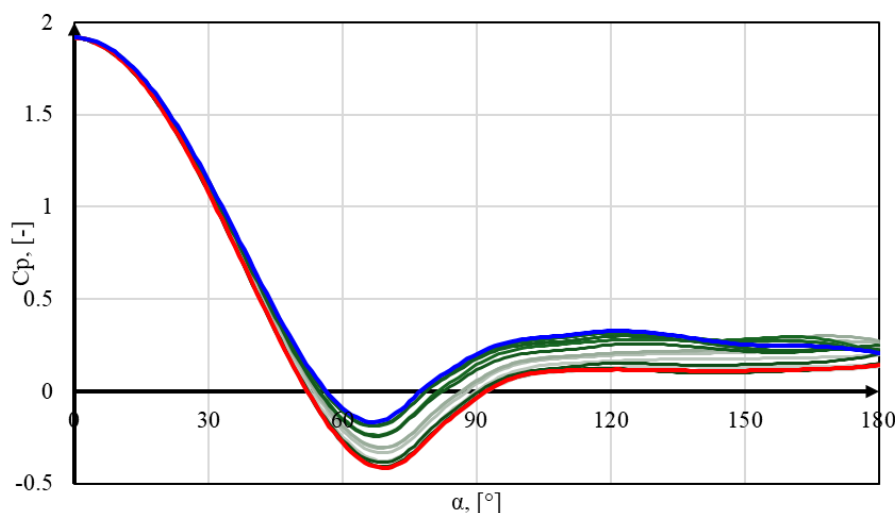
rys. 4.63 – Pole prędkości na przekroju na wysokości 580mm (180mm ponad powierzchnią stołu) dla prędkości na wlocie 10 oraz 4m/s.



rys. 4.64 – Pole prędkości za badanym modelem, przy prędkościach na wlocie 10, 7 i 4 m/s.

4.8.6 Przekroje poprzeczne

W rozdziale 4.8.4 zaprezentowano uśrednione wartości współczynników rozkładu ciśnienia na powierzchni katenoidalnego modelu. Rozkład ciśnienia jest jednak zauważalnie zmienny w czasie w przypadku brył obrotowych, co pokazuje rys. 4.8 lub obwiednie „cp-min” i „cp-max” na rys. 4.21. Rozpatrywany przypadek – katenoidalnej bryły, nie różni się w tym wypadku od walca. Obserwujemy naprzemiennie odrywanie wirów oraz zmienną w czasie siłę nośną, a zatem zmiana wielkości ciśnienia na powierzchni również jest obecna. Rozkłady współczynnika ciśnienia C_p dla katenoidy, na przekroju p500z, przy prędkości na wlocie 4m/s, są pokazane na rys. 4.65. Można jednak zaobserwować, że niezależnie od chwili czasu t , wielkość parcia na nawietrznej stronie jest stała. To samo obserwuje się dla prostych walców.



rys. 4.65 – Rozkłady współczynnika ciśnienia C_p na przekroju p500z, przy prędkości natarcia 4m/s, dla wybranych kroków czasowych następujących po sobie. Kolorem czerwonym i niebieskim oznaczono skrajne krzywe.

Dodatkowa trudność w określeniu projektowanego obciążenia wiatrem polega na zamianie oddziaływania dynamicznego (lub wielokrotnie zmiennego) na równoważne obciążenie statyczne. Na powyższym wykresie kolorem czerwonym i niebieskim są oznaczone skrajne położenia współczynnika rozkładu ciśnienia. Warto zaznaczyć, że położenie maksymalne lub minimalne nie występują jednocześnie po obu stronach bryły, jako symetryczne oddziaływanie. Mogą jednak występować naprzemiennie po obu stronach bryły. Na wykresie (rys. 4.65), można zaobserwować, że krzywe zbiegają się do pewnej wartości przy kącie 180° (na samym końcu wykresu). Jest to widoczne również na skrajnych (niebieskiej i czerwonej) krzywych.

Zaprezentowany rozkład ciśnienia na powierzchni walca można aproksymować za pomocą szeregu Fouriera (4-14). Takie podejście do rozkładu ciśnienia nie jest nowością. Było stosowane między innymi w starszej polskiej normie [N-6], ale również jak podaje Ledwoń [73], w starszych

normach niemieckiej, francuskiej czy węgierskiej. W normie [N-6] zastosowano szereg Fouriera o 6 wyrazach ($n = 6$ w tym wyraz wolny).

$$C_p(\alpha) = \sum_{i=0}^n a_i \cos(\alpha \cdot i) \quad (4-14)$$

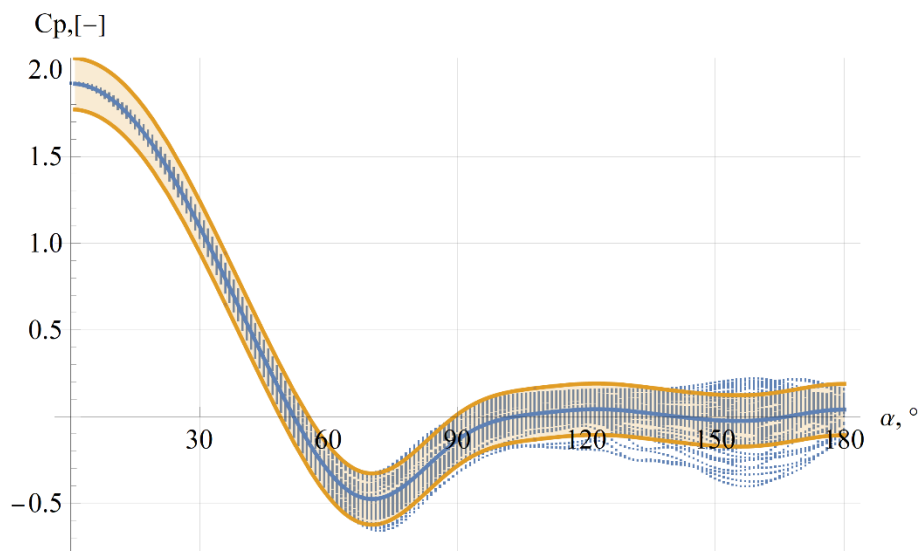
W ramach niniejszej pracy podjęto próbę wyznaczenia współczynników a_i do równania (4-14). Do tego zadania zostało wykorzystane oprogramowanie Wolfram Mathematica 12.2 oraz wbudowana metoda NonlinearModelFit. Dopasowanie jest wykonane na podstawie współczynników Ciśnienia C_p odczytanych z przekroju p600z przy prędkości wlotowej 4m/s (prędkość odniesienia $v_{ref} = 3,36\text{m/s}$). W dopasowaniu wzięły udział 42 serie danych (odczytane w równomiernych odstępach czasu po ustabilizowaniu się obliczeń).

Pozostało do ustalenia jedynie, ile wyrazów powinna mieć funkcja aproksymacyjna. Im więcej wyrazów, tym dokładniejsze dopasowanie, ale z drugiej strony wzrasta pracochłonność przy stosowaniu wzoru. Możliwość stosowania komputera do obliczeń inżynierskich rozwiązuje problem pracochłonności obliczeń. Tablica 4.15 zestawia obliczone wartości współczynników funkcji aproksymacyjnej (4-14), a sama funkcja jest przedstawiona na rys. 4.66.

Tablica 4.15 – współczynniki szeregu Fouriera (4-14)

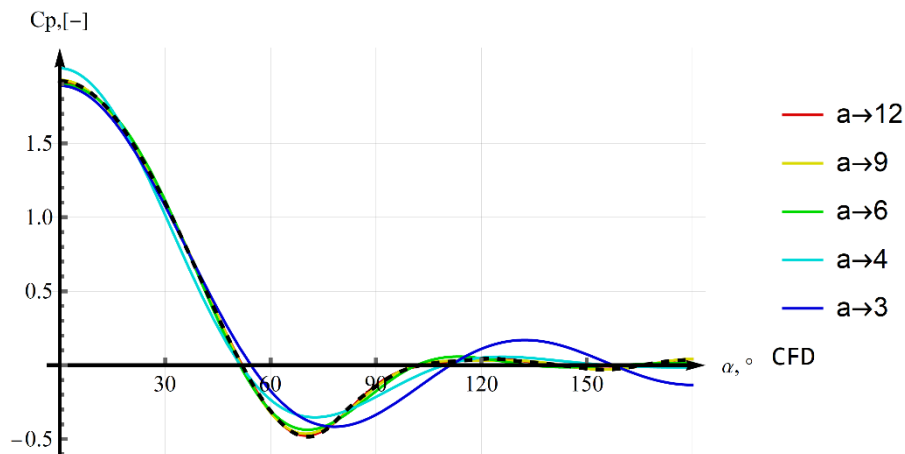
składowa	wartość	Odchylenie standardowe
$a_{[0]}$	0.2714	0.000863223
$a_{[1]}$	0.5804	0.00121756
$a_{[2]}$	0.6059	0.0012176
$a_{[3]}$	0.4328	0.00121756
$a_{[4]}$	0.1202	0.0012176
$a_{[5]}$	-0.06976	0.00121756
$a_{[6]}$	-0.03891	0.0012176
$a_{[7]}$	0.001216	0.00121756
$a_{[8]}$	0.02782	0.0012176
$a_{[9]}$	-0.00052	0.00121756
$a_{[10]}$	-0.00866	0.0012176
$a_{[11]}$	-0.00424	0.00121756
$a_{[12]}$	0.003211	0.0012176

Wykres (rys. 4.66) przedstawia aproksymację rozkładu współczynnika ciśnienia. Niebieską ciągłą linią jest oznaczona funkcja aproksymacyjna, natomiast pomarańczowymi liniami oznaczono przedział, dla którego zgodność dopasowania (*confidence level*) przekracza 90%. Zostały one wygenerowane przy pomocy narzędzia *SinglePredictionBands* wbudowanego w program Mathematica.



rys. 4.66 – Aproksymacja rozkładu ciśnienia szeregiem Fouriera (4-14). Pomarańczowym kolorem oznaczono zakres, dla którego zgodność dopasowania przekracza 90%. Niebieskie punkty to wyniki obliczeń CFD – łącznie 42 serie w równomiernych odstępach czasowych.

Ostatnią niewiadomą jest liczba wyrazów szeregu Fouriera potrzebna do odwzorowania rozkładu ciśnienia na powierzchni. Na rys. 4.67 zostały zestawione krzywe – funkcje aproksymacji dla różnych liczb wyrazów tej funkcji. Czarną przerywaną linią jest oznaczony średni rozkład ciśnienia C_p .



rys. 4.67 – Krzywe dopasowania dla różnej liczby wyrazów szeregu Fouriera.

Przy założeniu 12 lub 9 wyrazów funkcji aproksymacyjnej wizualnie aproksymacja oraz średni rozkład pokrywają się. Założenie 6 wyrazów daje dobre dopasowanie, chociaż różnice pomiędzy funkcją a średnią (zielona oraz czarna na rys. 4.67) są widoczne gołym okiem. Zastosowanie mniejszej liczby wyrazów według autora nie daje dobrego dopasowania. Poniższa tablica zestawia współczynniki funkcji, dla wszystkich wyrazów oraz kończy rozważania nad wynikami otrzymanymi z analiz CFD modelu w tunelu aerodynamicznym.

Tablica 4.16 – wartości współczynników funkcji aproksymacyjnej

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
0.2714 <i>0.09%</i>	0.5804 <i>0.12%</i>	0.6055 <i>0.12%</i>	0.4328 <i>0.12%</i>	0.1202 <i>0.12%</i>	-0.0698 <i>0.12%</i>	-0.0389 <i>0.12%</i>	0.0012 <i>0.12%</i>	0.0278 <i>0.12%</i>	-0.0005 <i>0.12%</i>	-0.0087 <i>0.12%</i>	-0.0042 <i>0.12%</i>	0.0032 <i>0.12%</i>
0.2714 <i>0.09%</i>	0.5803 <i>0.12%</i>	0.6054 <i>0.12%</i>	0.4328 <i>0.12%</i>	0.1202 <i>0.12%</i>	-0.0698 <i>0.12%</i>	-0.0390 <i>0.12%</i>	0.0012 <i>0.12%</i>	0.0278 <i>0.12%</i>	-0.0006 <i>0.12%</i>			
0.2715 <i>0.09%</i>	0.5803 <i>0.12%</i>	0.6057 <i>0.12%</i>	0.4328 <i>0.12%</i>	0.1205 <i>0.12%</i>	-0.0698 <i>0.12%</i>	-0.0387 <i>0.12%</i>						
0.2713 <i>0.10%</i>	0.5796 <i>0.15%</i>	0.6053 <i>0.15%</i>	0.4320 <i>0.15%</i>	0.1200 <i>0.15%</i>							Współczynnik <i>Odchylenie std.</i>	
0.2720 <i>0.13%</i>	0.5796 <i>0.19%</i>	0.6066 <i>0.19%</i>	0.4320 <i>0.19%</i>									

$$C_p(\alpha) = \sum_{i=0}^n a_i \cos(\alpha \cdot i)$$

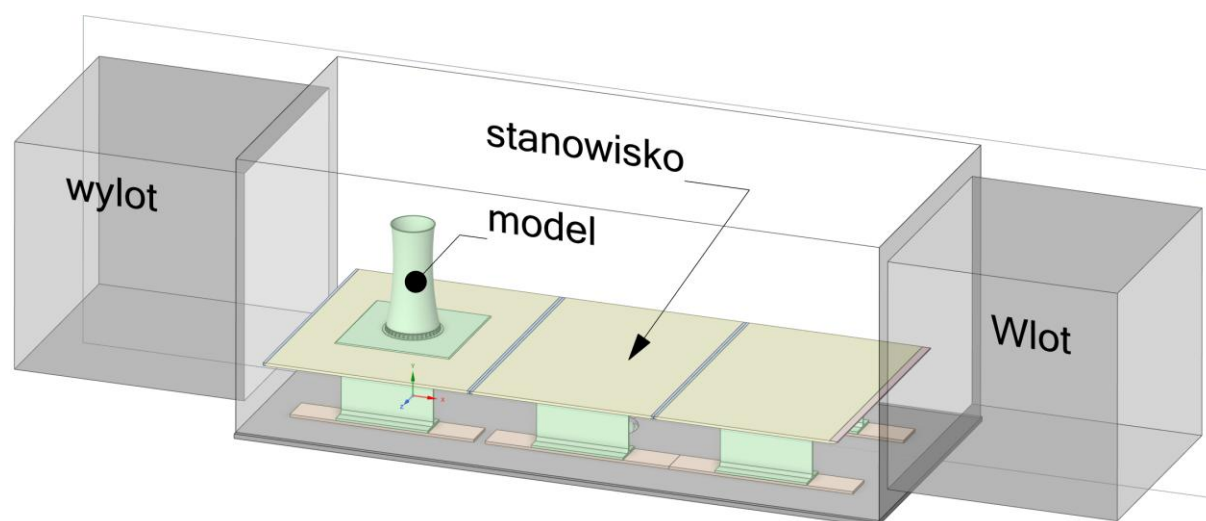
5 Badania laboratoryjne

W tym rozdziale są opisane badania laboratoryjne aerodynamiki modelu chłodni kominowej. Badania zostały przeprowadzone na Wydziale Techniki Ciepłej, na Wydziale Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, z wykorzystaniem dostępnej aparatury i urządzeń, to jest tunelu aerodynamicznego oraz urządzeń do pomiarów pól prędkości techniką PIV. Model przeznaczony do badań został wykonany w skali 1:400, i jest wzorowany na chłodni kominowej zbudowanej na terenie Elektrowni Opole w 2015r. W ramach badań były mierzone pola prędkości w przestrzeni za modelem.

5.1 Stanowisko badawcze

5.1.1 Tunel aerodynamiczny

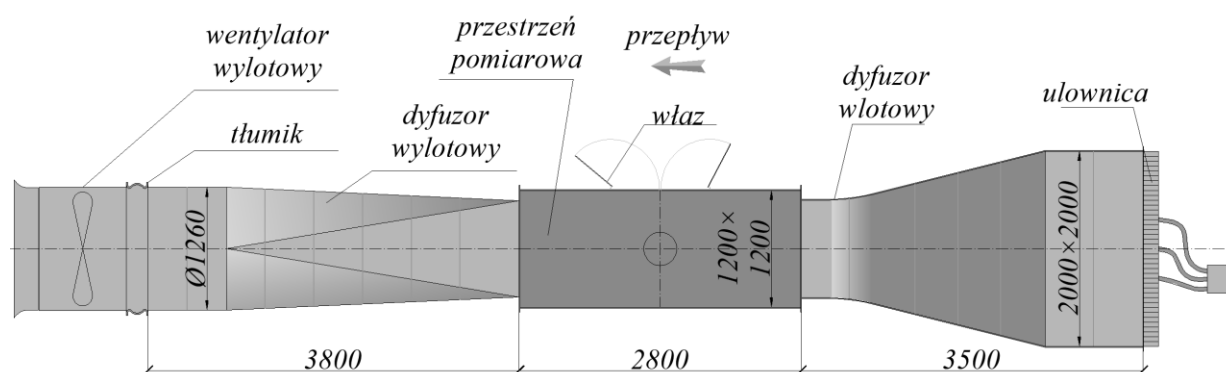
Stanowisko badawcze zostało umieszczone wewnątrz tunelu aerodynamicznego. Wymiary tunelu, a w szczególności komory badawczej są zgodne z przedstawionymi w załączniku. Tunel aerodynamiczny wykorzystany w badaniach został stworzony jako *tunel niegenerujący warstwy przyściennej*. Uzyskanie tego jest możliwe przez znajdujący się uskoki na wszystkich ścianach tuż za wlotem. W teorii takie rozwiązanie umożliwia zmniejszenie rozmiarów tunelu do uzyskania w miarę równomiernego rozkładu prędkości przepływu w przekroju.



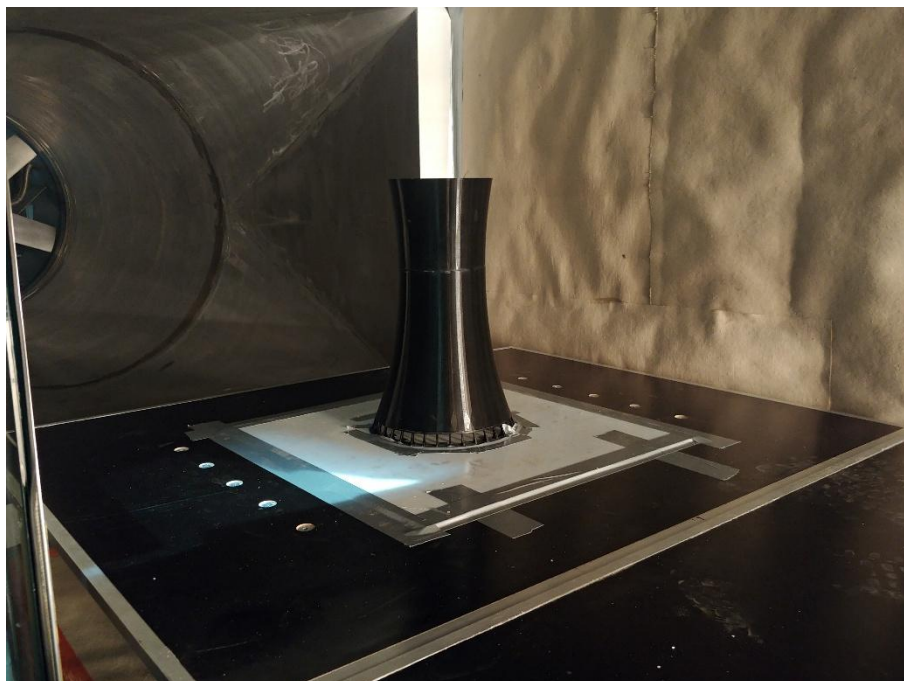
rys. 5.1 – Widok izometryczny modelu stanowiska badawczego. Wymiar poprzeczny komory badawczej $1,2 \times 1,2\text{m}$, długość komory $2,8\text{m}$.

Wewnątrz tunelu zostały umieszczone stoły, na których następnie zamocowano model. Z uwagi na wąskie okno wejściowe do komory badawczej tunelu, powierzchnia stołu do badań została podzielona na 3 segmenty. Szkice wykonawcze stołów znajdują się w załączniku „Załącznik 3 – Stanowisko badawcze”. Krawędzie stołów zostały okute aluminiowymi profilami w celu

poprawy trwałości oraz wyeliminowania wzbudzenia zawirowań na nierównych krawędziach. Krawędź natarcia w pierwszym stole została dodatkowo wyprofilowana w celu zmniejszenia oporu aerodynamicznego i powstających zaburzeń przepływu nad stołem. Górny blat oraz podstawki są wykonane z ciężkiej płyty (sklejki) o grubości 15mm, z gładkim wykończeniem powierzchni. Podpórki stołów są wykonane ze stalowych profili walcowanych – IPE270. Zamontowane wewnątrz tunelu aerodynamicznego stoły, zapewniają równą i prostą powierzchnię. Dzięki swojej masywności są stabilne, nie przesuwają się ani nie deformują w trakcie prowadzenia badań, nawet przy większych prędkościach.



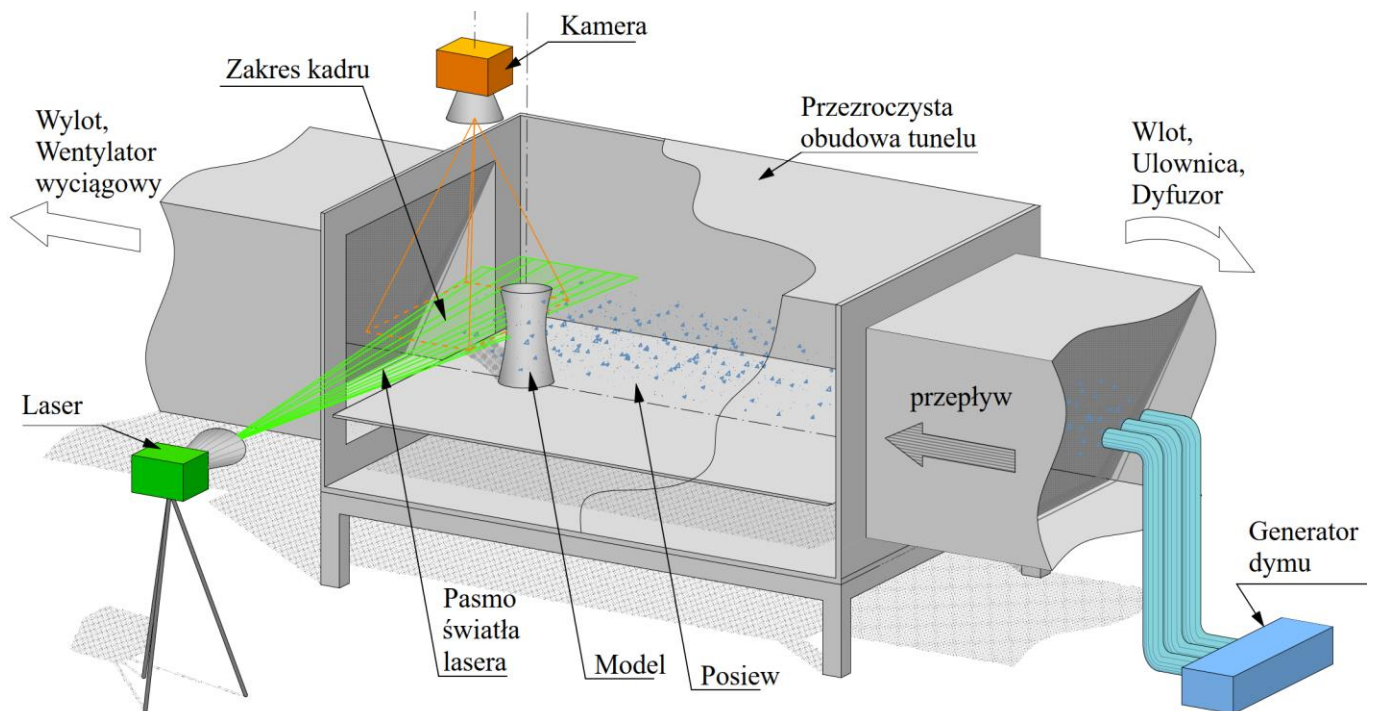
rys. 5.2 – Geometria tunelu aerodynamicznego.



rys. 5.3 – Model wewnątrz tunelu aerodynamicznego, w trakcie instalacji.

5.1.2 Aparatura pomiarowa

Pierwotnie stanowisko zostało przygotowane do jednoczesnego pomiaru siły działającej na model (za pomocą autorskiej wagi aerodynamicznej) oraz pomiarów pól prędkości metodą PIV. Z uwagi na trudności z kalibracją wagi, pomiary sił nie zostały wykonane. Całe stanowisko w konfiguracji do rejestrowania pola prędkości na poziomych przekrojach zostało przedstawione na rys. 5.4. Na potrzeby zarejestrowania pola prędkości na pionowym przekroju, zostały zamienione miejscami kamera oraz laser.



rys. 5.4 – Stanowisko badawcze z uwzględnieniem modelu, kamery PIV, lasera oraz generatora dymu.

- Wytwornica dymu umieszczona jest przed wlotem do tunelu aerodynamicznego.



rys. 5.5 – Generator dymu w ustawieniu do zdjęć w płaszczyźnie poziomej (z lewej), i pionowej (z prawej).

Dym jest doprowadzony do wlotu trzema elastycznymi przewodami, które zostały przytwierdzone do ulownicy na wlocie. Zastosowano wytwornicę dymu *Antari Z-1000*. Właściwie posiany napływ powietrza stanowi kluczowe zagadnienie do otrzymania prawidłowych wyników metodą PIV. Samo powietrze jest przezroczyste, jego fotografowanie nie daje żadnych wyników. Dopiero „wzory” z posianego dymem powietrza w świetle lasera dają obraz do dalszej analizy.

- Kamera o monochromatycznej matrycy i rozdzielczości 2048×2048 pikseli. Wykonuje serię zdjęć, składającą się z sekwencji dwóch następujących po sobie ujęciach. Odstęp czasowy pomiędzy zdjęciami jest bardzo mały (poniżej 1/10s). Dlatego jest zastosowana bardzo szybka kamera, sprzężona z laserem.
- Laser, generuje poziome (lub pionowe, zależnie od konfiguracji) pasmo światła. Jego zadaniem jest naświetlenie przekroju, na którym ma być wykonane zdjęcie. Laser jest wypoziomowany względem tunelu oraz modelu. W ramach jednej sekwencji, laser wykonuje dwa naświetlenia w krótkim odstępie czasu, w trakcie każdego z nich kamera zapisuje po jednym zdjęciu. Kamera i laser są ze sobą wzajemnie sprzężone.
- Ściany i dach tunelu są wykonane z przezroczystego materiału, dlatego można wykonywać pomiary PIV aparaturą ustawioną na zewnątrz. Jednak zewnętrzne światło (słoneczne lub sztuczne) pogarsza jakość otrzymywanych obrazów. Dlatego całość tunelu, wraz z aparaturą na zewnątrz jest zakrywana na czas badań nieprzeziemną tkaniną. Dodatkowo szklane i jasne powierzchnie odbijają i rozpraszają światło lasera. Aby ograniczyć odbicia, wszystkie wewnętrzne elementy zostały pomalowane czarną matową farbą. Tylne ściana, na której zatrzymuje się światło lasera, jest wyłożona czarnym materiałem.

