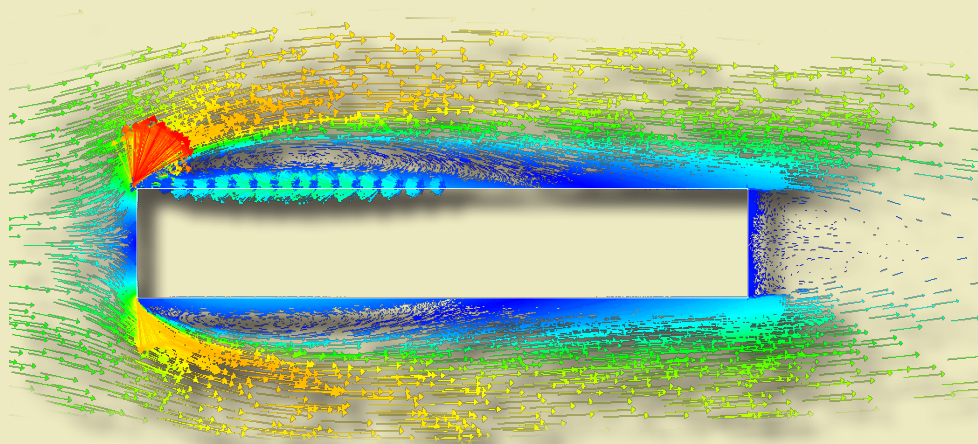




*Paulina Jamińska-Gadomska*

# Analiza oddziaływania wiatru na układ budynek-rusztowanie



MONOGRAFIE

# Analiza oddziaływania wiatru na układ budynek-rusztowanie

# Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska  
Wydział Budownictwa i Architektury  
ul. Nadbystrzycka 40  
20-618 Lublin

Paulina Jamińska-Gadomska

# Analiza oddziaływania wiatru na układ budynek-rusztowanie



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej  
Lublin 2020

Recenzent:

dr hab. inż. Dariusz Heim, prof. Politechniki Łódzkiej

dr hab. inż. Piotr Górski, prof. Politechniki Opolskiej

Redakcja i skład publikacji (zdjęcie na okładce): Paulina Jamińska-Gadomska

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2020

ISBN: 978-83-7947-403-5

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

[www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa](http://www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa)

ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59

Druk: DjaF – 30-092 Kraków, ul. Kmietowicza 1/1

[www.djaf.pl](http://www.djaf.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)

Nakład: 50 egz.

## SPIS TREŚCI

Streszczenie.....	7
Abstract.....	9
Zestawienie najważniejszych symboli i skrótów .....	11
1 Wstęp.....	13
2 Rusztowania i ich klasyfikacja .....	17
2.1 Typy rusztowań.....	17
2.1.1 Materiał elementów konstrukcyjnych.....	17
2.1.2 Sposób użytkowania .....	21
2.1.3 Budowa konstrukcji.....	22
2.1.4 Sposób zamocowania.....	25
2.2 Dodatkowe wyposażenie.....	25
3 Zalecenia normowe dotyczące przyjmowania obciążeń rusztowań.....	27
3.1 Zasady przyjmowania obciążeń rusztowań.....	27
3.2 Działanie wiatru na rusztowania .....	30
3.2.1 Współczynnik miejsca $c_s$ .....	32
3.2.2 Współczynnik oporu aerodynamicznego $c_f$ .....	32
3.2.3 Ciśnienie dynamiczne wiatru $q$ .....	35
4 Aktualny stan wiedzy z zakresu oddziaływania wiatru na rusztowania .....	39
4.1 Opływ wiatru wokół obiektów prostopadłościennych .....	39
4.2 Badania w tunelach aerodynamicznych dotyczące rusztowań.....	42
4.3 Symulacje CFD dotyczące rusztowań.....	49
4.4 Pomiary w skali naturalnej dotyczące rusztowań.....	49
4.5 Podsumowanie .....	50
5 Metody modelowania turbulencji w CFD.....	51
5.1 Podstawy teoretyczne.....	52
5.2 DNS ( <i>Direct Numerical Simulation</i> ).....	54
5.3 LES ( <i>Large Eddy Simulation</i> ) .....	55
5.4 DES ( <i>Detached Eddy Simulation</i> ).....	56
5.5 RANS ( <i>Reynolds-averaged Navier-Stokes</i> ) .....	56
5.5.1 Model liniowej lepkości turbulentnej .....	57
5.5.1.1 Modele 0-równaniowe .....	58
5.5.1.2 Modele 1-równaniowe .....	58
5.5.1.3 Modele 2-równaniowe .....	59

5.5.2	Model nieliniowej lepkości turbulentnej .....	61
5.5.3	Model transportu naprężeń Reynoldsa .....	61
5.6	Podsumowanie .....	62
6	Badania in-situ oddziaływania wiatru na rusztowania.....	63
6.1	Metodyka badań.....	63
6.1.1	Sprzęt i rodzaj pomiarów.....	63
6.1.2	Technika pomiarów .....	66
6.2	Wyniki pomiarów .....	68
6.3	Podsumowanie .....	90
7	Symulacje przepływu wokół słupków rusztowania.....	91
7.1	Wprowadzenie .....	91
7.2	Opis domeny obliczeniowej CFD .....	93
7.3	Modelowanie przepływu w warstwie przyściennej.....	95
7.4	Przepływ wokół jednego słupka.....	97
7.5	Przepływ wokół dwóch słupków .....	103
7.6	Przepływ wokół dziesięciu słupków .....	108
7.7	Podsumowanie .....	109
8	Symulacje przepływu wokół budynku z rusztowaniem.....	111
8.1	Wybór obiektu w skali naturalnej .....	111
8.2	Warunki brzegowe symulacji CFD.....	114
8.3	Siatka domeny obliczeniowej .....	115
8.4	Walidacja modelu CFD.....	117
8.5	Opływ budynku bez rusztowania .....	122
8.6	Wpływ odwzorowania szczegółów elewacji na wyniki.....	125
8.7	Wpływ kąta natarcia wiatru na obciążenie słupków .....	127
8.8	Wpływ oddalenia rusztowania od budynku na obciążenie słupków .....	134
8.9	Wpływ rusztowania na obciążenie elewacji budynku.....	135
8.10	Porównanie wyników symulacji z obciążeniem normowym .....	138
8.11	Podsumowanie .....	140
9	Podsumowanie i wnioski .....	141
9.1	Podsumowanie badań in-situ i analiz numerycznych.....	141
9.2	Wnioski wynikające z badań in-situ.....	141
9.3	Wnioski wynikające z symulacji CFD.....	142
9.4	Wnioski końcowe.....	144
9.5	Wnioski w odniesieniu do zaleceń normowych .....	144
	Bibliografia .....	147

## STRESZCZENIE

### **Analiza oddziaływania wiatru na układ budynek-rusztowanie**

W pracy przedstawiono analizę oddziaływania wiatru na rusztowania fasadowe bez zakryć ochronnych, ustawione przy budynkach o pełnych elewacjach bez otworów. Pracę rozpoczęto od klasyfikacji najczęściej występujących na rynku rusztowań oraz opisu normowych zaleceń dotyczących oddziaływania wiatru. Skupiono się na procedurze wyznaczania obciążenia wiatrem podając sposób określania poszczególnych parametrów definiujących obciążenie. Wykonano kompleksowy przegląd literatury dotyczący oddziaływania wiatru na rusztowania, z podziałem na: badania modelowe, badania in-situ oraz symulacje numeryczne.

Jako podstawowe narzędzie prac badawczych, wybrano Obliczeniową Mechanikę Płynów – CFD, a wyniki symulacji były porównywane z pomiarami in-situ. Niezbędne zatem było opisanie podstaw CFD, ze zwróceniem szczególnej uwagi na modele wykorzystane w obliczeniach prezentowanych w niniejszej pracy.

Najważniejsza część pracy dotyczy badań in-situ i symulacji CFD. Badania w skali naturalnej przeprowadzono na kilkudziesięciu rusztowaniach fasadowych wzniesionych w różnych rejonach Polski. Na podstawie wykonanych pomiarów prędkości i kierunku wiatru, przedstawiono analizę rozkładu czasowego i przestrzennego prędkości wiatru oraz porównano zmierzone 10-minutowe wartości z wyznaczonymi według podejścia normowego.

Pozostałe analizy wykonano wykorzystując CFD. Przeprowadzono procedurę walidacyjną wyboru odpowiedniego modelu turbulencji na podstawie obliczeń przepływu płaskiego wokół przekrojów: jednego, dwóch i dziesięciu słupków. Wyniki porównano z danymi dostępnymi w literaturze. Wybrany model turbulencji został następnie zastosowany do symulacji opływu wokół wybranego budynku z rusztowaniem. Dalszą walidację modelu CFD przeprowadzono na podstawie badań in-situ zrealizowanych samodzielnie na wybranym obiekcie. Wykonano szereg analiz parametrycznych obejmujących zmiany kąta natarcia wiatru, poziom odwzorowania szczegółów elewacji, a także różne odstępstwa między rusztowaniem i budynkiem.

Na podstawie przeprowadzonych badań w skali naturalnej oraz symulacji, sformułowano główne wnioski. Przede wszystkim stwierdzono, że symulacje CFD mogą być użyte do analizy przepływów wokół układu budynek-rusztowanie. Zauważono, że rusztowanie ustawione przy budynku nie powoduje zwiększenia działania wiatru na elewację budynku, a decydujący wpływ na obciążenie wiatrem rusztowania ma opływ budynku wynikający z jego kształtu. Bardzo istotne jest stwierdzenie, że przy skomplikowanych kształtach budynku

oszacowanie obciążenia wiatrem rusztowania można przyjąć na podstawie analizy CFD opływu wokół samego budynku. Słupki stojące w wewnętrznym rzędzie przy budynku są mniej obciążone. Niezależnie od kąta natarcia wiatru, dominującym kierunkiem działania na słupki rusztowania jest kierunek równoległy do fasady. Największe wartości wektorów prędkości występują przy słupkach znajdujących się w okolicy naroży budynku. Słupki wysunięte poza krawędź budynku są narażone na znacznie większe działanie wiatru niż pozostałe. Zjawisko przesłaniania słupków występuje tylko wtedy, gdy kierunek wiatru jest równoległy do linii ich ustawienia, a więc nie powinno być uwzględniane w obliczeniach, ponieważ w rzeczywistości kierunek wiatru nie jest stały.

## ABSTRACT

### **Analysis of wind action on building-scaffolding system**

The work presents an analysis of the wind impact on a building-scaffolding system. The analysed issue concerned wind load of façade scaffoldings without protective cladding, mounted at buildings with no openings. The work begins with the classification of the most common scaffoldings on the market and the description of the standard recommendations regarding the impact of wind. The main focus was on the wind load procedure, specifying the method of determining individual parameters defining the load. A comprehensive literature review concerning the impact of wind on scaffoldings was carried out, divided into model and in-situ tests, as well as numerical simulations.

The Computational Fluid Dynamics – CFD was selected as the basic research tool. The simulation results were validated using in-situ measurements. Therefore, it was necessary to describe the basics of CFD, paying special attention to the used models.

The most important part of the research concerned in-situ studies and CFD simulations. Full-scale tests were carried out on dozens of facade scaffoldings erected in various regions of Poland. Based on the measurements of wind speed and wind direction, the analysis of time and spatial distribution of wind speed was presented. The measured 10-minute values were compared with those determined according to the standard approach.

Other analyses were performed using CFD. A validation procedure was carried out to select the appropriate turbulence model based on the calculation of the 2D flow of one, two and ten scaffolding stands sections. The results were compared with the data available in the literature. The selected turbulence model was then used to simulate the flow around the building with scaffolding. A series of parametric analyses were carried out, including changes in the wind attack angle, level of building façade details, various spacing between the scaffolding and the building.

Based on the conducted in-situ tests and CFD simulations, main conclusions were formulated. First of all, it was found that simulations can be used to analyse flows around the building-scaffolding system. It was noticed that the scaffolding placed next to the building did not increase the effect of wind load on the façade of the building, and the flow pattern of the building resulting from its shape had a decisive influence on the wind load of the scaffolding. It is very important to state that for complex building shapes, the scaffolding wind load estimation can be based on CFD analysis of the flow around the building itself. In addition, the stands located in the first row next to the building were less loaded. Regardless of the angle of attack, the dominant wind load direction on the scaffolding stands is parallel to the façade. The largest values of velocity

occurred near the stands located at the corners of the building. Stands located beyond the edge of the building are exposed to a much larger wind than others, even those at the corner. The shielding effect of scaffolding elements occurs only if the wind direction is parallel to the line of their setting, so it should not be included in the calculations, because in reality the wind direction is not constant.

## ZESTAWIENIE NAJWAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I SKRÓTÓW

$\rho$	– gęstość powietrza [kg/m <sup>3</sup> ]
$-\overline{\rho u'_i u'_j}$	– naprężenia Reynoldsa [Pa]
$A, A_{B,n}, A_{B,g}$	– pole powierzchni odniesienia, netto elewacji, elewacji [m <sup>2</sup> ]
$C_D, C_\mu, C_{\varepsilon 1},$ $C_{\varepsilon 2}, C_{\omega 1},$ $C_{\omega 2}, C_1, C_2,$ $C_{1RNG}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon,$	– współczynniki/stałe modeli turbulencji [-]
$c_{dir}, c_{season}$	– współczynnik: kierunkowy, sezonowy [-]
$c_f, c_{f,0}$	– współczynniki aerodynamiczne oporu [-]
$C_p, C_d, C_l$	– współczynnik aerodynamiczny: ciśnienia, oporu, siły bocznej [-]
$c_e, c_r, c_o$	– współczynnik: ekspozycji, chropowatości terenu, rzeźby terenu [-]
$c_s$	– współczynnik miejsca [-]
$D$	– średnica przekroju poprzecznego [m]
$F_D, F_L$	– siła oporu aerodynamicznego i siła boczna [N]
$f_i$	– składowe wektora sił zewnętrznych [N], $i = x, y, z$
$F$	– siła działania wiatru [N]
$I_u, l$	– intensywność turbulencji [-], skala długości turbulencji [m]
$k$	– energia kinetyczna turbulencji [m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ]
$\varepsilon$	– dyssypacja energii kinetycznej turbulencji [m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup> ]
$\omega$	– dyssypacja na jednostkę energii kinetycznej turbulencji [s <sup>-1</sup> ]
$p, p_0$	– ciśnienie: dynamiczne, atmosferyczne [Pa]
$q_{b,0}, q_b, q$	– ciśnienie prędkości wiatru: podstawowe, bazowe, średnie [Pa]
Re	– liczba Reynoldsa [-]
$s_{ij}$	– tensor prędkości odkształcenia kąтового
St	– liczba Strouhala [-]
$f$	– częstotliwość odrywania się wirów [1/s]
$t$	– czas [s]
$\alpha$	– kąt napływu powietrza [°]
$\bar{u}, u'$	– wartość średnia i fluktuacyjna prędkości przepływu [m/s]
$u^+, u_T$	– prędkość: bezwymiarowa, styczna

$u_*, u_r$	– prędkość tarcia w atmosferycznej warstwie przyziemnej, prędkość tarcia
$u_i$	– składowa wektora prędkości [m/s], $i = x, y, z$
$u_{ref}$	– prędkość wiatru na wysokości referencyjnej [m/s]
$u_{b,0}, u_b, u_m$	– prędkość wiatru: podstawowa, bazowa, średnia [m/s]
$x_i$	– współrzędne w globalnym układzie współrzędnych [m], $i = 1, 2, 3$
$y^+, y$	– bezwymiarowa odległość od ściany [-], odległość od ściany [m]
$z, z_{ref}$	– wysokość: nad terenem, referencyjna [m]
$z_o$	– wymiar chropowatości terenu [m]
$\nu, \mu$	– współczynnik lepkości płynu: kinematyczny [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ], dynamiczny [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ]
$\nu_t, \mu_t$	– współczynnik lepkości turbulentnej płynu: kinematyczny [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ], dynamiczny [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ]
$\tau_{ij}^{SGS}$	– tensor naprężeń podsiatkowych
$\kappa$	– stała von Kármána
$\phi_B$	– współczynnik wypełnienia [-]
$\psi_\lambda$	– współczynnik wpływu swobodnego końca [-]
<i>CFD</i>	– Obliczeniowa Mechanika Płynów (Computational Fluid Dynamics)
<i>DES</i>	– Detached Eddy Simulation
<i>DNS</i>	– Direct Numerical Simulation
<i>DVM</i>	– Discrete Vortex Method
<i>EVM</i>	– Eddy Viscosity Model
<i>LES</i>	– Large Eddy Simulation
<i>MES</i>	– Metoda Elementów Skończonych (Finite Element Method)
<i>MOS</i>	– Metoda Objętości Skończonych (Finite Volume Method)
<i>N-S</i>	– równania Naviera-Stokesa
<i>RNG</i>	– Re-Normalisation Group
<i>RANS</i>	– Reynolds-averaged Navier-Stokes
<i>RSM</i>	– Reynolds Stress Model
<i>SGS</i>	– Sub-Grid Scale
<i>SST</i>	– Shear Stress Transport

# 1 WSTĘP

Rusztowanie jest to tymczasowa konstrukcja pomocnicza zmontowana z elementów wielokrotnego zastosowania, wykorzystywana przy wznoszeniu budynków, przy pracach wykonawczych i naprawczych obiektów budowlanych. Głównym celem takiej konstrukcji jest umożliwienie robotnikom wykonywania pracy na wysokości. Rusztowania są przeznaczone do okresowego przenoszenia obciążeń wywołanych przez ludzi, materiały budowlane lub sprzęt. Pomimo tymczasowego charakteru należy docenić wagę prawidłowego zaprojektowania konstrukcji rusztowania. Musi ono zapewniać bezpieczne miejsce pracy na każdym etapie, od wzniesienia do demontażu i nie może stanowić zagrożenia dla otoczenia (pieszych, pojazdów, budynków).

Przypadki wystąpienia uszkodzenia lub katastrofy budowlanej, definiowanej według [1] jako niezamierzone, gwałtowne zniszczenie obiektu budowlanego lub jego części, a także konstrukcyjnych elementów rusztowań, są dość częste. Katastrofa budowlana rusztowania może nastąpić z powodu: złego stanu elementów, niewłaściwej realizacji, błędnego projektu lub przyczyn losowych, takich jak np. uderzenie lub działanie porywów wiatru. Najczęściej jest to kombinacja kilku wymienionych przyczyn.

Zalecenia normowe dotyczące kierunków sił pochodzących od działania wiatru, zamieszczone w normach [2] i [3], ograniczają się do kierunku prostopadłego i równoległego do fasady. Z norm wynika, że przepływ wokół rusztowania ustawionego przy budynku zależy tylko od kształtu tego budynku, co w praktyce uwzględnione jest za pomocą współczynnika miejsca  $c_s$ . Rusztowanie ustawione przy budynku może znajdować się w obszarze zaburzeń spowodowanych wirami odrywającymi się od naroży budynku, czyli w tak zwanym śladzie aerodynamicznym. W związku z tym zwroty sił działających na poszczególne elementy nie pokrywają się, ani ze średnim kierunkiem napływu wiatru, ani też z kierunkiem prostopadłym do ściany.

Badanie rzeczywistego wpływu działania wiatru na rusztowanie ma również aspekt ekonomiczny. Projektowanie konstrukcji rusztowania na dużo wyższe wartości obciążeń i oddziaływań niż te występujące w rzeczywistości jest nieuzasadnione z wielu powodów. Przykładowo, przyjmowanie zbyt dużego obciążenia wiatrem powoduje niepotrzebne niszczenie elewacji w miejscach kotwienia, dodatkowe roboczogodziny przy montażu lub w wyjątkowych przypadkach nieprawidłowy wniosek projektanta, że nie ma możliwości zmontowania rusztowania, które spełni stany graniczne nośności.

Jednym z podstawowych elementów konstrukcji rusztowania, stosowanym ze względu na działanie wiatru, jest jego kotwienie. Łączniki kotew są mocowane do kołków umieszczonych w różnego rodzaju materiałach i często nie ma pewności, czy mocowanie zapewni przeniesienie planowanych sił wyrwujących kotwy. W warunkach polowych na budowie można określić nośność kotew

(wartość siły wyrrywającej kotwę ze ściany), która często okazuje się mniejsza niż planowana. W takich przypadkach wiedza o rzeczywistym działaniu wiatru pozwoli na dokładniejsze określenie obciążenia i na zaprojektowanie bezpiecznego zakotwienia, a w konsekwencji na bezproblemowe użytkowanie konstrukcji. Umożliwi także określenie stanu naprężenia w elementach konstrukcji, spowodowanego siłami, które mogą np. wywoływać skręcanie rusztowania. Taki wariant obciążenia nie jest uwzględniony w normach, a potencjalnie może powodować powstanie lokalnych sił wyrrywających kotwy, zwłaszcza zlokalizowane przy narożach obiektu.

W ramach pracy opisywanej w niniejszej monografii wykorzystano badania terenowe przeprowadzone na szeregu rusztowań fasadowych oraz symulacje opływu wiatru wokół układu budynek-rusztowanie za pomocą Obliczeniowej Mechaniki Płynów – CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Przeprowadzone analizy miały doprowadzić do:

- oceny interferencji aerodynamicznej oraz nieustalonych cech przepływu w odniesieniu do wolnostojącego rusztowania,
- określenia rzeczywistego oddziaływania wiatru na konstrukcję rusztowania fasadowego ustawionego przy obiekcie budowlanym,
- określenia zmiany pola prędkości wiatru wokół budynku prostopadłościennego wywołanej obecnością rusztowania,
- określenia zmiany oddziaływania wiatru na konstrukcję rusztowania w zależności od kąta napływu wiatru na układ budynek-rusztowanie,
- oceny wpływu ustawienia rusztowania przy budynku na rozkład ciśnienia na jego elewacjach.

Do badań in-situ i analiz numerycznych wybrano rusztowania typu ramowego ustawione przy budynkach o pełnych elewacjach, a cała praca odnosi się do rusztowań bez zabezpieczeń w postaci siatki.

Dodatkowym aspektem pracy była ocena przydatności symulacji CFD do określenia rzeczywistego rozkładu obciążenia wiatrem rusztowania. W tym celu należało wybrać odpowiednią metodę numerycznego modelowania turbulencji przepływu i dokonać jej walidacji na podstawie danych literaturowych i badań in-situ.

Monografia składa się z dziewięciu rozdziałów obejmujących wstęp i podsumowanie. Pracę rozpoczyna rozdział 1, w którym przedstawiono krótkie wprowadzenie do zagadnienia obciążenia wiatrem układów złożonych z budynku i rusztowania. Głównym zagadnieniem analizowanym w pracy jest obciążenie wiatrem konstrukcji rusztowań fasadowych, dlatego rozdział 2 zawiera informacje na temat systemu fasadowego i innych typów rusztowań. W rozdziale 3 podano wytyczne obowiązujących w Polsce norm na temat oddziaływania wiatru wraz z opisem poszczególnych parametrów definiujących obciążenie. Przegląd literatury na temat oddziaływania wiatru na rusztowania (rozdział 4) rozpoczęto od krótkiego opisu opływu obiektu z ostrymi krawę-

dziemi lub układu takich obiektów, jako zagadnień związanych bezpośrednio z oddziaływaniem wiatru na konstrukcje prętowe, które mogą przy nich stać. Następnie opisano prace dotyczące obciążenia wiatrem rusztowań, z podziałem na: badania modelowe, badania in-situ oraz symulacje numeryczne. Jako podstawowe narzędzie prac badawczych wybrano Obliczeniową Mechanikę Płynów – CFD, a wyniki przeprowadzonych symulacji były walidowane za pomocą badań in-situ. Niezbędne było więc opisanie w rozdziale 5 podstaw CFD, ze zwróceniem szczególnej uwagi na sposoby modelowania turbulencji i modele wykorzystane w obliczeniach prezentowanych w pracy.

W rozdziale 6 zaprezentowano sprzęt pomiarowy i sposób wykonywania badań in-situ. Zestawiono również rusztowania, na których wykonano pomiary prędkości i kierunku działania wiatru. Przedstawiono analizę rozkładu czasowego i przestrzennego prędkości wiatru i porównano zmierzone 10-minutowe wartości z prognozowanymi według podejścia normowego. Jako że badania terenowe dostarczyły danych ograniczonych tylko do zmierzonych warunków, zdecydowano się na dokładniejsze analizy wykorzystujące CFD. W rozdziale 7 przedstawiono opis procedury walidacyjnej wyboru odpowiedniego modelu turbulencji użytego w symulacjach. Przedstawiono obliczenia dotyczące opływu jednego, dwóch i dziesięciu słupków a wyniki porównano z danymi dostępnymi w literaturze. Wybrany model turbulencji został następnie zastosowany do symulacji opływu wokół budynku z rusztowaniem, co przedstawiono w rozdziale 8. Pokazano dalszą walidację modelu CFD przeprowadzoną na podstawie badań in-situ oraz wyniki analiz parametrycznych obejmujących zmiany kąta natarcia wiatru, poziom odwzorowania szczegółów elewacji, różne odstępny między rusztowaniem i budynkiem, itp.

Pracę zakończono rozdziałem 9 zawierającym podsumowanie wykonanych analiz oraz wnioski z nich wynikające.



## 2 RUSZTOWANIA I ICH KLASYFIKACJA

Rusztowania są to tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy, w trakcie wznoszenia konstrukcji budowlanej lub przy remontach istniejących obiektów. Ich zadaniem jest umożliwienie bezpiecznej pracy na wysokości, zarówno na zewnątrz jak i wewnątrz obiektów. Rusztowania budowlane możemy podzielić ze względu na: materiał z jakiego są wykonane elementy nośne, sposób użytkowania, budowę konstrukcji oraz sposób zamocowania.

### 2.1 Typy rusztowań

#### 2.1.1 Materiał elementów konstrukcyjnych

Materiały, z których wykonuje się rusztowania to: stal, aluminium, bambus i drewno. Użyty materiał ma wpływ na nośność, wytrzymałość i ciężar konstrukcji.