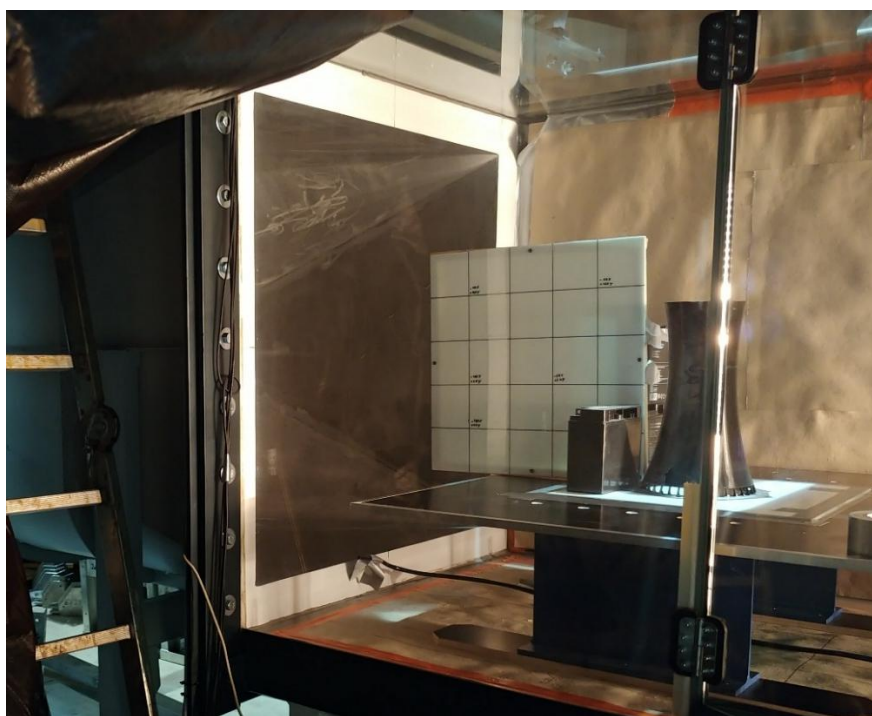


rys. 5.6 – Laser w trakcie pracy oraz model w trakcie naświetlania laserem. Otoczenie modelu pomalowane czarną farbą. Fotografie zostały wykonane przy niewielkim oświetleniu.

5.1.3 Kalibracja stanowiska pomiarowego

Kalibracja lasera polega na jego ustawieniu. Laser musi być ustawiony w taki sposób, że płaszczyzna wiązki światła jest identyczna jak przekrój, na którym wykonuje się zdjęcie. Kalibracja kamery ogranicza się do ustawienia ostrości obrazu na odległość, w której znajduje się światło lasera. Zdjęcia wykonywane są w ciemności, dlatego obiektyw kamery ma bardzo małą przysłonę (1,2), przy której kamera ma bardzo małą głębię ostrości. Przesunięcie lasera o kilka cm w górę lub dół wymaga każdorazowo ustawiania ostrości.

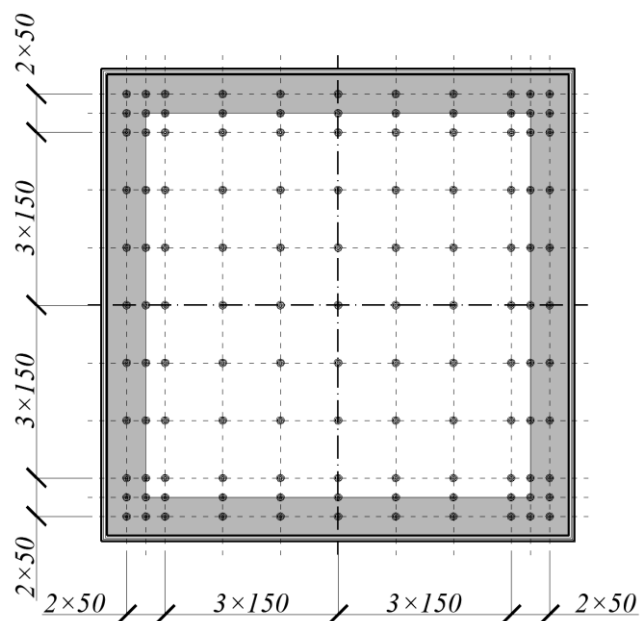
Gdy laser i kamera są prawidłowo ustawione, wykonuje się właściwą kalibrację stanowiska. Jej celem jest określenie zależności pomiędzy odległościami w polu prędkości, mierzonymi w pikselach na zdjęciu oraz rzeczywistymi wymiarami. W tym celu wykonuje się fotografie obiektu o znanej długości. W przypadku przedmiotowych badań, do kalibracji posłużyła przeznaczona do tego tablica, z widoczną podziałką 10×10cm, jak pokazano na rys. 5.7. Każda mierzona płaszczyzna wymaga niezależnej kalibracji lasera, wagi oraz właściwej kalibracji stanowiska.



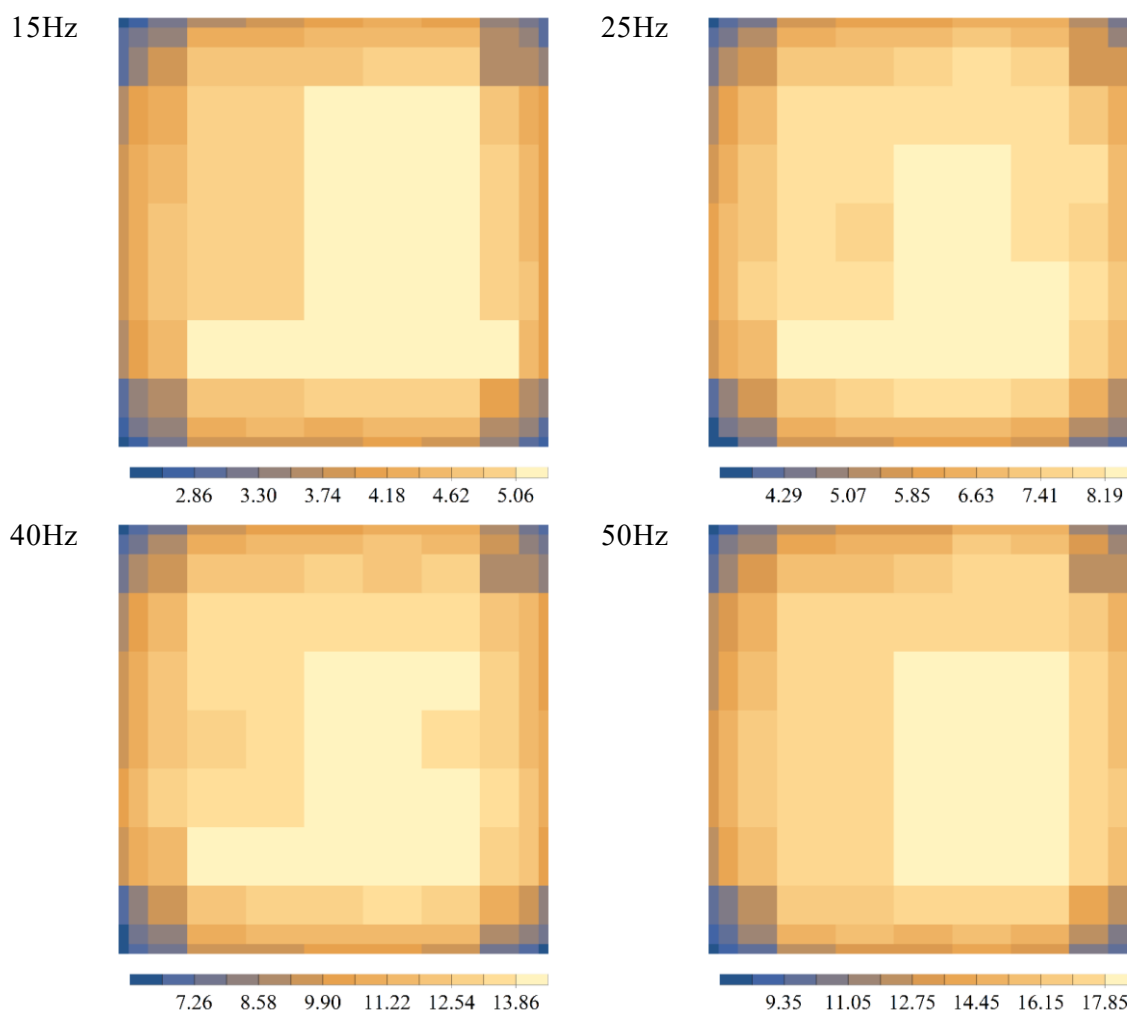
rys. 5.7 – Kalibracja stanowiska pomiarowego za pomocą dedykowanej tablicy z widoczną podziałką.

5.2 Profil prędkości wewnątrz tunelu badawczego

Przepływ powietrza wewnątrz tunelu jest wymuszony jednym wentylatorem o mocy 3,1 kW. Wentylator generuje prędkość przepływu do 18,5m/s. Profil prędkości wewnątrz tunelu został opracowany na podstawie pomiarów wykonanych i dostarczonych przez Pana dr. Tomasza Krysińskiego – pracownika ITC (Instytutu Techniki Ciepłej, Politechniki Śląskiej). Pomiary te zostały wykonane za pomocą anemometru.



rys. 5.8 – raster punktów pomiarowych wykonanych przez pracowników ITC.



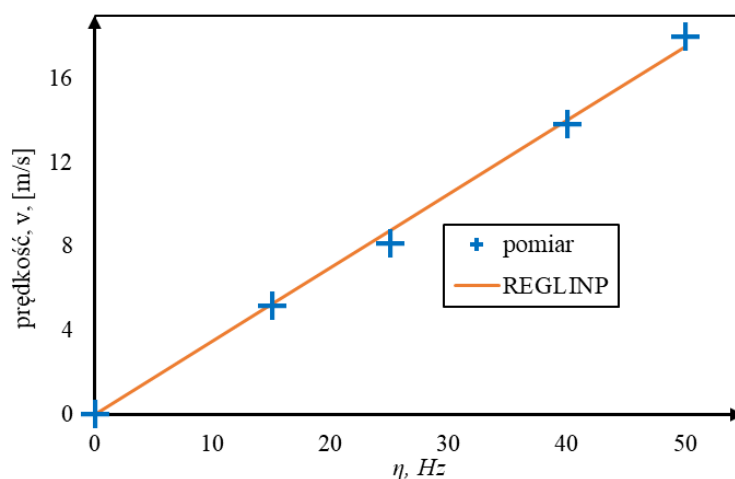
rys. 5.9 – Rozkłady prędkości [m/s], pomierzone przez ITC dla 4 prędkości wentylatora.

Punkty pomiarowe zostały rozmieszczone w przekroju poprzecznym przez środek komory pomiarowej tunelu. Raster punktów pomiarowych jest przedstawiony na rys. 5.8. W środkowej części rozstaw siatki pomiarowej ma 150mm. Przy ścianach – gdzie pojawia się gradient prędkości, raster jest dogęszczony do 50mm. Rozkłady prędkości przepływu były zmierzone dla prędkości wentylatora 15, 25, 40 i 50Hz. Zmierzone pola prędkości są zilustrowane na rys. 5.9 w postaci map (bez aproksymacji i wygładzania wyników).

Wyniki badań dostarczone przez ITC określają również nominalne prędkości przepływu. Są one obliczone jako wartości średnie z zawężonego obszaru – oznaczonego na rys. 5.11 zielonym kwadratem. W tym rejonie prędkość jest największa, ale również tutaj występują najmniejsze gradienty. Zaznaczony obszar obejmuje pomiary wewnątrz kwadratu o boku 600×600mm włącznie. Uśrednione, nominalne prędkości znajdują się w tablicy 5.1. Dla porządku, te nominalne prędkości zostały przyjęte w niniejszej pracy jako wartości referencyjne.

Tablica 5.1 – częstotliwości pracy wentylatora i nominalne prędkości powietrza na podstawie [ITC].

η , [Hz]	w , [m/s]
15	5.17
25	8.14
40	13.80
50	17.99



rys. 5.10 – Regresja liniowa zależności częstotliwość pracy wentylatora – prędkość przepływu.

Nominalna prędkość wewnątrz tunelu wzrasta prawie liniowo z prędkością obrotową wentylatora. Równanie (5-1) przedstawia zależność pomiędzy prędkością wentylatora η a prędkością przepływu. Wartość współczynnika kierunkowego funkcji została ustalona na podstawie regresji liniowej, na podstawie tablicy 5.1. Udało się dopasować prostą, z miarą odchylenia $R^2 \cong 0,9989$.

$$v(\eta) = 0,3499 \cdot \eta \quad (5-1)$$

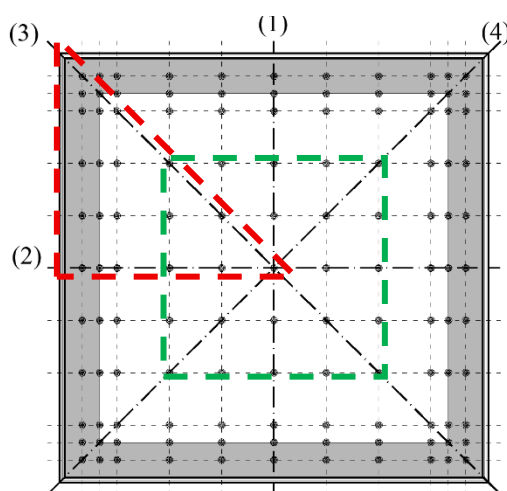
Opracowanie rozkładu prędkości

Na potrzeby pracy, mapy prędkości zostały uśrednione i wyrażone względem nominalnych prędkości, aby mogły stanowić punkt odniesienia do właściwych pomiarów. W pierwszym kroku, pola prędkości zostały sprowadzone do wartości względem nominalnej prędkości (5-2).

$$V_{rel}(\eta) = \frac{V}{v_{ref}} \quad (5-2)$$

Gdzie V i V_{rel} to macierze zawierające prędkości, a v_{ref} to prędkość odniesienia według tablicy 5.1. Przykładowo, przy prędkości obrotowej wentylatora $\eta = 15Hz$ każdy z punktów pomiarowych w przekroju jest dzielony przez $5,17m/s$. Taki zabieg został wykonany, aby było możliwe wyrażanie pól prędkości przez prędkość obrotową wentylatora wyciągowego.

W drugim kroku całe kwadratowe pole prędkości zostało podzielone osiami symetrii i przekątnymi na 8 jednakowych trójkątów (czerwony trójkąt na rys. 5.11). Następnie wartości prędkości ze wszystkich trójkątów zostały uśrednione i powielone 8 razy tak, aby uzyskać pole prędkości o 4 osiach symetrii. W ten sposób uśrednione i normowane pole prędkości na trójkątnym przekroju zostało przedstawione na rys. 5.12.

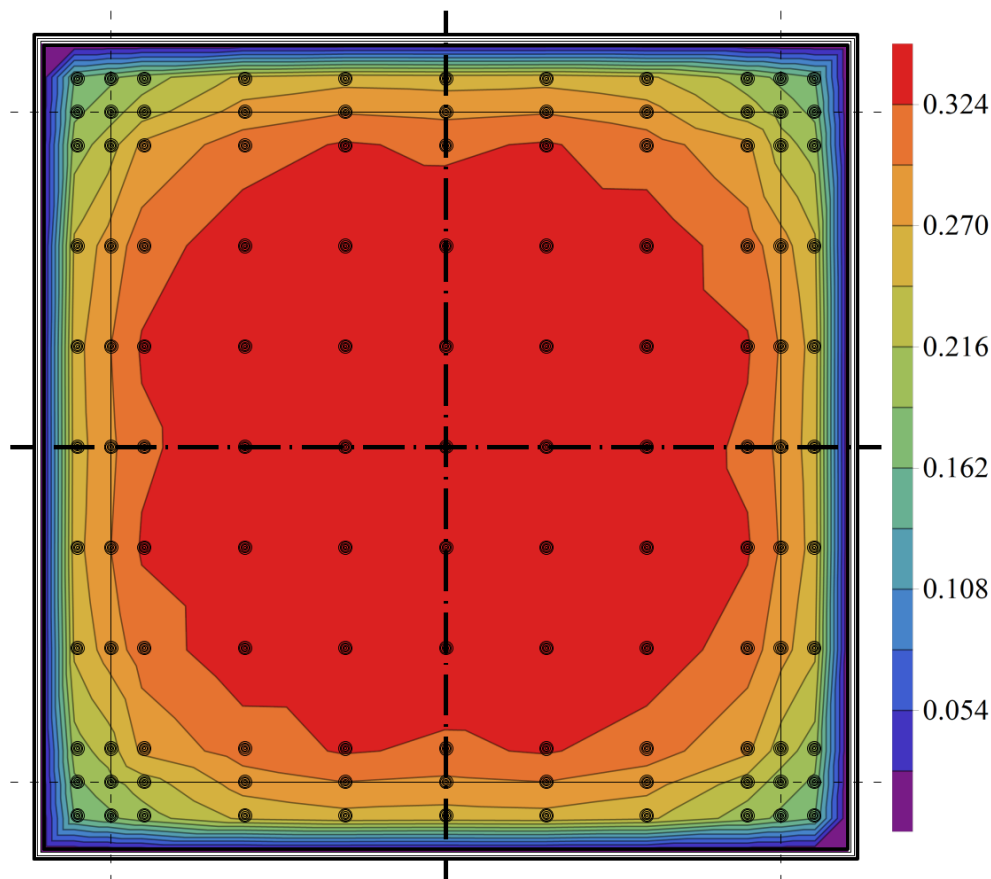


rys. 5.11 – Osie symetrii w przekroju przez tunel i siatkę pomiarową.

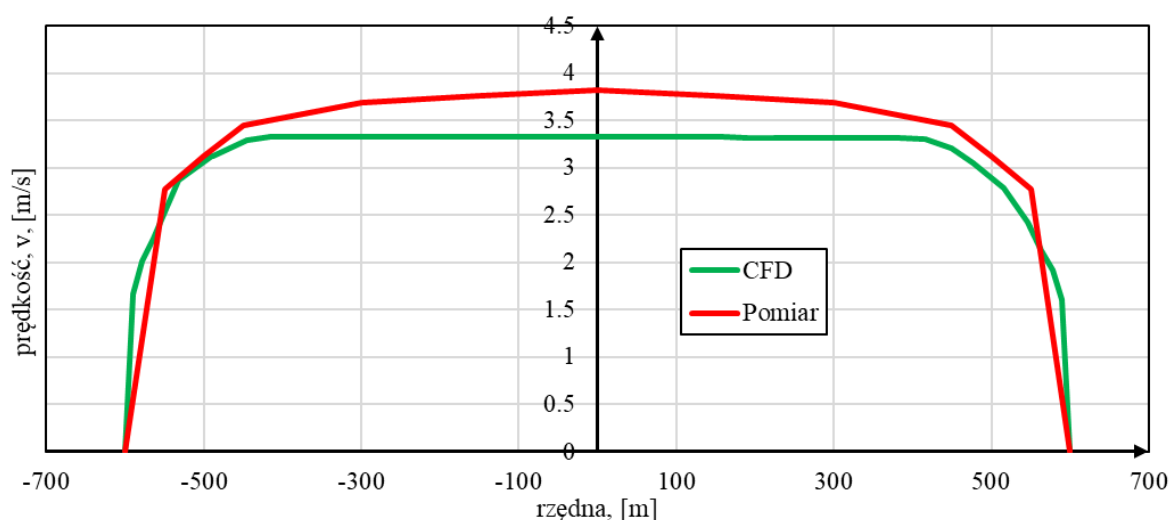
Przedstawione na wykresie dane są rozbudowane o prędkości „na powierzchni ścian”, czyli oddalone o $\pm 600mm$ od osi symetrii. Te wartości nie były mierzone, jednak wiadomo, że na powierzchni prędkość spada do zera. Rozkład jest wygładzony narzędziem wbudowanym w program Wolfram Mathematica 12.2.

Zastosowanie tunelu aerodynamicznego symulującego przepływ bez warstwy przyściennej nie powoduje zatem całkowitego zniesienia przyściennego gradientu prędkości, ale odsuwa go od badanego modelu. Cała środkowa część komory badawczej, zawiera prędkości w zakresie $(0,324 \div 0,350)\eta$, a zatem występują w niej bardzo małe wewnętrzne gradienty.

Porównanie rozkładu prędkości w środkowym poziomym przekroju z wynikami obliczeń numerycznych przedstawia rys. 5.13. Profil z pomiarów przy prędkości obrotowej 10 Hz, co skutkuje prędkością nominalną napływu 4m/s. Profil uzyskany w ramach obliczeń jest nieco bardziej „prostokątny”, przez co w środkowej części osiąga mniejszą wartość szybkości przepływu.



rys. 5.12 – Uśredniony rozkład prędkości wewnątrz tunelu, wyrażony w formie mnożnika częstotliwości. Na osi pionowej prędkość $v_{rel} = \frac{v}{\eta}$ wyrażona w jednostce $\left[\frac{m}{s}\right] \cdot \left[\frac{1}{Hz}\right]$. Delikatnie widoczna asymetria jest efektem wygenerowania mapy prędkości po wykonaniu uśredniania i odbicia danych.



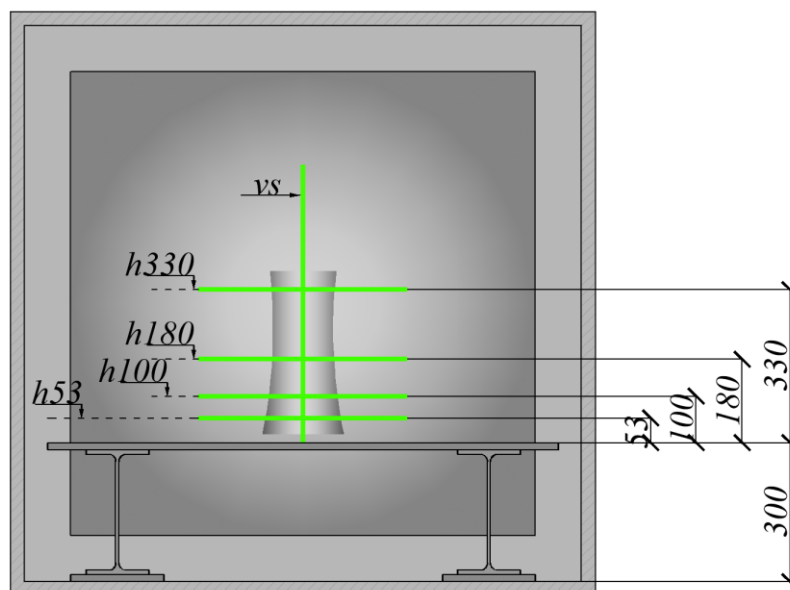
rys. 5.13 – Porównanie prędkości w tunelu z analizą CFD, dla środkowego poziomego przekroju.

5.3 Przebieg badania

W ramach prowadzonego programu badań zostały zmierzone pola prędkości w łącznie pięciu przekrojach (jeden pionowy, 4 poziome). Oznaczenia i lokalizacja przekrojów zostały przedstawione na rys. 5.14. Dla każdego z przekrojów wykonano serie pomiarowe przy prędkości wentylatora wyciągowego 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 i 40 Hz. W ramach każdej serii pomiarowej zostało wykonane 100 lub 200 par zdjęć. Dodatkowo w celu ograniczenia ryzyka błędu serie zostały powtórzone dwukrotnie. Poniższy diagram ilustruje przebieg pracy.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{powtórzenia:} \\ = \\ 2 \end{array} \right\} \times \left\{ \begin{array}{l} \text{przekroje:} \\ vs \\ h53 \\ h100 \\ h180 \\ h330 \\ = \\ 5 \end{array} \right\} \times \left\{ \begin{array}{l} \text{Prędkości:} \\ 5Hz \\ 10Hz \\ 15Hz \\ 20Hz \\ 25Hz \\ 30Hz \\ 35Hz \\ 40Hz \\ = \\ 8 \end{array} \right\} \times \left\{ \begin{array}{l} \text{seria:} \\ = \\ 200 \text{ pomiarów} \end{array} \right\} = 16\,000 \text{ pomiarów}$$

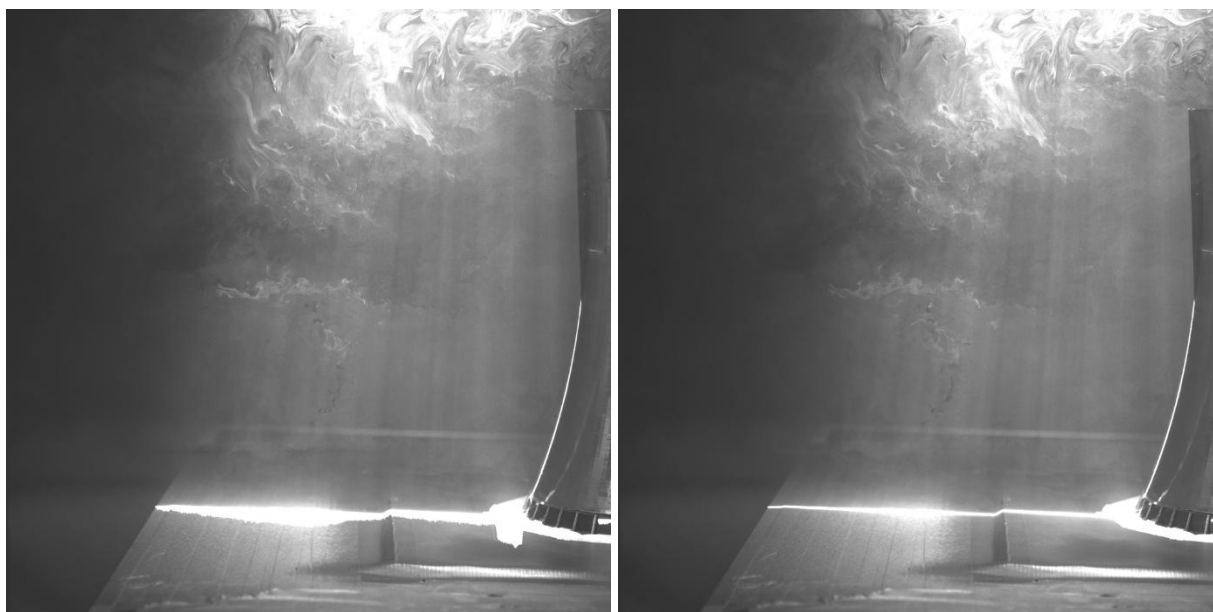
Sam proces badania nie jest czasochłonny. Ograniczeniem tempa pracy jest jednak ilość generowanego dymu przez wytwornicę. Po jednej serii sesji pomiarowej, składającej się z 8 prędkości cała przestrzeń hali jest wypełniona dymem z wytwornicy. Tunel zasysa powietrze jednorodnie wypełnione dymem, przez co posiew jest gorzej widoczny. Czasochłonnym zadaniem jest jednak sam proces ustawiania (zmiany pozycji lasera lub kamery).



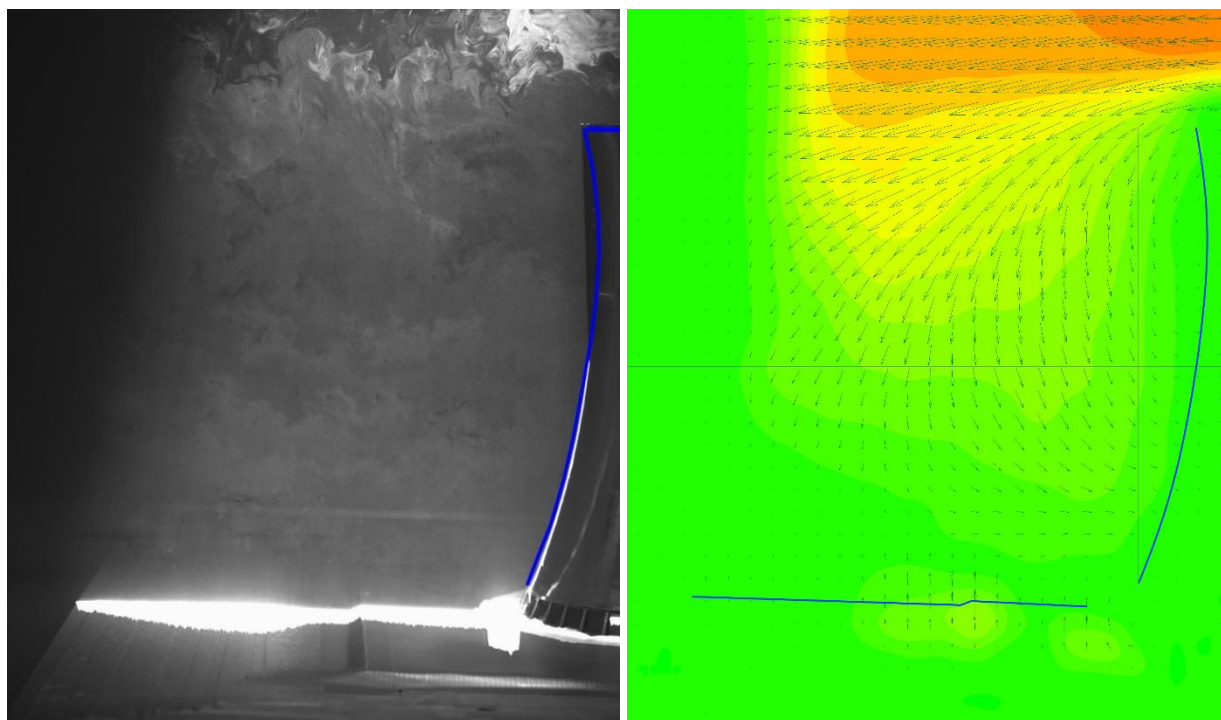
rys. 5.14 – Przekrój poprzeczny przez tunel aerodynamiczny: przekroje, w których zmierzono pola prędkości za modelem.

5.4 Przetwarzanie danych z badania PIV

Przykładowe fotografie (jedna para) zdjęć z kamery PIV są zaprezentowane na rys. 5.15. Zdjęcia są wykonane z bardzo małym odstępem czasowym, przez co sprawiają wrażenie identycznych. Zdjęcia różnią się jednak od siebie przesunięciem posianego powietrza.

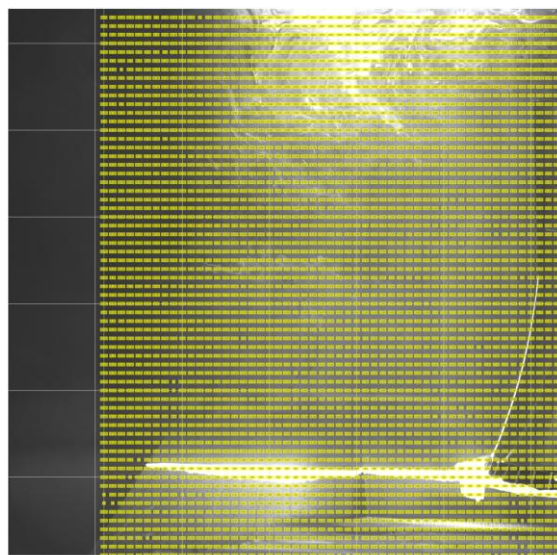


rys. 5.15 – Para zdjęć z kamery PIV, na przekroju pionowym. Pomiędzy zdjęciami występuje bardzo krótki odstęp czasu.



rys. 5.16 – Uśredniony rozkład prędkości na pionowym przekroju przy prędkości wentylatora 30Hz.
Niebieska linia oznacza krawędź modelu.

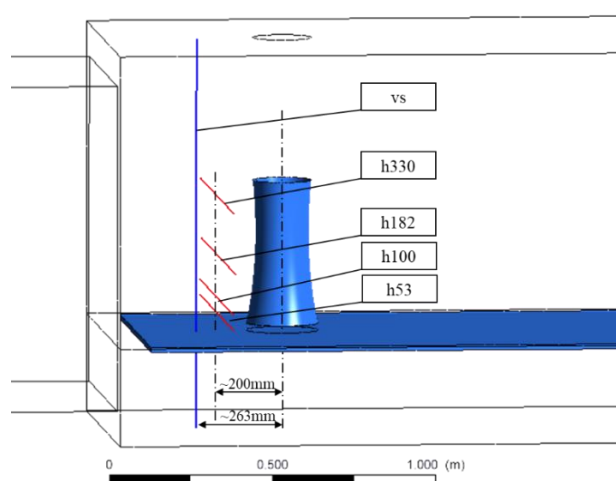
Końcowym produktem przetworzonych zdjęć wykonanych metodą PIV są pola prędkości w płaszczyznach naświetlania laserem. Pola są określone w ortogonalnej, równomiernej siatce punktów. Algorytm do analizy zdjęć w pierwszej kolejności dzieli każdą z fotografii w parze na sektory. W tym wypadku obszar jest podzielony na 63 segmenty w pionie i 53 w poziomie (część zdjęcia jest odrzucona). Dla każdego segmentu, na podstawie pary zdjęć jest wykonywana operacja splotu, w celu określenia jednego wektora prędkości (2 składowe) na sektor. Zdjęcia mają rozmiar 2048×2048 pikseli natomiast sektory po 32×32 pikseli. Część obszaru zdjęcia jest odrzucona, jak pokazano na rys. 5.17. Dlatego ilość sektorów nie jest sobie równa. Algorytm zwraca wektory w węzłach na przecięciu linii siatki, dlatego liczebność punktów rastru (w pionie) wynosi $2048/32 - 1 = 63$, i $1728/32 - 1 = 53$.



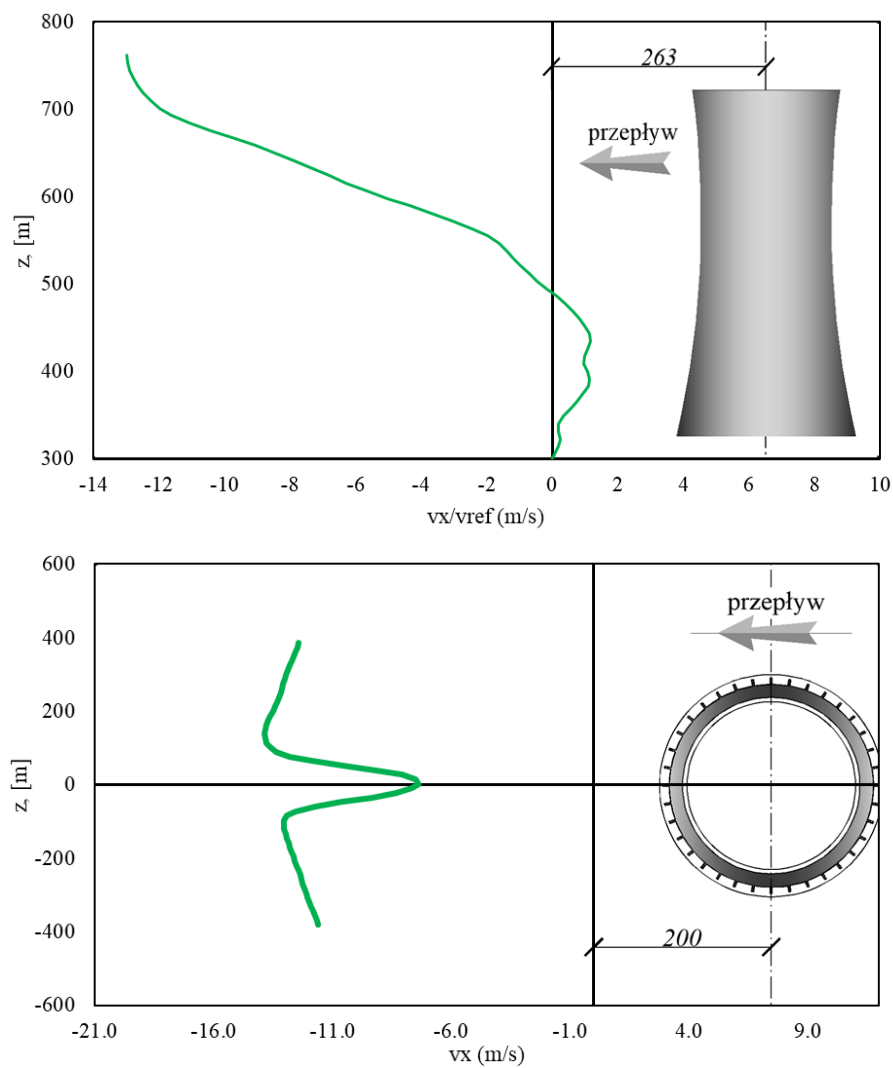
rys. 5.17 – Zakres analizy obrazów, który został zastosowany, jest oznaczony żółtymi punktami.

5.5 Interpretacja wyników i porównanie z obliczeniami

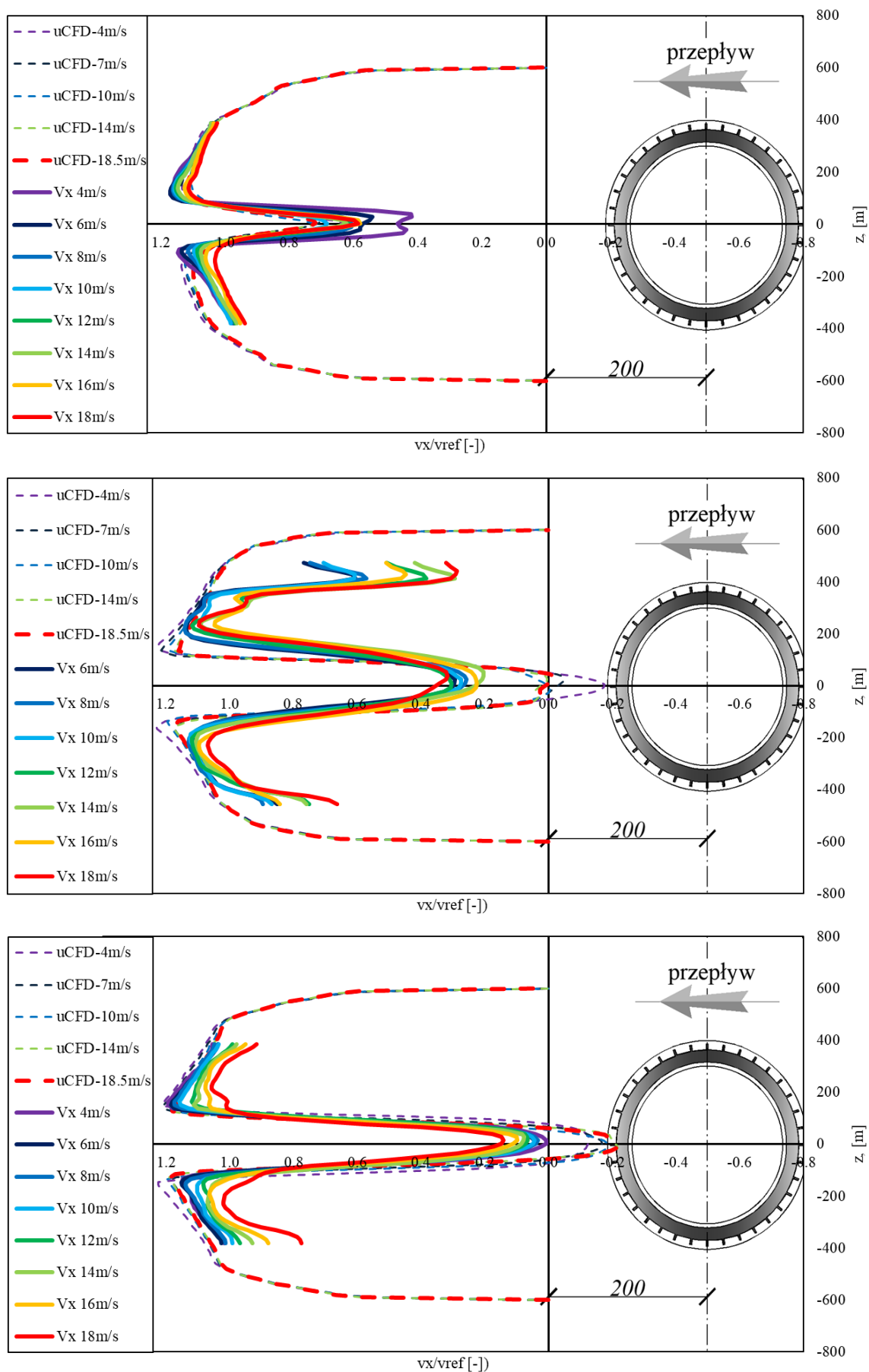
Porównanie z obliczeniami CFD zostanie przedstawione na płaskich wykresach w określonych punktach. Porównywanie map objęłoby całe przekroje, jednak trudno by było takie porównanie przedstawić, aby było możliwe omówienie różnic. Dlatego do porównania zostały wyodrębnione przekroje (linie) wzdłuż których są wykreślone wykresy prędkości. Przykładowe linie, oraz wykresy prędkości (przy prędkości wentylatora 30Hz), wraz z odniesieniem do położenia modelu zostały przedstawione na rys. 5.19. Na pionowej mapie (vs, według oznaczeń na rys. 5.14) wyodrębniono jeden wykres wzdłuż pionowej linii w odległości 263mm od osi chłodni. Na każdym z poziomych pól prędkości wyodrębniono wykresy wzdłuż poziomych linii w odległości 199mm od osi chłodni. Nieokrągłe wymiary odległości wynikają z tego, że w tych dokładnie rzędnych znajdowały się linie siatki PIV i nie było konieczne stosowanie interpolacji.



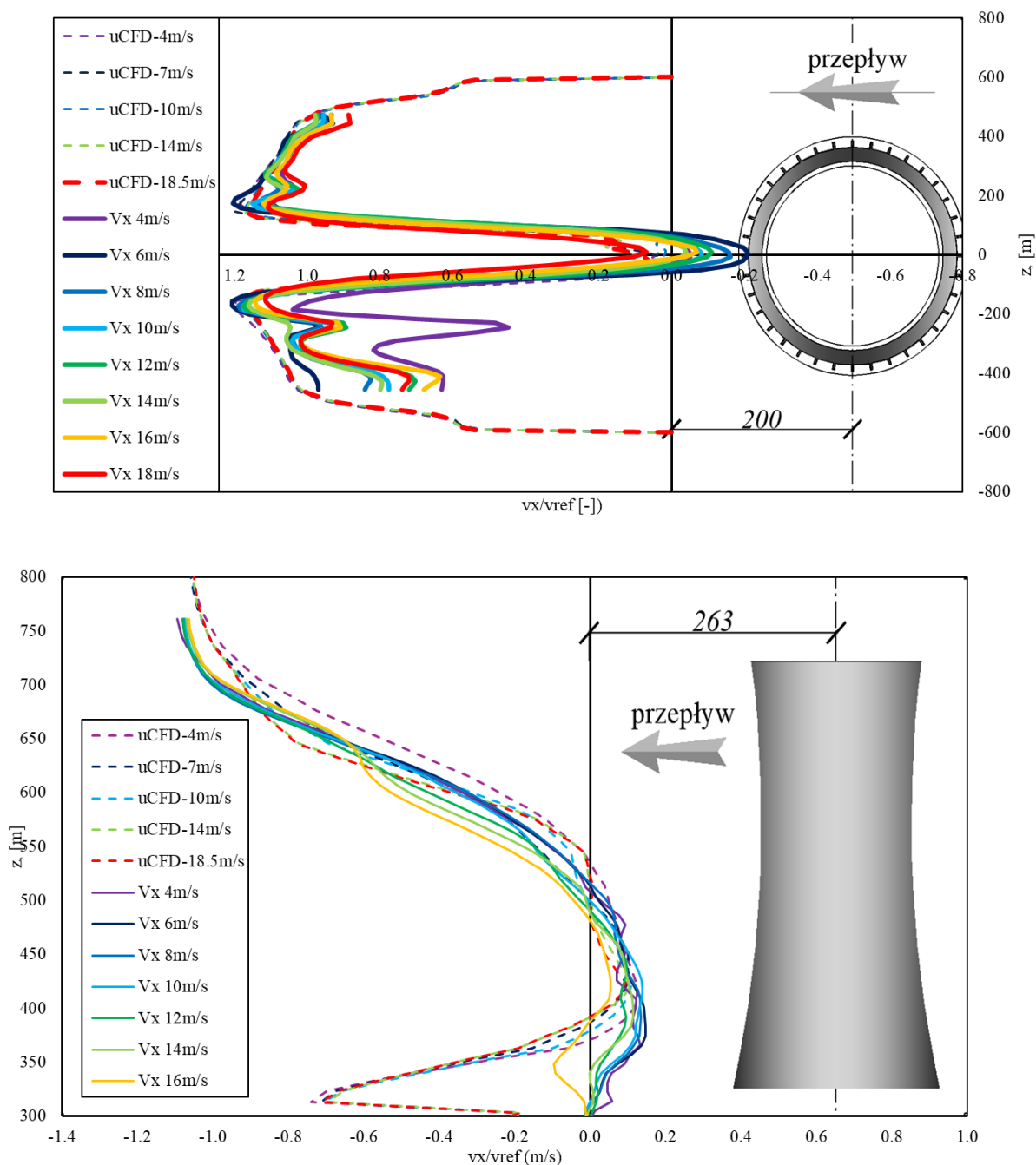
rys. 5.18 – Oznaczenia przekrojów, wzdłuż których zostały wykreślone wykresy – na podstawie zrzutu ekranu z programu POST-CFD (Ansys), oraz rys. 5.14.



rys. 5.19 – Rozkład prędkości za modelem – na pionowym polu (v_s) w odległości 263mm od osi modelu oraz na poziomym polu ($h330$), w odległości 200mm od osi chłodni. Oznaczenia przekrojów na rys. 5.14



rys. 5.20 – Rozkład prędkości wiatru na przekrojach poziomych kolejno h_{330} , h_{182} i h_{100} .



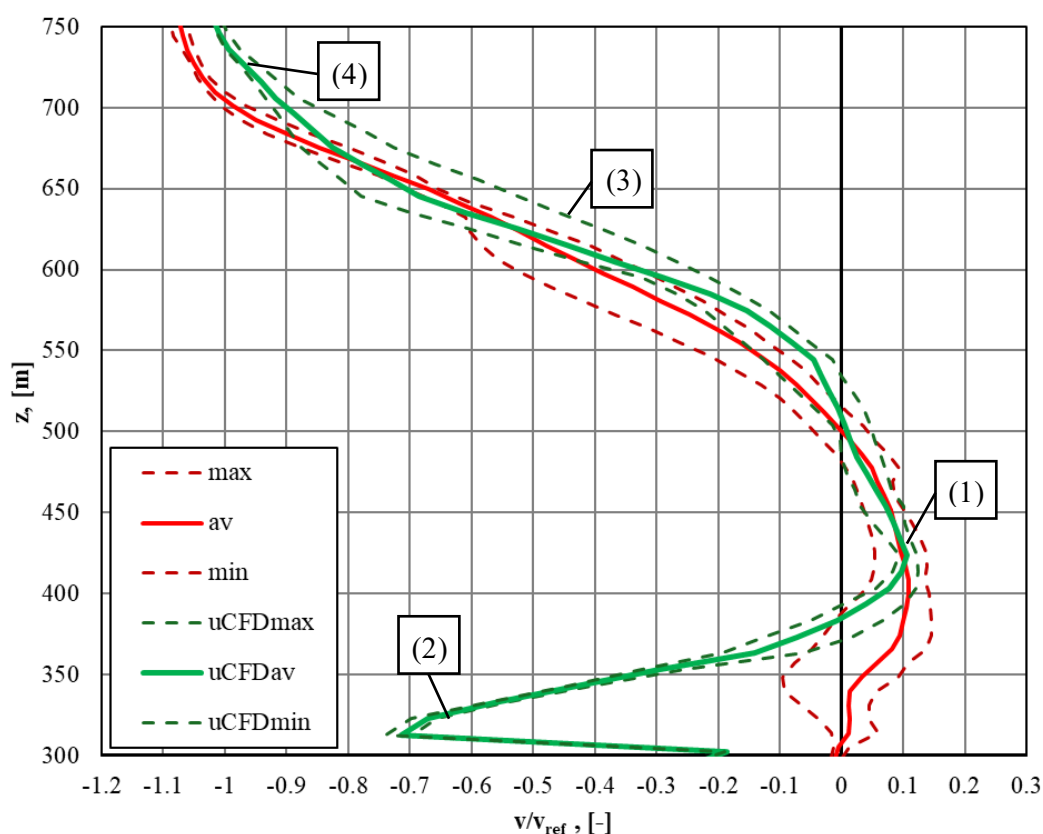
rys. 5.21 – Rozkład prędkości wiatru na przekroju poziomym h53 i pionowym – vs.

Powyższe porównania wskazują na różnicę pomiędzy wynikami obliczeń CFD a wynikami badań, uzyskanych techniką PIV. Linia przerywaną zostały przedstawione wyniki obliczeń CFD. Ponieważ najniższa prędkość z rozpatrywanego spektrum różni się od największej ponad $4\times$, wyniki są przedstawione w formie względnej (5-2) v_x/v_{ref} , gdzie v_{ref} oznacza prędkość odniesienia, wyznaczoną wg (5-1). Co ważne, na wykresach jest porównywana składowa prędkości wzdłuż kierunku przepływu powietrza w tunelu (v_x). W wyniku błędu, pomiar przy prędkości 10Hz został utracony na przekroju *hs182*. Nie udało się również przedstawić wykresu dla największej prędkości (ok 18m/s) na pionowym przekroju (vs). Poza tym serie danych są kompletne.

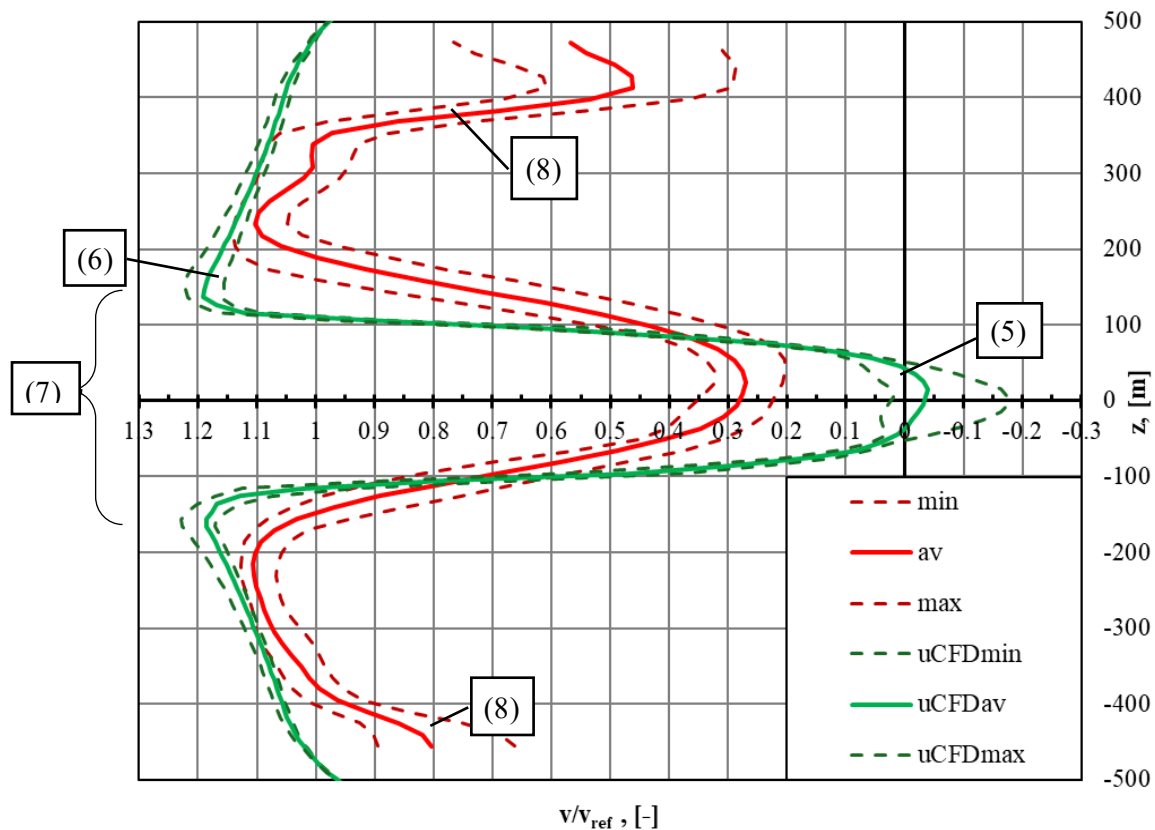
5.5.1 Opis jakościowy przepływu

Porównując wykresy uzyskane metodą PIV lub CFD, można zauważyć, że są zachowane podobne tendencje. W regionie tuż za modelem, udało się uzyskać dobrą zbieżność pomiędzy obliczeniami a badaniem. Nieco większe błędy pojawiają się w rejonie bliżej ścian tunelu, gdzie gradienty prędkości są znacznie większe.

Do jakościowego opisu przepływu za modelem posłuży rys. 5.22, na nim są zestawione średnie prędkości (względem nominalnego przepływu) otrzymane z badań i obliczeń. Na rysunku oznaczono punkty (1)÷(4). Zarówno w badaniach jak i obliczeniach numerycznych zauważono, że za modelem wytwarza się pole, na którym masa powietrza cofa się w kierunku przeciwnym do głównego przepływu (1). Średnia prędkość cofającego się powietrza sięga $-11\% \cdot v_{ref}$. To pole jest znacznie mniejsze w przypadku obliczeń numerycznych, ponieważ na samym dole (2) prędkość według obliczeń, zwraca się w kierunku głównego przepływu i osiąga wartość $0,7 v_{ref}$. Za modelem, w szczególności w górnej części obserwujemy gwałtowny spadek prędkości (3). Na wysokości równej wysokości chłodni, prędkość przepływu stabilizuje się i osiąga wartość ok $1,0 \cdot v_{ref}$.

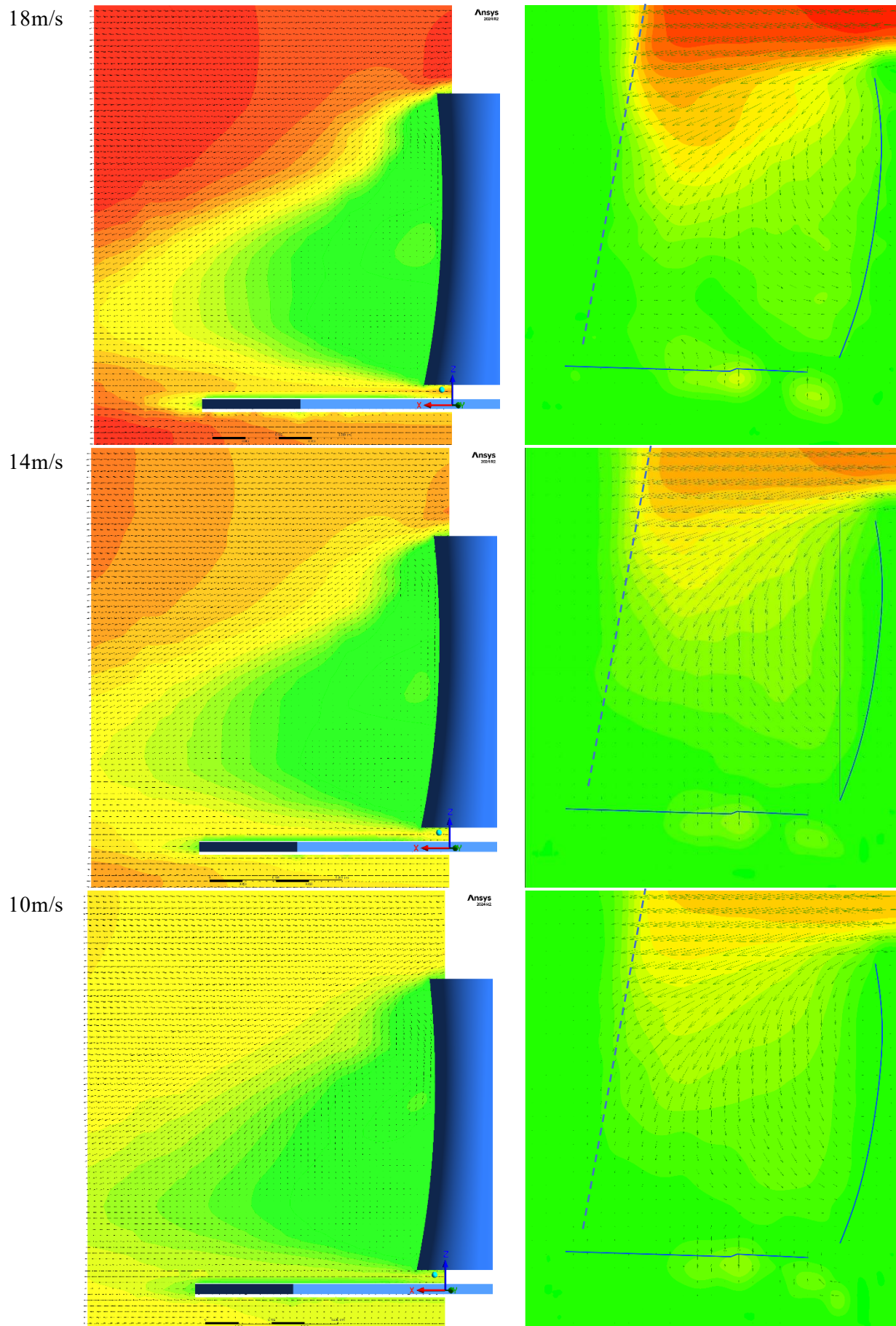


rys. 5.22 – Przekrój pionowy – względna, średnia prędkość przepływu według badań (kolorem czerwonym) i według obliczeń numerycznych (kolorem zielonym). Ciągłą linią oznaczono wartość średnią dla całego spektrum prędkości. Liniami przerywanymi oznaczono obwiednie wartości. Opis punktów (1)÷(4) w głównym tekście.