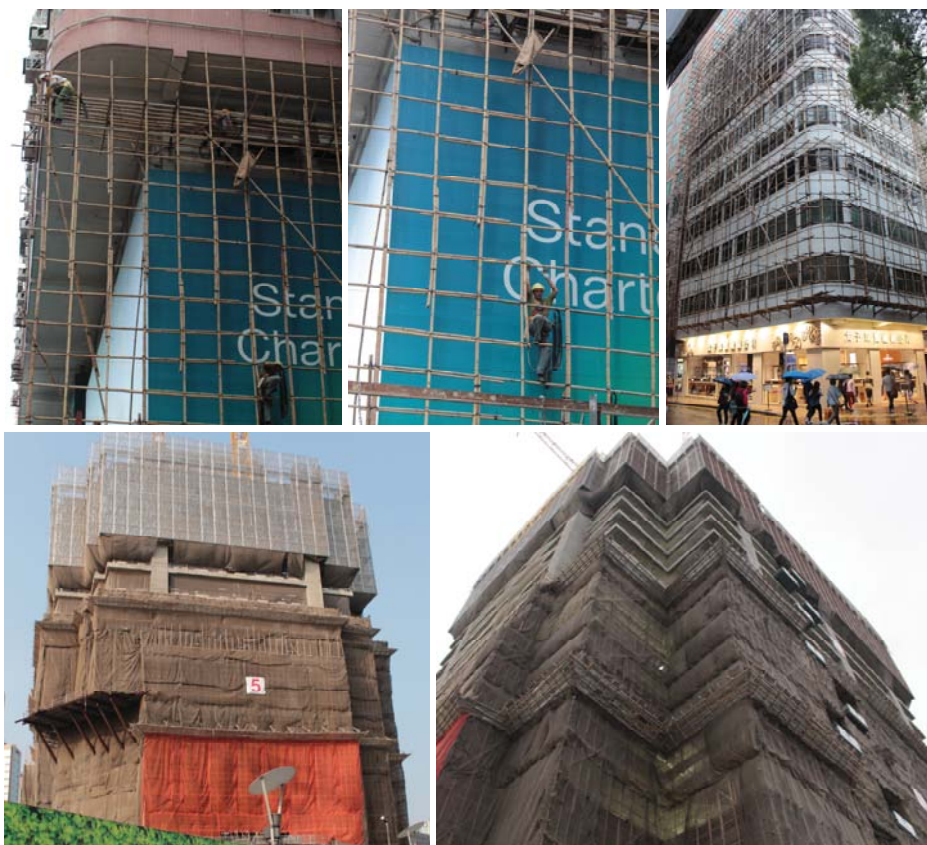
Rusztowania drewniane, ze względu na wysoki koszt, małą wytrzymałość i każdorazową konieczność dopasowywania elementów są mało uniwersalne i zostały wyparte z rynków krajów wysokorozwiniętych głównie przez prefabrykowane rusztowania stalowe. W krajach trzeciego świata rusztowania drewniane są wciąż wykorzystywane bardzo powszechnie ze względu na dostępność materiału. Przykład takich konstrukcji wykonanych z drewna pokazano na rysunku 2.1.



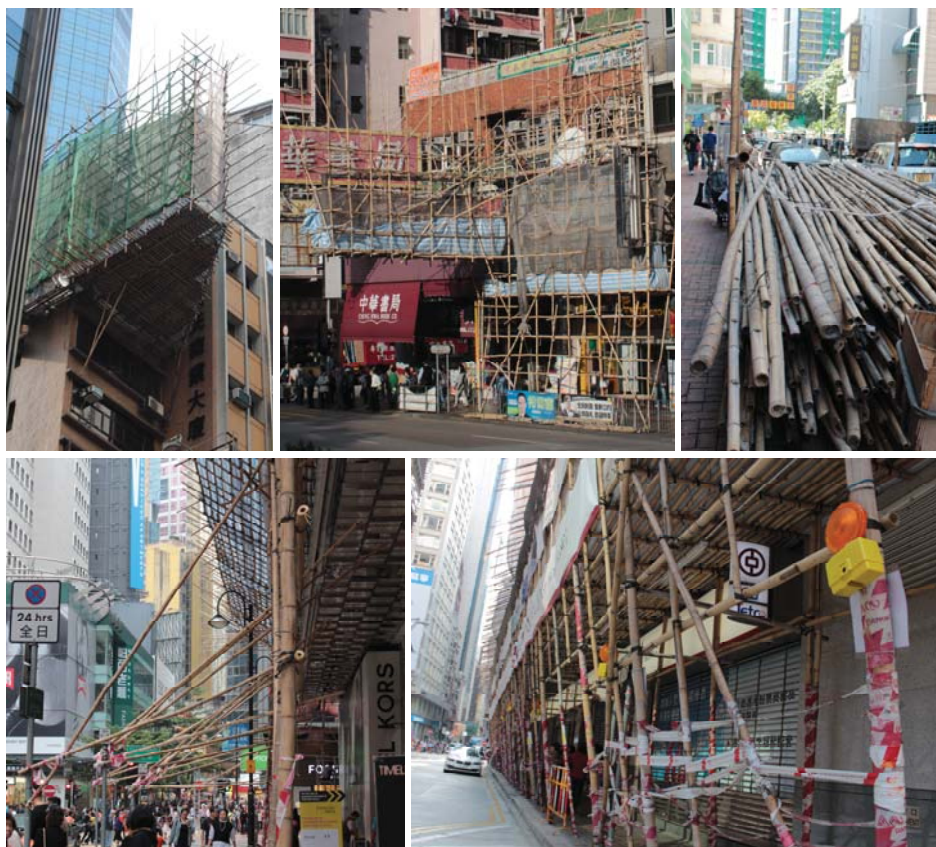
Rys. 2.1. Przykład rusztowania drewnianego [fot. T. Lipecki]

Rusztowania wykonane z bambusa są bardzo popularne w krajach naturalnego występowania tego surowca, czyli głównie w Azji południowo-wschodniej, ze względu na niską cenę pozyskania, elastyczność elementów i łatwość montażu, w trakcie którego bambusowe tyczki używane są jako elementy pionowe

i skośne, łączone ze sobą za pomocą nylonowych taśm. W odróżnieniu od rusztowań wykonanych z innych materiałów, rusztowania bambusowe zwykle są jednorzędowe, tzn. posiadają tylko jedną powierzchnię pionową tyczek, równoległą do elewacji obiektu, przy którym stoją. W związku z tym nie stosuje się na nich pomostów komunikacyjnych, ani tym bardziej pomostów przechodnich z drabinami. Komunikacja odbywa się bezpośrednio po elementach rusztowania. Platformy robocze, również wykonane z bambusowych tyczek i plandek, znajdują się tylko na wysokościach, na których muszą umożliwiać wykonywanie prac. Przykłady prostych rusztowań bambusowych oraz o skomplikowanym kształcie i nietypowym sposobie podparcia pokazano odpowiednio na rysunkach 2.2. i 2.3.



Rys. 2.2. Jednorzędowe rusztowania bambusowe [fot. P. Jamińska-Gadomska]



Rys. 2.3. Rusztowania bambusowe o skomplikowanym kształcie [fot. P. Jamińska-Gadomska]

W Europie największą popularnością cieszą się rusztowania stalowe. Początkowo miały one postać konstrukcji rurowych – wykonanych ze stalowych rur i złączy, natomiast w późniejszych czasach – prefabrykowanych systemów złożonych z ram (rusztowania ramowe) lub rur ze złączami zamocowanymi na stałe (rusztowania modułowe). Główną zaletą rusztowań, których elementy konstrukcyjne wykonane są ze stali, jest ich duża nośność. Oprócz dobrych parametrów wytrzymałościowych materiału, wpływ na nośność rusztowań ma użycie przekroju kołowego elementów nośnych (zwykle średnica zewnętrzna rury ma 48,3 mm). Moment bezwładności przekroju rury jest jednakowy względem wszystkich jej osi, co jest istotne, ponieważ element nośny rusztowania może być poddany zginaniu w różnych kierunkach. Również podatność na zwichrzenie ścianek (czyli lokalna utrata stateczności) jest mniejsza dla ściskanej rury o przekroju kołowym, niż dla prostokątnego przekroju o podobnym wymiarze.

Ze względu na możliwość występowania korozji, elementy stalowe rusztowań muszą być dodatkowo zabezpieczone, co zwykle zapewnia się poprzez cynkowanie ogniowe.

Rusztowania, których elementy nośne wykonane są z aluminium, powstały jako odpowiedź rynku na potrzebę użycia lżejszych systemów, niż w przypadku konstrukcji stalowych oraz dodatkowo odpornych na działanie substancji żrących występujących w zakładach przemysłowych. Systemy rusztowań aluminiowych są bardzo podobne do tych wykonanych ze stali, jednak ich nośność jest mniejsza. Niska waga elementów składowych pozwala na łatwy transport i ma znaczny wpływ na czas ustawiania całej konstrukcji. Aluminium jest o wiele bardziej odporne na korozję niż stal, co ma duże znaczenie przy wznoszeniu konstrukcji narażonych na działanie zewnętrznych warunków atmosferycznych, w szczególności deszczu, śniegu i mrozu oraz, jak wcześniej wspomniano, na działanie substancji chemicznych. Dlatego też, przy użyciu konstrukcji aluminiowych łatwiej spełnić wymagania bezpieczeństwa i higieny pracy. Jednak ich wysoka cena (aluminium jest droższe niż stal) oraz mniejsza nośność powodują, że nie są tak popularne jak rusztowania stalowe. Przykłady realizacji znajdują się na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Rusztowania aluminiowe [fot. P. Jamińska-Gadomska]

Podsumowując, konstrukcje rusztowań wykonane z elementów aluminiowych są lżejsze niż wykonane z elementów stalowych, z kolei rusztowania bambusowe cechuje duża elastyczność wykorzystanych elementów i niski koszt. Pomimo, iż w ostatnich latach coraz bardziej popularne na świecie są rusztowania wykonane z prefabrykowanych elementów stalowych i aluminiowych, sposób oceny który wariant jest najbardziej odpowiedni do zastosowania, nie jest łatwy. Badania oceniające co kieruje osobą decyzyjną przy wyborze mate-

riału rusztowania wykonano w pracach [4] oraz [5]. Autorzy pracy [5] podali narzędzia, które mogą wspomóc osobę decyzyjną w wyborze najlepszego rodzaju rusztowania przeznaczonego do danego zastosowania.

Materiał, z którego są wykonane elementy nośne konstrukcji jest tylko jednym z aspektów jakie należy wziąć pod uwagę podczas wyboru odpowiedniego rozwiązania. Podstawową decyzją jest wybór typu rusztowania, zwykle zależny od prac jakie mają być wykonane przy jego użyciu. Często wystarczy zdecydować się na typ, ponieważ zwykle determinuje on materiał z jakiego będzie wykonane rusztowanie.

### 2.1.2 Sposób użytkowania

Ze względu na sposób użytkowania rusztowania możemy podzielić na: jezdne (przejezdne) i nieruchome.

Rusztowania jezdne są to zwykle lekkie rusztowania aluminiowe w postaci jednej wieży. Są wykorzystywane w sytuacjach, kiedy dostęp do poziomu roboczego znajdującego się na pewnej wysokości nie jest potrzebny równocześnie w wielu miejscach. Łatwo zmienić ich pozycję dzięki ustawieniu na kółkach, które w trakcie pracy, kiedy rusztowanie znajdzie się w docelowej lokalizacji, są blokowane. Ruch konstrukcji może być zablokowany również poprzez dodatkowe elementy wypierające (Rys. 2.5). Konstrukcja rusztowań jezdnych jest samonośna, nie muszą one być ustawiane bezpośrednio przy obiektach i być z nimi łączone. Najczęściej używane są do prac wewnątrz pomieszczeń. Ze względu na niską masę, proces montażu i demontażu oraz transport nie stanowią problemu. Rusztowania nieposiadające kółek umożliwiając ich przemieszczanie, uznajemy za rusztowania nieruchome.



Rys. 2.5. Rusztowanie przejezdne [źródło: Altrad (<http://www.altrad.com/pl/>)].

### 2.1.3 Budowa konstrukcji

Rusztowania można podzielić ze względu na sposób budowy konstrukcji, na: kozłowe, rurowe, specjalne, ramowe, modułowe oraz wieżowe.

Rusztowania kozłowe składają się z co najmniej dwóch podpór przestrzennych (kozłów) i pomostu roboczego (Rys. 2.6). Kozły mogą być wykonane z elementów drewnianych, stalowych lub aluminiowych. Takie rusztowania mają zwykle jeden poziom roboczy i służą do prostych prac murarskich lub wykończeniowych, zwykle przy budowach domów jednorodzinnych.



Rys. 2.6. Rusztowanie kozłowe wykorzystane do prac murowych [fot. P. Jamińska-Gadomska]

Rusztowania rurowe lub inaczej stojakowo-złączkowe, to konstrukcje, w których wszystkie elementy nośne są wykonane z rur, najczęściej o tej samej średnicy, łączonych ze sobą za pomocą złączy (Rys. 2.7). Ich zaletą jest możliwość zastosowania przy obiektach o nietypowych kształtach. Wadą jest potrzeba użycia dużej liczby elementów koniecznych do zapewnienia stabilności konstrukcji, co zwiększa czas i koszt wykonania.



Rys. 2.7. Rusztowanie stojakowo-złączkowe [fot. M. Pieńko]

Rusztowania specjalne są to konstrukcje wykonane według ściśle ustalonych wymiarów oraz z wybranych przez zamawiającego materiałów. Ich kształt i sposób łączenia jest ściśle dostosowany do potrzeb zamawiającego. Zwykle znajdują zastosowanie w sektorze przemysłowym, handlowym i transportowym jako platformy pozwalające na pracę na pewnej wysokości.

Rusztowania ramowe i modułowe należą do rozwiązań systemowych, czyli takich, których wymiary siatki konstrukcyjnej są narzucone poprzez wymiary prefabrykowanych elementów.

Systemy modułowe pozwalają na tworzenie konstrukcji dopasowanej do skomplikowanego kształtu obiektu, przy którym są ustawione. Tworzy się je ze stojaków, do których w stałych odległościach przyspawane są specjalne elementy, np. talerzyki (Rys. 2.8), umożliwiające połączenie pozostałych części rusztowania, takich jak rygle i stężenia. Liczba gniazd w talerzyku pozwala na łączenie ze stężeniami ustawionymi pod kilkoma różnymi kątami, dzięki czemu system jest bardzo uniwersalny i pozwala na wykonanie skomplikowanych konstrukcji przestrzennych.



Rys. 2.8. Rusztowanie modułowe [fot. P. Jamińska-Gadomska]

Rusztowania ramowe składają się z prefabrykowanych płaskich ram, które nadają sztywność poprzeczną konstrukcji (Rys. 2.9). Sztywność w płaszczyźnie poziomej uzyskiwana jest dzięki pomostom, a w płaszczyźnie pionowej dzięki stężeniom. Stężenia łączone są ze stojakami ram za pomocą zacisków stałych i obrotowych. Ten typ konstrukcji cechuje możliwość szybkiego montażu i demontażu.



Rys. 2.9. Rusztowanie ramowe [fot. P. Jamińska-Gadomska]

Systemy ramowe są najczęściej stosowane przy płaskich elewacjach budynków, ponieważ umożliwiają tworzenie płaskich fasad rusztowania w krótkim czasie (stąd nazywane są również systemami fasadowymi), przy użyciu mniejszej liczby elementów niż w przypadku rusztowań modułowych. Potrzeba użycia większej liczby elementów do stworzenia podobnej konstrukcji generuje większy koszt, co powoduje, że zastosowanie rusztowań modułowych ma największe uzasadnienie w przypadku budowli o bardziej skomplikowanych kształtach. Zastosowanie tej samej średnicy rur w systemach ramowych oraz modułowych umożliwia łączenie ze sobą obu wymienionych systemów, co pokazano na rysunku 2.10.



Rys. 2.10. Połączenie rusztowań ramowych i modułowych [fot. P. Jamińska-Gadomska]

### 2.1.4 Sposób zamocowania

Rusztowania mogą się różnić ze względu na sposób zapewnienia stabilności. Mogą być ustawiane na gruncie za pośrednictwem podkładów drewnianych i podstawek, kotwione do obiektu przy którym stoją, mocowane za pomocą lin do gruntu lub podwieszone do ściany budynku za pomocą specjalnych wsporników. Na rysunku 2.11 pokazano przykład rusztowania wolnostojącego i podwieszonego.

a)



b)



Rys. 2.11. Przykład rusztowania: a) wolnostojącego z odciągami [fot. P. Jamińska-Gadomska], b) podwieszonego na konsolach [fot. E. Błazik-Borowa]

## 2.2 Dodatkowe wyposażenie

Niezależnie od użytego typu, aby spełnić wymagania BHP podane w Rozporządzeniu [1], rusztowania są wyposażone w środki ochrony takie jak: poręcze, bortnice, daszki, siatki i plandeki zabezpieczające. Poręcze, znajdujące się w płaszczyźnie wzdłużnej i poprzecznej rusztowania, zabezpieczają przed upadkiem ludzi z wysokości. Drewniane krawężniki (bortnice), montowane w płaszczyźnie pomostów, mają zabezpieczać przed upadkiem narzędzi znajdujących się na pomoście. Daszki zabezpieczające znajdują się zwykle nad poziomem głowy przechodniów, którzy mogą pojawić się w okolicy rusztowania i chronią ich przed spadającymi narzędziami i materiałami budowlanymi. Podobne zadanie pełnią siatki i plandeki zabezpieczające mocowane do całej zewnętrznej elewacji rusztowania (Rys. 2.12, Rys. 2.13). Mogą one dodatkowo zabezpieczać okolice rusztowań przed zapyleniem i przedostaniem się poza ich obręb drobniejszych elementów, np. fragmentów styropianu. Z drugiej strony chronią elewację budynku przed deszczem i zawilgoceniem. Siatki mogą mieć różną porowatość, plandeki są natomiast w 100% nieprzepuszczalne.



Rys. 2.12. Różne rodzaje siatek ochronnych [fot. P. Jamińska-Gadomska]



Rys. 2.13. Zabezpieczenie rusztowań w postaci okryć plastikowych [fot. P. Jamińska-Gadomska]

Zastosowanie albo brak siatki ochronnej lub plandeki ma znaczny wpływ na wielkość obciążenia wiatrem. W przypadku braku tego typu zabezpieczeń, wiatr działa bezpośrednio na rury i inne elementy konstrukcji (np. bortnice, stężenia). Rusztowania, do których zamocowane są plandeki o 100% nieprzepuszczalności, można w zasadzie traktować jak pełne fasady budynków, co opisano w kolejnym rozdziale.

### **3 ZALECENIA NORMOWE DOTYCZĄCE PRZYJMOWANIA OBCIĄŻEŃ RUSZTOWAŃ**

Pomimo, iż rusztowanie jest zdefiniowane według Eurokodu [2] jako konstrukcja tymczasowa, to musi spełniać wszystkie wymagania, które pozwalają na zapewnienie bezpieczeństwa osobom pracującym na nim i przebywającym w jego pobliżu, czyli spełniać warunki stanu granicznego nośności i użytkowania (por. [1]). Każda konfiguracja, która nie jest opisana w instrukcji montażu dostarczonej przez producenta, jest uznawana za nietypową i wymaga wykonania indywidualnego projektu.

Projekty nietypowych rusztowań fasadowych oraz nowych systemów rusztowań należy wykonywać bazując odpowiednio na normach [2] oraz [3] i [6]. Wymagania dotyczące materiałów z jakich powinno być wykonane rusztowanie znajdują się w [7]. Jeżeli rusztowanie ma być wykonane ze stali należy odnieść się dodatkowo do normy [8], jeśli z aluminium – do [9]. Informacje na temat złączy, sworzni oraz podstawek znajdują się w: [10], [11], [12]. Elementy zabezpieczające rusztowanie w postaci siatek opisano w [13] i [14], natomiast informacje o środkach ochrony osobistej w [15], [16], [17], [18].

Zestawienie polskich norm dotyczących rusztowań oraz szczegółowy opis zawartości projektu nietypowego rusztowania można znaleźć w pracy [19].

#### **3.1 Zasady przyjmowania obciążeń rusztowań**

Zgodnie z zaleceniami normy [2] przy projektowaniu rusztowań należy uwzględnić:

- obciążenia stałe – ciężar własny konstrukcji wraz z elementami pomocniczymi (np. wieże wyciągów) i zabezpieczającymi,
- obciążenia zmienne: eksploatacyjne – na pomoście roboczym, oraz wiatrem, śniegiem i lodem,
- obciążenia przypadkowe, nazywane według normy [20] obciążeniami wyjątkowymi (np. uderzenie o rusztowanie).

Obciążenie śniegiem, wiatrem i oblodzeniem jest brane pod uwagę tylko w przypadku rusztowań ustawionych na zewnątrz obiektów budowlanych. Jeżeli nie planuje się, aby konstrukcja była ustawiona na zewnątrz w okresie zimowym, obciążenie śniegiem i oblodzenie należy pominąć. Zgodnie z Rozporządzeniem [1], ze względu na bezpieczeństwo pracowników, użytkowanie rusztowania w warunkach gęstej mgły, opadów atmosferycznych, gołoledzi i silnego wiatru należy przerwać. Ponadto, w przypadku opadów śniegu należy oczyszczać siatkę ochronną i usuwać śnieg z pomostów. Jeżeli przewiduje się, że rusztowanie będzie narażone na zimowe warunki atmosferyczne, w projekcie należy uwzględnić oblodzenie poprzez zwiększenie przekroju elementów, na które będzie działał wiatr oraz zwiększenie obciążenia

pionowego poprzez uwzględnienie ciężaru oblodzenia i śniegu zalegającego na pomostach, zgodnie z normami [21] i [22].

W odniesieniu do rusztowań fasadowych norma [2] podaje w jaki sposób uwzględnić najbardziej niekorzystne przypadki obciążenia statycznego w warunkach eksploatacji oraz kiedy rusztowanie nie jest używane. Każdy projekt musi zawierać analizę statyczno-wytrzymałościową, z wariantami obciążeń opisującymi obie sytuacje.

Obliczenia dla rusztowania eksploatowanego powinny uwzględniać kombinacje takich obciążeń jak:

- ciężar własny konstrukcji,
- równomiernie rozłożone obciążenie eksploatacyjne, przyjęte w zależności od klasy rusztowania podanej przez producenta systemu, działające na najbardziej niekorzystnym poziomie roboczym, którym jest zwykle najwyższy poziom (Tab. 3.1),
- 50% obciążenia opisanego w poprzednim punkcie, które przyłożone jest do pomostów znajdujących się poziom niżej,
- obciążenie robocze wiatrem lub zastępcze obciążenie poziome w przypadku rusztowań wewnątrz obiektów budowlanych.

Jeżeli rusztowanie nie jest eksploatowane należy uwzględnić:

- ciężar własny konstrukcji,
- w zależności od klasy obciążenia: 0%, 25% lub 50% równomiernie rozłożonego obciążenia eksploatacyjnego przyłożonego do najbardziej niekorzystnego dla pracy poziomu roboczego – zwykle najwyższego,
- maksymalne obciążenie wiatrem według normy [23].

W przypadku, kiedy pionowe obciążenie równomiernie rozłożone wpływa pozytywnie na stabilność rusztowania (np. w sytuacji jego przewracania), należy przyjąć jego wartość jako równą zero.

Tab. 3.1. Obciążenia eksploatacyjne w zależności od klasy obciążenia [2]

Klasa rusztowania	Obciążenie równomiernie rozłożone $q_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]
1	0,75
2	1,50
3	2,00
4	3,00
5	4,50
6	6,00

Zestawienie wszystkich wariantów obliczeniowych, wykonane na podstawie normy [2] i pracy [19], znajduje się w b. 3.2.

Tab. 3.2. Zestawienie wariantów obciążeń dla rusztowań fasadowych [19]

	Rusztowanie na zewnątrz obiektu budowlanego									Rusztowanie wewnątrz obiektu budowlanego	
	Lato					Zima					
Wariant	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Ciężar własny	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Pełne obciążenie eksploatacyjne	×	×				×	×			×	×
Procentowy udział obciążenia eksploatacyjnego zależnego od klasy obciążenia			×	×				×	×		
Zastępcze obciążenie poziome równoległe do rusztowania										×	
Zastępcze obciążenie poziome prostopadłe do rusztowania											×
Robocze obciążenie wiatrem równoległe do rusztowania	×					×					
Robocze obciążenie wiatrem prostopadłe do rusztowania		×					×				
Maksymalne obciążenie wiatrem równoległe do rusztowania			×					×			
Maksymalne obciążenie wiatrem prostopadłe do rusztowania				×					×		
Obciążenie śniegiem								×	×		
Obciążenie oblodzeniem						×	×	×	×		
Obciążenie wiatrem pionowo do góry					×				×		

\* – mnożnik obliczeniowy ciężaru własnego równy 1,0.

\*\* – zwiększona powierzchnia odniesienia ze względu na oblodzenie.

Maksymalne obciążenie wiatrem należy określić na podstawie obowiązującej normy wiatrowej [23]. Wartość obciążenia należy przemnożyć dodatkowo przez współczynnik statystyczny równy 0,7, który uwzględnia tymczasowy charakter konstrukcji. Ponadto, w celu uwzględnienia oddziaływania wiatru na sprzęt

i materiały, które mogą znajdować się na pomostach roboczych, należy przyjąć nominalną powierzchnię odniesienia o wysokości 0,2 m (wliczając wysokość bortnicy) na każdym poziomie roboczym.

Robocze obciążenie wiatrem należy przyjąć jako równomiernie rozłożone, równe 0,2 kN/m<sup>2</sup> [2]. Uwzględnienie sprzętu i materiałów na pomostach roboczych odbywa się tak, jak w przypadku maksymalnego obciążenia wiatrem, z tym że należy przyjąć wysokość powierzchni odniesienia równą 0,4 m na każdym poziomie roboczym.

Akceptując powyższe zalecenia normowe, dla rusztowania klasy 3, ustawionego na zewnątrz obiektu budowlanego w lecie, zgodnie z tabelą 3.3, występują cztery przypadki obciążenia. Norma [2] dla wszystkich obciążeń stałych i zmiennych w stanie granicznym nośności zaleca przyjęcie częściowych współczynników bezpieczeństwa  $\gamma_f = 1,5$ , natomiast norma [20] zaleca przyjęcie  $\gamma_f = 1,35$  dla ciężaru własnego i  $\gamma_f = 1,5$  dla obciążeń zmiennych.