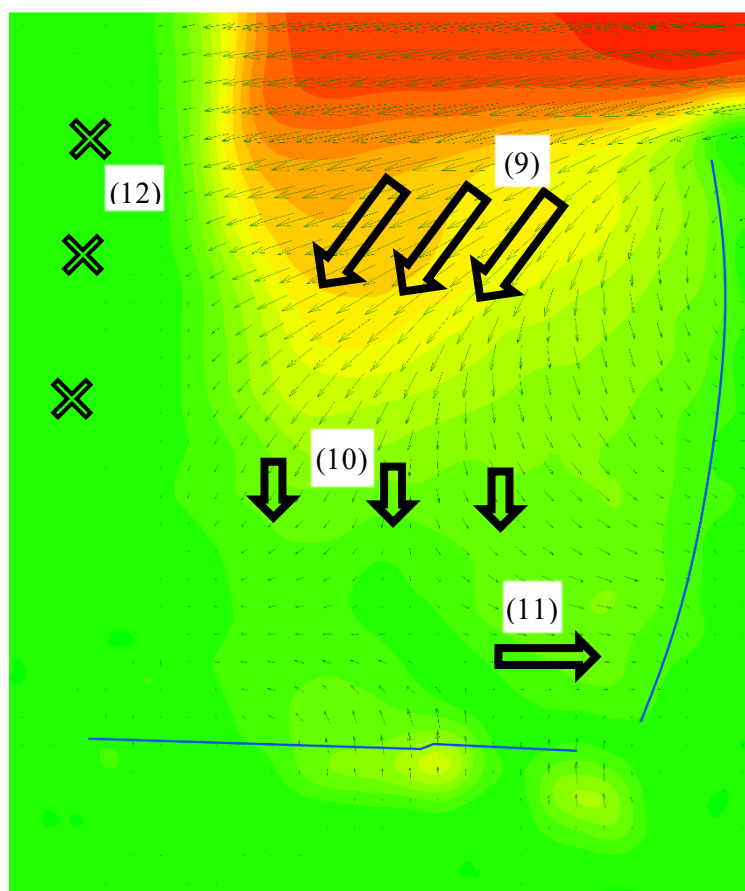
rys. 5.23 – Przekrój poziomy $h182$. Względna, średnia prędkość przepływu według badań i obliczeń numerycznych. Oznaczenia jak na rys. 5.22.

Pomimo zachowanych tendencji, większe różnice w wartościach wyników są widoczne na poziomym przekroju – na przykład na wysokości 182mm nad powierzchnią stołu (rys. 5.23). Według obliczeń numerycznych, wyhamowanie przepływu za modelem jest znacznie większe na tym przekroju (5). Prędkość spada do zera, a nawet pojawia się przepływ wsteczny. Ta różnica nie jest jednak aż tak istotna, gdy spojrzysz na nią z perspektywy pionowego przekroju. Wówczas można dojść do wniosku, że wykres prędkości otrzymanej z badań i obliczeń są między sobą przesunięte. Dlatego różnica między zieloną a czerwoną linią w (5) jest taka duża. Na rys. 5.23 można również zauważyć, że w punktach (6 - na krawędzi śladu aerodynamicznego) prędkość obliczona jest nieco większa od prędkości uzyskanej z badań oraz ślad aerodynamiczny chłodni z obliczeń numerycznych jest nieco węższy (7). To może być efektem za rzadkiej siatki w rejonie za walcem, ponieważ ogranicza efekt mieszania płynu w kierunku poprzecznym do przepływu. Niemniej jednak stosowanie mniejszych elementów objętościowych znacząco zwiększa ich liczbę, a tym samym opóźnia obliczenia. Ostatnią obserwacją na rys. 5.23 jest gradient prędkości w punktach (8), przy ścianach tunelu. Dla obliczeń numerycznych jest on znacznie mniejszy. W tym rejonie obserwuje się już zjawiska interakcji pomiędzy ścianami tunelu a swobodnym przepływem.



rys. 5.24 – Pola prędkości na przekroju pionowym (vs). Z prawej CFD, z lewej PIV.

Na rys. 5.24 i rys. 5.25 są zestawione pola prędkości na pionowym przekroju (v_s). Porównywanie całych pól prędkości jest mało dokładne, ale pozwala na bardziej ogólną ocenę przepływu powietrza. W obu przypadkach można zaobserwować, że chłodnia ściąga w dół strugę powietrza przepływającą ponad nią. W 1/3 wysokości chłodni główny kierunek przepływu jest skierowany ku dołowi. Poniżej 1/3 wysokości modelu pojawia się pole, w którym można zaobserwować przepływ przeciwny do kierunku głównego przepływu powietrza wewnątrz tunelu. Na rys. 5.24 przerywaną niebieską linią oznaczono orientacyjną krawędź światła lasera. Wyniki wyświetlone poza zakresem światła lasera są odrzucone, gdyż w tych miejscach algorytm PIV nie jest w stanie określić prawidłowych wartości.



rys. 5.25 – Zdobserwowane tendencje przepływów za modelem, przy prędkości 18,5 m.

Uśrednione przepływy dla różnych prędkości, uzyskane w badaniach metodą PIV oraz z obliczeń CFD wykazują spore podobieństwo. Zdobserwowane różnice mogą być efektem rzadkiej siatki w rejonie mieszania za modelem. Główny przepływ ma jednak takie same cechy dla obu pól prędkości. Można zatem uznać, że wyznaczone numerycznie pola prędkości są prawidłowe, a utworzony model numeryczny daje prawidłowe wyniki. W ramach przeprowadzonego eksperymentu wiele wartości nie zostało zbadanych – ciśnienie, siła oporu, siła nośna, prędkość przy powierzchni. Te wartości, w miarę potrzeb mogą być z pewnym prawdopodobieństwem odczytywane z modelu numerycznego.

6 CFD - oddziaływanie wiatru na rzeczywisty obiekt

6.1 Model obliczeniowy

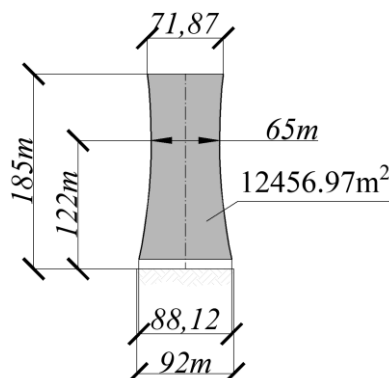
Badany model konstrukcji to katenoidalna chłodnia kominowa o wysokości 185m. Jej płaszcz rozpoczyna się na wysokości 9m. Poniżej konstrukcja jest wsparta na 36 słupach rozmieszczonych równomiernie po obwodzie. W celu jednoznacznego opisu geometrii płaszcza chłodni można posłużyć się równaniami parametrycznymi (6-1) w kartezjańskim układzie współrzędnych. Parametry równania i ich wartości są zestawione w tabelicy 6.1. Więcej uwagi geometrii samego modelu, zostało poświęcone w autorskiej pracy [1] oraz [74].

$$\begin{aligned}x &= a \cdot \cosh\left(\frac{v-h}{h} \cdot c\right) \cdot \cos \theta \\y &= a \cdot \cosh\left(\frac{v-h}{h} \cdot c\right) \cdot \sin \theta \\z &= v\end{aligned}\tag{6-1}$$

Zmienna z jest rzędną w kierunku pionowym a x i y to rzędne w kierunkach poziomych. W rozpatrywanym przypadku, x jest również kierunkiem natarcia wiatru. Wartości v i θ to zmienne parametryczne.

tablica 6.1 – wartości parametrów i zmiennych do funkcji (6-1)

wartość	opis	Wartość / zakres
v	zmienna	$0 \div 2\pi$
θ	zmienna	$0 \div 185$
a	parametr	32,5
h	parametr	122
c	parametr	0,882544

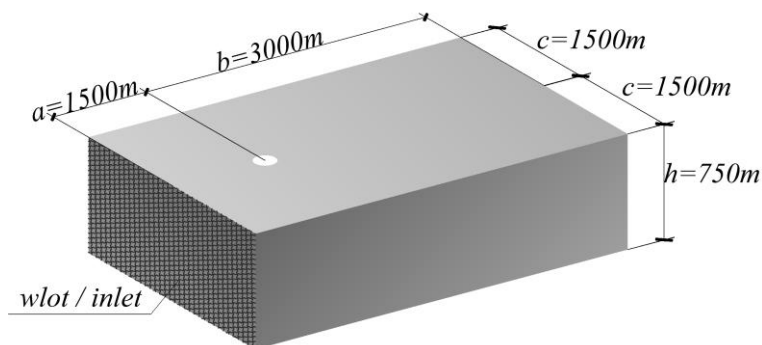


rys. 6.1 – wielkości charakterystyczne modelu obliczeniowego.

6.2 Założenia

Poprzednie rozdziały były poświęcone modelowi chłodni kominowej, pomniejszonej w skali. Ten rozdział skupia się na budowli o rzeczywistych rozmiarach. Pomimo że same modele mają identyczny kształt, a jedynie różnią się rozmiarem, całego zagadnienia nie da się przeskalować bez dodatkowych rozważań. Najbardziej istotną zmianą jest tutaj liczba Reynoldsa. Przy prędkości przepływu ok. 40m/s i średnicy chłodni 65m , liczba $Re = 1,7 \cdot 10^8$. A zatem przepływ jest w zakresie nadkrytycznym. W przypadku modelu chłodni pomniejszonego w skali, liczby Re mieściły się w zakresie podkrytycznym (lub krytycznym przy większych prędkościach) $Re = 5 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^5$. Kolejną istotną kwestią jest wielkość siatki. Zastosowana wielkość elementu przyściennego $0,2\text{mm}$ w małym modelu, po przeskalowaniu daje element o wielkości ok 100mm . Taki element skutkuje liczbą $Y+$ na poziomie 8000 , co jest zbyt wielką wartością (zakres stosowności $Y+$ od 30 do 300). Wymagany jest ponowny dobór wielkości siatki. Pozostałe elementy do ustalenia to:

- wielkość domeny – w małym modelu ta była narzucona przez gabaryt tunelu aerodynamicznego. W tym wypadku należy ją dobrać tak, by nie wpływała na mierzone wartości. Zazwyczaj przyjęcie odległości ścian bocznych oraz wlotu domeny od modelu w zakresie $10 \div 15D$ jest wystarczające. Średnica modelu waha się od 65 do 92m . Przyjęto odległość 1500m . Znacznie więcej miejsca pozostawia się za modelem, aby mogły rozwinąć się naprzemienne odrywające się wiry. Dlatego za modelem domena jest dwukrotnie dłuższa. W pobliżu modelu dodatkowo znajduje się podział wewnętrzny domeny, w celu zastosowania zagęszczenia siatki w najbliższym otoczeniu modelu.

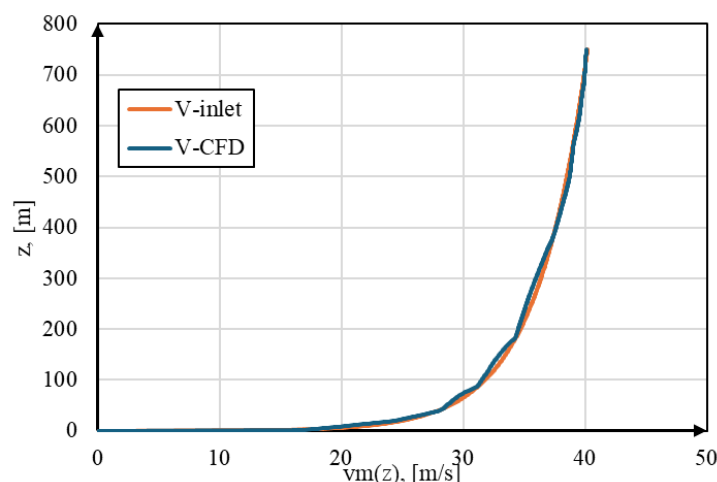


rys. 6.2 – gabaryty modelu.

- profil prędkości wiatru na wlocie. Na potrzeby zaimplementowania równań do programu Ansys Fluent, wzory (2-11) – na profil prędkości według Eurokodu uproszczone za pomocą programu Wolfram Mathematica. Do wzorów (2-11) podstawiono wartości odpowiadające II kategorii terenu i I strefy obciążenia wiatrem (według Tablicy 2.1). Uproszczone wzory mają postać (6-2):

$$v_m(z) = 12,5222 + 4,18 \cdot \ln(z) \quad (6-2)$$

$$I_v(z) = \frac{1}{2,99573 + \ln(z)}$$



rys. 6.3 – Profil prędkości wiatru w obliczeniach. *V-inlet* – ustawiona prędkość wlotowa, *V-CFD* – obliczona prędkość, zmierzona na wylocie.

W przypadku projektowania budowli, rozpatruje się zazwyczaj jedną prędkość – na podstawie norm projektowych. Przyjmuje się, że największa prędkość, stanowi najbardziej niekorzystną. Z uwagi na to, że zmienność obliczeniowej prędkości na terenach, gdzie wznosi się chłodnie ma małą zmienność, w analizie jest rozpatrywana jedna prędkość.

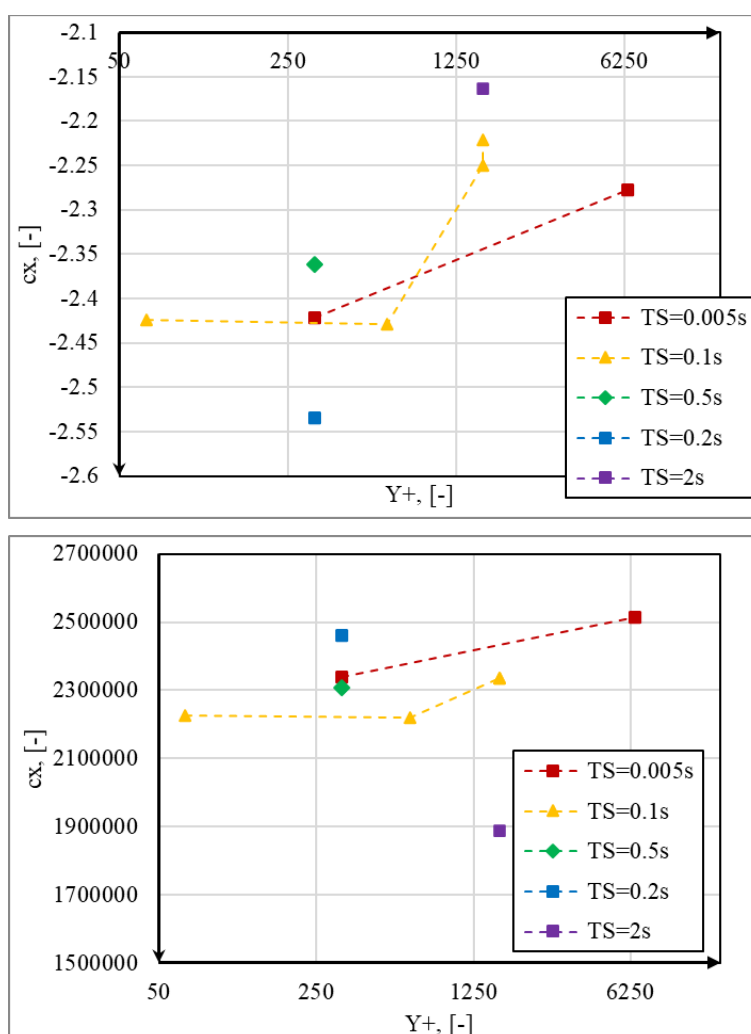
- wielkość kroku czasowego jest dobrana na podstawie zależności w tablicy 4.6. Średnica chłodni mieści się w przedziale 65 do 92 m a prędkości przepływu od 22 do 36 m/s. Dla liczby podziałów cyklu odrywania $n \rightarrow 50$, wielkość kroku czasowego powinna być nie większa niż 0,176 s do 0,408 s. Z uwagi na przyjęty typoszereg, do analizy jest zastosowany krok czasowy 0,1 s.

6.3 Siatka dyskretna

Utworzenie takiej siatki przy powierzchni modelu, dla której liczby y^+ wynosiłyby poniżej 1,0, jest bardzo trudne dla dużych obiektów. Przykładowo, przy prędkości 40 m/s i średnicy 65 m, grubość pierwszego elementu przy powierzchni powinna wynosić ok 0,026 mm. Chcąc zachować proporcje pomiędzy długościami boków objętości skończonych poniżej 100:1, należałoby stosować elementy przypowierzchniowe o rozmiarze ok 2,6 mm. Pole powierzchni płaszcza całej chłodni wynosi ok. 39 000 m². Zatem tylko pierwsza warstwa elementów przy powierzchni modelu powinna liczyć ok. $5,77 \cdot 10^9$ elementów. Przy wzroście elementów (growth rate) równym 1,2 i proporcji boków 100:1 należałoby zastosować ok 15÷20 warstw przyściennych. Do tego należy doliczyć jeszcze pozostałe

regiony siatki. Obecnie nie ma możliwości przeliczenia tak gęstej siatki. W przypadku tej pracy nie ma również takiej potrzeby.

W przypadku stosowanego modelu turbulencji $k-\omega$ SST można z powodzeniem stosować siatki przy których liczba y^+ mieści się w zakresie $30 \div 300$. Wraz ze wzrostem liczby y^+ spada dokładność odwzorowania przepływu, jest to jednak umiarkowany spadek dokładności. Analiza wrażliwości jest przedstawiona na rys. 6.4. Gorsze dla odwzorowania jest zastosowanie siatki, przy której y^+ mieści się w zakresie od 10 (lub nawet 8) do 30. W tym zakresie model $k-\omega$ SST zazwyczaj nie daje dobrych wyników. W obliczeniach, została zastosowana siatka przy powierzchni modelu o grubości $2 \div 5$ mm. Wielkość elementów przypowierzchniowych to ok 500 mm. Liczebność siatki wynosi ok 6,5 miliona elementów. W zakresie w pełni turbulentnym, modele są obliczane wolniej niż w przypadku zakresu podkrytycznego, dlatego dalsze zagęszczanie siatki jest bardzo uciążliwe.



rys. 6.4 – Analiza wrażliwości rozwiązania na gęstość siatki, wyrażoną w y^+ , na przykładzie siły oporu aerodynamicznego oraz maksymalnego ssania na ścianie bocznej walca.

6.4 Metody obliczeń

W obliczeniach jest wykorzystany przetestowany poprzednio model turbulencji $k-\omega$ SST. Obliczenia były prowadzone bez wykorzystania procesorów GPU. Zastosowane metody rozwiązania są zestawione w tablicy 6.2. Obliczenia były prowadzone z wykorzystaniem komputerów dużej mocy (HPC) w sieci PL-Grid w ramach przyznanego grantu.

Tablica 6.2– metody rozwiązania.

parametr	Metoda rozwiązania
scheme	coupled
Spatial Discretization	Last Sequence Cell Based
Pressure	PRESTO!
Momentum / Turbulent Kinetic Energy / Specific Dissipation Rate	Second Order Upwind
Transient Formulation	Second Order Implicit

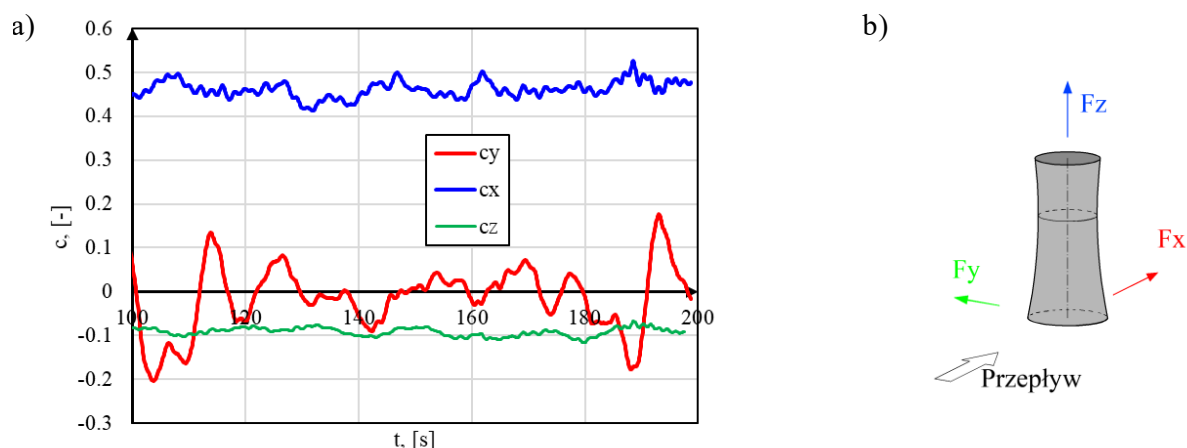
6.5 Wyniki obliczeń i ich interpretacja

Analiza została przeprowadzona w dwóch wariantach – ze stałą prędkością na wlocie oraz z prędkością na wlocie określoną profilem wiatru zmiennym podług wysokości z (rys. 6.3). Dlatego wyniki w tym rozdziale są przedstawione dla obu modeli. Z uwagi na trudność w interpretacji modelu uwzględniającego profil prędkości, wyniki są interpretowane w odniesieniu do modelu ze stałą prędkością.

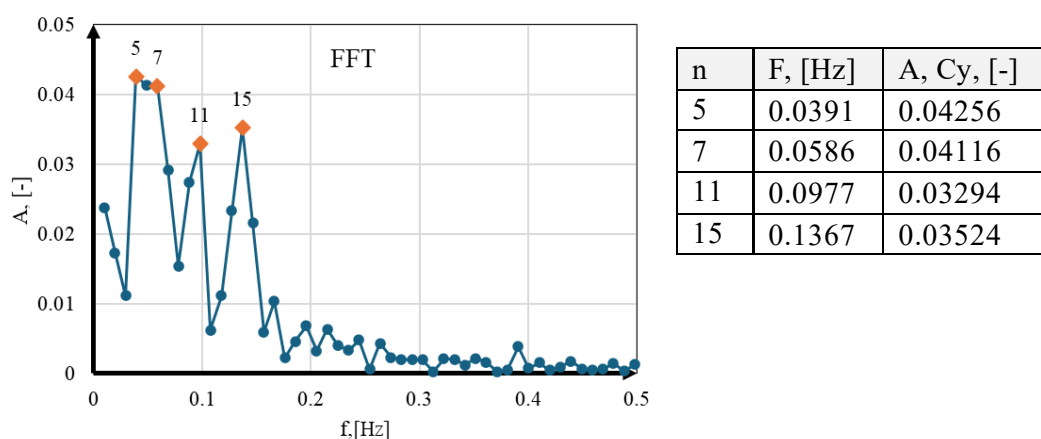
6.5.1 Siła nośna i siła oporu

W pierwszej kolejności warto pochylić się nad modelem, w którym zastosowano stałą prędkość napływu powietrza, zamiast profilu prędkości i turbulencji. Ten model jest nieco prostszy w interpretacji, z uwagi na stałą wartość prędkości odniesienia. Pole rzutu chłodni kominowej na kierunek nawietrzny wynosi w tym wypadku $12456.97m^2$, natomiast prędkości wlotu $40 m/s$.

Po ustabilizowaniu obliczeń (wykresy C_x , C_y) średnia prędkość wylotowa wynosi $33,95m/s$. Ta wartość jest przyjęta jako prędkość odniesienia. Średnia wartość współczynnika siły oporu wynosi $C_x = 0,462$, natomiast kwantyl 95% amplitudy, $C_y = 0,180$ a $C_z = 0,076$. Zatem siła oporu to $4\,061\,kN$, natomiast amplituda siły nośnej $F_y = 1\,459\,kN$ i $F_z = -667,0kN$. Siła pionowa oddziałuje na model w dół, a zatem zgodnie z kierunkiem grawitacji. Dla porównania, suma reakcji pionowych z płaszcza chłodni kominowej to ok $220\,000\,kN$. Dlatego siła pionowa od obciążenia wiatrem jest w tym wypadku pomijalnie mała. Nie można jednak zignorować sił poziomych F_x i F_y .



rys. 6.5 – a) Przebieg współczynnika siły nośnej (c_y), (c_z) oraz siły opory (c_x) po ustabilizowaniu.
b) Oznaczenia kierunków oddziaływania.

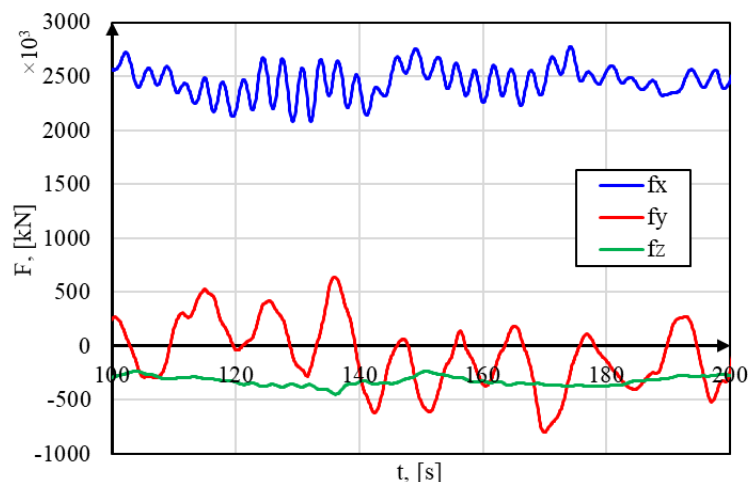


rys. 6.6 – analiza Fouriera i składowe częstotliwości zmian siły nośnej.

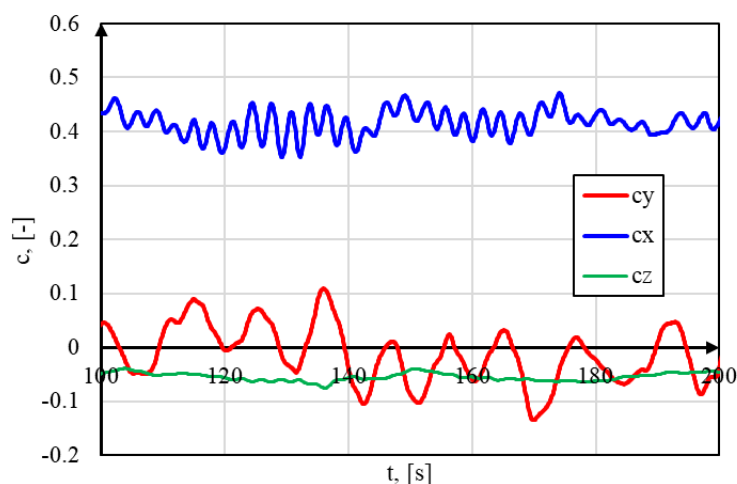
Na podstawie dyskretnej transformaty Fouriera zostały wyznaczone częstotliwości zmian siły nośnej. W tym wypadku, występuje kilka składowych w zakresie $0,04 \div 0,14$ Hz. Przy czym częstotliwość drgań własnych konstrukcji chłodni o podobnych wymiarach wynosi ok $0,4 \div 0,6$ Hz [1].

W przypadku modelu obliczeniowego, w którym zastosowano profil prędkości wiatru, nie jest możliwe prawidłowe podanie współczynników oddziaływania sił (C_x , C_y , C_z) z uwagi na to, że nie można jednoznacznie wskazać prędkości odniesienia. Oczywiście można tę prędkość uśrednić, ale współczynniki siły nie są liniowo zależne od prędkości, dlatego taki zabieg obarcza wynik błędem. Aby w zamian, bardziej dokładnie jest przedstawienie wyników w formie bezwzględnych sił oddziałujących na model. Wypadkowe siły oddziałujące na model zostały przedstawione na rys. 6.7. Współczynniki siły, są przedstawione na rys. 6.8, jako uzupełnienie interpretacji sił. Prędkość odniesienia zastosowana do sporządzenia wykresu (na rys. 6.8) wynosi 95,6% prędkości średniej na wylocie z domeny. Wartość została dobrana w taki sposób, aby uzyskać identyczną średnią wartość współczynnika obciążenia $C_x =$

0,462. Dzięki temu zabiegowi można porównywać pozostałe wielkości współczynników: $C_y = 0,204$ i $C_z = 0,0265$ do wielkości na podstawie modelu bez profilu prędkości.

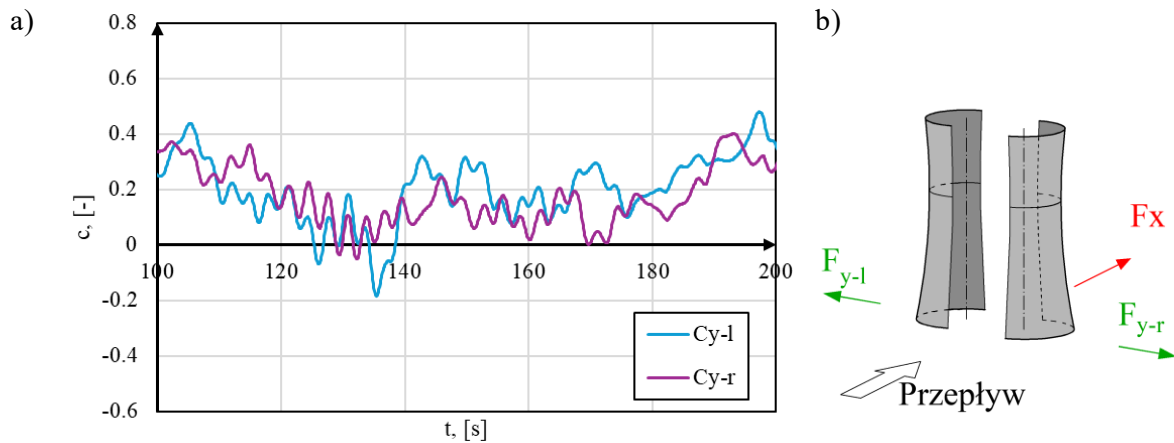


rys. 6.7 – siły nośne oraz siła oporu na podstawie modelu z profilem prędkości wiatru



rys. 6.8 – współczynniki sił nośnych oraz siły oporu dla modelu z profilem wiatru

Warto jeszcze zwrócić uwagę na siłę oddziałującą na połówkę chłodni. Powierzchnie obrotowe wykazują bowiem większą wrażliwość na ściskanie równoleżnikowe niż na ściskanie południkowe. Siła oddziałująca na lewą połówkę płaszcza to F_{y-l} , a na prawą F_{y-r} . Oznaczenia (zwroty) sił są zaprezentowane na rys. 6.9 w postaci współczynnika siły. Do ich wyznaczenia jako pole powierzchni odniesienia posłużyła połowa pola rzutu chłodni na kierunek wiatru $0,5A_{ref}$.

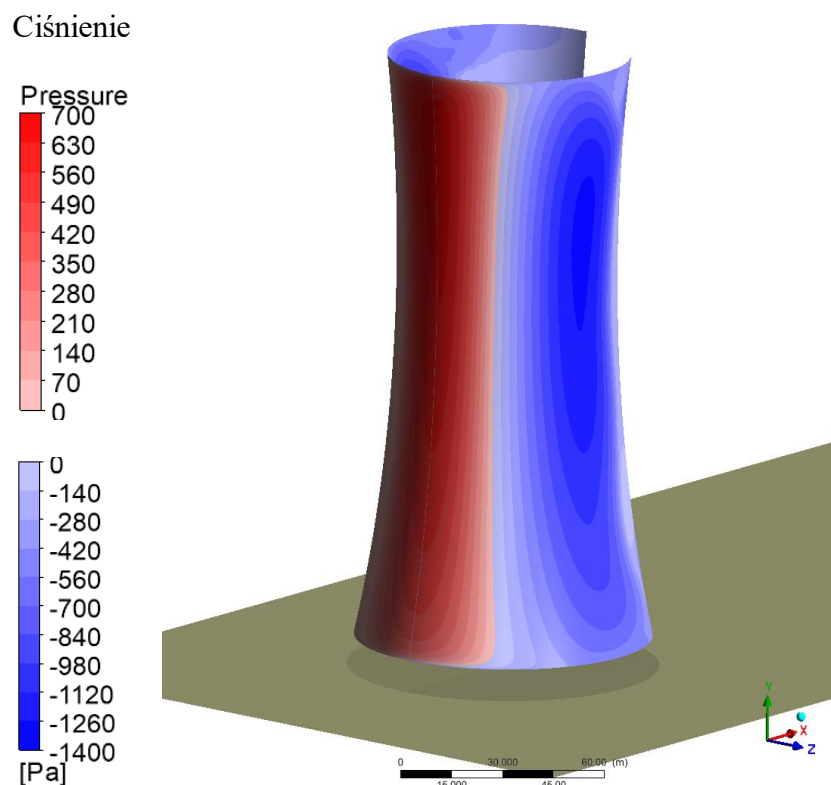


rys. 6.9 – a) Oddziaływanie wiatru na połówki płaszcza. b) Oznaczenia zwrotów sił F_{y-l} i F_{y-r} .
Dodatnia wartość $\rightarrow$ rozciąganie między połówkami.

Między połowami powłoki dominuje siła zwrócona na zewnątrz. Suma sił F_{y-l} i F_{y-r} daje wypadkową siłę pomiędzy połówkami. Natomiast różnica między nimi to wypadkowa siła działająca na całą chłodnię, a zatem F_y . Położenie krzywych współczynników siły powyżej osi obojętnej, świadczy o sile rozciągającej między połówkami. Oddziaływanie wiatru ma zatem korzystny efekt z uwagi na stateczność i nie wprowadza dodatkowego ściskającego oddziaływania do konstrukcji w rozpatrywanej płaszczyźnie.

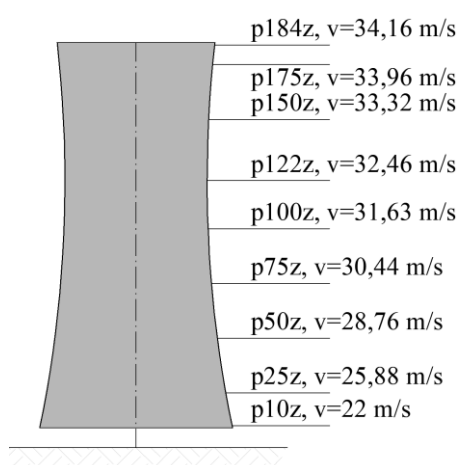
6.5.2 Rozkład ciśnienia

Rozkład ciśnienia na powierzchni chłodni kominowej jest najbardziej interesującym ze wszystkich wyników. Stanowi on bowiem niemal bezpośrednio obciążenie konstrukcji, którego wyznaczenie jest głównym celem tej pracy. Jak zaznaczono na początku pracy (na rys. 1.1) rzeczywisty rozkład obciążenia różni się od normowego. Według Eurokodu, ciśnienie wzrasta wraz z wysokością. Rozkład ciśnienia na powłoce, według analizy CFD, jest przedstawiony na rys. 6.10. Prezentowane ciśnienie jest polem chwilowym, dla ostatniego kroku przyrostu czasu ($t = 200s$). Na jego podstawie można zauważyć, że ciśnienie na zewnętrznej stronie (kolor czerwony) faktycznie wzrasta podług wysokości. Natomiast ekstremum ssania na ścianach bocznych znajduje się nie na górze, lecz w rejonie przewężania chłodni. To właśnie odróżnia rzeczywisty rozkład ciśnienia od rozkładu obliczonego na podstawie norm – jak dla walca.

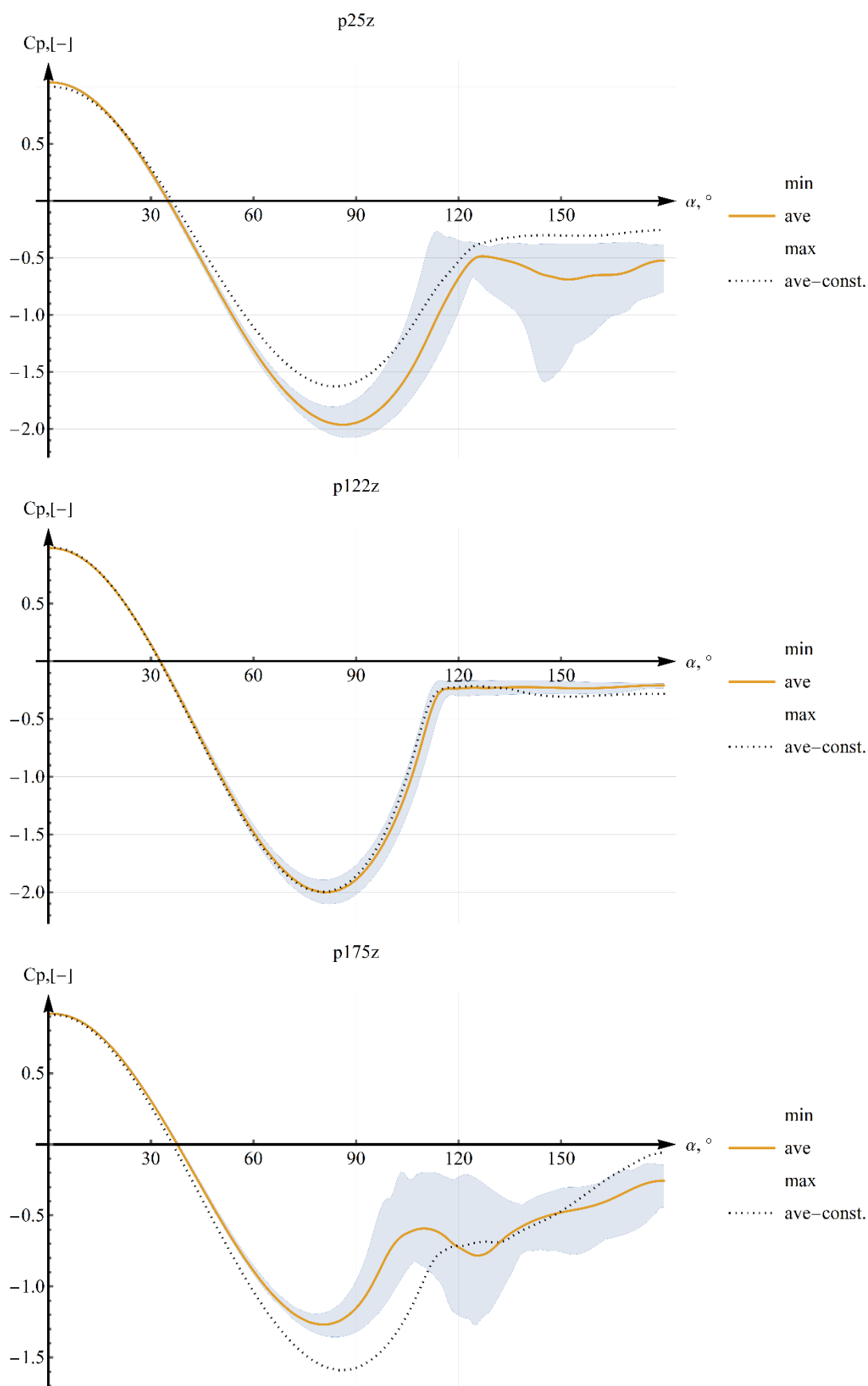


rys. 6.10 – Rozkład ciśnienia na powierzchni konstrukcji.

Podobnie jak dla obliczeń małego modelu (w rozdziale 4.8), rozkłady ciśnienia są przedstawione w formie wykresów $C_p(\alpha)$ na różnych wysokościach. Przekroje są opisane na rys. 6.11. Dla każdego z przekrojów prędkość odniesienia jest wyznaczona indywidualnie. Przykładowe rozkłady ciśnienia na powłoce są zestawione na rys. 6.12. Wszystkie rozpatrywane przekroje są zaprezentowane w załączniku „Załącznik 4 – rozkłady ciśnienia”.



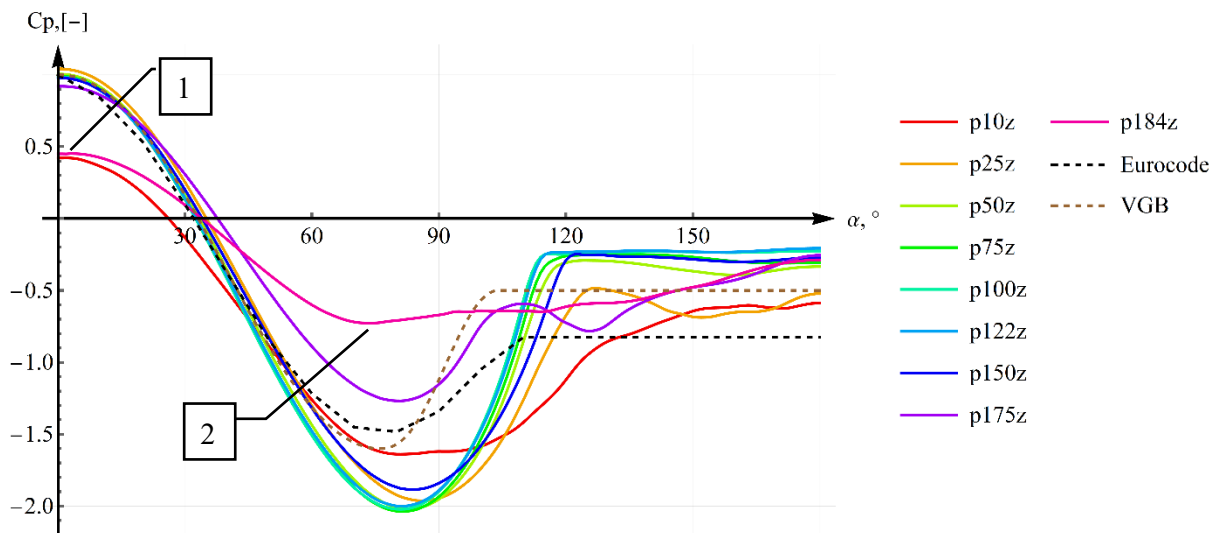
rys. 6.11 – Opis przekrojów, na których wyznaczono rozkład ciśnień, wraz z prędkościami odniesienia na kolejnych wysokościach – według równania (6-2).



rys. 6.12 – Rozkłady ciśnienia na wybranych przekrojach: „ave” – średni rozkład ciśnienia; min/max – wartości skrajne; „ave-const” – średni rozkład na podstawie modelu bez profilu wiatru.

W środkowej części chłodni (przekroje p50z ÷ p150z) zakres zmienności naprężeń w czasie jest bardzo mały. Średnia współczynnika ciśnienia wyznaczona na modelach z i bez profilu prędkości niemal pokrywa się. Można zatem wnioskować, że model jest mało wrażliwy na zmianę prędkości w pewnym zakresie. Sam rozkład jest zbliżony dla tego zaproponowanego w ramach Eurokodu [N-2]. Skrajne rozkłady ciśnienia (min, max) mocno rozchodzą się w strefach przy krawędziach płaszcza. W środkowej części jednak rozkład ciśnienia jest prawie stały.

Porównanie wszystkich średnich rozkładów ciśnienia jest przedstawione na rys. 6.13. Ciśnienie blisko krawędzi chłodni (przekroje p10z i p184z) znacznie odbiega od normowego rozkładu. Można zaobserwować o połowę mniejsze parcie na nawietrznej stronie (1) oraz mniejsze ssanie na ścianach bocznych (2). Przekroje p10z i p184z są jednak zlokalizowane w odległości 1 m od krawędzi płaszcza, dlatego rozbieżność od normowego rozkładu jest zrozumiała. Co ciekawe, można zaobserwować, że w środkowej części chłodni (miejsce przewężenia w przekroju p122z i sąsiednie) ssanie na bocznych ścianach jest nieco większe niż w przypadku rozkładu normowego.



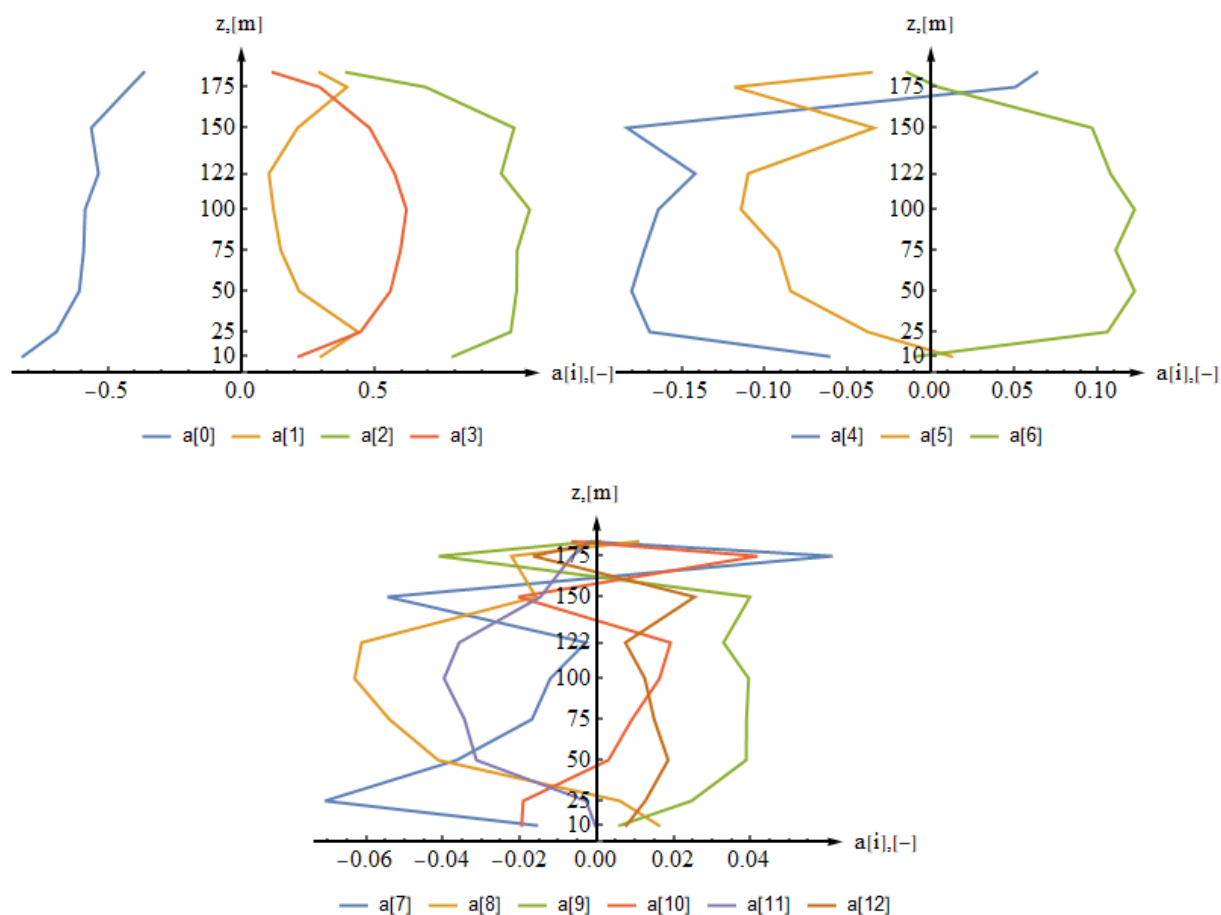
rys. 6.13 – średnie rozkłady ciśnienia na płaszczu według CFD. Wyniki na przekrojach p10z÷p184z oraz według norm Eurokod i VGB [N-2],[N-1].

Rozkład ciśnienia na powierzchni badanej konstrukcji jest aproksymowany za pomocą szeregu Fouriera. Podobnie jak poprzednio współczynniki funkcji zostały wyznaczone za pomocą programu Wolfram Mathematica. Funkcja $C_p(\alpha)$ składa się w tym wypadku z 13 wyrazów (w tym jednego wyrazu wolnego). Wartości współczynników funkcji są zestawione w tablicy 6.3, dla wszystkich przekrojów. W każdym przypadku szeregiem Fouriera był aproksymowany uśredniony rozkład ciśnienia.

$$C_p(\alpha) = \sum_{i=0}^n a_i \cos(\alpha \cdot i) \quad (6-3)$$

Tablica 6.3 – wartości współczynników do szeregu Fouriera

składowa	p10z	p25z	p50z	p75z	p100z	p122z	p150z	p175z	p184z
$a_{[0]}$	-0.8185	-0.6931	-0.6072	-0.5907	-0.5856	-0.5355	-0.5625	-0.4182	-0.3651
$a_{[1]}$	0.2996	0.4373	0.2166	0.1480	0.1205	0.1037	0.2110	0.3959	0.2940
$a_{[2]}$	0.7935	1.0100	1.0317	1.0340	1.0810	0.9742	1.0224	0.6908	0.3950
$a_{[3]}$	0.2160	0.4469	0.5590	0.5968	0.6189	0.5750	0.4812	0.2938	0.1189
$a_{[4]}$	-0.06130	-0.16927	-0.18011	-0.17247	-0.16403	-0.14188	-0.18292	0.05087	0.06377
$a_{[5]}$	0.01238	-0.03794	-0.08437	-0.09184	-0.11416	-0.10996	-0.03424	-0.11823	-0.03593
$a_{[6]}$	-0.00890	0.10635	0.12265	0.11131	0.12264	0.10816	0.09715	0.00449	-0.01422
$a_{[7]}$	-0.01562	-0.07068	-0.03641	-0.01682	-0.01207	-0.00279	-0.05442	0.06140	-0.00242
$a_{[8]}$	0.01619	0.00608	-0.04120	-0.05391	-0.06296	-0.06114	-0.01579	-0.02216	0.01069
$a_{[9]}$	0.00606	0.02469	0.03891	0.03900	0.03957	0.03303	0.03991	-0.04111	-0.00076
$a_{[10]}$	-0.01951	-0.01910	0.00308	0.00923	0.01637	0.01922	-0.02038	0.04188	-0.00620
$a_{[11]}$	-0.00038	-0.00268	-0.03128	-0.03438	-0.03969	-0.03578	-0.01461	-0.00638	-0.00138
$a_{[12]}$	0.00775	0.01269	0.01861	0.01498	0.01256	0.00747	0.02551	-0.01652	0.00082

rys. 6.14 – Graficzna reprezentacja współczynników funkcji aproksymacyjnej $a_{[0]} \div a_{[12]}$.

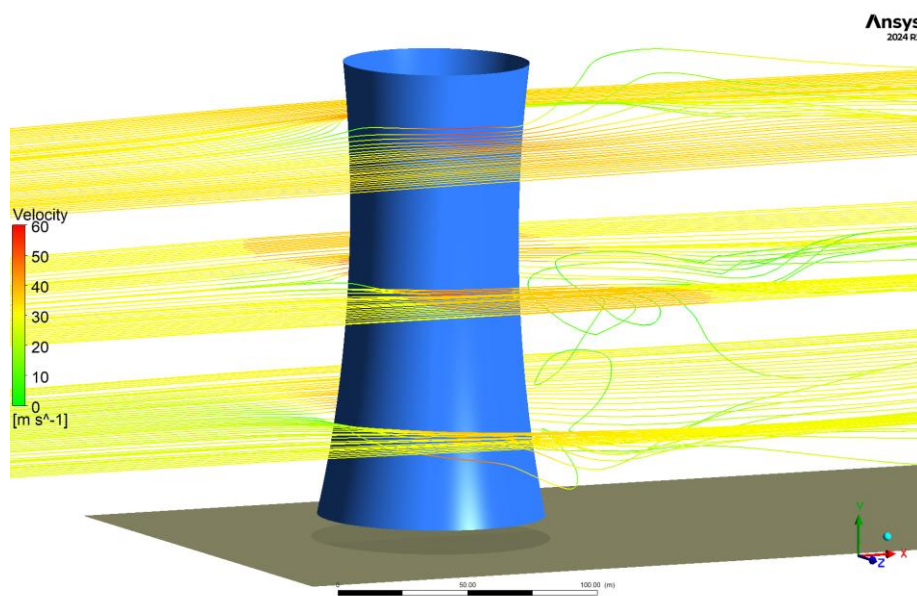
Współczynniki szeregu Fouriera zestawione w tablicy 6.3 można zestawić w formie graficznej rys. 6.14. W skrajnych przekrojach (p10z i p184z) rozkład ciśnienia jest wyraźnie zaburzony, dlatego wartości współczynników $a_{[i]}$ znacząco odstają od reszty. W pozostałych jednak przekrojach

współczynnik $a_{[0]}$ ma tendencję wzrostową na całej wysokości chłodni. W przypadku wartości $a_{[1]} \div a_{[3]}$, można zauważyć wyraźną krzywiznę na wykresach. W przypadku współczynników $a_{[4]} \div a_{[6]}$ nie ma już wyraźnie widocznych tendencji a wartości $a_{[7]} \div a_{[12]}$ zmieniają się w sposób chaotyczny. Aproksymowanie rozkładów współczynników $a_{[i]}$ ciągłymi funkcjami nie będzie tutaj zasadne, ponieważ funkcje do opisu niektórych współczynników byłyby bardzo złożone. Zamiast tego, do wyznaczenia rozkładu ciśnienia na wysokościach innych niż te odczytane można skorzystać z interpolacji liniowej pomiędzy współczynnikami $a_{[i]}$ na różnych wysokościach.

Rozkład współczynnika ciśnienia, uzyskany z wykorzystaniem interpolacji pomiędzy wyrażeniami $a_{[i]}$ na różnych wysokościach jest przedstawiony na rys. 6.15. Uzyskany rozkład jest ciągły pokrywa się z rozkładem ciśnienia na rys. 6.10. Metoda z wykorzystaniem interpolacji liniowej, choć jest dosyć prosta z punktu widzenia matematyki, jest również dosyć pracochłonna i skomplikowana z uwagi na procedurę obliczeniową (wymaga wyznaczenia współczynników $a_{[i]}$ na każdej rozpatrywanej wysokości). Ponadto interpolacja liniowa przy niedostatecznej liczbie zmierzonych przekrojów może prowadzić do obniżenia dokładności wyznaczania rozkładu ciśnienia. Z tego powodu kwestia matematycznego opisu funkcji aproksymującej dwóch zmiennych $C_p(z, \alpha)$ pozostaje nie rozwiązana w niniejszej pracy.