Tab. 3.3. Przypadki obciążeń rusztowania ustawionego na zewnątrz obiektu budowlanego, w lecie

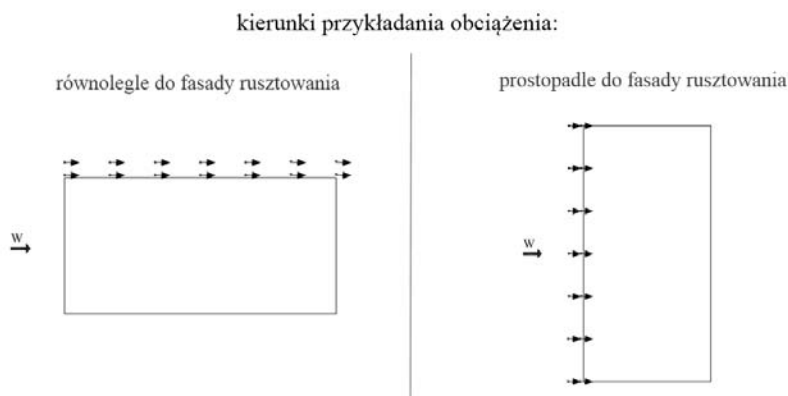
Przypadki	Ciężar własny	Obciążenie wiatrem	100% obciążenia najwyższego pomostu	50% obciążenie pomostu niższego	25% obciążenia najwyższego pomostu
I	×	Maksymalne, prostopadłe do elewacji			×
II	×	Maksymalne, równoległe do elewacji			×
III	×	Robocze, prostopadłe do elewacji	×	×	
IV	×	Robocze, równoległe do elewacji	×	×	

Zagadnieniu przyjmowania obciążeń rusztowań została poświęcona książka [24]. W związku z tematyką niniejszej pracy działanie wiatru zostało szczegółowo opisane w podpunkcie 3.2.

### 3.2 Działanie wiatru na rusztowania

Przyjmowanie obciążenia wiatru działającego na rusztowania według aktualnych zaleceń stwarza wielu projektantom problemy. Ze względu na niejasne i niepokrywające się ze sobą zapisy norm jest to najtrudniejsze do wyznaczenia obciążenie. Jak wspomniano, normy [2] i [3] zawierają informacje dotyczące

obciążenia wiatrem rusztowań, ale druga z nich służy do projektowania nowych systemów. Zawarte w niej dane odnoszą się do maksymalnych wartości obciążeń jakie konstrukcja wykonana w danym systemie powinna przenieść. Norma [3] podaje wprost, że obciążenie wiatrem należy przyjmować osobno w dwóch kierunkach: równoległym i prostopadłym do fasady rusztowania (Rys. 3.1). W normie [2] możemy znaleźć informacje, że nie należy uwzględniać ekranowania, tzn. obciążenie wiatrem należy przyłożyć również do elementów znajdujących się w śladzie aerodynamicznym innych elementów. Natomiast w normie [25] można znaleźć zapis dotyczący dodatkowego kotwienia fragmentów rusztowań wystających poza naroża ze względu na działające na nie poziome parcie i ssanie wiatru.



Rys. 3.1. Zalecenia normowe dotyczące przyjmowania kierunku obciążenia wiatrem działającego na rusztowanie

Pozostałe ogólne zasady projektowania rusztowań oraz zalecenia dotyczące sposobu zbierania i przykładania obciążenia wiatrem na konstrukcję rusztowania znajdują się w normie [2]. Według niej obciążenie to należy obliczać na podstawie tzw. ciśnienia dynamicznego prędkości wiatru działającego na powierzchnię prostopadłą do kierunku działania wiatru (powierzchnię odniesienia).

Wartość charakterystyczną wynikowej siły działania wiatru należy wyznaczać zgodnie ze wzorem:

$$F = c_s \cdot \sum_i (c_{fi} A_i q_i) \quad (1)$$

w którym:  $c_s$  – współczynnik miejsca,  $c_{fi}$  – współczynnik siły aerodynamicznej,  $A_i$  – pole powierzchni odniesienia,  $q_i$  – ciśnienie dynamiczne prędkości wiatru,  $i$  –  $i$ -ty element rusztowania. Metoda wyznaczania parametrów występujących we wzorze (1) została opisana w kolejnych podpunktach.

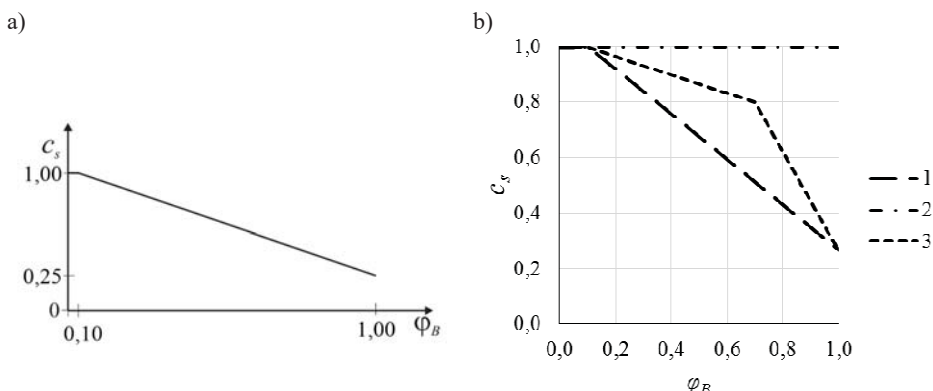
### 3.2.1 Współczynnik miejsca $c_s$

Współczynnik  $c_s$  uwzględnia obecność budynku, przy którym ustawiono rusztowanie i jego ewentualny wpływ na zmniejszenie obciążenia. W przypadku wiatru działającego równoległe do elewacji rusztowania, współczynnik  $c_s$  przyjmuje wartość równą 1,0. Natomiast w przypadku obciążenia prostopadłego,  $c_s$  można określić na podstawie rysunku 3.2a, w zależności od współczynnika wypełnienia  $\varphi_B$ , wyrażonego wzorem:

$$\varphi_B = \frac{A_{B,n}}{A_{B,g}} \quad (2)$$

gdzie:  $A_{B,n}$  – powierzchnia netto elewacji (po odjęciu otworów),  $A_{B,g}$  – całkowita powierzchnia elewacji.

Zgodnie z załącznikiem A normy [2], w przypadku rusztowań z zakryciem ochronnym wartość współczynnika  $c_s$  należy odczytać z rysunku 3.2b.



Rys. 3.2. Współczynnik miejsca  $c_s$ : a) dla rusztowań ustawionych przed elewacją i działania wiatru w kierunku prostopadłym do elewacji, b) dla okładzinowych rusztowań usytuowanych z przodu elewacji: 1 – zakrycie siatką, kierunek równoległy i prostopadły, 2 – zakrycie plandeką (zerowa przepuszczalność), kierunek równoległy i prostopadły, 3 – zakrycie plandeką (zerowa przepuszczalność), kierunek prostopadły [2]

### 3.2.2 Współczynnik oporu aerodynamicznego $c_f$

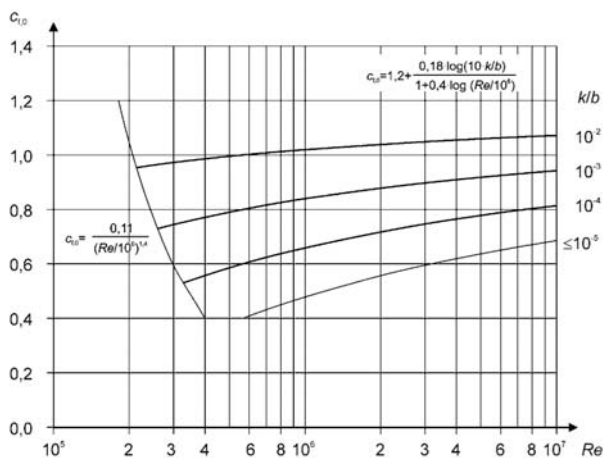
Norma [2] podaje różne możliwości określania współczynnika siły aerodynamicznej  $c_f$ . Z jednej strony zaleca odczytanie wartości  $c_f$  dla poszczególnych przekrojów poprzecznych elementów według normy [23] lub jeżeli są tą przekroje nietypowe – wykonanie badań w tunelu aerodynamicznym. Z drugiej strony, podaje wartość  $c_f$  równą 1,3 dla wszystkich projektowanych powierzchni pomostów, bortnic oraz powierzchni nominalnych [2]. Zakłada więc, że propo-

nowana wartość  $c_f = 1,3$  dotyczy powierzchni płaskich, natomiast dla pozostałych przekrojów, należy przyjąć wartości według normy [23].

W przypadku przekrojów kołowych (słupki, stężenia, poręcze),  $c_f$  należy odczytać z rozdziału 7.9 (Walce kołowe) normy [23]. Współczynnik oporu aerodynamicznego walca o skończonej długości wyznacza się według wzoru:

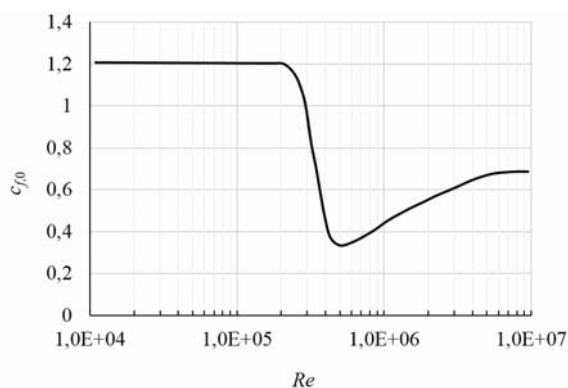
$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \quad (3)$$

gdzie  $c_{f,0}$  – współczynnik oporu aerodynamicznego walca bez wpływu swobodnego końca,  $\psi_\lambda$  – współczynnik wpływu swobodnego końca (uwzględniający zmniejszenie oporu wynikające z opływu końca). Wartość  $c_{f,0}$  można odczytać z rysunku 3.3, w zależności od liczby Reynoldsa,  $Re$ , oraz chropowatości względnej powierzchni przekroju,  $k/b$ .



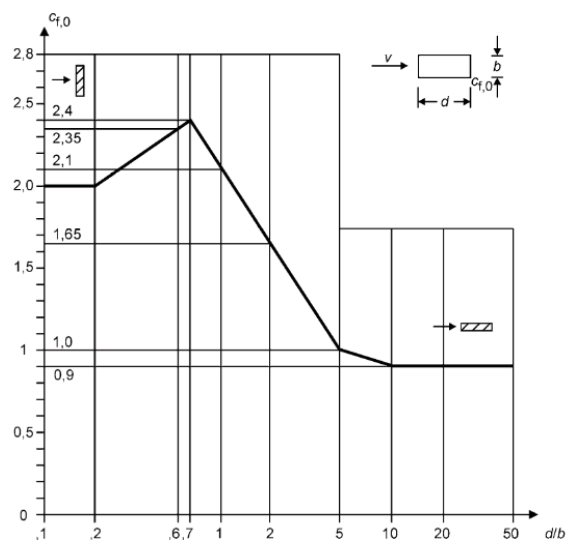
Rys. 3.3. Współczynnik oporu aerodynamicznego  $c_{f,0}$  walca kołowego bez wpływu swobodnego końca dla różnych wartości chropowatości względnej powierzchni  $k/b$  [23]

W związku z tym, że do budowy rusztowań używa się elementów o przekroju poprzecznym kołowym mniejszym niż 10 cm, wyznaczona dla nich liczba Reynoldsa będzie przeważnie wynosiła mniej niż minimalna wartość  $Re = 10^5$  podana na rysunku 3.3. Wielkość  $c_{f,0}$  należy wówczas przyjmować na podstawie literatury, np. według prac [26], [27]. Zgodnie z wykresem na rysunku 3.4, współczynnik oporu aerodynamicznego dla  $Re$  poniżej  $10^5$  jest stały i wynosi 1,2.



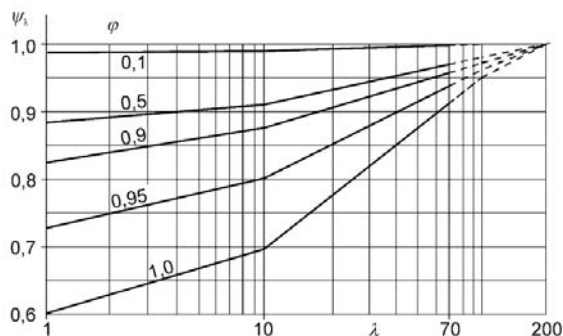
Rys. 3.4. Współczynnik oporu aerodynamicznego walca kołowego [27]

Współczynnik  $c_f$  w przypadku elementów o przekroju prostokątnym (np. bortnice) należy wyznaczyć, z ewentualnym uwzględnieniem zaokrąglenia naroży, poprzez pomnożenie przez współczynnik redukcyjny  $\psi_r$ . Wartości  $c_{f,0}$  dla przekroju prostokątnego, zależne od smukłości przekroju  $d/b$  można odczytać z rysunku 3.5 [23].



Rys. 3.5. Współczynnik oporu aerodynamicznego  $c_{f,0}$  dla przekroju prostokątnego z ostrymi narożami i bez wpływu swobodnego końca [23]

Wartość współczynnika wpływu swobodnego końca,  $\psi_\lambda$ , należy odczytać z rysunku 3.6, w zależności od współczynnika wypełnienia  $\varphi$  ( $\varphi = 1,0$  dla elementów pełnych) i smukłości efektywnej  $\lambda$ , oznaczającej stosunek długości do szerokości elementu.



Rys. 3.6. Wartości współczynnika wpływu swobodnego końca [23]

Zgodnie z załącznikiem A normy [2], w przypadku rusztowań zakrytych siatką ochronną, wartość  $c_f$  dla wiatru działającego prostopadle i równolegle do elewacji, wynosi odpowiednio 1,3 i 0,3 (dla plandeki o zerowej przepuszczalności – 1,3 i 0,1). Niezależnie czy zastosowana siatka jest przepuszczalna czy nie, można nie uwzględniać powierzchni elementów rusztowania za osłonę. Ponadto, w przypadku wiatru działającego równolegle do elewacji należy obciążać tylko jedną zakrytą powierzchnię boczną.

### 3.2.3 Ciśnienie dynamiczne wiatru $q$

Wartość ciśnienia dynamicznego  $q$  należy przyjąć w zależności od wariantu, dla którego prowadzone są obliczenia (Tab. 3.3). W przypadku obciążenia roboczego wartość ta jest stała, niezależna od wysokości  $z$  i wynosi  $q = 0,2 \text{ kN/m}^2$  [2], natomiast dla obciążenia maksymalnego należy odnieść się do normy [23]. Norma [2] dodatkowo podaje, iż dla wariantu obciążenia maksymalnego ciśnienie dynamiczne powinno zostać przemnożone przez współczynnik statystyczny równy 0,7, uwzględniający zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia średniej 10-minutowej wartości bazowej prędkości wiatru przyjętej dla okresu powrotu równego 50 lat, ze względu na tymczasowy charakter konstrukcji rusztowań.

Norma [23] opisuje szczytowe ciśnienie prędkości wiatru  $q_i(z)$ , uwzględniające wartość średnią i fluktuacje, działające na powierzchnię odniesienia  $A_i$  rusztowania (lub jego elementów), za pomocą równania:

$$q_i(z) = [1 + 7 \cdot I_u(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (4)$$

gdzie:  $I_u(z)$  – intensywność turbulencji na wysokości  $z$ ,  $u_m(z)$  – średnia prędkość wiatru na wysokości  $z$ ,  $c_e(z)$  – współczynnik ekspozycji (zależny od kategorii terenu i wysokości),  $q_b$  – wartość bazowa ciśnienia prędkości wiatru, opisana wzorem:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_b^2 \quad (5)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość powietrza równa  $1,225 \text{ kg/m}^3$ ,  $u_b$  – bazowa prędkość wiatru. Wartość  $u_b$  należy wyznaczyć według:

$$u_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot u_{b,0} \quad (6)$$

gdzie:  $c_{dir}$  – współczynnik kierunkowy,  $c_{season}$  – współczynnik sezonowy,  $u_{b,0}$  – wartość podstawowa bazowej prędkości wiatru. Jeżeli znany jest kąt napływu wiatru, wówczas wartość  $c_{dir}$  można odczytać z tabeli 3.4. Jeśli nieznany jest kierunek napływu, to zaleca się przyjęcie wartości bezpiecznej  $c_{dir} = 1,0$ . Współczynnik  $c_{season}$  należy przyjąć równy 1,0.

Tab. 3.4. Wartości współczynnika kierunkowego według Załącznika krajowego dla Polski [23]

Strefa	Kierunek wiatru (sektor)											
	0°/360°	30°	60°	90°	120° ◊	150° ◊	180° ◊	210° ◊	240° ◊	270° ◊	300° ◊	330° ◊
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,8	0,7						0,8	0,9	1,0		0,9
2	1,0	0,9	0,8	0,7				0,8	0,9	1,0		
3	0,8	0,7				0,9		1,0				

Wartości  $u_{b,0}$  oraz  $q_{b,0}$  podano w tabeli 3.5 w zależności od stref wiatrowych określonych na terenie Polski, oznaczonych na rysunku 3.7 i wysokości  $A$  nad poziomem morza. Są to wartości charakterystyczne, wyznaczone na podstawie średniej 10-minutowej prędkości, podanej dla wysokości 10 m nad poziomem terenu, niezależne od kierunku wiatru i pory roku.

Tab. 3.5. Wartości bazowej prędkości wiatru i ciśnienia prędkości wiatru dla poszczególnych stref [23]

Strefa	$A \leq 300 \text{ m}$		$A > 300 \text{ m}$	
	$u_{b,0}$ [m/s]	$q_{b,0}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$u_{b,0}$ [m/s]	$q_{b,0}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
1	22	0,30	$22 \cdot [1 + 0,0006 \cdot (A - 300)]$	$0,30 \cdot [1 + 0,0006(A - 300)]^2$
2	26	0,42	26	0,42
3	22	0,30	$22 \cdot [1 + 0,0006 \cdot (A - 300)]$	$0,30 \cdot [1 + 0,0006(A - 300)]^2 \cdot [(20000 - A) / (20000 + A)]$



Rys. 3.7. Strefy obciążenia wiatrem w Polsce [23]

Bazowe ciśnienie prędkości  $q_b$ , nieuwzględniające porywów wiatru, można również odczytać z wykresu znajdującego się w normie [3], która służy do projektowania nowych systemów rusztowań. Przyjmowane według niej obciążenie będzie miało największą możliwą wartość, a więc wyznaczoną dla strefy 3 (obszary górskie) i kategorii terenu 0 (teren otwarty).

Współczynnik ekspozycji  $c_e(z)$  zależy od współczynników chropowatości terenu  $c_f(z)$  oraz rzeźby terenu (orografii)  $c_o(z)$ . Wartość  $c_o(z)$  należy określić za pomocą Załącznika A normy [23], jeśli obiekt znajduje się na wietrznych stokach wzniesień, łańcuchów górskich, klifów i skarp. W przypadku gdy rzeźba terenu nie zwiększa prędkości wiatru o więcej niż 5%, wówczas  $c_o(z) = 1,0$ . Wartości  $c_e(z)$  zależne od kategorii terenu można znaleźć w tabeli 3.6.

Reasumując, jeżeli przyjmiemy, że współczynniki  $c_{dir}$  i  $c_{season}$  są równe 1,0, to wzór na ciśnienie dynamiczne upraszcza się do następującej postaci:

$$q(z) = c_e(z) \cdot q_{b,0} \quad (7)$$

gdzie  $c_e(z)$  wyznacza się z tabeli 3.6, a  $q_{b,0}$  z tabeli 3.5.

Tab. 3.6. Współczynnik ekspozycji w zależności od kategorii terenu [23]

Kategoria terenu	Opis kategorii	$z_{min}$ [m]	$z_{max}$ [m]	$c_e(z)$		
				$z < z_{min}$	$z_{min} \leq z < z_{max}$	$z \geq z_{max}$
<b>0</b>	Morze, obszar brzegowy otwarty na morze	1	200	2,03	$3,0 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,17}$	4,99
<b>I</b>	Jeziora lub tereny o nieznacznej roślinności i bez przeszkód	1	200	1,81	$2,8 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,19}$	4,95
<b>II</b>	Tereny o niskiej roślinności (trawa) i o pojedynczych przeszkodach (drzewa, budynki) oddalonych od siebie na odległość równą min. ich 20 wysokościom	2	300	1,56	$2,3 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,24}$	5,20
<b>III</b>	Tereny regularnie pokryte roślinnością lub budynkami, o pojedynczych przeszkodach oddalonych od siebie na odległość równą ich 20 wysokościom (wsie, tereny podmiejskie, lasy)	5	400	1,59	$1,9 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,26}$	4,96
<b>IV</b>	Tereny, których przynajmniej 15% powierzchni jest pokryte budynkami o średniej wysokości przekraczającej 15 m	10	500	1,50	$1,5 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,29}$	4,66

## **4 AKTUALNY STAN WIEDZY Z ZAKRESU ODDZIAŁYWANIA WIATRU NA RUSZTOWANIA**

Obciążenie wiatrem obiektu budowlanego oraz rusztowania, które przy nim stoi, może mieć znaczący wpływ na pracę statyczną i dynamiczną obu konstrukcji, dlatego też prawidłowe wyznaczenie tego obciążenia podczas procesu projektowania jest bardzo ważne. Wiatr jako proces stochastyczny w czasie i w przestrzeni jest trudny do matematycznego opisanie. Zalecenia normowe zawierają znaczne uproszczenia i w wielu przypadkach mogą być stosowane tylko w odniesieniu do prostych konstrukcji, znajdujących się w typowym klimacie i otoczeniu. Jeżeli mamy do czynienia z konstrukcjami nietypowymi, o skomplikowanym kształcie, wysokimi, o dużych rozpiętościach i dodatkowo narażonych na działanie silnych wiatrów, wytyczne podane w normach są niewystarczające. Każdą z takich konstrukcji należy analizować szczegółowo, używając w tym celu wyników badań z tuneli aerodynamicznych lub komputerowych symulacji przepływu. Rusztowania niewątpliwie można zaliczyć do konstrukcji nietypowych. Pomimo faktu, że są obiektami tymczasowymi należy pamiętać, że pracują na nich lub w ich otoczeniu ludzie. Prawidłowe określenie działania wiatru, często obciążenia wiodącego, jest zatem zadaniem kluczowym dla ich bezpieczeństwa.

W niniejszym rozdziale przedstawiono kompletny przegląd literatury w zakresie oddziaływania wiatru na rusztowania z podziałem na:

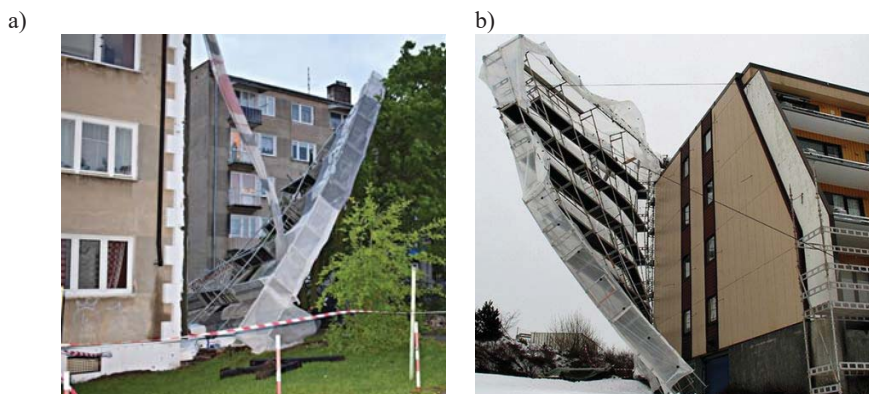
- badania modelowe,
- symulacje komputerowe,
- badania w skali rzeczywistej.

Literatura dotycząca poruszanego problemu jest bardzo ograniczona, zwłaszcza w zakresie symulacji i badań terenowych. Na wstępie, jako zagadnienie bardzo silnie związane z działaniem wiatru na rusztowanie, opisano zjawisko opływu wiatru wokół budowli prostopadłościennych.

### **4.1 Opływ wiatru wokół obiektów prostopadłościennych**

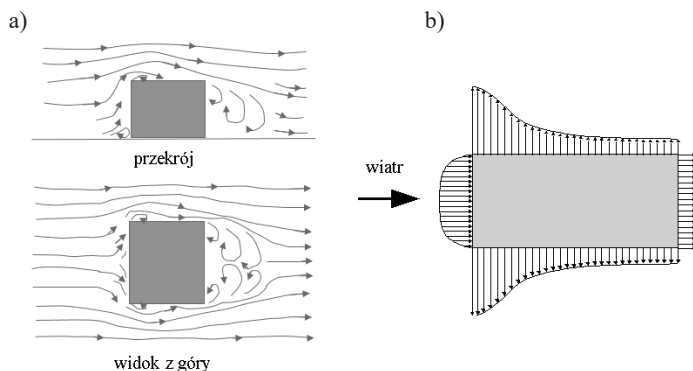
Zalecane przez normy podejście jest bardzo dużym uproszczeniem, które może prowadzić do błędnego określenia obciążenia wiatrem. W świetle przeglądu literatury można wnioskować, że rzeczywiste obciążenie wiatrem rusztowań stojących przy budynkach prostokątnych w planie i o ostrych krawędziach, jest dużo bardziej skomplikowane. W przypadku obiektów z ostrymi krawędziami mamy do czynienia z oderwaniem się warstwy przyściennej na krawędziach i powstaniem wiru, w obrębie którego może znajdować się rusztowanie. Mówimy wówczas, że znajduje się w śladzie aerodynamicznym budynku. Gdy rusztowanie jest zlokalizowane w strefie wiru, w skrajnym przypadku może dojść do powstania obciążenia skręcającego, które będzie powodowało jego

oderwanie od fasady budynku. Taka sytuacja jest najczęściej spotykana, gdy rusztowanie jest przykryte siatką ochronną o małej porowatości, która przy niekorzystnym kierunku wiatru pracuje jak żagiel (Rys. 4.1).