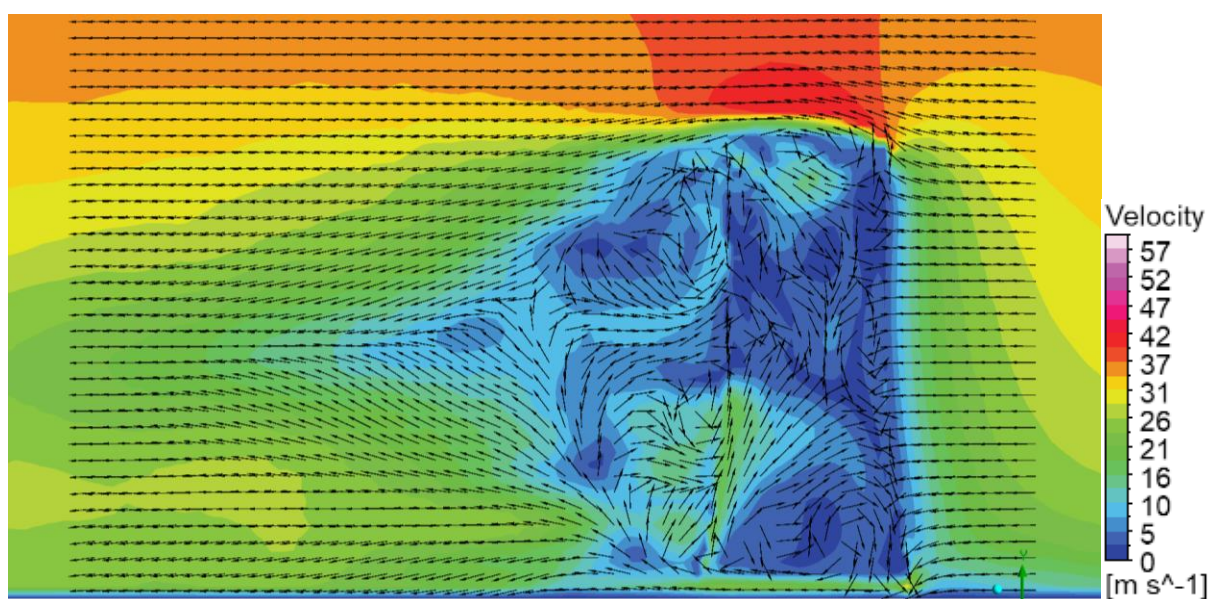
$\alpha \rightarrow$ $z \downarrow$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180
185	0.46	0.45	0.42	0.37	0.30	0.20	0.09	-0.03	-0.15	-0.27	-0.39	-0.50	-0.60	-0.67	-0.72	-0.73	-0.71	-0.69	-0.66	-0.65	-0.65	-0.64	-0.63	-0.62	-0.60	-0.59	-0.57	-0.54	-0.52	-0.48	-0.44	-0.39	-0.35	-0.32	-0.30	-0.29	
180	0.66	0.65	0.62	0.55	0.45	0.33	0.19	0.03	-0.12	-0.28	-0.45	-0.60	-0.73	-0.84	-0.91	-0.95	-0.97	-0.94	-0.88	-0.79	-0.70	-0.63	-0.62	-0.64	-0.67	-0.67	-0.65	-0.60	-0.55	-0.51	-0.48	-0.45	-0.41	-0.37	-0.32	-0.29	-0.27
175	0.92	0.90	0.86	0.78	0.65	0.48	0.30	0.11	-0.09	-0.30	-0.52	-0.72	-0.90	-1.04	-1.15	-1.23	-1.28	-1.26	-1.14	-0.96	-0.76	-0.62	-0.59	-0.64	-0.72	-0.76	-0.73	-0.65	-0.56	-0.50	-0.47	-0.46	-0.43	-0.38	-0.32	-0.27	-0.25
170	0.93	0.92	0.87	0.77	0.64	0.47	0.28	0.08	-0.14	-0.36	-0.58	-0.79	-0.98	-1.13	-1.26	-1.35	-1.40	-1.38	-1.28	-1.12	-0.93	-0.76	-0.67	-0.64	-0.65	-0.66	-0.63	-0.57	-0.51	-0.46	-0.44	-0.42	-0.40	-0.37	-0.32	-0.27	-0.26
165	0.95	0.93	0.87	0.77	0.64	0.46	0.26	0.05	-0.18	-0.42	-0.65	-0.86	-1.06	-1.23	-1.37	-1.46	-1.51	-1.50	-1.42	-1.28	-1.10	-0.91	-0.75	-0.64	-0.58	-0.55	-0.53	-0.49	-0.45	-0.42	-0.40	-0.39	-0.38	-0.35	-0.31	-0.27	-0.26
160	0.96	0.94	0.87	0.77	0.63	0.45	0.25	0.02	-0.23	-0.47	-0.71	-0.93	-1.14	-1.33	-1.48	-1.58	-1.63	-1.62	-1.56	-1.44	-1.27	-1.05	-0.83	-0.64	-0.51	-0.45	-0.42	-0.41	-0.39	-0.37	-0.36	-0.35	-0.35	-0.34	-0.31	-0.27	-0.26
155	0.98	0.95	0.88	0.77	0.62	0.45	0.23	-0.02	-0.27	-0.53	-0.77	-1.01	-1.23	-1.43	-1.59	-1.69	-1.74	-1.74	-1.70	-1.60	-1.44	-1.20	-0.91	-0.64	-0.44	-0.34	-0.32	-0.33	-0.34	-0.33	-0.32	-0.32	-0.32	-0.30	-0.27	-0.26	
150	0.99	0.96	0.88	0.77	0.62	0.44	0.21	-0.05	-0.32	-0.59	-0.84	-1.08	-1.31	-1.52	-1.70	-1.81	-1.86	-1.86	-1.83	-1.76	-1.61	-1.34	-0.99	-0.64	-0.37	-0.24	-0.22	-0.25	-0.28	-0.29	-0.28	-0.28	-0.30	-0.30	-0.29	-0.28	-0.27
145	0.98	0.95	0.88	0.76	0.61	0.42	0.20	-0.06	-0.34	-0.60	-0.86	-1.10	-1.33	-1.54	-1.71	-1.82	-1.87	-1.87	-1.83	-1.74	-1.56	-1.27	-0.92	-0.58	-0.34	-0.23	-0.22	-0.25	-0.28	-0.27	-0.27	-0.27	-0.28	-0.29	-0.28	-0.26	-0.25
140	0.97	0.95	0.87	0.76	0.60	0.41	0.18	-0.08	-0.35	-0.62	-0.88	-1.12	-1.36	-1.56	-1.73	-1.83	-1.88	-1.88	-1.83	-1.72	-1.51	-1.20	-0.85	-0.52	-0.31	-0.22	-0.22	-0.25	-0.27	-0.26	-0.25	-0.26	-0.27	-0.28	-0.27	-0.25	-0.24
135	0.96	0.94	0.86	0.75	0.59	0.39	0.16	-0.10	-0.36	-0.63	-0.89	-1.15	-1.38	-1.58	-1.74	-1.84	-1.88	-1.89	-1.83	-1.70	-1.46	-1.14	-0.78	-0.47	-0.27	-0.21	-0.22	-0.25	-0.26	-0.25	-0.23	-0.24	-0.26	-0.27	-0.26	-0.24	-0.23
130	0.95	0.93	0.86	0.74	0.58	0.38	0.15	-0.11	-0.38	-0.65	-0.91	-1.17	-1.41	-1.60	-1.75	-1.85	-1.89	-1.90	-1.83	-1.68	-1.42	-1.07	-0.70	-0.41	-0.24	-0.19	-0.22	-0.25	-0.26	-0.23	-0.22	-0.23	-0.25	-0.26	-0.25	-0.23	-0.21
125	0.94	0.92	0.85	0.74	0.57	0.37	0.13	-0.13	-0.39	-0.66	-0.93	-1.19	-1.43	-1.62	-1.76	-1.86	-1.90	-1.90	-1.83	-1.66	-1.37	-1.00	-0.63	-0.35	-0.20	-0.18	-0.22	-0.25	-0.25	-0.22	-0.20	-0.21	-0.24	-0.25	-0.24	-0.21	-0.20
120	0.94	0.92	0.86	0.74	0.57	0.36	0.12	-0.14	-0.40	-0.68	-0.95	-1.22	-1.46	-1.65	-1.79	-1.88	-1.93	-1.93	-1.85	-1.66	-1.36	-0.97	-0.60	-0.32	-0.19	-0.18	-0.22	-0.26	-0.25	-0.21	-0.20	-0.21	-0.23	-0.25	-0.23	-0.21	-0.19
115	0.97	0.94	0.88	0.76	0.59	0.37	0.13	-0.14	-0.41	-0.69	-0.97	-1.24	-1.48	-1.68	-1.82	-1.92	-1.97	-1.97	-1.89	-1.70	-1.40	-1.01	-0.62	-0.33	-0.19	-0.18	-0.22	-0.26	-0.25	-0.22	-0.20	-0.21	-0.24	-0.25	-0.24	-0.21	-0.19
110	0.99	0.97	0.90	0.78	0.60	0.38	0.13	-0.14	-0.41	-0.70	-0.98	-1.26	-1.51	-1.72	-1.86	-1.96	-2.01	-2.01	-1.93	-1.75	-1.44	-1.04	-0.64	-0.34	-0.20	-0.18	-0.23	-0.26	-0.26	-0.22	-0.20	-0.22	-0.24	-0.26	-0.24	-0.21	-0.19
105	1.01	0.99	0.92	0.79	0.62	0.40	0.14	-0.14	-0.42	-0.71	-1.00	-1.28	-1.54	-1.75	-1.90	-2.00	-2.05	-2.05	-1.98	-1.79	-1.48	-1.07	-0.67	-0.36	-0.20	-0.18	-0.23	-0.27	-0.26	-0.23	-0.21	-0.22	-0.25	-0.26	-0.24	-0.21	-0.19
100	1.03	1.01	0.94	0.81	0.63	0.41	0.15	-0.14	-0.43	-0.72	-1.02	-1.30	-1.57	-1.78	-1.94	-2.04	-2.09	-2.09	-2.02	-1.83	-1.51	-1.10	-0.69	-0.37	-0.20	-0.18	-0.23	-0.27	-0.27	-0.23	-0.21	-0.22	-0.25	-0.26	-0.24	-0.21	-0.19
95	1.03	1.00	0.93	0.80	0.63	0.40	0.14	-0.13	-0.42	-0.72	-1.01	-1.29	-1.55	-1.77	-1.92	-2.02	-2.08	-2.08	-2.02	-1.82	-1.51	-1.11	-0.70	-0.38	-0.21	-0.19	-0.23	-0.27	-0.27	-0.24	-0.22	-0.23	-0.26	-0.28	-0.26	-0.23	-0.21
90	1.02	0.99	0.92	0.80	0.62	0.40	0.14	-0.13	-0.42	-0.71	-1.00	-1.28	-1.54	-1.76	-1.91	-2.01	-2.06	-2.06	-1.99	-1.82	-1.51	-1.12	-0.71	-0.39	-0.22	-0.19	-0.23	-0.27	-0.27	-0.24	-0.23	-0.24	-0.27	-0.29	-0.28	-0.25	-0.23
85	1.01	0.99	0.91	0.79	0.62	0.40	0.14	-0.13	-0.42	-0.71	-1.00	-1.27	-1.53	-1.74	-1.90	-2.00	-2.05	-2.05	-1.98	-1.81	-1.51	-1.12	-0.72	-0.40	-0.23	-0.19	-0.23	-0.27	-0.27	-0.25	-0.23	-0.25	-0.28	-0.30	-0.29	-0.26	-0.25
80	1.00	0.98	0.90	0.78	0.61	0.39	0.14	-0.13	-0.42	-0.70	-0.99	-1.26	-1.52	-1.73	-1.89	-1.99	-2.04	-2.04	-1.97	-1.80	-1.51	-1.13	-0.73	-0.41	-0.23	-0.20	-0.23	-0.27	-0.28	-0.25	-0.24	-0.26	-0.29	-0.32	-0.31	-0.28	-0.27
75	0.99	0.97	0.90	0.77	0.60	0.39	0.14	-0.13	-0.42	-0.70	-0.98	-1.25	-1.51	-1.72	-1.87	-1.97	-2.02	-2.02	-1.96	-1.79	-1.51	-1.13	-0.74	-0.42	-0.24	-0.20	-0.24	-0.27	-0.28	-0.26	-0.24	-0.26	-0.30	-0.33	-0.32	-0.30	-0.29
70	1.00	0.97	0.90	0.78	0.61	0.40	0.15	-0.12	-0.41	-0.69	-0.97	-1.24	-1.49	-1.71	-1.86	-1.96	-2.02	-2.02	-1.96	-1.80	-1.53	-1.15	-0.76	-0.44	-0.25	-0.21	-0.24	-0.29	-0.29	-0.27	-0.27	-0.29	-0.32	-0.34	-0.33	-0.31	-0.29
65	1.00	0.98	0.90	0.78	0.61	0.40	0.16	-0.11	-0.40	-0.68	-0.96	-1.23	-1.48	-1.69	-1.85	-1.96	-2.01	-2.02	-1.96	-1.81	-1.54	-1.17	-0.78	-0.46	-0.27	-0.22	-0.25	-0.30	-0.31	-0.29	-0.29	-0.31	-0.34	-0.36	-0.34	-0.31	-0.30
60	1.00	0.98	0.90	0.78	0.62	0.41	0.17	-0.10	-0.39	-0.67	-0.94	-1.21	-1.47	-1.68	-1.84	-1.95	-2.01	-2.02	-1.96	-1.82	-1.56	-1.19	-0.80	-0.47	-0.28	-0.23	-0.26	-0.31	-0.32	-0.31	-0.31	-0.33	-0.36	-0.37	-0.35	-0.32	-0.30
55	1.01	0.98	0.91	0.79	0.62	0.42	0.17	-0.10	-0.38	-0.66	-0.93	-1.20	-1.45	-1.67	-1.83	-1.94	-2.00	-2.01	-1.97	-1.83	-1.57	-1.22	-0.82	-0.49	-0.29	-0.24	-0.27	-0.32	-0.34	-0.33	-0.33	-0.35	-0.38	-0.39	-0.36	-0.33	-0.31
50	1.01	0.98	0.91	0.79	0.63	0.42	0.18	-0.09	-0.37	-0.65	-0.92	-1.19	-1.44	-1.66	-1.83	-1.94	-2.00	-2.01	-1.97	-1.84	-1.59	-1.24	-0.85	-0.51	-0.31	-0.25	-0.28	-0.33	-0.35	-0.35	-0.35	-0.37	-0.39	-0.40	-0.37	-0.33	-0.31
45	1.02	0.99	0.92	0.80	0.64	0.44	0.20	-0.07	-0.35	-0.62	-0.90	-1.16	-1.41	-1.63	-1.80	-1.92	-1.98	-2.00	-1.96	-1.84	-1.62	-1.30	-0.92	-0.60	-0.38	-0.30	-0.32	-0.37	-0.40	-0.41	-0.41	-0.43	-0.45	-0.45	-0.42	-0.38	-0.36
40	1.03	1.00	0.92	0.81	0.65	0.45	0.21	-0.05	-0.33	-0.60	-0.87	-1.13	-1.38	-1.60	-1.78	-1.90	-1.96	-1.99	-1.96	-1.85	-1.65	-1.35	-1.00	-0.68	-0.46	-0.36	-0.36	-0.40	-0.45	-0.47	-0.48	-0.49	-0.50	-0.49	-0.46	-0.42	-0.41
35	1.03	1.01	0.93	0.81	0.66	0.46	0.23	-0.03	-0.31	-0.58	-0.85	-1.11	-1.35	-1.57	-1.75	-1.88	-1.95	-1.97	-1.95	-1.86	-1.69	-1.41	-1.08	-0.77	-0.53	-0.41	-0.40	-0.44	-0.49	-0.53	-0.55	-0.56	-0.56	-0.54	-0.50	-0.47	-0.45
30	1.04	1.02	0.94	0.82	0.67	0.47	0.24	-0.01	-0.29	-0.56	-0.83	-1.08	-1.32	-1.55	-1.73	-1.86	-1.93	-1.96	-1.95	-1.87	-1.72	-1.47	-1.16	-0.85	-0.60	-0.47	-0.44	-0.48	-0.54	-0.59	-0.61	-0.62	-0.61	-0.59	-0.55	-0.51	-0.50
25	1.05	1.02	0.95	0.83	0.68	0.49	0.26	0.00	-0.27	-0.54	-0.80	-1.06	-1.30	-1.52	-1.70	-1.84	-1.92	-1.95	-1.94	-1.88	-1.75	-1.53	-1.24	-0.93	-0.68	-0.53	-0.48	-0.52	-0.59	-0.65	-0.68	-0.69	-0.67	-0.63	-0.59	-0.56	-0.54
20	0.84	0.82	0.75	0.65	0.51	0.34	0.13	-0.10	-0.35	-0.60	-0.83	-1.06																									

6.5.3 Pola prędkości.



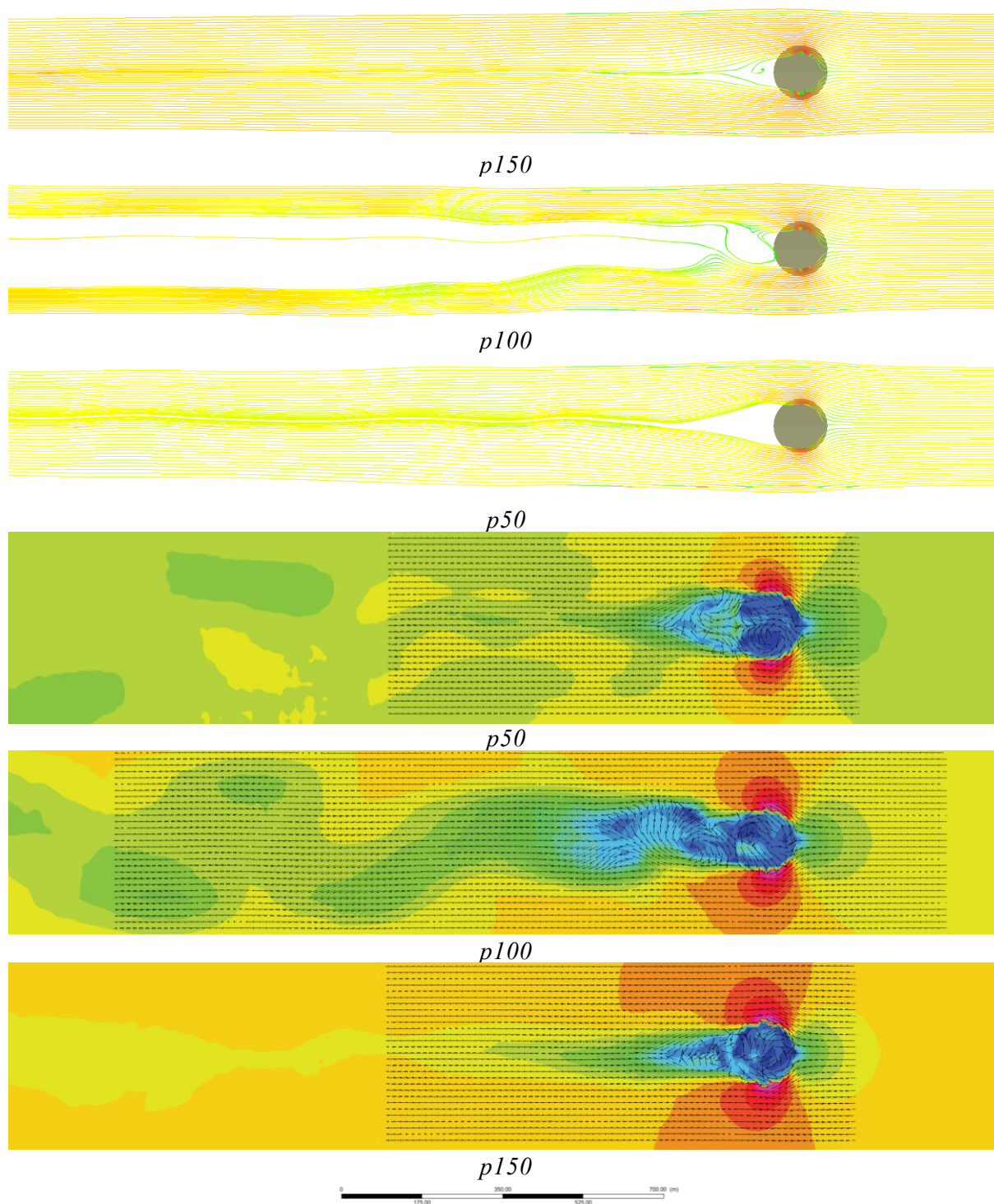
rys. 6.16 – Linie przepływu wokół chłodni kominowej.

Pole prędkości za badaną konstrukcją nie jest szczególnie istotne dla rozkładu ciśnienia. Warto jednak zwrócić uwagę, na harmonicznie zmienny w czasie przepływ za konstrukcją. Chłodnie kominowe, dla zagwarantowania ciągłości w chłodzeniu wody w razie awarii, zazwyczaj są wznoszone w bateriach zawierających minimum dwie budowle. Są one zlokalizowane w bliskim sąsiedztwie, co znacznie komplikuje proces wyznaczania obciążenia wiatrem. Choć niniejsza praca nie jest poświęcona obciążeniu konstrukcji w śladzie aerodynamicznym warto przypomnieć, że jest to realny problem. Zignorowanie tego zjawiska w przeszłości doprowadziło do kilku katastrof budowlanych [75].



rys. 6.17 – Pole prędkości w przekroju pionowym przez oś symetrii chłodni kominowej.

Widoczny na rys. 6.17 przepływ za chłodnią jest mocno turbulentny. Chłodnia powoduje wyhamowanie przepływu w śladzie aerodynamicznym. Miejscami pojawia się przepływ o składowej poziomej zwróconej przeciwnie do głównego kierunku przepływu. Linie prądu oraz pola prędkości na poziomych przekrojach są przedstawione na rys. 6.18. W środkowej części (przekrój na wysokości 100m – p100) wytworzył się przepływ przypominający naprzemienne odrywanie wirów od powierzchni chłodni. Zjawisko to ma jednak charakter lokalny i nie występuje na całej wysokości.

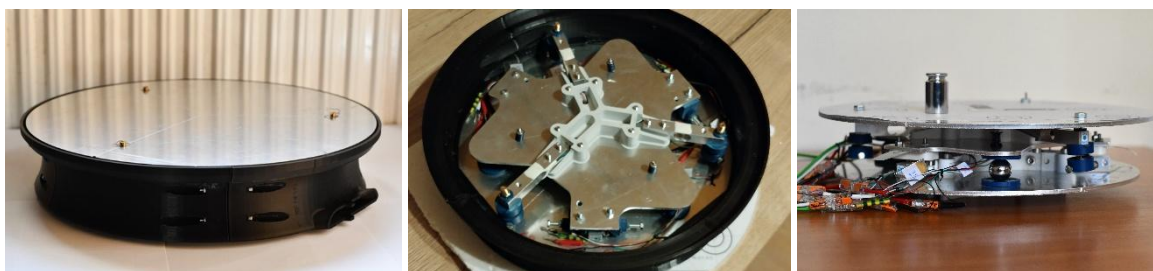


rys. 6.18 – Linie przepływu oraz pola prędkości na wysokościach 50, 100 i 150m n.p.t.

Zaobserwowany niestacjonarny przepływ za chłodnią nie jest nowym odkryciem, ale potwierdza obecność zjawisk związanych z wirami von Kármána. Jest to szczególnie niebezpieczne zjawisko, gdy częstotliwość odrywania wirów pokrywa się z częstotliwością drgań własnych chłodni. W rozpatrywanym przypadku, częstotliwości drgań własnych są jednak zwykle większe [1]. O wiele bardziej niekorzystna sytuacja występuje, gdy rozpatruje się kilka budowli ustawionych w szeregu równoległym do kierunku wiatru (lub pod pewnym kątem). Wówczas cyklicznie zmieniające się obciążenie może doprowadzić do awarii konstrukcji na zawietrznej stronie. Aerodynamice układu kilku walców poświęcono uwagę między innymi w pracach [4], [77]. Przedstawione prace porównują jednak interakcję walców, a nie powłok hiperboloidalnych lub katenoidalnych. Z uwagi na złożoność zagadnień w procesie projektowania chłodni, wpływ interakcji pomiędzy chłodniami powinien być wyznaczany indywidualnie dla każdego przypadku metodami numerycznymi lub eksperymentalnymi.

7 Zgłoszenie patentowe – waga aerodynamiczna

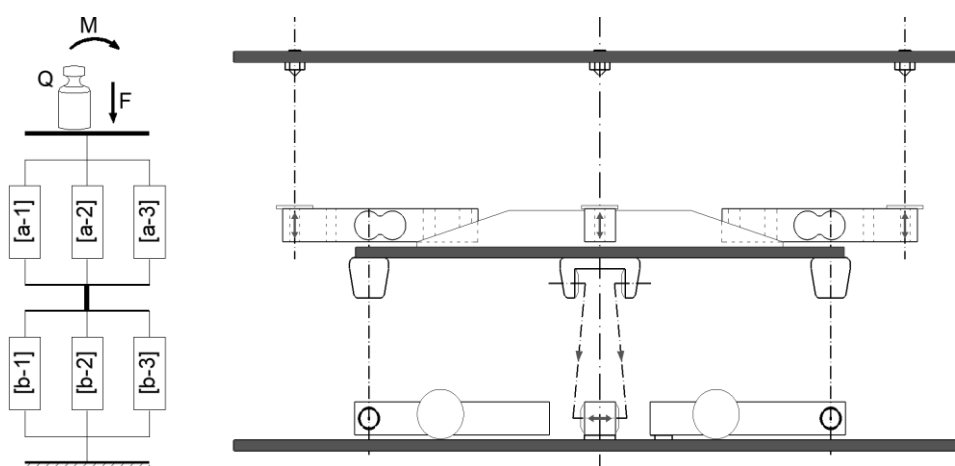
W ramach prowadzonych badań, zostało przygotowane urządzenie pomiarowe do jednoczesnego pomiaru trzech składowych siły i trzech składowych momentu działającego na model mieszczony w tunelu aerodynamicznym. Urządzenie zostało również zgłoszone jako wynalazek do polskiego urzędu patentowego, gdzie otrzymało numer zgłoszenia P.445446. Ostatecznie urządzenie zostało wykorzystane w badaniach, ale powstał jego prototyp gotowy do użycia. Samo urządzenie jest owocem pracy zespołu, do którego autor niniejszej pracy należał.

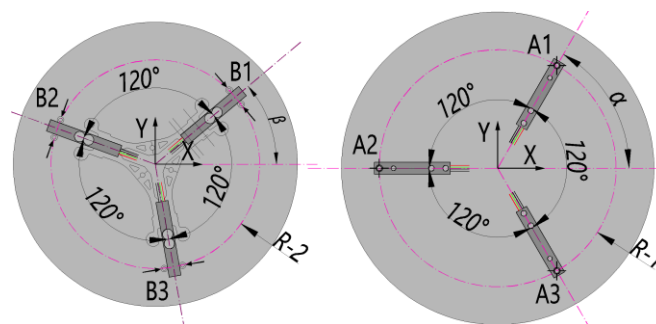


rys. 7.1 – Prototyp autorskiej wagi aerodynamicznej w obudowie oraz bez niej [76].

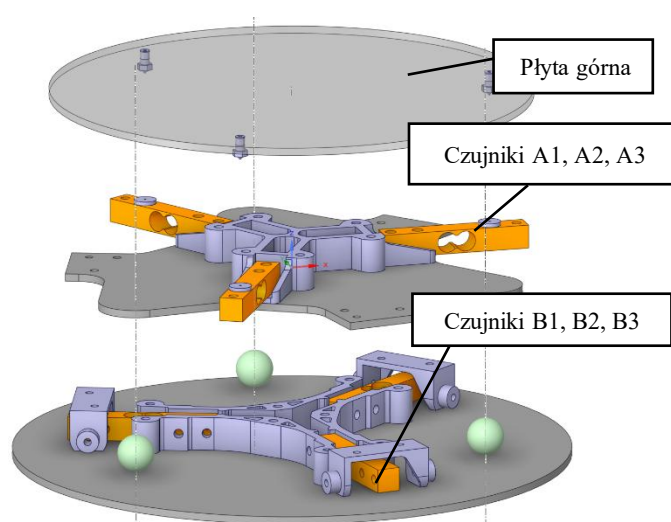
7.1 Zasada działania urządzenia

Waga składa się sześciu niezależnych czujników siły (belek tensometrycznych NA27) rys. 7.3. Belki zostały pogrupowane w dwa zbiory. Wewnątrz zbiorów belki są połączone równolegle ze sobą. Zbiory są natomiast złączone szeregowo – przez co waga ma „warstwową budowę”. Dzięki takiemu rozwiązaniu można rozdzielić myślowo całe urządzenie na dwa niezależne mechanizmy. Takie rozwiązanie znacznie ułatwia proces kalibracji oraz upraszcza samą konstrukcję.





rys. 7.2 – Schemat połączenia czujników wagi aerodynamicznej [76].



rys. 7.3 – Schemat połączenia czujników wagi aerodynamicznej [76].