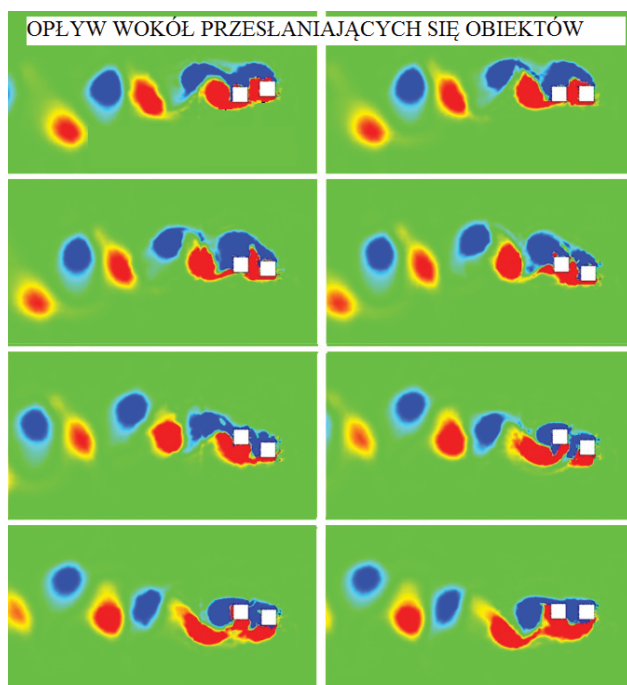


Rys. 4.1. Oderwanie rusztowania z siatką ochronną od elewacji budynku: a) Płońsk, Polska [źródło: <https://www.plonszczak.pl>, fot. Katarzyna Kołodziejczyk], b) Haugesund, Norwegia [źródło: <https://www.vertikal.net/en/news/story/16678/>]

Zwykle obiekt, przy którym ustawione jest rusztowanie znajduje się w większym kompleksie zabudowy, np. na osiedlu mieszkaniowym. W takim przypadku rusztowanie może znajdować się w śladzie aerodynamicznym sąsiednich obiektów, mówimy wówczas o interferencji aerodynamicznej. W celu zilustrowania sytuacji w jakiej może znaleźć się rusztowanie, na rysunku 4.2 pokazano przepływ powietrza wokół prostopadłościanu oraz wynikający z niego rozkład ciśnienia na powierzchni obiektu, zaś na rysunku 4.3 opływ wokół dwóch obiektów zlokalizowanych jeden za drugim. Wiele informacji na temat przepływu powietrza w przypadku różnych ustawień budynków podano w pracach: [28], [29], [30], [31], [32], [33].

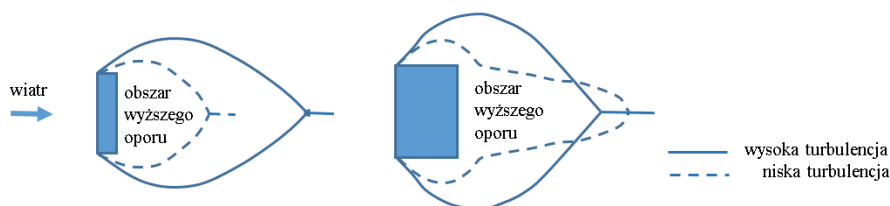


Rys. 4.2. Schematy: a) opływu powietrza wokół prostopadłościanu (przekrój pionowy i poziomy), b) rozkładu ciśnienia prędkości wokół budynku wolnostojącego (przekrój poziomy)



Rys. 4.3. Interferencja pomiędzy dwoma budynkami [34]

Na opływ powietrza wokół obiektu ma wpływ bardzo wiele czynników zewnętrznych. Przede wszystkim jest on zależny od parametrów struktury wiatru, takich jak: średnia prędkość wiatru i jego kierunek oraz intensywność turbulencji. Jeżeli rozpatrujemy przypadek trójwymiarowy wówczas należy uwzględnić zmiany pionowe tych parametrów. Rysunek 4.4 obrazuje jak zmienia się opływ wokół przekroju prostokątnego w zależności od intensywności turbulencji.



Rys. 4.4. Wpływ turbulencji na opływ obiektów prostopadłościennych [29]

Szczegółową analizę parametrów opisujących strukturę wiatru w tzw. atmosferycznej warstwie przyziemnej (części atmosfery – od ziemi do wysokości 250 m – 500 m, gdzie pionowe gradienty prędkości wiatru są wielokrotnie większe niż w warstwach leżących wyżej), zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości, podano w szerokim zakresie w książkach: [28], [29], [30], [35],

[36], [37], [38]. Prace te opisują również stosowane w praktyce podejścia i metody szacowania oddziaływania wiatru na różne konstrukcje inżynierskie, zarówno te proste, w odniesieniu do których można stosować zasady normowe, jak i o skomplikowanych kształtach oraz na układy obiektów. Opisywane w nich procedury oparte są głównie na badaniach w tunelach aerodynamicznych.

## **4.2 Badania w tunelach aerodynamicznych dotyczące rusztowań**

Badania w tunelu aerodynamicznym polegają na przeskalowaniu obiektu, często wraz z jego otoczeniem i topografią terenu. Przepływ wiatru jest symulowany przy pomocy wentylatorów, a chropowatość terenu poprzez elementy ustawione na podłożu przed badanym elementem. Sekcja pomiarowa tunelu zwykle nie przekracza wymiarów  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ , stąd też badane obiekty muszą być odpowiednio przeskalowane.

W budownictwie zwykle wykorzystuje się skale 1:100, 1:300, często 1:1000. Bardzo mało jest tuneli, w których można badać obiekty inżynierskie w skali 1:50 lub większej. Konieczność zachowania skali geometrycznej sprawia, że nie wszystkie detale mogą zostać zachowane. Rodzi to oczywiste trudności w wykorzystaniu tuneli aerodynamicznych do badania rusztowań. Przykładowo, wykonanie modelu rusztowania fasadowego stojącego przy dowolnym budynku wykonanym w skali 1:100 wymagałoby zastosowania elementów odwzorowujących słupki o przekroju  $4,8 \cdot 10^{-4}\text{ m}$ . Bezpośrednie zamodelowanie rusztowania w takiej skali oraz jego oprzyrządowanie pomiarowe jest więc niemal niemożliwe.

Bardzo istotne w badaniach modelowych jest przeskalowanie parametrów napływającego wiatru, aby wyniki mogły być odniesione do rzeczywistości. W związku z tym, pionowy profil prędkości wiatru oraz intensywność turbulencji i inne parametry opisujące przepływ, muszą być odpowiednio odwzorowane w oparciu o normy lub pomiary w skali rzeczywistej. Często poprawne odwzorowanie warstwy przyziemnej jest trudniejsze niż odwzorowanie samego obiektu. Informacje na temat problemów związanych ze skalowaniem można znaleźć m. in. w pracach [28] i [38].

W zależności od wykonywanych badań wykonuje się modele:

- sztywne – wykorzystywane głównie przy badaniach ciśnienia na ścianach obiektu, oraz przepływu pomiędzy budynkami; wymagane jest odwzorowanie tylko kształtu konstrukcji,
- aeroelastyczne – wykorzystywane do badań dynamicznego zachowania obiektu pod wpływem działania wiatru; w tym przypadku charakterystyki materiałów, z których modele są wykonane muszą być tak dobrane, aby iloraz pierwszej i drugiej częstości drgań własnych oraz formy drgań odpowiadały obiektowi w skali naturalnej, czyli musi być zachowany rozkład masy i sztywności.

Istnieje bardzo dużo rodzajów pomiarów jakie można wykonać w tunelach aerodynamicznych. Pomiary prędkości przepływu mogą być wykonane przy użyciu:

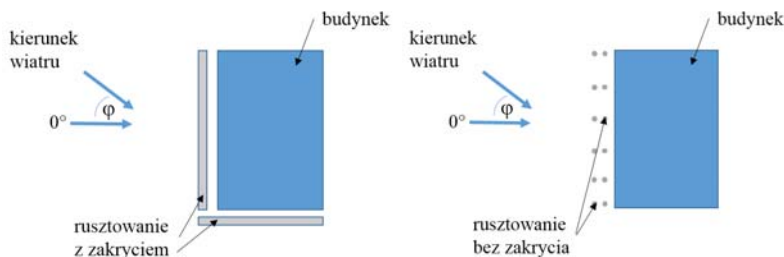
- LDA (*Laser Doppler Anemometry* – Laserowa Anemometria Dopplerowska). W badaniach wykorzystywany jest efekt Dopplera (różnica częstotliwości fali wysyłanej przez źródło oraz rejestrowanej przez obserwatora) do pomiaru prędkości przepływu płynu w trzech kierunkach. Zaletą metody jest możliwość wykonania badań bez wprowadzania dodatkowych urządzeń w przestrzeń pomiarową (wprowadza się tylko drobiny, które mają odbijać laser).
- PIV (*Particle Image Velocimetry*). Badania polegają na wykorzystaniu rozpraszania światła laserowego na cząsteczkach niesionych przez powietrze. Metoda pozwala na pomiary pól prędkości w przepływach turbulentnych i strukturach wirowych. Do badań używany jest laser oraz kamera. Ze względu na możliwości optyczne kamer, tunele do badań PIV mają zwykle małą przestrzeń pomiarową.
- Termoanemometrów. Urządzenia działają w oparciu o zasadę wymiany ciepła pomiędzy czujnikiem nagrzewanym prądem a działającym na niego strumieniem powietrza, co zmienia proporcje natężenia prądu i oporności włókna czujnika. Sondy termoanemometryczne wykorzystywane są do punktowych pomiarów prędkości i kierunku wiatru.

Pozostałe, najczęściej wykonywane pomiary w tunelach aerodynamicznych polegają na:

- Pomiarze sił i momentów aerodynamicznych działających na model przymocowany do wagi aerodynamicznej. Ostatnio, coraz częściej w badaniach wykorzystywana jest waga HFFB (*High Frequency Force Balance*) służąca do pomiaru wartości fluktuacyjnych sił i momentów aerodynamicznych z wysoką częstotliwością próbkowania.
- Pomiarze przyspieszeń za pomocą akcelerometrów mocowanych na modelach aeroelastycznych. Badania te mają na celu określenie częstotliwości drgań badanej konstrukcji pod wpływem działającego wiatru.
- Badaniach zjawisk aeroelastycznych. Zwykle pomiary prowadzone są na fragmencie konstrukcji (tzw. modelu sekcyjnym), np. liny lub płyty mostu, w celu sprawdzenia czy nie wystąpią fenomeny aerodynamiczne, np. flatter.
- Badaniach ciśnienia dynamicznego na ścianach sztywnego modelu. Do pomiarów stosowane są czujniki ciśnienia montowane w ścianach obiektu i w punkcie referencyjnym. Czujniki połączone są z przetwornikiem mierzącym różnicę ciśnienia pomiędzy punktem pomiarowym a referencyjnym.

Badania, dotyczące działania wiatru na budynki, stanowią znaczną część wszystkich eksperymentów wykonywanych w tunelach aerodynamicznych. Wiedza na temat zachowania się przepływu wokół budynku lub układów budynków zapewnia również bardziej świadome projektowanie rusztowań. Ponadto, zakładając sztywne zachowanie siatki o zerowej przepuszczalności ochraniającej rusztowanie, można uznać, że ciśnienie uzyskane na powierzchni siatki będzie bardzo zbliżone do ciśnienia dla budynku o takich samych wymiarach [39].

Jak już wspomniano, wymiary rusztowania budowlanego ustawionego przy fasadzie budynku są dużo mniejsze niż sam budynek (Rys. 4.5), a więc dobranie elementów, które będą modelować jego części jest bardzo trudne. Dotychczas, badania obiektów z ustawionymi przy nich rusztowaniami były wykonane tylko kilkukrotnie.



Rys. 4.5. Schematy poglądowe: przekrój poziomy budynków z rusztowaniem, z i bez zakrycia ochronnego

W pracy [40] oraz [41] opisano badania w tunelu aerodynamicznym dotyczące rusztowań samowznoszących. Wymiary tunelu aerodynamicznego z warstwą przysięnną Uniwersytetu Tongijskiego – 3 m szerokości, 2,5 m wysokości oraz 15 m długości – pozwoliły na zachowanie skali podobieństwa 1:30 przy modelu konstrukcji rusztowania wykonanym z miedzianych drutów. Modele budynków wykonane były z tworzywa ABS w czterech wariantach rozmieszczenia otworów na elewacjach, ze stosunkiem powierzchni otworów do pełnej elewacji na poziomie: 0%, 15%, 30% i 50%. Badania wykonano dla licznych kombinacji, w których uwzględniono przypadki z i bez siatki ochronnej, z i bez podestów, z i bez osłon zabezpieczających oraz pięć kątów napływu wiatru:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  i  $180^\circ$ . Autorzy określili współczynniki oporu aerodynamicznego na podstawie sił pomierzonych za pomocą wagi aerodynamicznej, na której ustawiono model rusztowania. Określili współczynnik dla całego rusztowania oraz współczynnik uwzględniający dynamiczne działanie porywów wiatru. W rezultacie zaobserwowali m. in., że największe obciążenie wiatrem konstrukcji rusztowania występuje przy kącie natarcia równym  $0^\circ$ , czyli prostopadłym do fasady budynku z rusztowaniem.

Podobne badania rusztowań fasadowych zostały opisane w pracy [39]. Model prostopadłościennego budynku o kwadratowym przekroju poziomym został wykonany w skali 1:50. Wysokość budynku w skali modelowej wynosiła 1 m, szerokość 0,6 m. Warunki napływu odpowiadały terenowi otwartemu. Pomiary wykonano dla rusztowania ustawionego przy jednej ze ścian budynku, z siatką przepuszczalności równej 0%, 15% i 30%. Ustawienie modelu rusztowania (bez budynku) na wadze aerodynamicznej umożliwiło określenie siły aerodynamicznej przy kącie napływu wiatru od  $0^\circ$  do  $180^\circ$ , zmienianym co  $15^\circ$ . Jednocześnie, w przypadku gdy rusztowanie było przykryte siatką o zerowej przepuszczalności zbadano ciśnienie od strony zewnętrznej i wewnętrznej siatki, w celu uzyskania ciśnienia różnicowego. Wyniki badań pokazały, że siły parcia występują przy kącie napływu wiatru w przedziale od  $0^\circ$  do  $60^\circ$  (max. dla  $0^\circ$ ), a siły wyrwywające w przedziale od  $60^\circ$  do  $180^\circ$  (max. dla  $90^\circ$ ). Wykazano, że im bardziej porowata jest siatka, tym mniejsze są siły działające na rusztowanie. Ciśnienie jest zmienne wzdłuż wysokości i szerokości rusztowania, a ekstremalne wartości można zaobserwować przy jego krawędziach.

Pozostałe badania, wykonane do tej pory na świecie, dotyczyły rusztowań z zakryciami ochronnymi o zerowej przepuszczalności. W eksperymentach opisanych w pracach [42] oraz [43] zakrycia w postaci nieprzepuszczalnej siatki zamodelowano jako sztywne, pełne elementy z pleksiglasu, odsunięte od budynku. Sama konstrukcja rusztowania nie była modelowana bezpośrednio. Wymiary budynku w skali modelowej 1:75 wynosiły: wysokość – 0,318 m, szerokość – 0,256 m i głębokość – 0,160 m. Badania przeprowadzono w zakresie kąta natarcia wiatru od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ , co  $15^\circ$ , dla dwunastu ustawień rusztowań wokół budynku, w zależności od czterech różnych wariantów rozmieszczenia otworów na elewacjach budynku, ze stosunkiem powierzchni otworów do pełnej elewacji na poziomie: 0%, 20%, 40% i 80%. Czujniki ciśnienia montowano wzdłuż jednej z fasad rusztowania, mierząc ciśnienie wewnątrz (między budynkiem a rusztowaniem) i na zewnątrz zakrycia. Stwierdzono, że:

- wypełnienie budynku ma duży wpływ na ciśnienie wewnętrzne na zakryciu, natomiast znikomy na ciśnienie zewnętrzne;
- wartości dodatnie współczynnika siły aerodynamicznej są mniejsze, a wartości ujemne większe, gdy wypełnienie elewacji wzrasta;
- kiedy rusztowanie jest ustawione wzdłuż kilku ścian budynku wartości szczytowe ciśnienia zewnętrznego i wewnętrznego są mniejsze, niż gdy rusztowanie znajduje się tylko przy jednej ze ścian;
- największe wartości lokalne ciśnienia występują na krawędziach rusztowania;
- dla niektórych układów rusztowań, wartości średnie współczynników siły aerodynamicznej osiągały wartość 1,7, czyli większą niż 1,3 rekomendowane przez normę europejską [2] dla rusztowania z nieprzepuszczalną siatką.

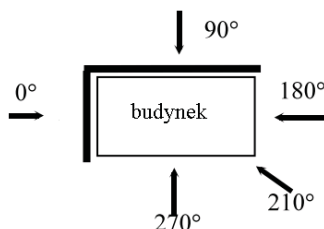
W pracy [44] poszerzono wcześniejsze badania budynków z rusztowaniami o określenie wpływu interferencji aerodynamicznej wywołanej obecnością innego obiektu w sąsiedztwie. Pomiary wykonano dla trzech różnych ustawień rusztowań przy budynku: wzdłuż jednej ściany, wzdłuż dwóch sąsiednich ścian oraz wzdłuż wszystkich ścian. Podobnie jak w poprzednich badaniach, przyjęto cztery warianty rozmieszczenia otworów na elewacjach budynku. Budynek sąsiadujący nie posiadał żadnych otworów, a jego lokalizacja oraz wysokość były wartościami zmiennymi. Autorzy zauważyli, że:

- jeśli sąsiadujący budynek ustawiony jest przed badanym rusztowaniem, parcie działające na ścianę budynku za rusztowaniem znacząco maleje, a ssanie wzrasta;
- jeśli sąsiadujący budynek ustawiony jest obok badanego rusztowania, parcie na ścianę budynku za rusztowaniem jest większe niż dla analogicznego przypadku bez sąsiedniego budynku;
- wzrost wysokości sąsiadującego budynku znacznie zwiększa efekt interferencji.

Bardzo podobne badania modelu budynku z rusztowaniem pokrytym siatką nieprzepuszczalną opisano w pracy [45]. Elementy rusztowania nie były modelowane, przyjęto siatkę w postaci pełnej ściany/przegrody dookoła budynku. Budynek *Silsoe Experimental Building*, służący różnym pomiarom w skali naturalnej od lat 90-tych XX wieku, wykonany w skali modelowej 1:30 miał wymiary 0,2 m x 0,2 m x 0,2 m. Badania wykonano dla pełnego zakresu kąta natarcia wiatru, ze skokiem co 15°. Autorzy stwierdzili, że wartości ciśnienia zmierzone w trakcie badań modelowych budynku bez zakrycia są zbieżne z wynikami badań w skali naturalnej [46], [47], dlatego założyli iż wyniki z tunelu dotyczące rusztowania z zakryciem również poprawnie odzwierciedlają rzeczywistość. Ciśnienie różnicowe uzyskane na zewnątrz i od środka zakrycia porównano z rekomendacjami brytyjskich odpowiedników norm [6], [7], [23]. Uzyskano zgodność współczynnika oporu aerodynamicznego dla ściany nawietrznej i bocznych (odpowiednio 1,3 oraz 0,1). W przypadku ściany zawietrznej autorzy zasugerowali stosowanie uzyskanego przez nich wyniku  $c_f = 0,25$ . Na podstawie porównania do normy amerykańskiej [48] (ze względu na brak rekomendacji dla rusztowań odczytano wartości dla budynków pełnościennych) zauważono, że wartość  $c_f = 0,85$  podana dla ściany nawietrznej jest niższa niż uzyskana w badaniach, a  $c_f = 0,70$  oraz  $c_f = 0,40$  – odpowiednio dla ściany bocznej i zawietrznej były wartościami znacznie wyższymi niż w eksperymencie.

Badania budynku z rusztowaniem pokrytym pełną, nieprzepuszczalną siatką opisano również w [49]. Pełnościennie elementy, odzwierciedlające rusztowanie z nieprzepuszczalną siatką zostały ustawiane przy ścianach budynku prostopadłościennego o prostokątnym przekroju poziomym, w pięciu konfiguracjach. Model budynku w skali 1:50 miał wymiary 0,128 m x 0,248 m x 0,126 m.

Budynek z zakryciem ustawiono w tunelu zapewniając profil o stałej prędkości wiatru wzdłuż wysokości oraz niską intensywność turbulencji. Badania wykonano dla pięciu różnych kątów natarcia wiatru, z czego cztery z nich odpowiadały kierunkom prostopadłym do każdej ze ścian ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ), a piąty wynosił  $210^\circ$  (Rys. 4.6).



Rys. 4.6. Kąty natarcia wiatru na budynek z rusztowaniem [49]

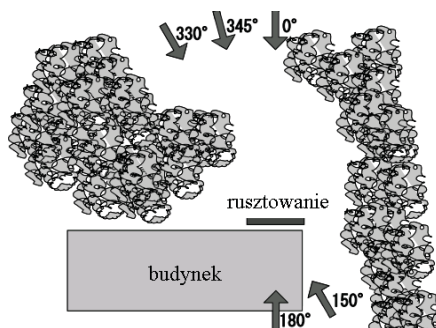
Autorzy stwierdzili m. in., że:

- różnica średniego ciśnienia zmierzonego od zewnątrz i od wewnątrz siatki była większa dla rusztowania ustawionego przy krótszej ścianie budynku;
- szerokość ściany budynku i jego kształt miały większy wpływ na ciśnienie różnicowe niż szerokość rusztowania.

Wpływ wiatru na rusztowania budowlane był tematem projektu badawczego pt.: „*Development of an assessment methods on wind resistance in temporary structures*” [50], który podzielono na trzy główne zagadnienia:

- wpływ błędów konstrukcyjnych na możliwość wystąpienia awarii rusztowania pod wpływem działającego wiatru [51], [52];
- wpływ wiatru na proces montażu oraz demontażu rusztowań [53];
- określenie nowego sposobu obciążania wiatrem rusztowań na podstawie badań przeprowadzonych w skali naturalnej [54] oraz w tunelu aerodynamicznym [55], [56] wraz z zalecaniami dotyczącymi zmniejszenia podatności rusztowania na oderwanie od budynku [57].

Przed przeprowadzeniem szczegółowych badań modelowych dokonano sprawdzenia możliwości odtworzenia wyników uzyskanych w skali naturalnej [55]. Stwierdzono, że jeśli średnia prędkość wiatru jest wysoka oraz wpływ lokalnych zaburzeń jest niski, wyniki ciśnienia mierzonego na elewacji w skali naturalnej i modelowej są bardzo zbliżone. Następnie przeprowadzono pomiary w tunelu w skali 1:150 dotyczące budynku z rusztowaniem z zakryciem ochronnym zamodelowanym jako element pełnościenny. Badania wykonano dla czterech różnych konfiguracji ustawienia rusztowania dookoła budynku oraz dla czterech przypadków stopnia wypełnienia elewacji budynku, przy kątach natarcia wiatru zaznaczonych na rysunku 4.7.

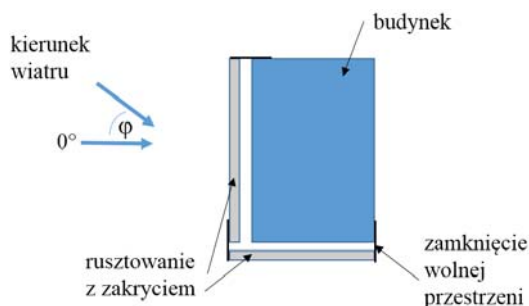


Rys. 4.7. Usytuowanie budynku z rusztowaniem oraz kąty natarcia wiatru [55]

Na podstawie zmierzonego ciśnienia na zewnątrz i od środka zakrycia, stwierdzono, że:

- ciśnienie na zewnątrz rusztowania może być określone w zależności od wymiarów budynku na podstawie obowiązujących norm dla ścian zewnętrznych;
- ciśnienie od wewnątrz rusztowania powinno być zróżnicowane w zależności od tego czy rusztowanie stoi po stronie nawietrznej czy zawietrznej budynku;
- wartości ciśnienia od wewnątrz rusztowania są dużo mniej zależne od stopnia wypełnienia budynku jeśli wiatr wieje od strony rusztowania i dużo bardziej jeśli wiatr wieje zza budynku.

W pracy [57], na podstawie powyżej przytoczonych wniosków, zaproponowano rozwiązanie zmniejszające możliwość oderwania rusztowania z zakryciem od ściany, polegające na zamknięciu wolnych przestrzeni pomiędzy budynkiem a rusztowaniem (Rys. 4.8). Zdaniem autorów raportu taki zabieg zmniejszy możliwość wzrostu wartości ciśnienia wewnętrznego, w przypadku wiatru wiejącego zza budynku.



Rys. 4.8. Schemat poglądowy budynku z rusztowaniem z zakryciem z zamkniętymi wolnymi przestrzeniami

### 4.3 Symulacje CFD dotyczące rusztowań

Drugą metodą badań opływu powietrza wokół układu budynek-rusztowanie są analizy numeryczne wykorzystujące CFD. Symulacje opływu wokół takiego zestawu obiektów są bardzo trudne do wykonania ze względu na prętowy charakter rusztowania i różnicę w wielkości średnicy słupka i całego budynku. Oczywiście, istnieje bardzo obszerna literatura na temat różnych zagadnień związanych z symulacjami opływu wokół budynków, które również mogą być pomocne przy analizie zachowania się rusztowania. Należy jednak podkreślić, że symulacje CFD w zakresie oddziaływania wiatru, są wciąż na poziomie wymagającym ich każdorazowej walidacji dla nowych przypadków.

Prace [58] i [59] stanowią rozszerzenie badań w tunelu aerodynamicznym opisanych w [45] o analizy CFD budynku okrytego siatką o różnej przepuszczalności. Do wykonania analiz przepływu autor użył komercyjnego oprogramowania Fluent, a do utworzenia siatki obliczeniowej programu Gambit. Domena obliczeniowa oraz modele odzwierciedlały badania przeprowadzone w tunelu w skali 1:30. Elementy rusztowania nie były modelowane bezpośrednio. W symulacjach uwzględniono jedynie siatkę ochronną jako element porowaty znajdujący się w pewnym oddaleniu od budynku. Symulacje zostały przeprowadzone z wykorzystaniem kilku różnych modeli turbulencji: *Realizable k-ε*, RNG (*Re-Normalisation Group*), RSM (*Reynolds Stress Model*) i LES (*Large Eddy Simulation*). W wyniku przeprowadzonych symulacji autor określił współczynniki ciśnienia na rusztowaniu w dwóch wariantach siatki o różnej przepuszczalności. Wartości zostały podane z podziałem na sekcje na elewacji rusztowania, analogicznie do zaleceń normy [23] odniesionych do budynków pełnościennych. Największe wartości ciśnienia uzyskano przy narożach rusztowania.

Wstępne wyniki analiz dotyczących opływu wiatrem budynku z rusztowaniem, będące podwaliną niniejszej pracy, zostały również opublikowane przez autorkę w pracach [60], [61]. Powyższe prace wyczerpują literaturę dotyczącą badań przepływu wokół rusztowania za pomocą CFD.

### 4.4 Pomiary w skali naturalnej dotyczące rusztowań

Oprócz badań przeprowadzonych przez autorkę i jej współpracowników, pomiary oddziaływania wiatru na rusztowanie w skali naturalnej zostały opisane tylko w pracy [54]. Rusztowanie fasadowe zostało zmontowane przy fragmencie jednej ze ścian prostopadłościennego budynku *National Institute of Industrial Safety*. Konstrukcja rusztowania miała 7 ram w pionie i 6 pól w poziomie i była obłożona plandeką ochronną o przepuszczalności równej 0%. Górny poziom ram wystawał ponad dach budynku. Pomiary prędkości wiatru oraz sił w kotwach wykonywano przez 10 minut z częstotliwością 50 Hz, tylko gdy prędkość wiatru w okolicach budynku przekraczała 10 m/s. Do badań użyto:

anemometrów czasowych mierzących prędkość wiatru 3 m ponad środkiem dachu budynku oraz 3 m nad środkiem rusztowania i anemometru wiatrakowego przymocowanego do rusztowania, mierzącego prędkość i kierunek wiatru. W badaniach użyto także 66 tensometrów służących do pomiaru sił ściskających i rozciągających w kotwach na wszystkich 12 łącznikach kotwiących oraz 54 tensometrów przymocowanych do planeki oraz w każdym węźle rusztowania w płaszczyźnie zewnętrznych słupków w celu pomiaru sił działających na planekę ochronną. Autorzy stwierdzili, że obciążenie wiatrem spowodowało występowanie maksymalnych sił w różnych kotwach, ale zwykle były one zlokalizowane w górnym obszarze rusztowania. Wartości uzyskane w niektórych kotwach były wyższe aż o 40% niż uzyskane na podstawie obliczeń normowych.

## 4.5 Podsumowanie

Badania w większości przypadków dotyczą rusztowań z zakryciem ochronnym. Często uwzględniane jest same zakrycie w postaci powierzchni przepuszczalnej lub planeki, a pomijana sama konstrukcja prętowa. Tylko pojedyncze przypadki poruszają tematykę obciążenia wiatrem rusztowań w postaci konstrukcji prętowych. Z jednej strony, taki wybór tematów badawczych może być podyktowany występowaniem większego obciążenia wiatrem na zakrytych rusztowaniach, z drugiej, podejście pomijające konstrukcję prętową jest o wiele prostsze do zrealizowania.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury można zauważyć, że zalecenia znajdujące się w normach do projektowania rusztowań ramowych mogłyby zostać uzupełnione lub zmienione. Szczególnie istotnymi wnioskami wydają się te dotyczące:

- zwiększenia obciążenia wiatrem działającego na rusztowanie w przypadku zastosowania siatek, a w szczególności planek nieprzepuszczalnych;
- pełnego osiatkowania rusztowania z budynkiem, bez zostawiania wolnych przestrzeni, przez które mógłby dostać się wiatr odrywający konstrukcję rusztowania od budynku;
- wystąpienia większego obciążenia wiatrem przy kątach natarcia wiatru innych niż  $0^\circ$  i  $90^\circ$ ;
- zwiększenia obciążenia w narożach rusztowania.

## 5 METODY MODELOWANIA TURBULENCJI W CFD

Badania oddziaływania wiatru na obiekty inżynierskie oraz ludzi przez wiele lat były prowadzone w skali modelowej w tunelach aerodynamicznych lub w skali naturalnej na rzeczywistych obiektach. Rozwój technologii oraz w szczególności, zwiększenie mocy obliczeniowej komputerów spowodowały, że w dziedzinie inżynierii wiatrowej na popularności zyskały badania o charakterze obliczeniowym wykorzystujące Obliczeniową Mechanikę Płynów (*Computational Fluid Dynamics* – CFD). Możliwość wykonania symulacji numerycznych już na etapie projektowania konstrukcji pozwala na znaczne zmniejszenie kosztów i czasu analizy w porównaniu do badań w skali naturalnej lub modelowej. Przeprowadzenie pomiarów in-situ jest możliwe tylko na istniejącym obiekcie, stąd wprowadzenie na takim etapie ewentualnych zmian, np. w kształcie konstrukcji jest zwykle niemożliwe lub bardzo kosztowne. Badania w tunelu aerodynamicznym i symulacje komputerowe mogą być natomiast wykonane już na etapie koncepcji projektowej konstrukcji. Dzięki temu, w przypadku wykrycia zaburzeń przepływu, zbyt dużego oddziaływania wiatru lub przeciwnie, zbyt małych korzyści przewietrzających na poziomie przechodniów, można zmienić orientację, wysokość lub kształt planowanego obiektu lub układu obiektów. Niezależnie od wykorzystanej metody, badania lub symulacje należy powtórzyć dla każdego nowego przypadku i nowej konfiguracji. Obliczenia CFD mogą być wykonane w każdej chwili, wystarczy odpowiednie oprogramowanie i dostępna znaczna moc obliczeniowa komputera. Badania w tunelu wymagają poniesienia wyższych kosztów związanych z dłuższym czasem potrzebnym do wykonania pomiarów, utworzeniem nowych modeli, kosztami prądu i innymi pobocznymi czynnikami niezbędnymi do uruchomienia tunelu.

Do otrzymania wiarygodnych wyników symulacji CFD potrzebny jest prawidłowy model turbulencji, odpowiednie warunki początkowe i brzegowe oraz siatka Metody Objętości Skończonych (MOS) lub Metody Elementów Skończonych (MES). Należy pamiętać, że obecnie każda symulacja CFD wymaga walidacji przeprowadzonej poprzez badania w tunelu aerodynamicznym lub w skali naturalnej. Wynika to z faktu, iż przepływ wiatru jest zjawiskiem bardzo skomplikowanym i zależnym od wielu czynników. Również ze względu na złożoność równań różniczkowych opisujących przepływ, przyjętą metodę modelowania trzeba często dostosować do konkretnego przypadku obliczeniowego.

W kolejnych podrozdziałach opisano podstawowe równania wykorzystywane w CFD oraz główne metody modelowania przepływu, takie jak DNS (*Direct Numerical Simulation*), LES (*Large Eddy Simulation*) i RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*). Najbardziej popularna metoda RANS, którą wykorzystano w obliczeniach przedstawionych w dalszej części pracy została opisana z podziałem na główne modele obliczeniowe.

## 5.1 Podstawy teoretyczne

Rozwiązanie zagadnień z zakresu przepływu powietrza w terenie otwartym lub zabudowanym nie jest łatwym zadaniem ze względu na losowy charakter oddziaływania wiatru w czasie i w przestrzeni. W rzeczywistości możemy wyróżnić dwa typy przepływu powietrza: laminarny i turbulentny. W przepływie laminarnym, prędkość płynu w dowolnym punkcie przestrzeni nie zależy od czasu, płyn przepływa w równoległych warstwach bez zakłóceń. W przepływie turbulentnym, nawet jeśli warunki napływu są niezmiennie, dochodzi do wymiany cząsteczek płynu między warstwami, czyli chaotycznego i losowego przepływu, w którym prędkość i ciśnienie zmieniają się w czasie. Podstawowym kryterium pozwalającym na określenie, z jakim rodzajem przepływu mamy do czynienia jest liczba Reynoldsa ( $Re$ ), czyli bezwymiarowy parametr opisujący zależność pomiędzy siłami bezwładności i lepkości w płynie:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu} \quad (8)$$

gdzie:  $L$  – wymiar charakterystyczny opływanego obiektu,  $u$  – prędkość przepływu,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\nu$  – gęstość oraz współczynniki lepkości dynamicznej i kinematycznej płynu.

W celu rozwiązania zagadnienia przepływu wiatru należy sięgnąć po równanie Naviera-Stokesa (N-S) trójwymiarowego przepływu płynu nieściśliwego zmiennego w czasie oraz po równanie ciągłości [28], [36], [38], [62], [63]. Ponieważ prędkość przepływu wiatru w zagadnieniach związanych z aerodynamiką budowli inżynierskich, mieści się w zakresie do około 0,15 Ma (Ma – liczba Macha), zakładamy że powietrze to płyn nieściśliwy ( $\rho = const.$ ), czyli taki, którego gęstość nie zmienia się wraz ze zmianą ciśnienia. Równanie ciągłości zapisane w postaci wskaźnikowej wygląda następująco:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

gdzie:  $t$  – czas,  $u_i$  – składowa wektora prędkości,  $x_i$  – współrzędne w globalnym układzie współrzędnych,  $i = 1, 2, 3$ .

Dla płynu nieściśliwego ( $\rho = const.$ ):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (10)$$

Równanie N-S w postaci wskaźnikowej można przedstawić następująco [58], [64]:

$$\frac{du_i}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} + f_i \quad (11)$$

gdzie:  $i, j$  – kierunki 1, 2, 3,  $f_i$  – składowe wektora sił zewnętrznych,  $p$  – ciśnienie.

Po uwzględnieniu wzoru opisującego prędkość odkształcenia kąowego:

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

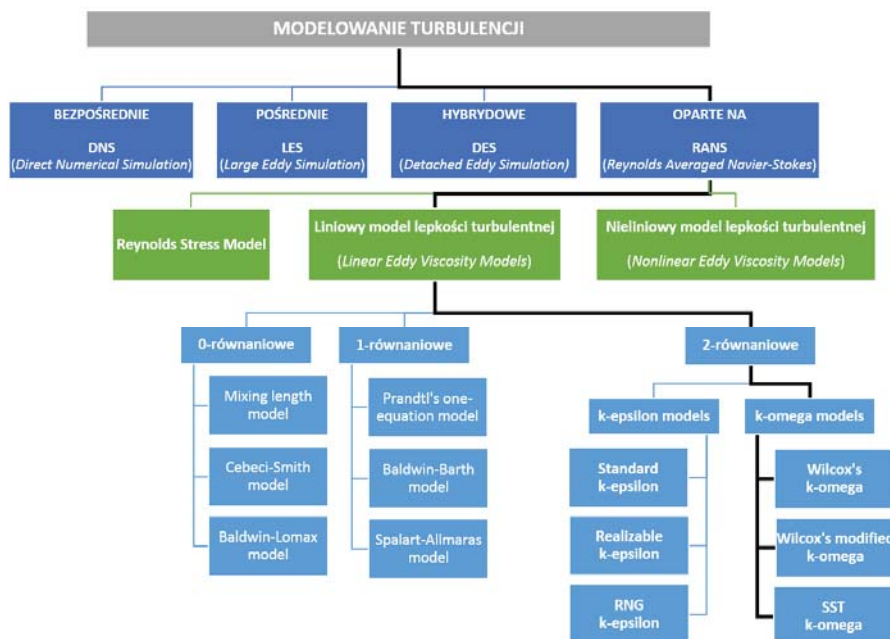
oraz równania ciągłości dla płynu nieściśliwego (10) otrzymujemy równanie N-S w postaci:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + 2\nu \frac{\partial s_{ij}}{\partial x_m} + f_i \quad (13)$$

Powyższy zapis oznacza, że na szybkość w jakim w danym punkcie zmienia się prędkość płynu (lewa strona równania) ma wpływ adwekcja płynu (pierwszy składnik), gradient ciśnienia płynu (drugi składnik), efekty lepkości płynu (trzeci składnik) oraz ewentualne inne siły oddziałujące na płyn, np. siła grawitacji (czwarty składnik).

Jeżeli przepływ jest laminarny, a temperatura płynu stała, równanie ciągłości oraz równanie N-S można rozwiązać bezpośrednio metodą DNS uzyskując dokładne rozwiązanie.

W przypadku przepływu turbulentnego, w którym powstające wiry uzależnione są od pola przepływu oraz lepkości płynu, liczba niewiadomych przekracza liczbę równań. W celu domknięcia układu równań należy przyjąć dodatkowe zależności między niewiadomymi. Podstawowe założenie domykające oparte jest na hipotezie Reynoldsa, zgodnie z którą chwilowe wartości wielkości fizycznych charakteryzujących przepływ w danym punkcie, są sumą wielkości uśrednionych w czasie oraz składowej fluktuacyjnej (turbulentnej), będącej losową funkcją czasu i przestrzeni. Model, który przyjmuje równania opisujące uśredniony w czasie przepływ płynu to RANS, a model uśredniania pola przepływu w przestrzeni poprzez wprowadzenie dodatkowej lepkości oddającej naprężenia w płynie i symulacji tylko dużych wirów to LES. Podstawowy podział na modele, za pomocą których można uwzględnić turbulencję przepływu przedstawiono na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Podstawowe metody modelowania turbulencji przepływu

Konieczna przy obliczeniach numeryczna dyskretyzacja równań polegająca na przedstawieniu równań różniczkowych w postaci równań algebraicznych może odbywać się za pomocą jednej z metod siatkowych takich jak (por. [65]): Metoda Różnic Skończonych (*Finite Difference Method*), Metoda Elementów Skończonych (*Finite Element Method*), Metoda Objętości Skończonych (*Finite Volume Method*). Inną możliwością jest zastosowanie w rozwiązaniu metody bezsiatkowej DVM (*Discrete Vortex Method*). Szczegółowy opis wymienionych podejść można znaleźć m.in. w pracach [66], [67], [68], [69].

Metoda Objętości Skończonych, szczególnie często stosowana w CFD, wykorzystuje siatkę aproksymującą kształt przestrzeni, w której występuje przepływ. Szukane wartości wyznaczane są w węzłach tej siatki. Warunek opisany przez równanie różniczkowe musi być spełniony w pewnym obszarze kontrolnym zbudowanym wokół węzła siatki lub w obszarze kontrolnym równoważnym komórce siatki. Zaletą metody jest fakt, że objętości kontrolne nie muszą mieć regularnego kształtu, a więc siatki wykorzystywane do obliczeń nie muszą być strukturalne.

## 5.2 DNS (*Direct Numerical Simulation*)

Jeżeli przepływ jest laminarny a temperatura płynu stała, równanie ciągłości oraz równanie N-S dają dokładne rozwiązanie. W metodzie DNS równania N-S są rozwiązywane bezpośrednio, uwzględniając wszystkie możliwe czasowe

i przestrzenne ruchy w przepływie [70]. Do użycia tej metody wymagana jest duża moc obliczeniowa komputera [71].

Teoretycznie rozwiązanie jest możliwe do uzyskania również dla przepływu turbulentnego. Ponieważ jednak w przypadku takiego przepływu mamy do czynienia jednocześnie z dużymi i bardzo małymi wirami, siatka użyta do obliczeń musi być utworzona z bardzo małych komórek – nie większych niż rozmiar najmniejszych wirów (0,1-1,0 mm, według skali Kołmogorowa [70]), co w rezultacie prowadzi do generacji siatki z tak olbrzymią liczbą węzłów, że wykonanie dla niej obliczeń jest aktualnie niemożliwe. Rozwiązanie można uzyskać tylko dla przepływów laminarnych, przy niskich liczbach Reynoldsa, a więc nieodpowiadających zagadnieniom inżynierii wiatrowej.

### 5.3 LES (*Large Eddy Simulation*)

Metoda LES, którą stworzył Smagorinsky [72], jest kompromisem pomiędzy metodami RANS i DNS [73]. Metoda LES rozdziela przepływ na część rozwiązywaną numerycznie i modelowaną analitycznie. Podział dokonywany jest za pomocą filtracji na ruch drobno- i wielkoskalowy. Przyjmowana szerokość filtra zwykle równa jest szerokości elementu siatki. Wielkoskalowe ruchy płynu wyznaczane są za pomocą zmodyfikowanych równań N-S. Małe wiry powstające w przepływie w wyniku lepkości płynu, mniejsze od szerokości zastosowanego filtra, są modelowane za pomocą lepkości zastępczej. Wraz ze zmniejszeniem szerokości filtra model LES zbliża się do DNS.

Równanie N-S dla LES wygląda następująco:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij}^{SGS} \right] \quad (14)$$

gdzie: nadkreślenia oznaczają filtrację przestrzenną,  $\tau_{ij}^{SGS}$  – tensor naprężeń podsiatkowych (*Sub-Grid Scale* – SGS) w skali mniejszej niż zastosowana filtracja:

$$\tau_{ij}^{SGS} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (15)$$

W zależności od sposobu definicji tensora naprężeń  $\tau_{ij}$  mamy do czynienia z różnymi modelami LES [67], [68].

Obecnie, numeryczne odwzorowanie oddziaływania wiatru na konstrukcje, które jest najbardziej zbliżone do rzeczywistości, uzyskuje się przy użyciu modelu LES [68]. Pomimo uwzględniania wirów mikroskalowych za pomocą lepkości zastępczej, siatka obliczeniowa wykorzystywana przy obliczeniach musi być bardzo gęsta. W związku z tym podstawowym ograniczeniem LES są możliwości obliczeniowe komputerów, a potrzebny na wykonanie obliczeń czas

powoduje, że symulacje są bardzo kosztowne. Wobec ograniczeń możliwości stosowania LES najczęściej wykorzystywaną w obliczeniach jest model RANS, która daje mniej satysfakcjonujące rezultaty, ale jest dużo tańsza w zastosowaniu ze względu na możliwość użycia siatek obliczeniowych o mniejszej liczbie węzłów. Istnieje również metoda pośrednia, polegająca na połączeniu modeli RANS i LES – DES.

## 5.4 DES (*Detached Eddy Simulation*)

Model hybrydowy DES [74], ma na celu skrócenie czasu obliczeń i zmniejszenie potrzebnej mocy obliczeniowej, przy jednoczesnym uzyskaniu poprawności symulacji przepływu na poziomie zbliżonym do wyników uzyskiwanych za pomocą LES. Polega na zastosowaniu modelu RANS w rejonie warstwy przyściennej oraz modelu LES w pozostałym obszarze domeny obliczeniowej. Dzięki temu siatka obliczeniowa nie musi być tak gęsta jak w przypadku LES.

## 5.5 RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*)

RANS poprzez wprowadzenie do równań N-S uśrednienia w czasie, pozwala na wyznaczenie średniej prędkości i ciśnienia dla przepływu ustalonego. Uwzględnienie fluktuacji prędkości i ciśnienia odbywa się poprzez modelowanie ich za pomocą innych parametrów. Dzięki temu, że bezpośrednio wyznaczane są tylko duże wiry, rozmiary komórek siatek obliczeniowych mogą być stosunkowo duże i moc obliczeniowa konieczna do wykonania symulacji jest mniejsza w porównaniu do wyżej omówionych metod. Jest to podstawowa zaleta tego modelu.

Po wprowadzeniu uśrednienia czasowego (tzw. dekompozycja Reynoldsa):

$$u_i(t) = \bar{u}_i + u'_i(t) \quad (16)$$

gdzie:  $\bar{u}_i, u'_i(t)$  – wartość średnia i fluktuacyjna prędkości przepływu, równania ruchu N-S przybierają następującą postać:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] + f_i \quad (17)$$

gdzie:  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  – naprężenia Reynoldsa,  $\mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$  – naprężenia powodowane lepkością płynu. Nadkreślenia nad symbolami oznaczają uśrednienie w czasie.

Dla płynu nieściśliwego otrzymujemy równanie ciągłości składowych prędkości średniej i fluktuacyjnej, w zapisie wskaźnikowym w postaci:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{x_i} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial u'_i}{x_i} = 0 \quad (19)$$

Ponieważ równania N-S są nieliniowe, każde uśrednianie generuje dodatkowe niewiadome, które wymagają powiązania z wielkościami średnimi. W związku z wystąpieniem większej liczby niewiadomych niż samych równań – dla zagadnienia dotyczącego przestrzeni 3D mamy cztery równania (równanie ciągłości oraz równania N-S dla trzech składowych wektora prędkości) i dziesięć niewiadomych (ciśnienie, trzy składowe wektora prędkości oraz sześć składowych tensora naprężeń Reynoldsa) – układ jest niemożliwy do rozwiązania bez wprowadzenia dodatkowych zależności wiążących składowe tensora naprężeń [63]. Opis matematyczny tych składowych można podzielić na:

- wykorzystujący bezpośrednio modelowanie równań (*Reynolds Stress Models*),
- bazujący na hipotezie Boussinesqa (*Eddy Viscosity Models*).

Innym sposobem podziału modeli obliczeniowych RANS jest uwzględnienie liczby równań, które są potrzebne do domknięcia układu (Rys. 5.1). Są to:

- modele 0-równaniowe,
- modele 1-równaniowe: Spalart-Allmaras,
- modele dwu- lub więcej równaniowe: Standard  $k$ - $\epsilon$ , RNG  $k$ - $\epsilon$ , Realizable  $k$ - $\epsilon$ , Standard  $k$ - $\omega$ , SST  $k$ - $\omega$ .

### 5.5.1 Model liniowej lepkości turbulentnej

Modelu liniowej lepkości turbulentnej (Linear Eddy Viscosity Model) przyjmuje hipotezę Boussinesqa, która zakłada że turbulentne naprężenia Reynoldsa zachowują się podobnie do pozostałych naprężeń w płynie i są proporcjonalne do prędkości deformacji [28], [38], [75]:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (20)$$

$$\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (21)$$

gdzie:  $\nu_t = \mu_t/\rho$ ,  $\mu_t$  – kinematyczny i dynamiczny współczynnik lepkości turbulentnej. Przy założeniu, że wartość  $\mu_t$  jest znana, podstawienie powyższych zależności do równań N-S prowadzi do domknięcia układu równań.

### 5.5.1.1 Modele 0-równaniowe

W modelu drogi mieszania (*Mixing Length Model*) nie zostaje wprowadzone żadne dodatkowe równanie, natomiast współczynnik  $\mu_t$  jest zdefiniowany jako funkcja pozycji w przestrzeni:

$$\mu_t = \rho C_\mu l_m^2 \left( \frac{d\bar{u}}{dy} + \frac{d\bar{v}}{dx} \right)^2 \quad (22)$$

gdzie:  $l_m = \kappa y$  – droga mieszania Prandtla,  $\kappa$  – stała von Kármána,  $C_\mu$  – stała modelu.

Powyższe założenie ma duże znaczenie w przypadku obszaru w warstwie przyściennej, w której współczynnik lepkości turbulencji jest zmienny. Szczegółowy opis tej metody znajduje się w pracy [75].

Wyżej opisany model oraz inne modele 0-równaniowe (np.: *Cebeci-Smith model* oraz *Baldwin-Lomax model*) opisano wraz z przykładami użycia w pracy [76], wskazując na podstawową ich wadę – lepkość turbulentna jest zależna tylko od chwilowych zawirowań i nie jest w stanie zamodelować transportu turbulencji w przepływie. W związku z tym modele te nie są użyteczne np. dla przepływów z recyrkulacją.

### 5.5.1.2 Modele 1-równaniowe

Modele 1-równaniowe rozwiązują zagadnienie turbulencji w równaniach N-S za pomocą jednego dodatkowego równania transportu, zwykle dotyczącego energii kinetycznej turbulencji  $k$ .

Pierwszym modelem 1-równaniowym był model Prandtla, dla którego kinematyczna lepkość turbulentna  $\nu_t$  została zdefiniowana następująco:

$$\nu_t = k^{0.5} l = C_D \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (23)$$

gdzie:  $l$  – skala długości turbulencji,  $C_D = 0,8$  – stała modelu.

Inne modele tego typu to *Baldwin-Barth model* oraz *Spalart-Allmaras model* [77]. Najpopularniejszą odmianą modeli 1-równaniowych jest ostatni z nich, ale jest on odpowiedni głównie dla mało skomplikowanych zastosowań lotniczych uwzględniających przepływ w warstwie przyściennej (wokół profili lotniczych).

### 5.5.1.3 Modele 2-równaniowe

Istnieje bardzo wiele różnych modeli 2-równaniowych, które są wykorzystywane od lat i zostały obszernie opisane w literaturze, np. [38], [68], [76], [78], [79]. Modele tego typu rozwiązują równania transportu przy pomocy równania energii kinetycznej turbulencji  $k$  oraz równania, które pozwala na wyznaczenie dyssypacji energii kinetycznej turbulencji  $\varepsilon$  lub dyssypacji na jednostkę energii kinetycznej turbulencji  $\omega$ .

W modelu  $k$ - $\varepsilon$  *standard*  $\mu_t$  opisano wzorem [80]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (24)$$

Przy wykorzystaniu powyższej zależności równanie N-S przyjmuje postać:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (25)$$

gdzie:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (26)$$

W celu wyznaczenia składowych tensora naprężeń Reynoldsa należy użyć dwóch dodatkowych równań opisujących  $k$  oraz  $\varepsilon$ :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = s_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (27)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} s_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (28)$$

gdzie:  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  – liczba Prandtla w odniesieniu do energii i dyssypacji energii kinetycznej turbulencji,  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$  – stałe modelu  $k$ - $\varepsilon$  *standard* [80].

Model  $k$ - $\varepsilon$  *standard* od lat jest najczęściej używanym modelem turbulencji w zagadnieniach inżynierii wiatrowej, w tym opływu budynków. Umożliwia przeprowadzenie analiz skomplikowanych zadań za pomocą komputerów jednoprosesorowych, zużywając przy tym stosunkowo mało nakładów czasowych i pieniężnych. Niestety, posiada również wady wynikające z zastosowania szeregu uproszczeń i przybliżeń, np. nadaje się tylko dla przepływów w pełni turbulentnych, nie odwzorowuje poprawnie fragmentów przepływów zawierających duże gradienty ciśnienia, występujących szczególnie w okolicach warstwy przyściennej.

Ponieważ jakość uzyskiwanych wyników często była wątpliwa, autorzy wielu opracowań sięgali po model  $k$ - $\varepsilon$  w innych wersjach niż *standard* (por. [81]).

Model  $k$ - $\varepsilon$  *realizable* został zaproponowany w pracy [82] przez wprowadzenie modyfikacji modelu *standard*, mających na celu lepsze działanie w obszarach przepływu z dużymi gradientami ciśnienia i oderwaniem od naroży. Zmieniono sposób definicji  $C_\mu$ , a równanie opisujące  $\varepsilon$  zostało wyrażone następująco [78], [83]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_1 S \varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (29)$$

gdzie:  $S = \sqrt{2s_{ij}s_{ij}}$ ,  $C_1 = \max\left(0, 43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right)$ ,  $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$ ,  $C_2 = 1,9$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,2$ .

Równanie opisujące  $k$  jest takie samo jak w modelu *standard*, ale zmieniają się jego stałe. Wartość  $C_\mu$  ze stałej staje się funkcją średniego odkształcenia i prędkości kątowej.

Kolejnym modelem z grupy  $k$ - $\varepsilon$  jest  $k$ - $\varepsilon$  *renormalization group* (RNG). Również w nim zmieniono równanie opisujące  $\varepsilon$  na [64]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\varepsilon}{k} \left[ (C_{\varepsilon 1} - C_{1RNG}) \frac{s_{ij}}{\rho} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (30)$$

gdzie:  $C_{1RNG} = \frac{\eta(1 - \eta/4,38)}{(1 + 0,012\eta^3)}$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,68$ ,  $\sigma_\varepsilon = 0,719$ .

Stałe w równaniach są uzyskiwane za pomocą teorii renormalizacji grup. Dla złożonych przepływów turbulentnych, z występującymi wirami i oderwaniem strugi, model ten charakteryzuje się wyższą skutecznością niż  $k$ - $\varepsilon$  *standard*. Z drugiej strony, zbiegnięcie się rozwiązania jest trudniejsze do uzyskania.