Wyodrębnione zbiory czujników różnią się ustawieniem belek tensometrycznych (zgodnie z rys. 7.3):

- czujniki ustawione pionowo [A] (pomiar pionowej siły) odpowiedzialne za wyznaczenie siły pionowej F_z oraz momentów względem poziomych osi M_x , M_y ,
- czujniki ustawione poziomo [B] (pomiar poziomej siły) odpowiedzialne za wyznaczenie poziomych sił F_x i F_y oraz momentu względem pionowej osi M_z .

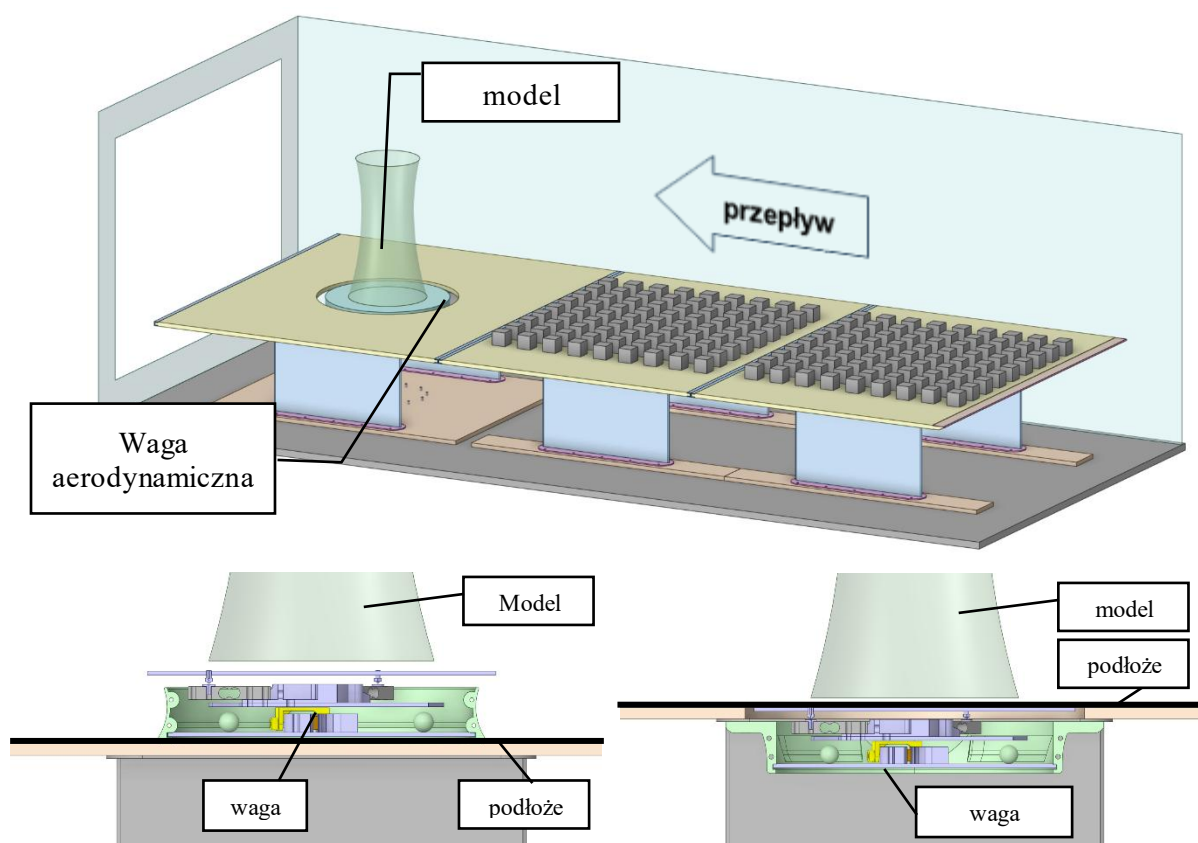
$$\begin{aligned} [A_1, A_2, A_3] &\rightarrow [F_z, M_x, M_y] \\ [B_1, B_2, B_3] &\rightarrow [F_x, F_y, M_z] \end{aligned} \quad (7-1)$$

7.2 Budowa i zastosowanie wagi

Waga została zaprojektowana tak, aby było możliwe zamontowanie jej na płaskiej powierzchni i nie zaburzała przepływu. Dlatego jej model w rzucie jest okrągły, a profil wysokość ograniczony do

minimum. Prototyp wagi, zbudowany z płyt aluminiowych oraz łączników wydrukowanych na drukarce 3D ma wysokość 7cm. Niemniej jednak, z zastosowaniem tych samych belek, teoretycznie można obniżyć profil wagi do 4,5cm. Waga została wyposażona w 2 wymienne obudowy – do mocowania na stole, oraz do mocowania w otworze pod stołem. Druga konfiguracja jest szczególnie przydatna, w badaniach budowli, ponieważ można całkowicie wyeliminować wpływ wagi na badany przepływ.

Konstrukcja zbudowanego prototypu wagi opiera się na trzech aluminiowych płytach o grubości 4mm, z których zostały wycięte pożądane kształty. Elementy łączące do ograniczników przesuwu oraz belek tensometrycznych zostały wydrukowane na drukarce 3D z tworzywa PLA lub ABS. Łożyska zostały wykonane z kul stalowych o średnicy 3cm. Do utworzenia prowadzeń poziomych zostały wykorzystane łożyska toczne o małej średnicy.

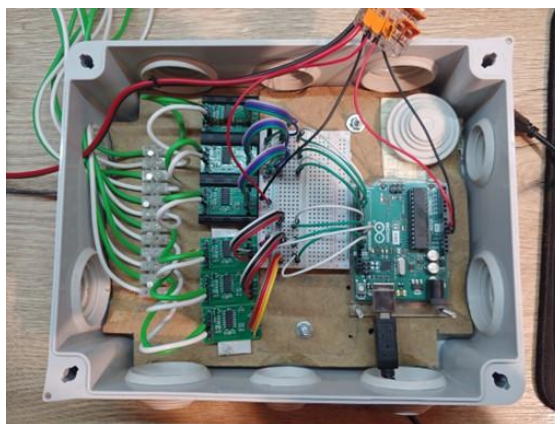


rys. 7.4 – Przykład zastosowania wagi w tunelu oraz konfiguracje obudowy: do ustawienia na stole i do zamontowani w otworze w stole [76].

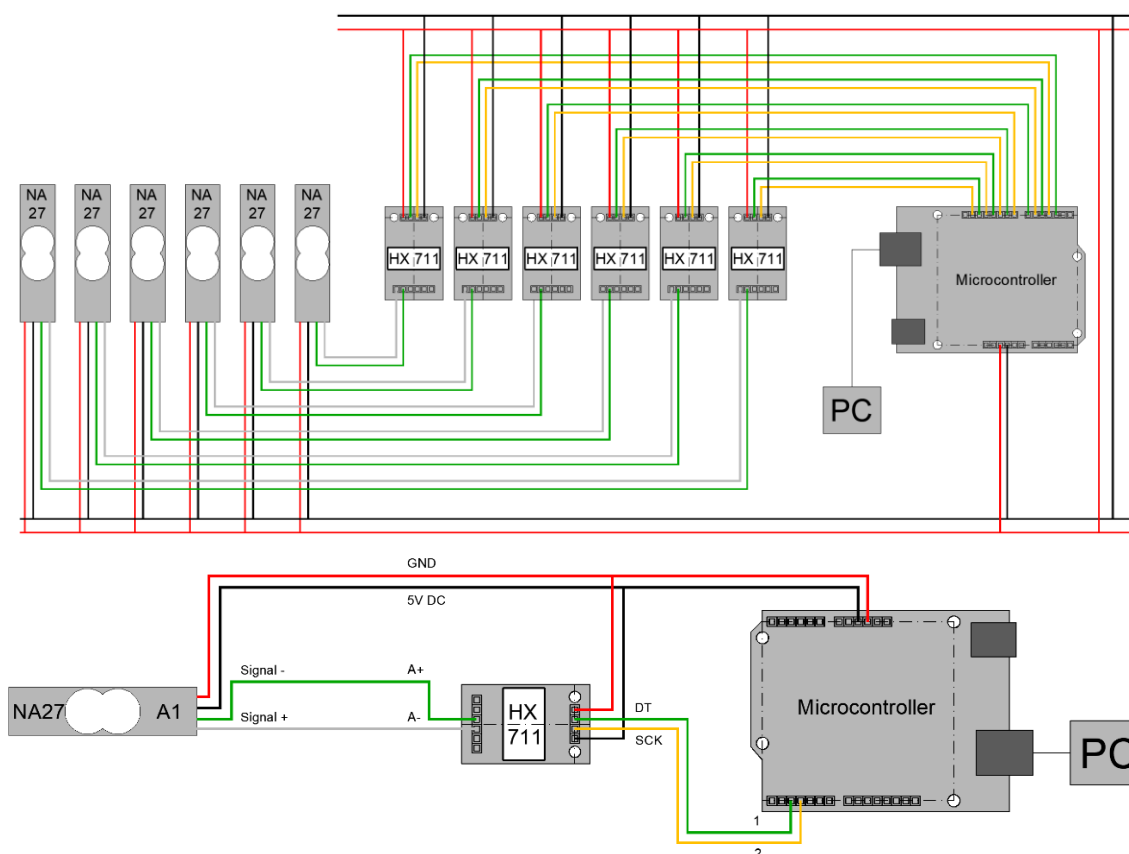
7.3 Schemat podłączenia elektrycznego

Podstawowym założeniem budowy wagi była jego niska cena. Na dzień rozpoczęcia prac nad urządzeniem zespół nie dysponował znacznymi środkami finansowymi, dlatego do budowy wykorzystano łatwo dostępne komponenty. Jako czujniki siły zostały wykorzystane belki tensometryczne NA27 o udźwigu do 20N, zasilane przez wzmacniacze sygnału HX711. Całość jest

podłączona do programowalnego kontrolera Arduino Uno R3. Całość komunikuje się z komputerem za pomocą złącza USB, przez port COM3. Dzięki temu jest możliwe wyświetlanie i monitorowanie na żywo odczytów w programie MS Excel. W celu zredukowania elektroniki wewnątrz wagi, kontroler oraz wzmacniacze zostały zamontowane w skrzynce poza obudową wagi i poza tunelem aerodynamicznym.



rys. 7.5 – Połączone wzmacniacze sygnału HX711 do kontrolera Arduino [76].



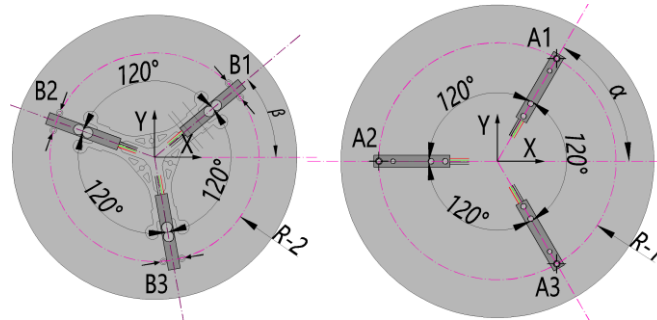
rys. 7.6 – Schemat połączenia elektrycznego komponentów, oraz szczegółowy schemat połączenia Belka tensometryczna ↔ HX 711 ↔ Arduino ↔ PC. Przewody czarny i czerwonym to przewody zasilające, pozostałe to przewody sygnałowe – zgodnie z kolorami urządzeń. [76].

Same zastosowane komponenty (belki tensometryczne NA27) pracują z dokładnością do czterech cyfr znaczących. Przy jednoczesnym podłączeniu sześciu beleczek, kontroler Arduino pozwala na próbkowanie z częstotliwością ok. 10Hz. Dla statycznych obciążeń wywołanych wiatrem jest to dostatecznie dużo, choć w przypadku wystąpienia odrywania wirów von Karmana, jest potrzebne większa częstotliwość odczytu wyników.

7.4 Przetwarzanie danych i proces kalibracji wagi

Zaproponowane urządzenie jest wewnętrznie statycznie wyznaczalne, dlatego znając jego geometrię (rys. 7.7) oraz stałe sprężyste dla każdej z belek można wyznaczyć wektor sił analitycznie stosując równania (7-2). Takie podejście wymaga jednak niezależnej kalibracji każdej z belek. Dlatego kalibracja jest prowadzona na złożonej wadze aerodynamicznej. Siły po kalibracji, wyznacza się stosując równania (7-3). Ponieważ waga została podzielona na dwie warstwy, składowe też są rozdzielone na dwie grupy, które wzajemnie nie wpływają na siebie.

Kalibracja w tym wypadku polega na znalezieniu współczynników x_i oraz wyrazów wolnych C_i . Niewiadomych jest łącznie 24, dlatego do pełnej kalibracji wagi wymagane jest zastosowanie co najmniej 24 znanych obciążeń.



rys. 7.7 – Kąty pomiędzy poszczególnymi belkami tensometrycznymi na płycie dolnej i górnej.

$$\begin{aligned}
 \text{a)} \quad & F_x = B_1 \cdot \sin \beta + B_2 \cdot \sin \left(\beta + \frac{2}{3} \pi \right) + B_3 \cdot \sin \left(\beta + \frac{4}{3} \pi \right) \\
 \text{b)} \quad & F_y = B_1 \cdot \cos \beta + B_2 \cdot \cos \left(\beta + \frac{2}{3} \pi \right) + B_3 \cdot \cos \left(\beta + \frac{4}{3} \pi \right) \\
 \text{c)} \quad & F_z = A_1 + A_2 + A_3 \\
 \text{d)} \quad & M_x = R_1 \cdot A_1 \cdot \sin(\alpha) + R_1 \cdot A_2 \cdot \sin \left(\alpha + \frac{2}{3} \pi \right) + R_1 \cdot A_3 \cdot \sin \left(\alpha + \frac{4}{3} \pi \right) \\
 \text{e)} \quad & M_y = R_1 \cdot A_1 \cdot \cos(\alpha) + R_1 \cdot A_2 \cdot \cos \left(\alpha + \frac{2}{3} \pi \right) + R_1 \cdot A_3 \cdot \cos \left(\alpha + \frac{4}{3} \pi \right) \\
 \text{f)} \quad & M_z = R_2 \cdot (B_1 + B_2 + B_3)
 \end{aligned} \tag{7-2}$$

Równania (7-3) można zapisać również w postaci macierzowej (7-4):

$$\begin{aligned}
 \text{a)} \quad & Fx = x_1 \cdot B1 + x_2 \cdot B2 + x_3 \cdot B3 + C_{Fx} \\
 \text{b)} \quad & Fy = x_4 \cdot B1 + x_5 \cdot B2 + x_6 \cdot B3 + C_{Fy} \\
 \text{c)} \quad & Fz = x_7 \cdot A1 + x_8 \cdot A2 + x_9 \cdot A3 + C_{Fz} \\
 \text{d)} \quad & Mx = x_{10} \cdot A1 + x_{11} \cdot A2 + x_{12} \cdot A3 + C_{Mx} \\
 \text{e)} \quad & My = x_{10} \cdot A1 + x_{11} \cdot A2 + x_{12} \cdot A3 + C_{My} \\
 \text{f)} \quad & Mz = x_{13} \cdot A1 + x_{14} \cdot A2 + x_{15} \cdot A3 + C_{Mz}
 \end{aligned} \tag{7-3}$$

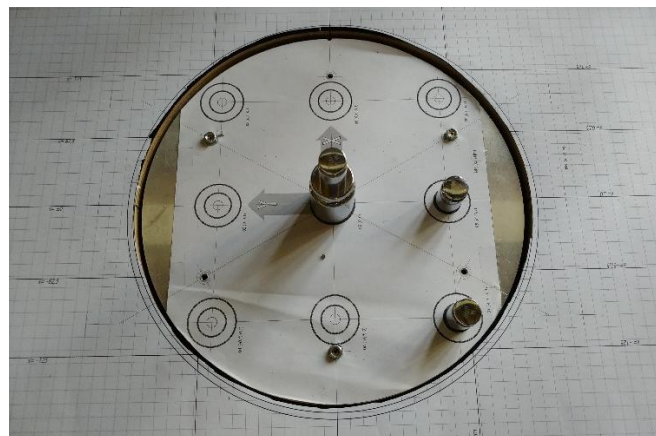
$$FM = AB \times X + C \tag{7-4}$$

Gdzie wektor AB zawiera odczyty z belek tensometrycznych, wektor C zawiera wyrazy wolne, Wektor FM zawiera wynik – czyli składowe siły i momenty. Natomiast macierz X zawiera składowe stałe współczynniki proporcjonalności dla wagi.

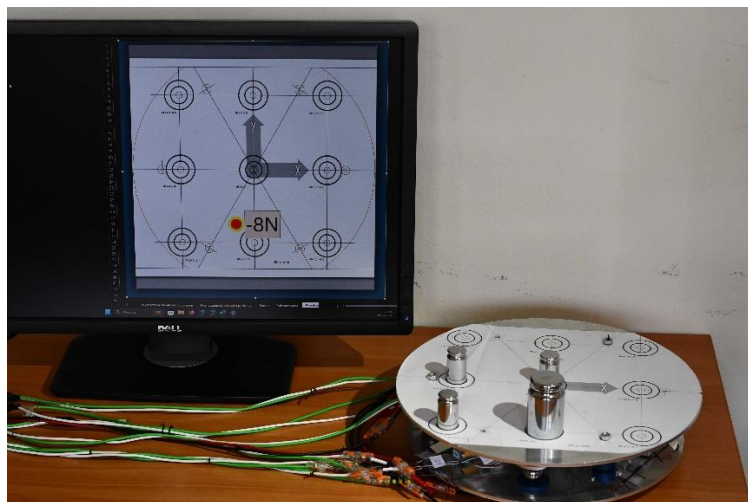
$$\begin{aligned}
 AB &= [A_1 \quad A_2 \quad A_3, B_1 \quad B_2 \quad B_3] \\
 C &= [C_{Fx}, \quad C_{Fy}, \quad C_{Fz}, C_{Mx}, \quad C_{My}, \quad C_{Mz}] \\
 FM &= [F_x \quad F_y \quad F_z, M_x \quad M_y \quad M_z]
 \end{aligned} \tag{7-5}$$

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & x_7 & x_{10} & x_{13} & 0 \\ 0 & 0 & x_8 & x_{11} & x_{14} & 0 \\ 0 & 0 & x_9 & x_{12} & x_{15} & 0 \\ x_1 & x_4 & 0 & 0 & 0 & x_{16} \\ x_2 & x_5 & 0 & 0 & 0 & x_{17} \\ x_3 & x_6 & 0 & 0 & 0 & x_{18} \end{bmatrix} \tag{7-6}$$

W celu usprawnienia procesu kalibracji, na wadze została umieszczona plansza kalibracyjna, która umożliwia zidentyfikowanie obciążenia bez wykonywania pomiarów położenia obciążników (rys. 7.8). Wyniki są zapisywane w pamięci komputera (w programie MS Excel). Kalibracja jest przeprowadzona na większej liczbie punktów niż jest to konieczne, aby było możliwe przeprowadzenie regresji oraz sprawdzenie powtarzalności otrzymanych wyników.



rys. 7.8 – Plansza do kalibracji wagi aerodynamicznej.



rys. 7.9 – Wizualizacja odczytu z wagi w programie MS Excel.

Po przeprowadzeniu kalibracji udało się wyznaczyć stałe kalibracyjne. W przypadku składowych siły F_x , M_x , M_y udało się uzyskać dobrą dokładność pomiarów. Błąd względny wagi wynosi poniżej 1%. Waga również powraca do stanu zerowego po zdjęciu obciążenia. Niestety dla składowych siły F_x , F_y oraz M_z nie udało się uzyskać zadowalającej dokładności. Średni błąd względny to 6%, przy czym w skrajnym przypadku nawet 12%. Waga również nie powracała do stanu zerowego po zdjęciu obciążenia. Powodem tego były duże tarcia i luzy wewnętrzne. Są one szczególnie widoczne przy małych wartościach obciążeń.

Z uwagi na to, że nie udało się uzyskać zadowalającej dokładności, badania laboratoryjne nie zostały powtórzone z udziałem stworzonego prototypu wagi. W dalszych planach badawczych jest jednak rozwój urządzenia oraz jego ponowna budowa z lepszej jakości materiałów oraz większą precyzją wykonania.

8 Wnioski końcowe

8.1 Podsumowanie

W ramach niniejszej pracy, zostały przeprowadzone obliczenia numeryczne przepływu wiatru wokół wzorcowej chłodni kominowej. Zostały wykonane badania eksperymentalne w tunelu aerodynamicznym na modelu zmniejszonym w skali. Jako uzupełnienie, zadbano również o analizę CFD odwzorowującą badania eksperymentalne. Wszystkie obliczenia numeryczne były prowadzone w programie Ansys Fluent, na własnej stacji graficznej, serwerze obliczeniowym Katedry Mechaniki i Mostów, na wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej oraz klastrze obliczeniowym sieci PL-Grid (wybór maszyna w zależności od wielkości modelu – ilość elementów). Integralną częścią obliczeń były analizy wrażliwości rozwiązania na wybrane parametry (m. in. gęstość siatki, wielkość kroku czasowego, model turbulencji).

W ramach wzajemnej weryfikacji, udało się stwierdzić, że eksperyment oraz analiza CFD dały zbieżne wyniki w zakresie pól prędkości przepływu za badanym modelem. W ten sposób obliczenia numeryczne zostały zwalidowane badaniem laboratoryjnym. Stworzony model obliczeniowy posłużył do wyznaczenia obciążenia wiatrem konstrukcji a **cel pracy został osiągnięty**.

Efektom rozważań są mapy rozkładu ciśnienia na powierzchni chłodni kominowej. Wyniki zostały porównane do wielkości wyznaczonych zgodnie z normą. Praca pokazała, że wynikowy rozkład ciśnienia zauważalnie odbiega od obciążenia wyznaczonego jak dla walca. Różnice nie są bardzo duże, ale mogą w istotny sposób wpłynąć na etap projektowania konstrukcji oraz otwierają drogę do optymalizacji geometrii betonowych chłodni kominowych. Zaobserwowano również, że opór aerodynamiczny katenoidalnej chłodni kominowej jest mniejszy niż w przypadku walca o podobnych wymiarach i takiej samej powierzchni odniesienia. **Udowodnione zostały tezy pracy:**

- chłodnia katenoidalna stawia inny opór aerodynamiczny niż walec,
- na powierzchni chłodni kominowej rozkład ciśnienia jest inny niż dla walca.

Uzyskane rozkłady ciśnienia, w postaci bezwymiarowych współczynników rozkładu ciśnienia C_p , siły oporu C_x oraz siły nośnej C_y, C_z , mogą zostać wykorzystane w procesie projektowania konstrukcji, dla chłodni o podobnych wymiarach. Do uniwersalnego zastosowania otrzymanych wyników należałoby jednak wykonać opracowanie dla szerszego spektrum geometrii, w szczególności uwzględniającego różne średnice w przekroju poziomym chłodni.

Warto zwrócić jeszcze uwagę, że niewielka optymalizacja dużej konstrukcji (jaką jest chłodnia kominowa), skutkuje sporą oszczędnością materiału, dlatego temat ma potencjał do dalszego pogłębiania. Geometria użytego modelu obliczeniowego została wygenerowana za pomocą funkcji katenoidy. Model wykonano bez uproszczeń czy aproksymacji kształtu odcinkami stożków lub walców.

Dzięki temu, uzyskane rozkłady ciśnienia można przypisać do modelu konstrukcyjnego, opisanego tą samą funkcją bez stosowania technik interpolacji. To z kolei pozwala na uruchomienie obliczeń sprzężonych (analiza „2-way FSI” – Fluid-Structure Interaction), do modelowania opływu i deformacji konstrukcji w jednej analizie przyrostowej.

8.2 Możliwe kierunki rozwoju pracy

W ramach rozwoju zaprezentowanego tematu, rozważa się przeprowadzenie parametrycznej analizy CFD, dla różnych geometrii budowli. Zaprezentowane wyniki dotyczą jednej geometrii chłodni. Jednak kompleksowe rozpoznanie, wymaga opisu szerszej liczby wariantów. Opracowane kroki numerycznego wyznaczania rozkładu obciążenia, mogą zostać zautomatyzowane (na przykład w środowisku Ansys Workbench). Dzięki temu rozwiązanie większej liczby wariantów geometrycznych powinno być możliwe bez większego nakładu pracy człowieka. Wymaga jednak znacznej mocy obliczeniowej i czasu pracy komputera. Chłodnie kominowe są jednak dosyć unikatowymi konstrukcjami, dlatego należy rozważyć, czy indywidualne symulacje obciążenia wiatrem nie będą tańszym i bardziej dokładną metodą.

Zaprezentowane wyniki, zostały aproksymowane szeregiem Fouriera w taki sposób, że można obliczyć rozkład ciśnienia w dowolnym miejscu płaszcza chłodni, lecz procedura obliczeniowa wymaga stosowania interpolacji. W pracy zastosowano najprostszą interpolację liniową. Jest to dosyć niewdzięczna w implementacji metoda, dlatego kolejnym kierunkiem rozwoju prac, mógłby być opis matematyczny rozkładu ciśnienia na powłoce, tak aby można było sprowadzić rozkład ciśnienia C_p do funkcji dwóch zmiennych (kąta θ i wysokości z) $\rightarrow C_p = f(\theta, z)$. Cel tej aproksymacji to utworzenie przyjaznej do stosowania metody wyznaczania rozkładu obciążenia wiatrem.

Trzecim kierunkiem rozwoju są prace poświęcone zgłoszonej do urzędu patentowego wadze aerodynamicznej. Istniejący prototyp działa, chociaż jego działanie wymaga dopracowania. Prace nad urządzeniem skupią się nad wytworzeniem kolejnego prototypu, z większą dokładnością oraz z wykorzystaniem twardszych materiałów do konstrukcji wagi. Samo urządzenie posiada też kilka wad, technicznych które powinny zostać wyeliminowane podczas tworzenia kolejnej wersji. Funkcjonalna waga stanowi dobre narzędzie do prowadzenia badań przepływu dla skomplikowanych geometrii konstrukcji lub elementów wyposażenia konstrukcji.

8.3 Inne osiągnięcia

W trakcie trwania doktoratu powstały autorskie prace związane z tematyką chłodni kominowych. Publikacje [74] i [1] są poświęcone matematycznemu opisowi kształtu oraz wpływowi geometrii chłodni na wielkości sił wewnętrznych i wymiarowania. Praca [45] jest poświęcona budowie prezentowanej wagi aerodynamicznej. Doktorant brał również udział jako członek zespołu w procesie

tworzenia innych prac poświęconych dynamice chłodni kominowych [81]÷[83] oraz badaniom aerodynamicznym innych obiektów [84], [85].

Powstało również kilka innych publikacji nie związanych z tematyką doktoratu, ze współudziałem doktoranta: [78]÷[80] Dotyczą one badań i analiz numerycznych szklanych elementów (IGU), w których zakres obowiązków obejmował przygotowanie modeli numerycznych w programie ABAQUS. Powstały też referaty związane z pracą zawodową jako projektant konstrukcji metalowych dla firm *Optimal Design of Structures Sp. z o.o.* i *Pracownia Inżynierska Modylion*. Publikacje: [86] – autorski referat dotyczący obciążenia wiatrem rurociągów oraz [87],[88] – współautorskie prace poświęcone wybranym zagadnieniom projektowania konstrukcji stalowych.