Podstawą modelu turbulencji  $k$ - $\omega$  są również równania opisujące energię kinetyczną turbulencji i jej dyssypację. W celu ułatwienia całkowania równań dyssypację  $\varepsilon$  zastąpiono dyssypacją na jednostkę energii kinetycznej turbulencji  $\omega$ . Zależność pomiędzy tymi wielkościami jest następująca [84]:

$$\varepsilon = C_\mu \omega k \quad (31)$$

Podstawiając (31) do wzoru (24) otrzymujemy:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (32)$$

a równania na  $k$  i  $\omega$  prezentują się następująco:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = s_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (33)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = C_{\omega 1} \frac{\omega}{k} s_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\omega 2} \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (34)$$

gdzie:  $C_{\omega 1} = 0,556$ ,  $C_{\omega 2} = 0,075$ ,  $\beta^* = 0,09$ ,  $\sigma_k = \sigma_\omega = 2$ .

Model  $k$ - $\omega$  charakteryzuje się wyższą skutecznością symulacji zjawisk zachodzących w warstwie przyściennej niż modele z grupy  $k$ - $\epsilon$ . Na poprawność uzyskanego rozwiązania bardzo duży wpływ ma to, czy w ramach warunków brzegowych zdefiniowano poprawną wartość  $\omega$ , gdyż obliczenia cechują się dużą wrażliwością na ten parametr.

Model SST  $k$ - $\omega$  (*Shear Stress Transport*) [85], [76] jest modelem hybrydowym. Powstał z połączenia modelu  $k$ - $\omega$ , dającego prawidłowe wyniki w warstwie przyściennej i modelu  $k$ - $\epsilon$ , który dobrze sprawdza się w miarę oddalania się od powierzchni ograniczającej przepływ. Warunki brzegowe są takie same jak dla modelu  $k$ - $\omega$ , ale rozwiązanie jest mniej wrażliwe na zadaną wielkość  $\omega$ . Model SST  $k$ - $\omega$  cechuje dobre odwzorowanie rzeczywistości w przypadku przepływów turbulentnych, ale jednocześnie wykazuje zbyt duże poziomy turbulencji w obszarach stagnacji i dużego przyspieszenia przepływu.

### 5.5.2 Model nieliniowej lepkości turbulentnej

Podstawowym założeniem modelu nieliniowej lepkości turbulentnej (*Nonlinear Eddy Viscosity Model*) jest nieliniowe powiązanie naprężeń turbulentnych z gradientami prędkości, lokalnej skali turbulencji i skali czasowej. Podobnie jak LES potrafi uwzględnić anizotropię turbulencji, ale jest przy tym mniej kosztowny. Ponadto, dobrze radzi sobie ze złożonymi przepływami turbulentnymi przy budynkach prostopadłościennych [86].

### 5.5.3 Model transportu naprężeń Reynoldsa

Model transportu naprężeń Reynoldsa (*Reynolds Stress Model*) polega na bezpośrednim opisie transportu składowych tensora naprężeń Reynoldsa [38], [68]. Ponieważ rozwiązywane równania są ściśle ze sobą sprzężone, trudniej jest uzyskać zbiegnięcie się wyników, a ponadto symulacje wymagają dużej mocy obliczeniowej. Może być z powodzeniem używany do rozbudowanych przepływów 3D z gwałtownymi zmianami kierunku przepływu.

## 5.6 Podsumowanie

W powyższym rozdziale opisano metody modelowania turbulencji w symulacjach CFD. Wybór odpowiedniej metody w dużej mierze zależy od badanego zagadnienia, jedne sprawdzają się w przypadku przepływów wewnętrznych (np. w rurach), a inne w przypadku przepływów zewnętrznych takich jak przepływ powietrza. Szczególną uwagę, należy zwrócić na prędkość i turbulencję przepływu, ponieważ w zależności od użytego modelu sposób ich wyznaczenia będzie się różnił, dając większe lub mniejsze błędy w rezultatach, bądź całkowicie nie nadając się do opisu danego zjawiska ze względu na zastosowaną zbyt dużą liczbę uproszczeń. W zagadnieniach związanych z przepływem wiatru dodatkową komplikację wprowadza wysoka wartość liczby  $Re$  wynikająca z rozmiarów budowli. Powoduje to utrudnienie rozwiązania przepływu za pomocą modeli uśredniających turbulencję, takich jak RANS. W związku z różnicą w rozmiarze budynku i elementów rusztowania, zastosowanie modelu  $k-\varepsilon$  jest bardzo trudne.

W ramach niniejszej pracy odpowiedni model turbulencji został dobrany na podstawie symulacji opływu wiatru wokół słupków rusztowania, i porównania charakterystycznych parametrów opływu z wynikami znanymi z literatury. Następnie, wybrany model został wykorzystany do bardziej rozbudowanych symulacji, które zostały zwalidowane na podstawie pomiarów in-situ.

Na podstawie doświadczeń zdobytych w trakcie dotychczasowej pracy naukowej polegających na wykonaniu wielu symulacji przy użyciu różnych modeli RANS oraz analizy przedstawionej w kolejnych rozdziałach stwierdzono, że  $k-\omega$  SST najlepiej odwzorowuje rzeczywisty opływ w rozpatrywanych zagadnieniach.

## 6 BADANIA IN-SITU ODDZIAŁYWANIA WIATRU NA RUSZTOWANIA

Pomiary prędkości oraz kierunku wiatru działającego na rusztowania były głównym celem badań przeprowadzonych w skali naturalnej. Badania wykonano w ramach szerszego projektu zatytułowanego „*Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań*” finansowanego przez NCBiR. Badania dotyczyły rusztowań fasadowych zmontowanych przy ścianach budynków zlokalizowanych w różnych częściach kraju.

### 6.1 Metodyka badań

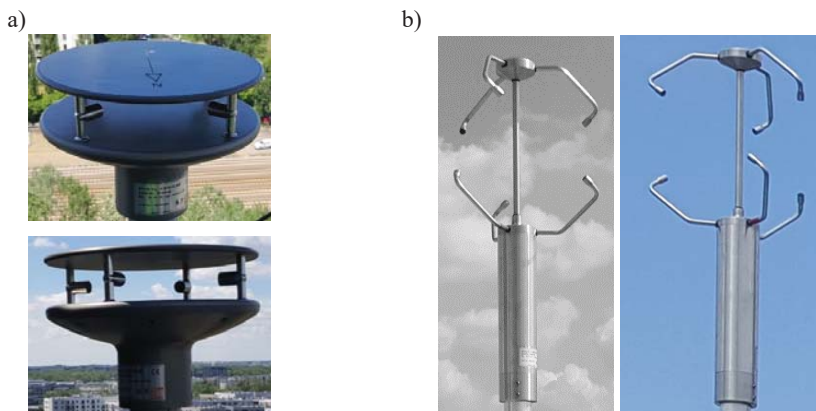
Badania parametrów środowiskowych, a w szczególności wiatru, w najbliższym otoczeniu obiektów budowlanych nie są częste. Jako przykład mogą służyć eksperymenty prowadzone w skali naturalnej, opisane m. in. w pracach [87], [88], [89], [90], [91]. Jak wcześniej wspomniano, eksperymenty in-situ na rusztowaniach ograniczają się w zasadzie do pozycji [54].

Wartości charakterystyczne prędkości wiatru, wykorzystywane przy obciążaniu obiektów budowlanych na terenie Polski, zostały wyznaczone przez Żurańskiego [37]. Wartości te zostały obliczone przy założeniu 50-cio letniego okresu powrotu, na podstawie danych o prędkości i kierunku wiatru zgromadzonych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Obecnie, zgodnie z rekomendacjami Światowej Organizacji Meteorologicznej, na stacjach pomiarowych co godzinę zapisywane są prędkości średnie 10-minutowe. Dawniej zapisywano średnie 2-minutowe, a pomiary były wykonywane tylko co trzy godziny. Dane ze stacji meteorologicznych rejestrowane są automatycznie z dokładnością do 1 m/s – jeśli chodzi o prędkość i  $10^\circ$  – jeśli chodzi o kierunek. Do pomiarów wykorzystywane są anemometry czasowe i wiatrakowe.

Na podstawie analizy wyżej wymienionych badań in-situ oraz możliwości technicznych, dostosowano sprzęt pomiarowy oraz sposób i długość wykonywania pomiarów na konstrukcjach rusztowań.

#### 6.1.1 Sprzęt i rodzaj pomiarów

Pomiar prędkości i kierunku wiatru został wykonany na kilkudziesięciu rusztowaniach fasadowych. System pomiarowy składał się z 5 anemometrów ultradźwiękowych dwukierunkowych (*2D ThiesClima Ultrasonic, compact*) oraz anemometru ultradźwiękowego trójkierunkowego (*ThiesClima Ultrasonic 3D*). Na rysunku 6.1 przedstawiono zdjęcia wykorzystanych czujników.



Rys. 6.1. Anemometry ThiesClima: a) kompaktowy dwukierunkowy, b) trójkierunkowy

Wykorzystane anemometry mierzą czas potrzebny impulsowi ultradźwiękowemu na przebycie drogi  $L_p$  pomiędzy naprzeciwległymi przetwornikami. Impuls jest wysyłany od jednego przetwornika do przeciwnego z prędkością  $c$ , czas potrzebny na przebycie drogi  $L_p$  jest równy  $T_1$ , zaś czas potrzebny na przebycie tej samej drogi z powrotem –  $T_2$ . Ultradźwiękowe anemometry dwukierunkowe posiadają dwie osie pomiaru w jednej płaszczyźnie (cztery przetworniki – Rys. 6.1a), a trójkierunkowe – trzy osie (Rys. 6.1b). Prędkość jest obliczana na podstawie czasów uzyskanych dla każdej osi osobno, na podstawie następujących zależności:

$$T_1 = \frac{L_p}{c + u}, T_2 = \frac{L_p}{c - u}, u = \frac{L_p}{2} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (35)$$

Wpływ temperatury na uzyskane rezultaty jest znikomy i może być pominięty.

Parametry wykorzystanych anemometrów dwukierunkowych są następujące:

- zakres pomiarowy prędkości wiatru: 0,01–75 m/s;
- dokładność:  $\pm 0,2$  m/s ( $u < 5$  m/s),  $\pm 2\%$  ( $5 \text{ m/s} \leq u \leq 60 \text{ m/s}$ ), maksymalna rozdzielczość: 0,01 m/s;
- zakres pomiarowy kierunków napływu wiatru:  $360^\circ$ ;
- dokładność:  $\pm 2^\circ$ , maksymalna rozdzielczość:  $0,1^\circ$ .

Parametry anemometru trójkierunkowego:

- zakres pomiarowy prędkości wiatru: 0,01–85 m/s;
- dokładność:  $\pm 0,1$  m/s ( $u < 5$  m/s),  $\pm 1\%$  ( $5 \text{ m/s} \leq u \leq 35 \text{ m/s}$ ),  $\pm 2\%$  ( $35 \text{ m/s} < u \leq 60 \text{ m/s}$ ), maksymalna rozdzielczość: 0,01 m/s;
- zakres pomiarowy kierunków napływu wiatru:  $360^\circ$ ;
- dokładność:  $\pm 1^\circ$  ( $1 \text{ m/s} \leq u \leq 35 \text{ m/s}$ ) oraz  $\pm 2^\circ$  ( $35 \text{ m/s} < u \leq 65 \text{ m/s}$ ), maksymalna rozdzielczość:  $0,1^\circ$ .

Akwizycja danych, dotyczących prędkości i kierunku wiatru, prowadzona była przy pomocy zestawu urządzeń *National Instruments* specjalnie dobranych do tego celu. Wykorzystany system akwizycji, pokazany na rysunku 6.2, został szczegółowo opisany w pracach [92], [93], [94], [95]. Zainstalowane karty pomiarowe pozwalały na równoczesny pomiar prędkości i kierunków wiatru za pomocą pięciu anemometrów 2D oraz jednego anemometru 3D. Dodatkowo istniała możliwość synchronicznego pomiaru ciśnienia atmosferycznego, wilgotności i temperatury za pomocą odpowiednich zewnętrznych urządzeń podłączonych do systemu, jak również ciśnienia prędkości wiatru w 16 punktach na powierzchni obiektów za pomocą czujników ciśnienia SETRA.

Zaprojektowany i wykonany system pomiarowy zapisywał dane pochodzące ze wszystkich kanałów pomiarowych jednocześnie i przesyłał je do komputera przenośnego. Dane dotyczące prędkości i kierunku wiatru zapisywane były co 0,2 s.

a)



b)



c)



d)



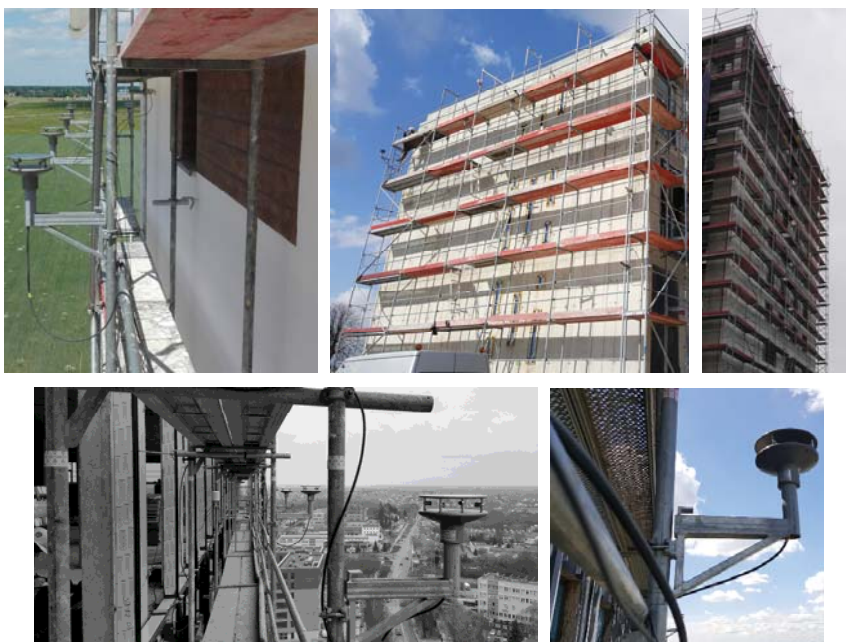
e)



Rys. 6.2. System akwizycji danych: a) karty *National Instruments*, b) gniazda anemometrów, c) gniazda czujników ciśnienia, d) i e) widok stanowiska pomiarowego

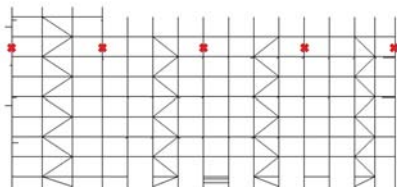
## 6.1.2 Technika pomiarów

Anemometry 2D montowano za pomocą stalowych konsol będących częścią systemu rusztowaniowego do zewnętrznych słupków ram rusztowania, 0,36 m przed zewnętrznym słupkiem. W większości przypadków rusztowania miały wysokość równą wysokości budynku, przy którym je ustawiono lub były od niego do 2 m wyższe. W celu uniknięcia wpływu zaburzeń powodowanych wirem odrywającym się na górnej krawędzi budynku na wyniki pomiarów, anemometry montowano zwykle około 1 m poniżej najwyższego poziomu pomostów rusztowania lub tak, aby znajdowały się około 2 m poniżej dachu budynku. Rysunek 6.3 prezentuje przykładowe rozmieszczenie anemometrów 2D, zamocowanych za pomocą stalowych konsol do zewnętrznych słupków rusztowania.

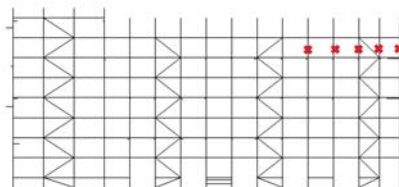


Rys. 6.3. Anemometry 2D zamontowane na zewnątrz rusztowania

a)



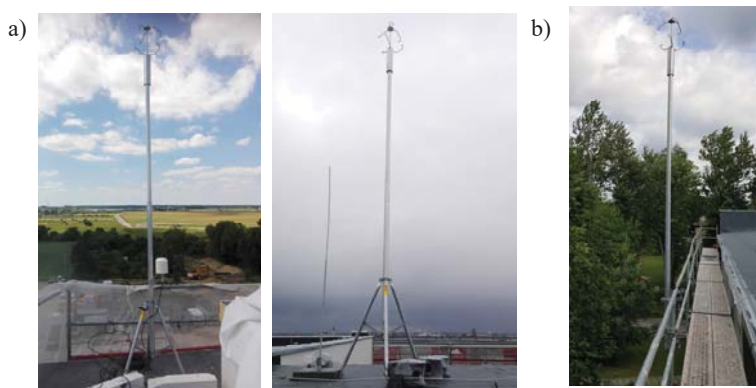
b)



Rys. 6.4. Rozmieszczenie anemometrów 2D: a) równomiernie wzdłuż długości rusztowania, b) w narożu rusztowania

Podczas rozmieszczania anemometrów 2D wzdłuż długości rusztowania kierowano się tym, aby objąć pomiarem cały jego poziom. W tym celu, dwa anemometry 2D montowano do skrajnych ram, jeden do ramy środkowej i dwa pozostałe do ram pośrednich między środkową i skrajnymi (Rys. 6.4a). Kilukrotnie wykonano pomiary w narożu rusztowania, w celu uchwycenia oderwania się wiru od krawędzi budynku (Rys. 6.4b).

Anemometr 3D montowano do wierzchołka masztu o wysokości 2,2 m – 3,5 m. Maszt był ustawiany na dachu budynku (Rys. 6.5a), przy którym znajdowało się rusztowanie lub, gdy nie było to możliwe, był montowany do ramy ostatniego poziomu rusztowania (Rys. 6.5b). Idealnym rozwiązaniem byłoby umieszczenie anemometru w obszarze przepływu niezaburzonego, co w wielu przypadkach okazywało się niemożliwe, głównie wskutek dodatkowych urządzeń występujących na dachach badanych budynków.



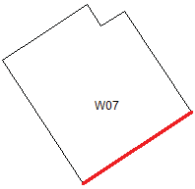





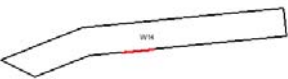

Rys. 6.5. Umieszczenie anemometru 3D: a) na dachu budynku, b) zamocowanie do najwyższej ramy rusztowania





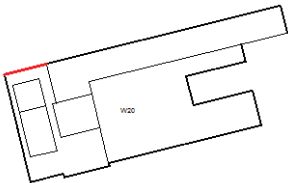







W wyniku realizacji badań uzyskano przebiegi czasowe prędkości i kierunku wiatru w pięciu punktach na rusztowaniu, zwykle na jednym poziomie. Wartości te nie są wystarczające do uzyskania informacji na temat rozkładu prędkości na całym rusztowaniu, mogą jedynie pokazać wycinek płaskiego przepływu. Ponadto, mogą być wykorzystane do zweryfikowania symulacji CFD. Ze względu na losowy charakter warunków atmosferycznych, nie było możliwe przeprowadzenie badań przy stałych wartościach prędkości wiatru. Na niektórych rusztowaniach obciążenie wiatrem w trakcie pomiarów było na tyle niskie (bardzo niska prędkość), że badań nie wykonano lub wyniki były obarczone zbyt dużym błędem pomiarowym. Pomiary prowadzono w cyklach kilkugodzinnych przez jeden dzień na każdej konstrukcji. Nie było możliwe pozostawienie sprzętu pomiarowego na dłuższy okres na placu budowy.



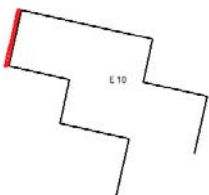




## 6.2 Wyniki pomiarów



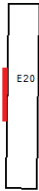

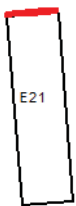






Pomiary prędkości i kierunku wiatru wykonano na 34 rusztowaniach. Pięć z nich było pokrytych siatką ochronną, pięć innych ustawiono przy budynkach szkieletowych. W tabeli 6.1 pokazano przyjętą klasyfikację rusztowań oraz obrys budynków i zdjęcia rusztowań przy nich ustawionych.

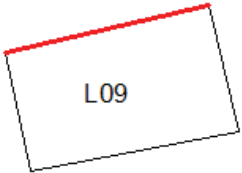



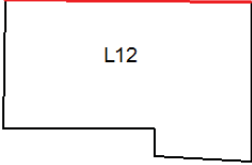

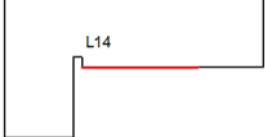

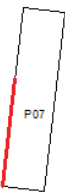



Tab. 6.1. Zestawienie rusztowań, na których przeprowadzono pomiary anemometryczne.

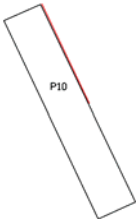



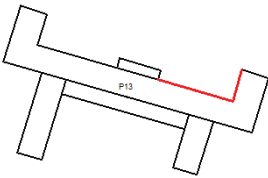







Oznaczenie rusztowania	Siatka	Budynek szkieletowy	Obrys budynku	Zdjęcie
W07	nie	tak	 Obrys budynku W07, który jest prostokątnym kształtem z jednym narożnikiem przyciętym pod kątem. Czerwona linia wskazuje na jedną z dłuższych stron.	 Zdjęcie rusztowania W07, które jest wielopiętrową konstrukcją z widocznymi poziomymi i pionowymi elementami szkieletu.
W08	nie	nie	 Obrys budynku W08, który ma kształt litery 'E' z dodatkowymi wcięciami. Czerwona linia wskazuje na jedną z krótszych stron.	 Zdjęcie rusztowania W08, które jest konstrukcją z pionowymi słupkami i poziomymi belkami, ustawioną przy budynku.
W11	nie	nie	 Obrys budynku W11, który ma kształt litery 'H' z dodatkowymi wcięciami. Czerwona linia wskazuje na jedną z krótszych stron.	 Zdjęcie rusztowania W11, które jest konstrukcją z pionowymi słupkami i poziomymi belkami, ustawioną przy budynku.
W14	nie	nie	 Obrys budynku W14, który jest wydłużonym, wąskim kształtem z lekko zaokrąglonymi końcami. Czerwona linia wskazuje na jedną z krótszych stron.	 Zdjęcie rusztowania W14, które jest konstrukcją z pionowymi słupkami i poziomymi belkami, ustawioną przy budynku.

Oznaczenie rusztowania	Siatka	Budynek szkieletowy	Obrys budynku	Zdjęcie
W18	nie	nie		
W19	nie	nie		
W20	nie	nie		
W23	nie	nie		
E05	tak	nie		
E06	tak	nie		

Oznaczenie rusztowania	Siatka	Budynek szkieletowy	Obrys budynku	Zdjęcie
E08	nie	tak		
E09	nie	nie		
E10	nie	tak		
E12	tak	nie		
E13	tak	nie		
E15	nie	nie		

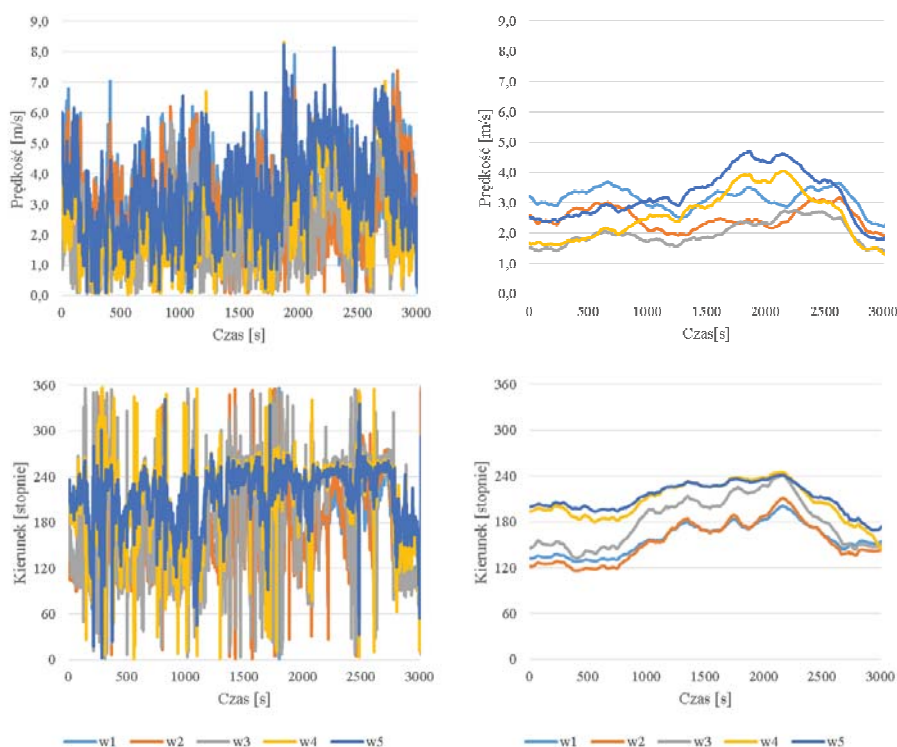
Oznaczenie rusztowania	Siatka	Budynek szkieletowy	Obrys budynku	Zdjęcie
E16	tak	nie		
E20	nie	nie		
E21	nie	nie		
E23	nie	nie		
L06	nie	nie		
L07	nie	nie		

Oznaczenie rusztowania	Siatka	Budynek szkieletowy	Obrys budynku	Zdjęcie
L09	nie	tak		
L11	nie	tak		
L12	nie	nie		
L14	nie	nie		
P07	nie	nie		
P09	nie	nie		

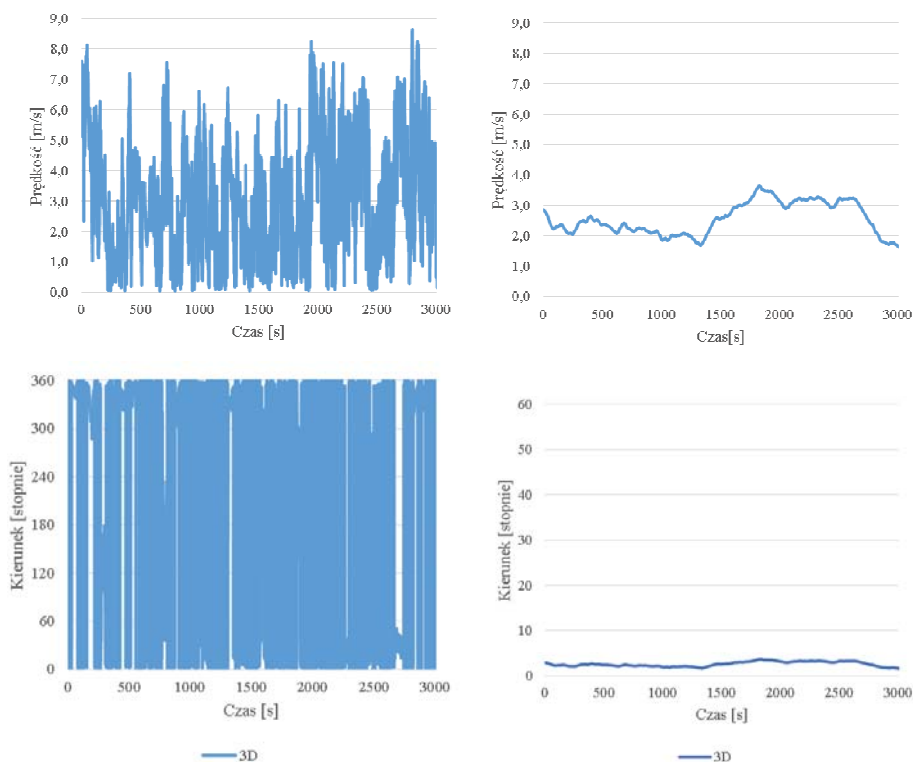
Oznaczenie rusztowania	Siatka	Budynek szkieletowy	Obrys budynku	Zdjęcie
P10	nie	nie		
P11	nie	nie		
P13	nie	nie		
P21	nie	nie		
P23	nie	nie		
P24	nie	nie		

Ponieważ celem niniejszej pracy było zbadanie oddziaływania wiatru bezpośrednio na rusztowanie, przypadki z siatką pominięto jako stanowiące zupełnie odrębne zagadnienie. Pod uwagę wzięto tylko rusztowania ustawione przy obiektach o pełnych elewacjach, tak aby wychwycić wpływ budynku jako przeszkody zmieniającej opływ. W przypadku rusztowania ustawionego przy budynku szkieletowym badane zagadnienie byłoby bardziej zbliżone do opływu rusztowania wolnostojącego.

Z pozostałych 24 rusztowań, do dalszej analizy wybrano te, które stały przy zewnętrznych fasadach budynków o stosunkowo prostych kształtach przekroju poziomego. Przykładowe przebiegi czasowe wartości chwilowych (zmierzonych na rusztowaniu W18) i średnich ruchomych 10-minutowych prędkości i kierunku wiatru pokazano na rysunkach 6.6 i 6.7.



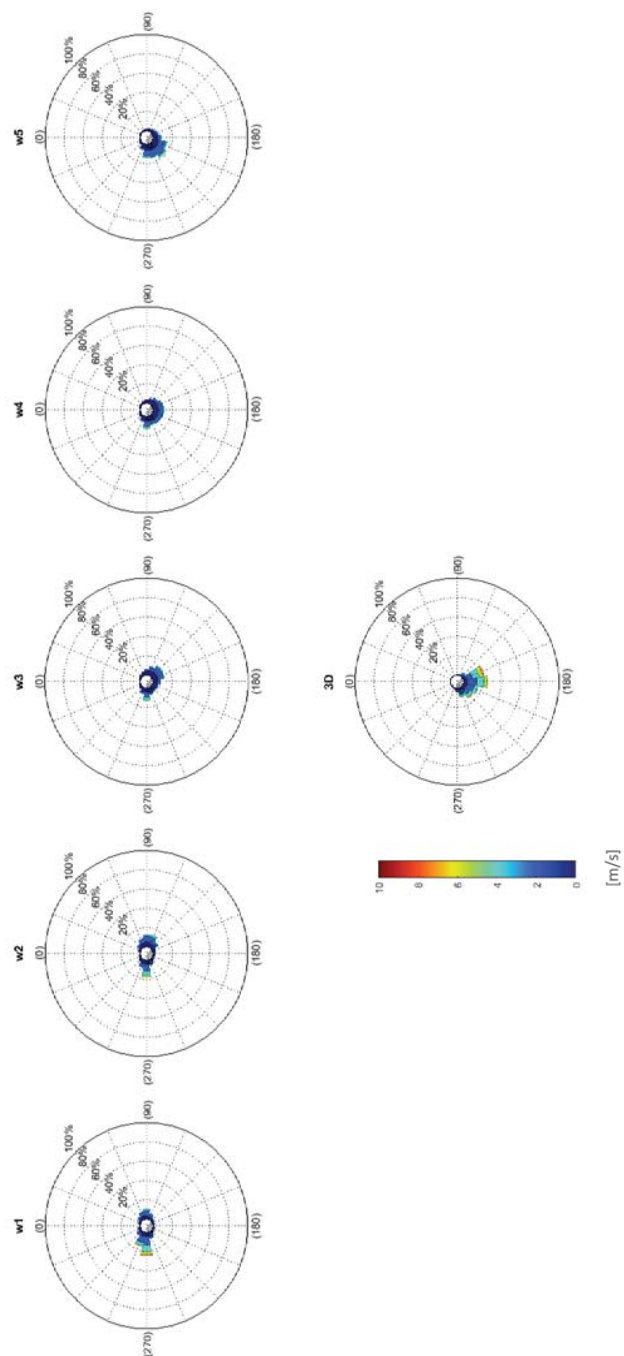
Rys. 6.6. Przebiegi czasowe prędkości i kierunku wiatru zarejestrowane za pomocą anemometrów 2D, rusztowanie W18. Po lewej wartości chwilowe, po prawej średnia ruchoma 10-minutowa



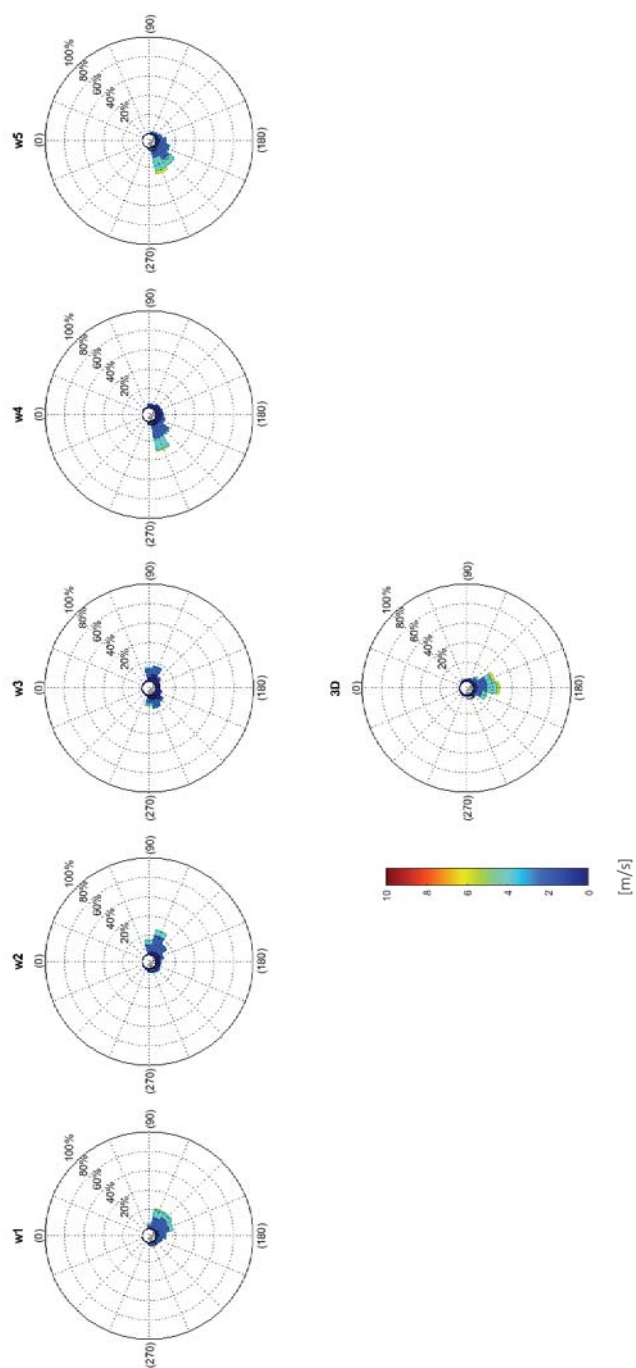
Rys. 6.7. Przebiegi czasowe prędkości i kierunku wiatru zarejestrowane za pomocą anemometru 3D, rusztowanie W18. Po lewej wartości chwilowe, po prawej średnia ruchoma 10-minutowa

Na podstawie przebiegów czasowych chwilowych prędkości i kierunku utworzono róże wiatrów dla wszystkich czujników pomiarowych zamontowanych na danym rusztowaniu, obejmujące cały okres pomiarowy. Wartości odczytane z anemometru 3D, przyjęto w dalszych rozważaniach jako odpowiadające prędkości i kierunkowi natarcia wiatru na dane rusztowanie. Róże wiatrów wyznaczone dla anemometrów 2D bezpośrednio obrazują przeważające kąty i prędkości wiatru przy każdym ze słupków, na którym znajdował się czujnik. Przykładowe wykresy pokazano na rysunkach 6.8–6.18.

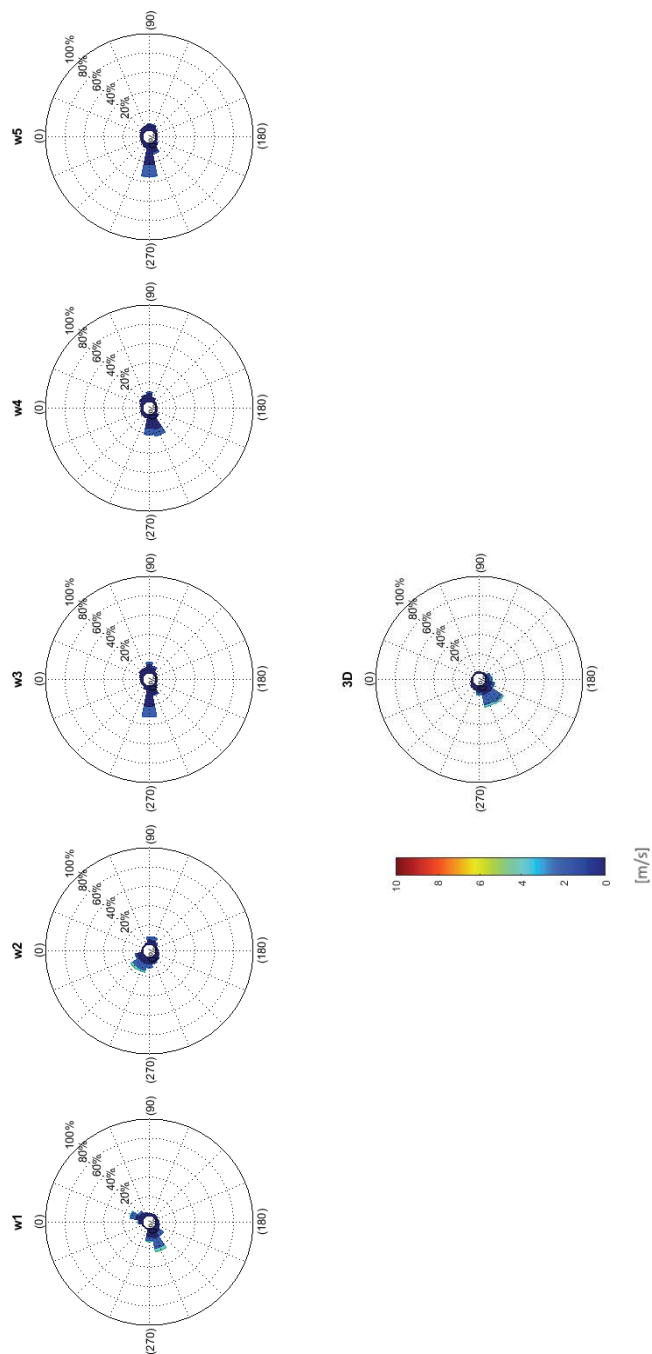
Analiza przestrzenno-czasowa prędkości i kierunków była niezbędna do zorientowania się w rzeczywistym rozkładzie obciążeń działających na słupki w różnych wariantach i ustawieniach rusztowań. Na podstawie pomiarów wysnuto ogólne wnioski na temat rozkładów obciążenia, a wartości porównano z zaleceniami normowymi. Następnie wybrano przypadek, który posłużył do walidacji modelu CFD.



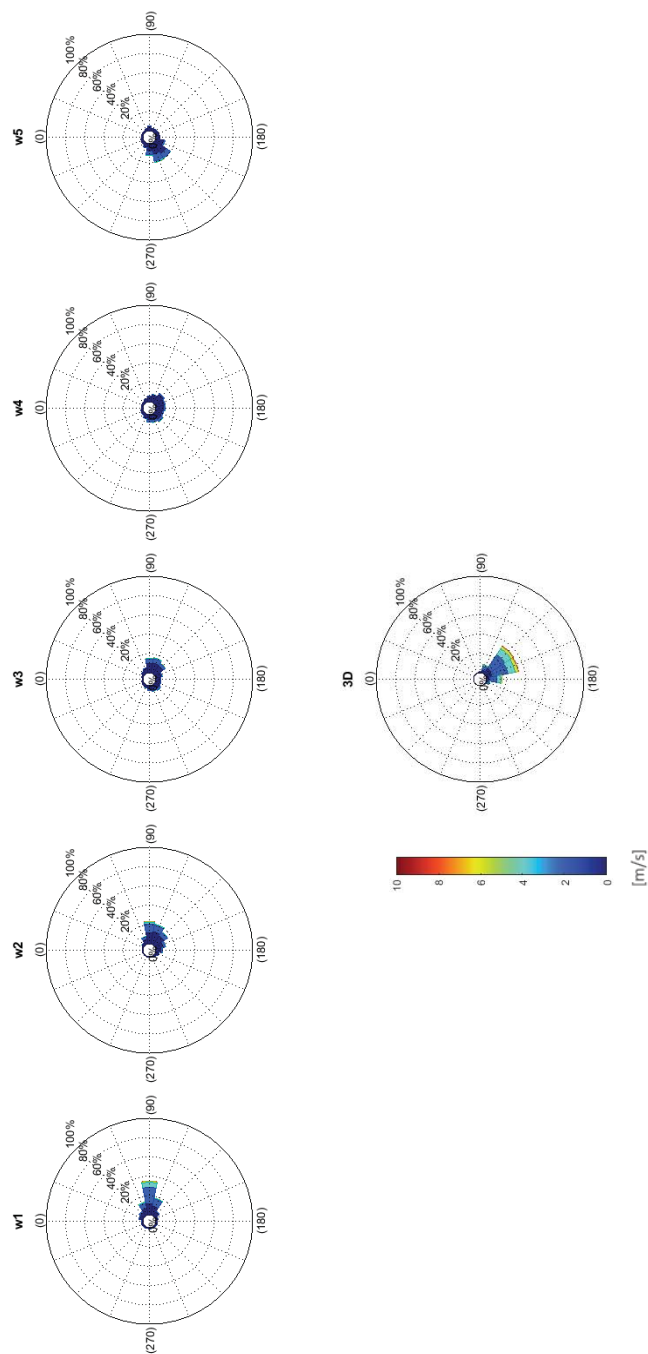
Rys. 6.8. Róża wiatrów, rusztowanie W14



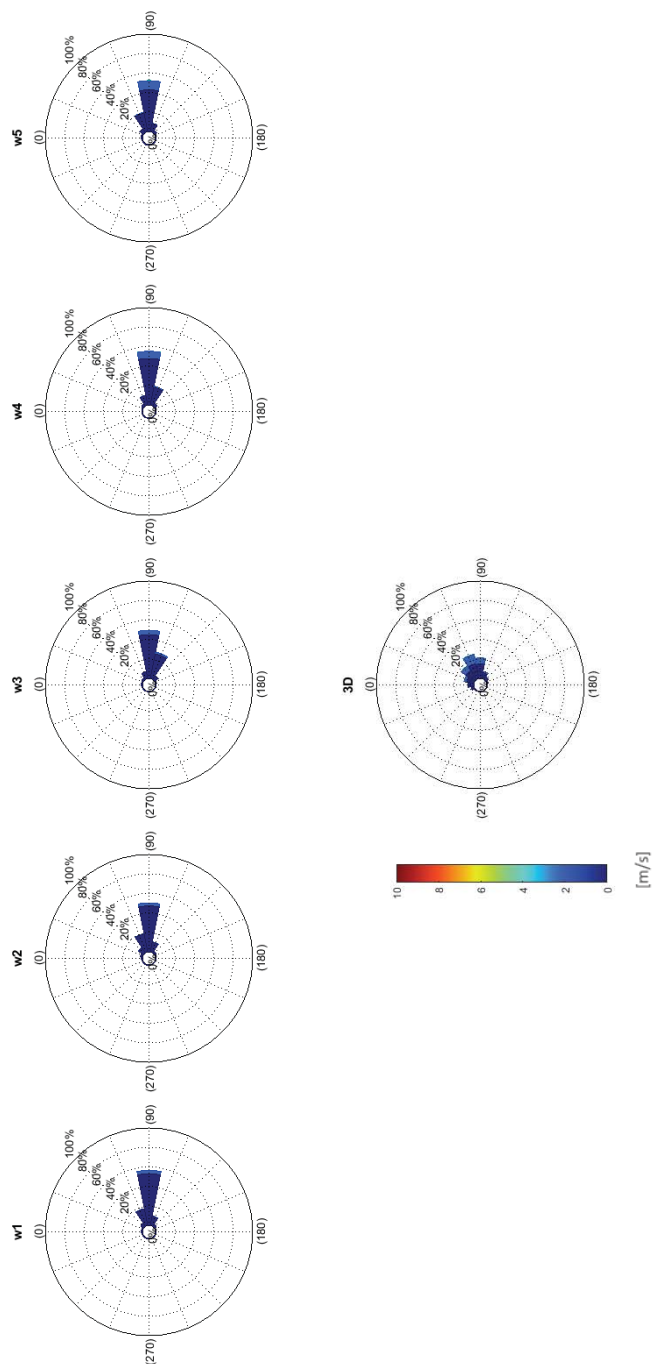
Rys. 6.9. Róża wiatrów, rusztowanie W18



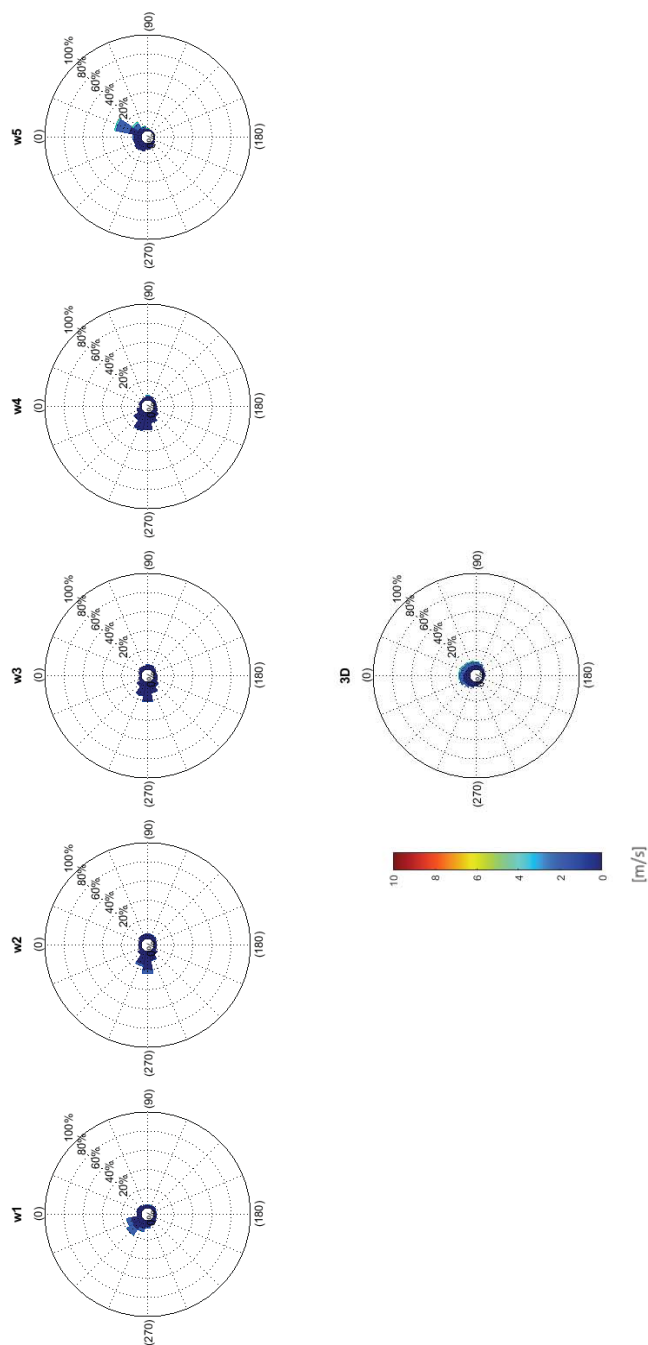
Rys. 6.10. Róża wiatrów, rusztowanie W19



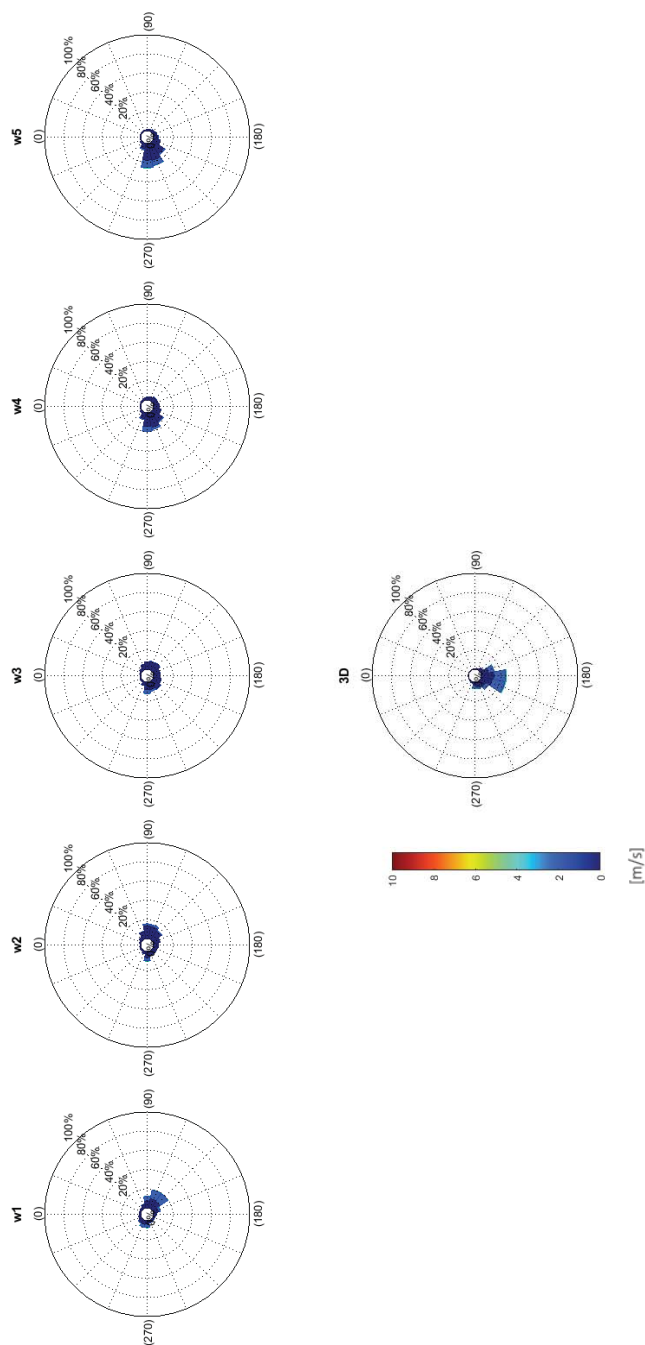
Rys. 6.11. Róża wiatrów, rusztowanie E15



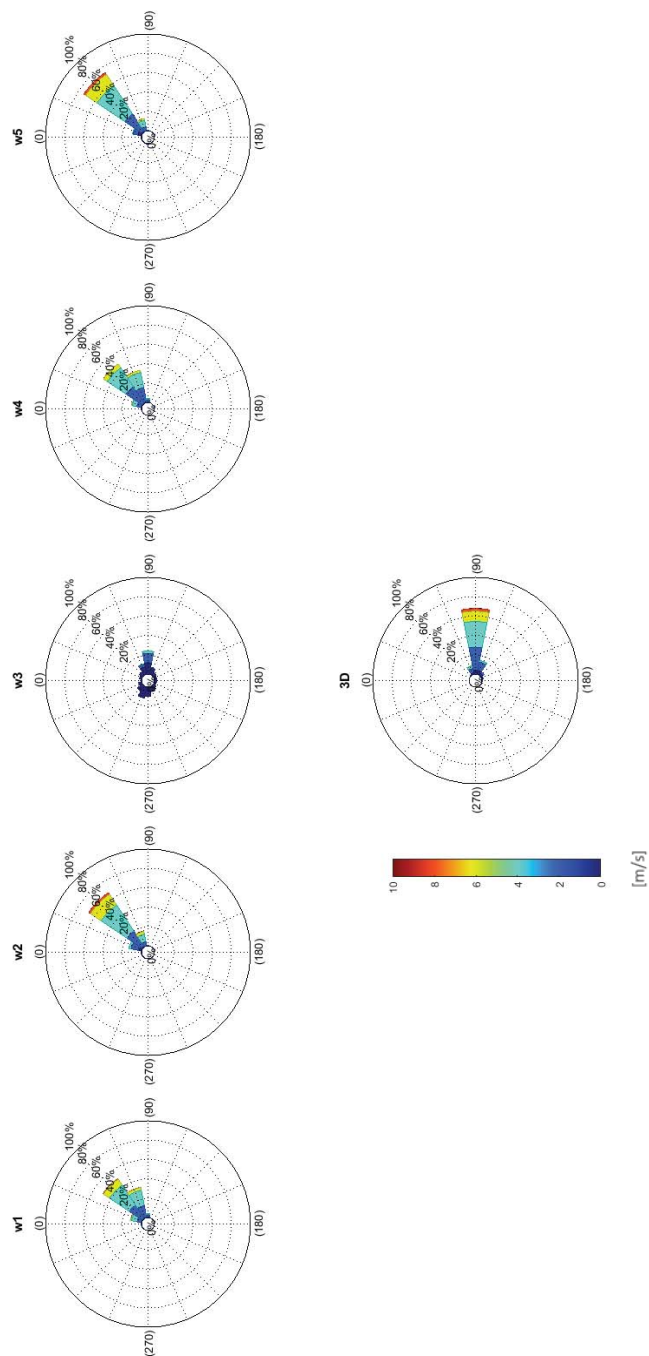
Rys. 6.12. Róża wiatrów, rusztowanie E20