Afiliacje i granty

We gratefully acknowledge Polish high-performance computing infrastructure PLGrid (HPC Center: ACK Cyfronet AGH) for providing computer facilities and support within computational grant no. PLG/2024/017500, PLG/2023/016590



Badania w tunelu aerodynamicznym oraz budowa wagi aerodynamicznej, były możliwe dzięki przyznanemu grantowi 32/014/SDU/10-22-31 na dofinansowanie rozpoczęcia działalności naukowej w nowej tematyce badawczej.



Załączniki

Załącznik 1 – Rozkład Ciśnienia – GIF

Załącznik 2 – Skrypt

Załącznik 3 – Stanowisko Badawcze

Załącznik 4 – Rozkłady ciśnienia

Wykaz piśmiennictwa

Literatura

- [1] **M. W. Wiśniowski, R. Walentyński, D. Cornik**, “Preliminary analysis of catenoid chimney cooling towers,” *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, vol. 71, no. 6, art. no. e147341, 2023, doi: 10.24425/bpasts.2023.147341
- [2] **S. Bielak, R. Walentyński**, „Powłoka katenoidalna -opis geometryczny, rozwiązanie ogólne umownego stanu błonowego i przykład dla osiowo-symetrycznego obciążenia ciężarem własnym”, *Zesz. Nauk. WSI Opole, Bud.*, Art. nr 36, 1993.
- [3] **X. Cheng, G. Wu, L. Zhao, P. Li, and Y. Ge**, “Wind-induced internal pressures on large cooling towers,” *Advances in Structural Engineering*, vol. 22, no. 14, pp. 3014–3029, 2019. doi: 10.1177/1369433219861727
- [4] **A. Flaga**, *Inżynieria wiatrowa*. Kraków: Politechnika Krakowska, 2008.
- [5] **J. A. Żurański**, *Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji*. Warszawa: Arkady, 2013.
- [6] **A. G. Davenport**, "The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 87, no. 372, pp. 194–211, Apr. 1961, doi: [10.1002/qj.49708737208](https://doi.org/10.1002/qj.49708737208)
- [7] **A. G. Davenport**, *The Relationship of Wind Structure to Wind Loading*. Teddington: National Physical Laboratory, 1963
- [8] **A. G. Davenport**, "The Buffeting of Large Superficial Structures by Atmospheric Turbulence," *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 116, no. 1, pp. 135–160, Jun. 1964, doi: 10.1111/j.1749-6632.1964.tb33943.x
- [9] **A. G. Davenport**, "The Dependence of Wind Loads on Meteorological Parameters," in *Wind Effects on Buildings and Structures*, Proc. Int. Res. Seminar, Ottawa, Canada, vol. 1, pp. 19–82, University of Toronto Press, 1968
- [10] **T. Adachi**, “The effect of surface roughness of a body in the high Reynolds-number flow,” *Int. J. Rotating Mach.*, vol. 1, no. 3-4, pp. 187-197, 1995, doi: 10.1155/S1023621X95000066.
- [11] **T. Lipecki**, *Struktura wiatru i badania modelowe obciążenia wiatrem budowli prostopadłościennych*, Lublin, Poland, 2015
- [12] **O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor**, *The Finite Element Method – Vol. 3: Fluid Dynamics*, 5th ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2000, ISBN 978-0-7506-5050-2
- [13] **K. Starowicz, T. Milewski, G. Bosak**, “Wind tunnel studies of cooling tower surface in terms of aerodynamic interference,” *Technical Transactions, Civil Engineering*, vol. 113, no. 1-B, pp. 115–121, Dec. 9, 2016, doi: 10.4467/2353737XCT.16.069.5418.
- [14] **Jendzelovsky, N. Antal, R.** „CFD and Experimental Study of Wind Pressure Distribution on the High-Rise Building in the Shape of an Equilateral Acute Triangle”. *Fluids* 2021, 6, 81. <https://doi.org/10.3390/fluids6020081>
- [15] **X. Cheng, G. Wu, L. Zhao, P. Li, Y. Ge**, “Wind-induced internal pressures on large cooling towers,” *Adv. Struct. Eng.*, vol. 22, no. 14, pp. 3014–3029, Dec. 2019, doi: 10.1177/1369433219861727.

- [16] **X.-X. Cheng, L. Zhao, Y.-J. Ge, J. Dong**, “Adaptive wind tunnel model tests for a large cooling tower considering the realistic wind environment,” *Adv. Struct. Eng.*, vol. 20, no. 10, pp. 1527–1539, 2017
- [17] **A. Flaga, R. Klaput, Ł. Flaga**, “Wind tunnel model tests of wind action on the chimney with grid-type curtain structure,” *Arch. Civ. Eng.*, vol. 67, no. 3, pp. 177–196, 2021, doi: 10.24425/ace.2021.138050
- [18] **M. Poćwierz, K. Gumowski, J. Piechna**, “Wpływ projektowanej zabudowy na warunki wiatrowe otoczenia na przykładzie inwestycji przy ul. Powązkowskiej w Warszawie,” *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, vol. IX, no. 3, pp. 33–45, 2017.
- [19] **J. Huitron**, *Wind Tunnel Simulation of the Atmospheric Boundary Layer*, M.S. thesis, Dept. of Chemical Engineering, University of Houston, Houston, TX, USA, 1977.
- [20] **T. Lipecki**, “Korelacja przestrzenna ciśnienia wiatru na ścianach bocznych obiektów prostopadłościennych,” *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, vol. 7, no. 4, pp. 11–16, 2015
- [21] **J. Armitt, J. Counihan**, “The simulation of the atmospheric boundary layer in a wind tunnel,” *Atmos. Environ.*, vol. 2, no. 1, pp. 49–71, 1968
- [22] **J. Counihan**, “An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel,” *Atmospheric Environment*, vol. 3, no. 2, pp. 197–214, Mar. 1969, doi: 10.1016/0004-6981(69)90008-0.
- [23] **J. Counihan**, “Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements,” *Atmospheric Environment*, vol. 5, no. 8, pp. 637–642, 1971.
- [24] **T. Lipecki, J. Bęc, E. Błazik-Borowa**, “Wpływ struktury wiatru na rozkład współczynnika ciśnienia na powierzchni modelu o przekroju kołowym o średnicy 20 cm,” *Budownictwo i Architektura*, vol. 10, pp. 81–92, 2012.
- [25] **P. R. Owen, H. K. Zienkiewicz**, “The production of uniform shear flow in a wind tunnel,” *J. Fluid Mech.*, vol. 2, no. 6, pp. 521–531, Aug. 1957, doi: 10.1017/S0022112057000336.
- [26] **M. F. P. Lopes, M. Glória Gomes, J. P. J. Gomes Ferreira**, “Simulation of the atmospheric boundary layer for model testing in a short wind tunnel,” *Experimental Techniques*, vol. 32, no. 4, pp. 36–43, Jul. 2008, doi: 10.1111/j.1747-1567.2007.00293.x.
- [27] **H. A. Panofsky, A. A. Townsend**, “Change of terrain roughness and the wind profile,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 90, pp. 147–155, 1964
- [28] **G. L. Goliger, R. V. Milford, G. L. Beattie**, “Wind tunnel testing for civil engineering applications,” *Civil Engineer in South Africa*, vol. 30, no. 3, pp. 103–111, 1988
- [29] **B. Blocken, T. Stathopoulos, J. van Beeck**, “Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment,” *Build. Environ.*, vol. 100, pp. 50–81, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.12.003.
- [30] **B. Conan, J. van Beeck, S. Aubrun**, “Sand erosion technique applied to wind resource assessment,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 104–106, pp. 322–329, 2012, doi: 10.1016/j.jweia.2012.03.017.
- [31] **N. Isyumov, A. G. Davenport**, “Comparison of full-scale and wind tunnel wind speed measurements in the Commerce Court Plaza,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 1, pp. 201–212, Jan. 1975, doi: 10.1016/0167-6105(75)90014-8.

- [32] **N. Isyumov**, “Studies of the pedestrian level wind environment at the boundary layer wind tunnel laboratory of the University of Western Ontario,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 3, no. 2–3, pp. 187–200, 1978.
- [33] **J. P. A. J. van Beeck, G. Dezsö, P. Planquart**, „Microclimate Assessment by Sand Erosion and Irwin Probes for Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnels,” *PHYSMOD 2009*, Von Karman Institute, Sint-Genesius-Rode, Belgia, 2009.
- [34] **H. P. A. H. Irwin**, “A simple omnidirectional sensor for wind-tunnel studies of pedestrian-level winds,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 7, no. 3, pp. 219–239, May 1981, doi: 10.1016/0167-6105(81)90051-9
- [35] **P. M. Brito**, A. D. Ferreira, and A. C. M. Sousa, “A CFD study on the Irwin probe flows,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 219, art. no. 104808, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jweia.2021.104808.
- [36] **M. Yamada, Y. Uematsu, H. Saeki**, “A visual technique for the evaluation of the pedestrian-level wind environment around buildings by using infrared thermography,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 65, no. 1–3, pp. 261–271, Mar. 1997, doi: 10.1016/S0167-6105(97)00045-7
- [37] **H. Zhao, Y. Zhou, X. Li, C. Liu, X. Chen**, “The influence of wind speed on infrared temperature in impervious surface areas based on in situ measurement data,” *GIScience & Remote Sensing*, vol. 56, no. 6, pp. 843–863, 2019, doi: 10.1080/15481603.2019.1572322.
- [38] **P. Czop, M. Hetmańczyk, G. Wszolek, J. Sloniewski, D. Gąsiorek, and Z. Buliński**, “Particle image velocimetry technique applied to flow evaluation through a shock absorber intake valve,” w: *Mechatronics 2017 – Ideas for Industrial Applications* (J. Świder i in. eds.), vol. Adv. Intell. Syst. Comput., Springer, 2019, pp. 81–90, doi: 10.1007/978-3-030-15857-6_9.
- [39] **Z. Buliński**, *Numerical Modelling and Credibility Analysis of Free Surface Flows in Selected Industrial Processes*, Ph.D. dissertation, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, Feb. 2009. ISBN: 978-83-61506-03-4.
- [40] **Z. Szczerba**, “Tensometryczna waga aerodynamiczna o niskim poziomie interakcji składowych,” *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 53, no. 12, pp. 107–110, 2007
- [41] **K. Seo, H. Okuizumi, Y. Konishi, T. Kobayashi, H. Hasegawa, S. Obayashi**, “Measurement of aerodynamic force and moment acting on a javelin using a magnetic suspension and balance system,” *Sci. Rep.*, vol. 13, art. no. 391, Jan. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-27534-2
- [42] **National Aeronautics and Space Administration**, “Wind-tunnel Force Measurement Calibration System,” *U.S. Patent 9 354 134 B2*, issued [date not specified], available via NTRS
- [43] **S. A. Commo, K. C. Lynn, K. G. Toro, D. Landman**, “Development of the in-situ load system for internal wind-tunnel balances,” *J. Aircraft*, vol. 52, no. 1, pp. 287–295, Mar. 2015, doi: 10.2514/1.C032691
- [44] **K. Seo, H. Okuizumi, Y. Konishi, T. Kobayashi, H. Hasegawa, S. Obayashi**, „Measurement of aerodynamic force and moment acting on a javelin using a magnetic suspension and balance system,” *Sci. Rep.*, vol. 13, art. nr 391, Jan. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-27534-2
- [45] **D. Cornik, A. Padewska-Jurczak, P. Szczepaniak, R. Walentyński, M. Wiśniowski**, “Aerodynamic scale prototype for lightweight structures testing,” presented at the *LSCE 2023 – Lightweight Structures in Civil Engineering*, Gdańsk University of Technology, Gdańsk, Poland, Nov. 2023

- [46] **J. O. Templeman, B. B. Sheil, T. Sun**, “Multi-axis force sensors: A state-of-the-art review,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 304, art. no. 111772, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.sna.2019.111772
- [47] **L.-P. Chao, K.-T. Chen**, “Shape optimal design and force sensitivity evaluation of six-axis force sensors,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 63, no. 2, pp. 105–112, Jan. 1997, doi: 10.1016/S0924-4247(97)01534-3
- [48] **G.-S. Kim**, “Design of a six-axis wrist force/moment sensor using FEM and its fabrication for an intelligent robot,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 133, pp. 27–34, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.sna.2006.03.040
- [49] **A. F. Molland**, “Chapter 8—Manoeuvring,” in *The Maritime Engineering Reference Book*, 1st ed., Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2008, pp. 578–635, doi: 10.1016/B978-0-7506-8987-8.00008-1
- [50] **T. Adachi**, “The effect of surface roughness of a body in the high Reynolds-number flow,” *Int. J. Rotating Mach.*, vol. 1, pp. 187–197, Jan. 1995, doi: 10.1155/S1023621X95000170.
- [51] **J. H. Lienhard**, *Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders*, Tech. Ext. Serv., Washington State Univ., Bull. 300, Pullman, WA, USA, 1966
- [52] **A. Padewska-Jurczak**, *Pogłębiona analiza numeryczna oddziaływania wiatru na obiekty budowlane o nietypowym kształcie i układzie*, rozprawa doktorska, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice, 2016.
- [53] **J. Ostrowska-Maciejewska**, *Podstawy i zastosowania rachunku tensorowego* (wykład dla doktorantów), Prace Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, nr 1, Warszawa, Polska: IPPT PAN, 2007, pp. 5–185.
- [54] **S. Bielak**, *Ogólna teoria powłok prostokreślnych pracujących w stanie zgięciowym*, Habilitation thesis, Politechnika Śląska, Gliwice, Poland, 1973.
- [55] **S. Bielak**, *Konstrukcje powłokowe. Cz. 1: Podstawy geometryczne i fizyczne*, Opole, Poland: WSI (Instytut Budownictwa Wieżowego), 1984, 166 pp.
- [56] **C. L. M. H. Navier**, “Mémoire sur les lois du mouvement des fluides,” *Mém. Acad. R. Sci. Inst. Fr.*, pp. 389–440, 1823.
- [57] **Stokes, G.G.** (1845) On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion and of the Equilibrium and Motion of Elastic Solids. *Trans. Cambridge Philos. Soc.*, 8, 287–319.
- [58] **Z. Ostrowski**, *Metody numeryczne*, wykład, Politechnika Śląska, Instytut Techniki Ciepłej, Gliwice, Poland, 2012. [unpublished].
- [59] **B. R. Munson, T. H. Okiishi, W. W. Huebsch, A. P. Rothmayer**, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 7th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012, ISBN 978-1-118-11613-5
- [60] **F. M. White**, *Fluid Mechanics*, 6th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2009, ISBN 978-0-07-352934-9
- [61] **K. Tesch**, *Podstawy podstaw mechaniki płynów*, wykład z ćwiczeniami, wydanie elektroniczne z ilustracjami, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 6 maja 2022. [Online]. Available: https://www.pg.gda.pl/~krzyte/students/fluids_pl.pdf. [Accessed: Jul. 24, 2025]
- [62] **K. Tesch**, *Numeryczna mechanika płynów*, 1st ed., Gdańsk, Poland: Gdańsk University of Technology, 2021, ISBN 978-83-7348-833-5

- [63] **O. Reynolds**, “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,” *Philos. Trans. R. Soc. Lond.*, vol. 174, pp. 935–982, 1883, doi: 10.1098/rstl.1883.0029
- [64] **P. R. Spalart, S. R. Allmaras**, “A one-equation turbulence model for aerodynamic flows,” presented at the 30th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, Jan. 6–9, 1992, doi: 10.2514/6.1992-439
- [65] **B. Liao, J. Liu, F. Luo, X. Man**, “Evaluation of CFD simulation using various turbulence models for wind pressure on buildings based on wind tunnel experiments,” *Proc. Eng.*, vol. 121, pp. 2209–2216, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.09.094
- [66] **F. R. Menter**, “Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows,” *AIAA Paper 93-2906*, presented at the 24th AIAA Fluid Dynamics Conference, Orlando, FL, July 6–9, 1993. arc.aiaa.orgNTRS
- [67] **F. R. Menter**, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,” *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, Aug. 1994.
- [68] **F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry**, “Ten years of industrial experience with the SST turbulence model,” in *Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*, K. Hanjalić, Y. Nagano, and M. Tummers, Eds., West Redding, CT, USA: Begell House, Inc., 2003, vol. 4, pp. 625–632
- [69] **M. Germano, U. Piomelli, P. Moin, W. H. Cabot**, “A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model,” *Phys. Fluids A*, vol. 3, no. 7, pp. 1760–1765, Jul. 1991, doi: 10.1063/1.857955
- [70] **F. Nicoud, F. Ducros**, “Subgrid-Scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor,” *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 62, no. 3, pp. 183–200, Sep. 1999, doi: 10.1023/A:1009995426001
- [71] **N. K. Sunil, A. S. Benphil, C. M. Zakir Faruquee**, “Effect of domain size and grid spacing on flow past a circular cylinder at low Reynolds number,” *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)*, vol. 3, no. 8, Aug. 2014
- [72] **B. G. Bienkiewicz, R. F. Kutz**, “Discrete vortex model of flow over a square cylinder,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 67–68, pp. 203–217, Apr. 1997, doi: 10.1016/S0167-6105(97)00061-5
- [73] **J. A. Ledwoń, M. Golczyk**, *Chłodnie kominowe i wentylatorowe*, Warszawa, Poland: Arkady, 1967
- [74] **M. W. Wiśniowski**, “Propozycja zastosowania katoidalnego płaszcza poszycia chłodni kominowej,” w *Współczesne zagadnienia z inżynierii lądowej: Prace naukowe doktorantów*, t. 837, I. Pokorska-Silva i K. Gromysz, red., Politechnika Śląska, Gliwice, Poland, 2020, pp. 347–354, ISBN 978-83-7880-696-7.
- [75] **J. Melcer**, “Important moments in the history of structural aerodynamics,” *MATEC Web Conf.*, vol. 107, article no. 00074 (DYN-WIND’2017), pp. 1–5, May 24, 2017, doi: 10.1051/mateconf/201710700074.
- [76] **M. W. Wiśniowski, D. Cornik, A. Padewska-Jurczak, P. Szczepaniak, i R. Walentyński**, „Internal isostatic six-component force/moment aerodynamic balance. (in preparation).
- [77] **A. Padewska-Jurczak, P. Szczepaniak, i R. Walentyński**, „Experimental and numerical analyses of airflow around two cylinders angled to the direction of wind”, *Bull. Pol. Acad. Sci.-Tech. Sci.*, t. 71, Art. nr 1, 2023, doi: 10.24425/bpasts.2023.144578.
- [78] **Z. Respondek, M. Kozłowski, i M. W. Wiśniowski**, „Deflections and stresses in rectangular, circular and elliptical insulating glass units”, *Materials*, t. 15, Art. nr 7, 2022, doi: 10.3390/ma15072427.

- [79] **M. Kozłowski, Z. Respondek, D. Cornik, M. W. Wiśniowski, i K. Zemła**, „Influence of curvature and geometrical parameters on internal pressure in cylindrical Insulating Glass Units”, *Thin-Walled Struct.*, t. 188, 2023, doi: 10.1016/j.tws.2023.110812.
- [80] **M. Kozłowski, Z. Respondek, M. W. Wiśniowski, D. Cornik, i K. Zemła**, „Experimental and numerical simulations of climatic loads in insulating glass units by controlled change of pressure in the gap”, *Appl. Sci.-Basel*, t. 13, Art. nr 3, 2023, doi: 10.3390/app13031269.
- [81] **A. Padewska-Jurczak, D. Cornik, R. Walentyński, M. W. Wiśniowski, i P. Szczepaniak**, „Research on the dynamics of lightweight shell and spatial structures with the aid of computational fluid dynamics and a shaking table”, *Archives of Civil Engineering*, t. 69, Art. nr 4, 2023, doi: 10.24425/ace.2023.147665.
- [82] **R. Walentyński, A. Padewska-Jurczak, M. W. Wiśniowski, i D. Cornik**, „Dynamic analysis of highcooling towers”, w *Vibrations in physical systems. XXX Conference*, R. Starosta i M. Jankowska, Red., Poznań: Agencja Reklamowa Comprint, 2022.
- [83] **D. Cornik, R. Walentyński, i M. W. Wiśniowski**, „Shaking table for testing civil structures”, w *XXIX LSCE 2023 Lightweight Structures in Civil Engineering. Contemporary problems. International colloquium of IASS Polish Chapter. Book of abstract*, P. Kłosowski, A. Tomaszewska, i M. Zmuda Trzebiatowski, Red., Politechnika Gdańska, 2023.
- [84] **A. Padewska-Jurczak, Z. Buliński, T. Krysiński, M. W. Wiśniowski, i D. Cornik**, „Experimental and numerical determination of a wind force acting on an object in the shape of a bent pipe”, w *XXX LSCE 2024 Lightweight Structures in Civil Engineering. Contemporary problems. International Colloquium of IASS Polish Chapters. Book of Abstracts*, G. Dzierżanowski, M. Gajewski, I. Kamińska, i A. Szwed, Red., Politechnika Warszawska, 2024.
- [85] **A. Padewska-Jurczak, D. Cornik, Ł. Marzec, R. Walentyński, P. Szczepaniak, i M. W. Wiśniowski**, „Numerical analyzes of vehicle buffeting on road gantries”, w *16th International Symposium on Human-Induced Vibrations and Seismic Influences on Structures*, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, 2024.
- [86] **M. W. Wiśniowski**, „Proposal of simplified way of applying wind load on circular cross-section”, w *6th World Multidisciplinary Civil Engineering - Architecture - Urban Planning Symposium : WMCAUS 2021, 14-18 June 2021, Prague, Czech Republic* [online], I. Yilmaz, M. Marschalko, i M. Drusa, Red., w *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1203. IOP Publishing, 2021. doi: 10.1088/1757-899X/1203/3/032075.
- [87] **M. W. Wiśniowski, K. Koziel, i L. Rogoziński**, „Influence of steel roof structure rigidity on the distribution of onternal forces in load-bearing multi-span trapezoidal sheet”, w *Lightweight structures in civil engineering : Contemporary problems, XXVII LSCE 2021, 2nd-3rd December 2021, Łódź, Poland : Book of abstracts*, Politechnika Łódzka, 2021. [Online]. Dostępne na: <http://repozytorium.p.lodz.pl/handle/11652/4103>
- [88] **K. Koziel, M. Matyl, i M. W. Wiśniowski**, „Numerical verification of calculation for steel SHS/RHS truss designed according to Eurocode 3”, w *XXIX LSCE 2023 Lightweight Structures in Civil Engineering. Contemporary problems. International colloquium of IASS Polish Chapter. Book of abstract*, P. Kłosowski, A. Tomaszewska, i M. Zmuda Trzebiatowski, Red., Politechnika Gdańska, 2023.

Normy i standardy

- [N-1] *VGB-Standard VGB-S-610: Structural Design of Cooling Towers (superseding VGB-R 610e/610s)*, VGB PowerTech e.V., Essen, Germany, Oct. 2019. ISBN 978-3-96284-145-4
- [N-2] Polski Komitet Normalizacyjny, *PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru*, z Załącznikiem Krajowym NA:2010. Warszawa: PKN, 2008
- [N-3] *BS 6399-2:1997 Loading for buildings – Code of practice for wind loads*, incorporating Amendment No.1 and Corrigendum No.1, British Standards Institution, London, U.K., Jul. 15, 1997, ISBN 0-580-27447-0
- [N-4] *CNR-DT 207/2008 Guide for the Assessment of Wind Actions and Effects on Structures*, National Research Council of Italy, Roma, Italy, June. 11th, 2010
- [N-5] *ASCE/SEI 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, Jan. 2010. ISBN 978-0-7844-1085-1. Errata 1 opublikowano w 2011 r.
- [N-6] Polski Komitet Normalizacji i Miar, *PN-77/B-02011: Obciążenia w obliczeniach statycznych – Obciążenie wiatrem*. Warszawa: PKNMiM, 1977
- [N-7] *IS 875 (Part 3): Code of Practice for Design Loads (Other than Earthquake) for Buildings and Structures – Part 3: Wind Loads*, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, 2nd Rev., Nov. 13, 1987; reaffirmed 2003
- [N-8] *GB 50009–2012: Load Code for the Design of Building Structures*, China Architecture & Building Press, Beijing, Chiny, wyd. krajowe, wydana 28 maja 2012, obowiązuje od 1 października 2012.
- [N-9] *ASCE/SEI 49–12: Wind Tunnel Testing for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, 2012. ISBN: 978-0-7844-7690-1 Strony internetowe

Strony internetowe oraz materiały firm

- [E-1] “Cross-correlation,” *Wikipedia*, [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-correlation>. [Accessed: Jun. 7, 2025].
- [E-2] “Pitot tube,” *Wikipedia*, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Pitot_tube. [Accessed: Jun. 22, 2025].
- [E-3] P. Bargieł, *Wprowadzenie do analiz przepływów – CFD Fluent*, materiały szkoleniowe, MESCO Sp. z o.o., Bytom, Poland, Mar. 2023. [unpublished]
- [E-4] P. Bargieł, M. Bara, *Fluent Meshing*, materiały szkoleniowe, MESCO Sp. z o.o., Bytom, Poland, Mar. 2023. [unpublished]
- [E-5] “Wykłady z fizyki ogólnej (I rok, PW),” *Politechnika Warszawska*, [Online]. Available: <https://www.if.pw.edu.pl/~anadam/WykLadFO.html>. [Accessed: Jul. 7, 2025]
- [E-6] “Napężenie,” *Wikipedia*, [Online]. Available: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Napężenie>. [Accessed: Jul. 18, 2025].

- [E-7] Navier–Stokes equations,” *Wikipedia*, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Navier–Stokes_equations. [Accessed: Jul. 19, 2025]
- [E-8] “Volume viscosity,” *Wikipedia*, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Volume_viscosity. [Accessed: Jul. 19, 2025]
- [E-9] “Vortex shedding,” *Wikipedia*, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_shedding. [Accessed: Jul. 19, 2025]. (en.wikipedia.org)
- [E-10] Axis VM, *Przewodnik korzystania z aplikacji WIND*, Axis VM, [Software guide], 2024
- [E-11] Baldwin-Lomax model,” *CFD-Online Wiki*, [Online]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/Baldwin-Lomax_model. [Accessed: Jul. 24, 2025]
- [E-12] *OpenFOAM User Guide v2212*, “k-kl-omega,” *OpenFOAM: turbulence, RAS, linear eddy viscosity models*, OpenCFD Ltd., [Online]. Available: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-k-kl-omega.html>. [Accessed: Jul. 24, 2025]
- [E-13] Ansys Inc., *ANSYS Fluent 12.0 User’s Guide*, Release 12.0. [Online]. Available: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm. [Accessed: Jul. 24, 2025]
- [E-14] Ansys Inc., *ANSYS Fluent Theory Guide, Realasee 2024 R2*, [Online]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th.html. [Accessed: Jul. 24, 2025]
- [E-15] “Standard k ϵ model,” *CFD Online Wiki*, [Online]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/Standard_k-epsilon_model. [Accessed: June. 24, 2025]
- [E-16] “SST k- ω model,” *CFD-Online Wiki*, [Online]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model. [Accessed: June. 24, 2025]
- [E-17] RNG-LES model,” *CFD-Online Wiki*, Sept. 27, 2005. [Online]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/RNG-LES_model. [Accessed: June. 24, 2025]
- [E-18] Large eddy simulation (LES),” *CFD-Online Wiki*, [Online]. Available: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Large_eddy_simulation_\(LES\)](https://www.cfd-online.com/Wiki/Large_eddy_simulation_(LES)). [Accessed: June. 24, 2025]
- [E-19] “Y+ wall distance estimation,” *CFD-Online Wiki*, last modified June 13, 2011. [Online]. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/Y_plus_wall_distance_estimation. [Accessed: June. 24, 2025].