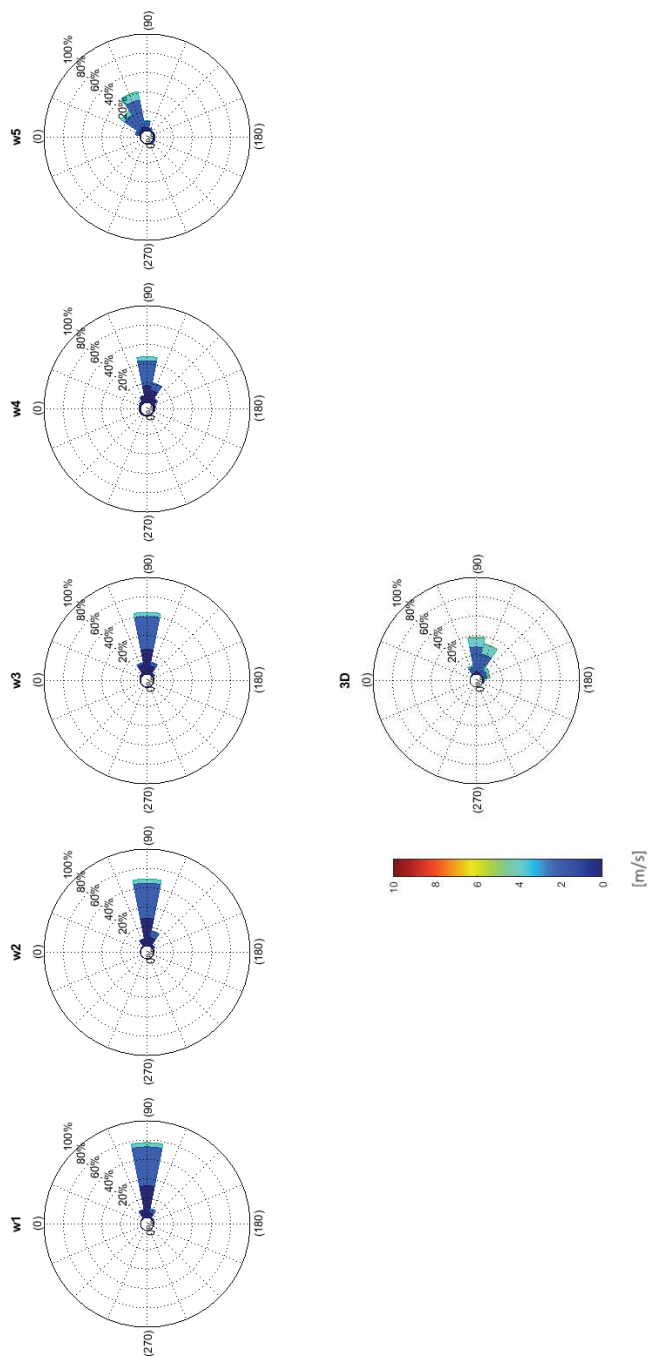
Rys. 6.13. Róża wiatrów, rusztowanie E21



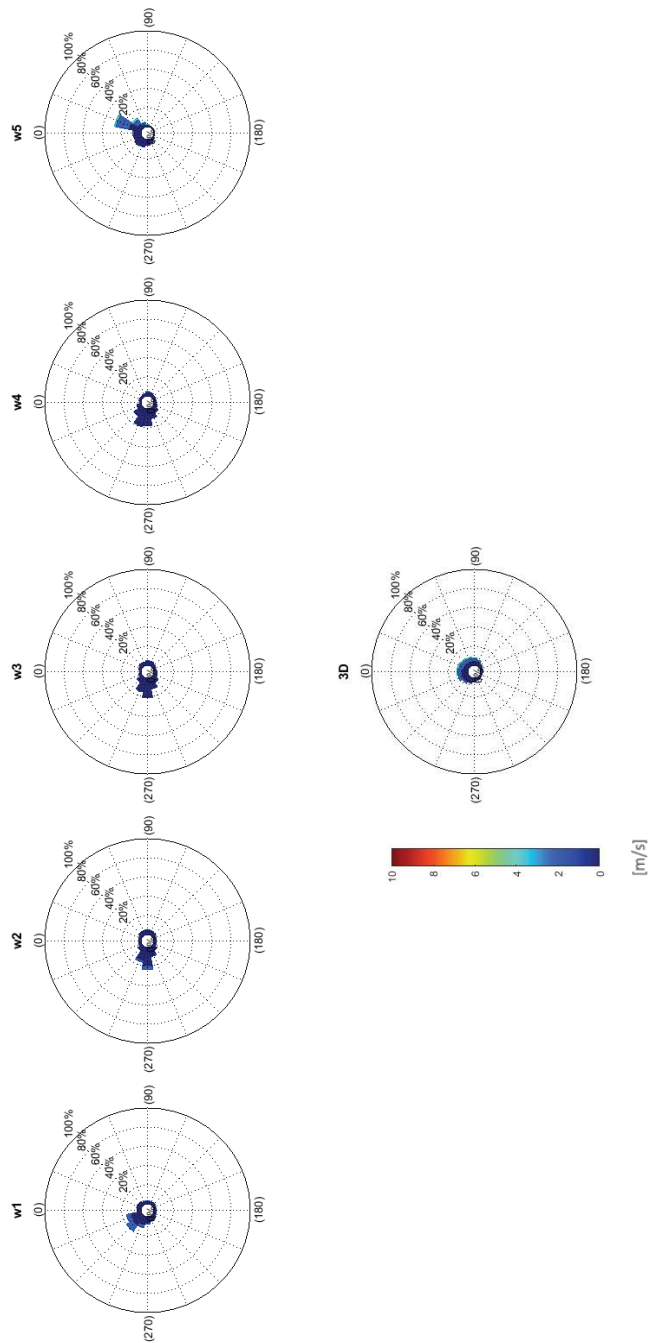
Rys. 6.14. Róża wiatrów, rusztowanie E23



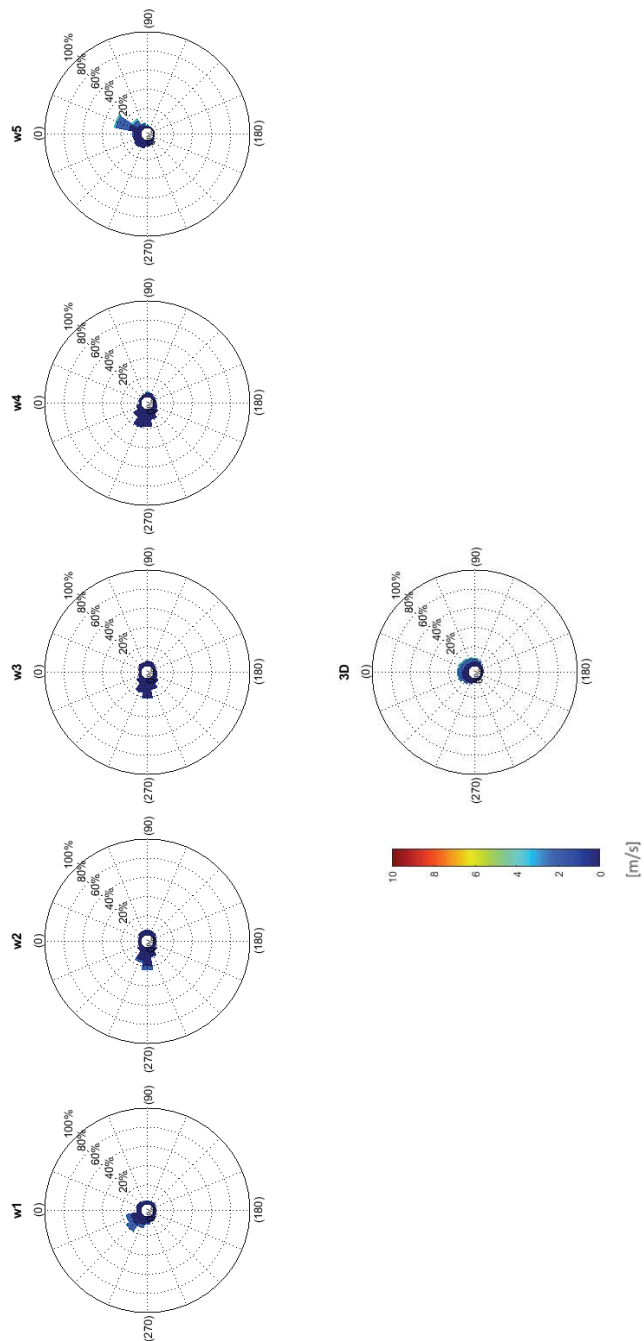
Rys. 6.15. Róża wiatrów, rusztowanie L12



Rys. 6.16. Róża wiatrów, rusztowanie P10



Rys. 6.17. Róża wiatrów, rusztowanie P11



Rys. 6.18. Róża wiatrów, rusztowanie P21

Jako wstępne wskazanie możliwych różnic pomiędzy rzeczywistym oddziaływaniem wiatru i obowiązującym podejściem normowym [2], porównano wartości i kierunki wektorów prędkości przed słupkami rusztowania, w miejscu zamocowania anemometrów.

Wyznaczając wartości z pomiarów własnych użyto średniej 10-minutowej wypadkowej poziomej zarejestrowanej na anemometrze 3D. Jako kryterium przyjęto najmniejsze fluktuacje kąta natarcia wiatru w czasie 10 minut (najniższe odchylenie standardowe kąta napływu). Kierunek obciążenia działającego na słupki rusztowania przyjęto jako zgodny z kierunkiem napływu wyznaczonym z anemometru 3D, natomiast prędkość wiatru na wysokości montażu anemometrów 2D wyznaczono z pionowego profilu wiatru [96]:

$$\overline{U}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z + z_o}{z_o} \right) \quad (36)$$

gdzie:  $z$  – współrzędna pionowa,  $z_o$  – wymiar chropowatości terenu (dla danej kategorii terenu),  $\kappa$  – stała von Kármána  $u_*$  – prędkość tarcia w atmosferycznej warstwie przyziemnej, zdefiniowana wzorem:

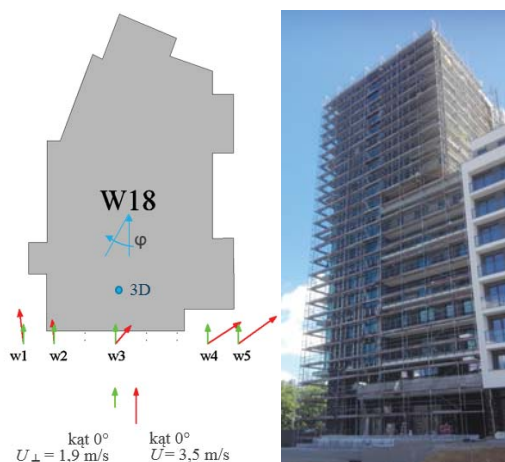
$$u_* = \frac{u_{ref} \kappa}{\ln \left( \frac{z_{ref}}{z_o} \right)} \quad (37)$$

Przyjęto prędkość referencyjną  $u_{ref}$  na wysokości  $z_{ref}$  ustawienia anemometru 3D nad ziemią, zakładając że występuje tam przepływ niezaburzony.

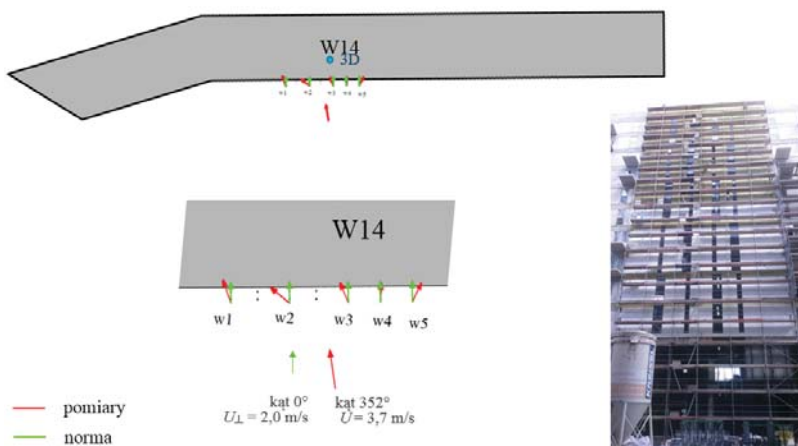
Dla takiej samej prędkości wiatru jaką odczytano z pomiarów własnych, wyznaczono wektory prędkości zgodnie z normą [2], a więc w kierunku równoległym i prostopadłym do fasady rusztowania. Wartość prędkości wiatru działającego na rusztowanie, w przypadku kierunku prostopadłego do fasady została przemnożona przez współczynnik miejsca dla pełnej elewacji  $c_s = 0,25$ . Ponieważ wyniki pomiarów odczytywano tylko w pięciu punktach na rusztowaniu, wartości z normy również zaprezentowano dla tych samych punktów. Oczywiście, w rzeczywistości obciążenie wiatrem działa na wszystkie słupki.

Na rysunkach 6.19 i 6.20 pokazano porównanie wektorów prędkości dla czterech przykładowych rusztowań.

a)



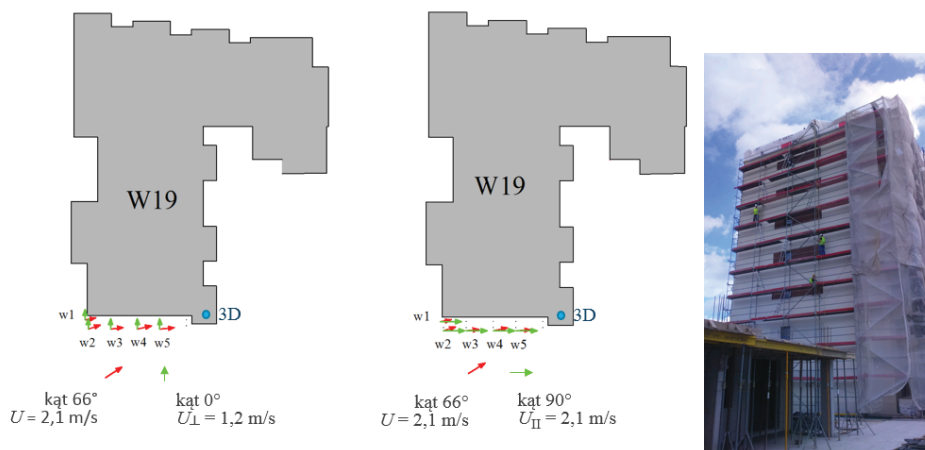
b)



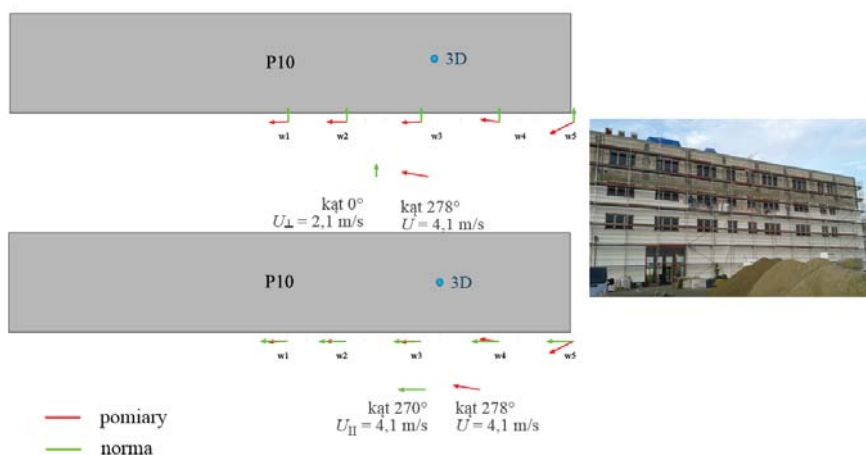
Rys. 6.19. Wektory prędkości wiatru działającego na słupki rusztowania wyznaczone na podstawie pomiarów w skali naturalnej oraz zaleceń normowych, dla rusztowania: a) W18, b) W14

Na rysunku 6.19 można zauważyć, że w przypadku napływu wiatru w kierunku prostopadłym do fasady, jeżeli budynek nie ma otworów, wektory prędkości przy słupkach nachylone są pod kątem do budynku. Dzieje się tak nie tylko w przypadku narożnych słupków (Rys. 6.19a), ale również gdy są umieszczone w środku szerokości elewacji długiego budynku (Rys. 6.19b). Oznacza to, że wiatr działający na rusztowanie wykazuje charakter zgodny z opływem budynków bez rusztowania (por. Rys. 4.2a).

a)



b)



Rys. 6.20. Wektory prędkości wiatru działającego na słupki rusztowania wyznaczone na podstawie pomiarów w skali naturalnej oraz zaleceń normowych, dla rusztowania: a) W19, b) P10

Rys. 6.20a pokazuje kierunek napływu wiatru działającego pod kątem w stosunku do budynku i fasady rusztowania. Wektory prędkości przed słupkami skierowane są pod innym kątem niż kąt napływu, niemalże równoległe do fasady. W tym przypadku wartości z pomiarów porównano z dwoma kierunkami normowymi.

Rys. 6.20b przedstawia porównanie wektorów prędkości dla kąta napływu wiatru bliskiego równoległemu do fasady rusztowania. Należy zauważyć, że wektor przed narożnym słupkiem ma inny kierunek niż napływ. Wektory

prędkości przed innymi słupkami są równoległe do fasady. Jest to prawdopodobnie spowodowane odrywaniem się wiru od naroża budynku. Opływ wiatru wokół budynku i rusztowania P10 zostanie zaprezentowany szczegółowo w kolejnym rozdziale jako przypadek walidacyjny symulacji CFD.

W przedstawionym porównaniu, normowa prędkość napływającego wiatru odpowiadała prędkości zmierzonej. W przypadku rusztowania W18, prędkość wiatru działającego na słupki znajdujące się przy narożach budynku, była wyższa w pomiarach, niż według obliczeń normowych, przy prostym obciążeniu zgodnym z kątem napływu. W pozostałych przypadkach rusztowań prędkość wiatru przed słupkami była podobna. Należy zauważyć, że uwzględnienie nieprzepuszczalności budynku przez zmniejszenie prędkości wiatru, w przypadku obciążenia prostego, może spowodować zaniżenie obciążenia dla pewnych kątów i słupków znajdujących się w narożach.

W odniesieniu do zaprezentowanych rusztowań, z pomiarów własnych wybrano jeden decydujący kąt natarcia wiatru. We wszystkich przypadkach kierunki wektorów prędkości przed słupkami rusztowania (wyznaczone z anemometru 2D) nie były w pełni zgodne z kierunkiem napływającego wiatru (wyznaczonym z anemometru 3D). Aby poznać rozkład i wartości wektorów prędkości wiatru działającego na słupki rusztowania, należałoby przeprowadzić analizę dla pozostałych kątów napływu. Wykonanie takiego porównania dla pełnego zakresu kąta natarcia nie było możliwe do przeprowadzenia w oparciu o pomiary w skali rzeczywistej. Taką analizę umożliwia natomiast zastosowanie symulacji CFD.

### 6.3 Podsumowanie

Pomiary w skali naturalnej wykonano na kilkudziesięciu rusztowaniach fasadowych. Na podstawie analizy wszystkich przypadków do dalszych rozważań wybrano rusztowania ustawione przy budynkach o jak najprostszym kształcie. Bazując na przebiegach czasowych i przyjmując jako kryterium najmniejsze fluktuacje kąta natarcia wiatru na anemometrze 3D w czasie 10 minut wykonano analizę wektorów prędkości z badań i normy. Porównanie wyników było możliwe tylko dla zmierzonych kątów napływu wiatru. W celu wykonania analizy dla pełnego zakresu kąta do dalszej analizy wybrano rusztowanie P10, dla którego wykonano symulacje CFD opisane w dalszej części pracy.

## 7 SYMULACJE PRZEPŁYWU WOKÓŁ SŁUPKÓW RUSZTOWANIA

### 7.1 Wprowadzenie

Symulacje CFD przeprowadzono w odniesieniu do konstrukcji rusztowań ustawionych przy budynkach i porównano uzyskane wyniki z rezultatami pomiarów w skali naturalnej. Największym problemem w odwzorowaniu obiektu z rusztowaniem jest duża różnica wymiarów pomiędzy słupkiem i budynkiem. Aby mieć pewność, że przyjęte w późniejszych symulacjach podejście jest prawidłowe, obliczenia rozpoczęto od sprawdzenia opływu powietrza wokół pojedynczego słupka, a następnie słupków ustawionych w rzędzie jeden za drugim. Symulacje wykonano jako dwuwymiarowe, zmienne w czasie.

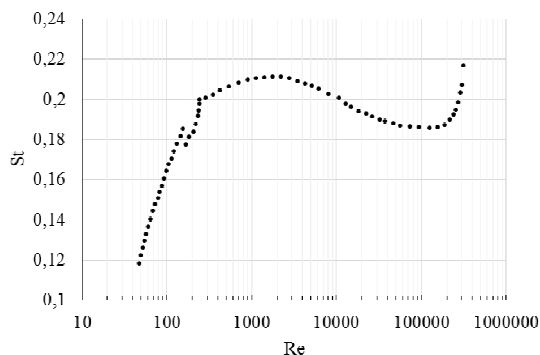
W literaturze można znaleźć wiele raportów dotyczących badań opływu pojedynczego walca lub płaskiego przekroju kołowego dla różnych zakresów liczby Reynoldsa. Główne parametry aerodynamiczne wynikające z opływu powietrza wokół nieruchomego walca to współczynniki ciśnienia:  $C_p$ , oporu aerodynamicznego  $C_D$  oraz siły bocznej  $C_L$ , które można wyznaczyć na podstawie następujących wzorów:

$$C_p = \frac{p - p_0}{0,5\rho u^2}, \quad C_D = \frac{F_D}{0,5\rho u^2 D}, \quad C_L = \frac{F_L}{0,5\rho u^2 D} \quad (38)$$

gdzie:  $p$  – ciśnienie na ścianie walca,  $p_0$  – ciśnienie atmosferyczne,  $u$  – prędkość referencyjna,  $\rho$  – gęstość powietrza,  $F_D$  – siła oporu aerodynamicznego,  $F_L$  – aerodynamiczna siła boczna,  $D$  – średnica przekroju poprzecznego. Dodatkowo, mając do czynienia z wirami odrywającymi się ze ścian walca, stosuje się bezwymiarową liczbę Strouhala służącą do określenia podobieństwa przepływów okresowych:

$$St = \frac{Df}{u} \quad (39)$$

gdzie:  $f$  – częstotliwość odrywania się wirów. Zależność liczby Strouhala od liczby Reynoldsa pokazano na rysunku 7.1, na podstawie pracy [97].



Rys. 7.1. Zależność liczby Strouhala od liczby Reynoldsa [97]

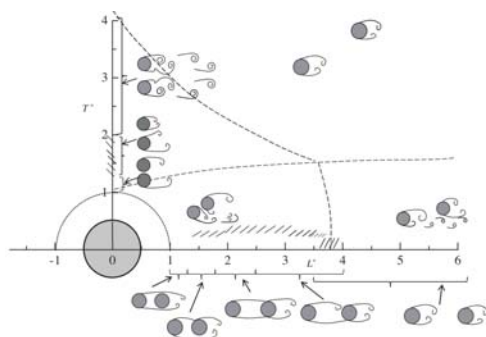
Jak już wspomniano, literatura dotycząca opływu walca jest bardzo bogata. Można ją podzielić na dotyczącą opływu wokół płaskiego przekroju kołowego i trójwymiarowego walca. Ponadto, w zależności od badanych zagadnień, na dotyczącą opływu przy stałej prędkości wiatru lub przy prędkości zmiennej wzdłuż wysokości, zgodnie z pionowym profilem. To samo dotyczy zmian turbulencji. Wiele podstawowych prac odnosi się do walców nieruchomych, inne do drgających. Odrębny zakres zagadnień dotyczy interferencji aerodynamicznej między grupami walców kołowych. Przegląd badań eksperymentalnych i numerycznych na temat oddziaływania wiatru na tego typu przekroje zawarty jest w pracach [65], [98].

Poniżej wymieniono tylko kilka przykładowych opracowań dotyczących opływu walca w zakresie rozważanych w tym rozdziale wartości liczby Reynoldsa od  $1,6 \cdot 10^4$  do  $7,2 \cdot 10^4$ .

W artykule [99] opisano badania w tunelu aerodynamicznym przeprowadzone dla cylindra znajdującego się w przepływie o stałej prędkości i niskiej intensywności turbulencji równej 0,6%. Przy  $Re = 7 \cdot 10^4$ , parametry przepływu przyjmowały następujące wartości:  $St \approx 0,18$ ,  $C_D \approx 1,2$ ,  $C_p \approx 1,0$  w punkcie stagnacji i  $C_p \approx -1,4$  w położeniu odpowiadającym kątowi  $65^\circ$  mierzonemu od czoła przekroju oraz po stronie zawietrznej.

W pracy [100] podjęto temat fluktuacji sił aerodynamicznych działających na walec w podkrytycznym zakresie liczby Reynoldsa. Liczba  $St$  wynosiła 0,202, współczynnik  $C_D$  wahał się od 1,0 do 1,2, a współczynnik  $C_L$  od około -1,25 do 1,25. Średni współczynnik  $C_p$  dla gładkiej powierzchni cylindra, przy  $Re = 6,1 \cdot 10^4$  przyjmował bardzo podobne wartości jak w pracy [99].

Wiele eksperymentów dotyczy modeli mających możliwość ruchu, przeważnie poprzecznego do napływu [101], [102], [103], [104], [105], [106]. Jednak bazowe rozważania zwykle rozpoczynają się od badania opływu modelu sztywnego i nieruchomego.



Rys. 7.2. Klasyfikacja opływu wokół walców o tej samej średnicy, przy  $Re = 6 \cdot 10^4$  [107]

Klasyfikacja opływu dwóch walców (w przepływie płaskim – przekrojów kołowych), w zależności od rodzaju oddziaływań między nimi została dokładnie opisana w pracach [107], [108], [109], [110] i pokazana na rysunku 7.2.

Przy  $Re = 6 \cdot 10^4$ , w zależności od wzajemnego ustawienia cylindrów w stosunku do kąta napływu wiatru, możemy mówić o trzech obszarach oddziaływania. W pierwszym obszarze walce ustawione są obok siebie w stosunku do napływającego wiatru (oba są nawietrzne). Jeżeli rozstaw między ich osiami  $L_w < 1,1D$  ( $D$  – średnica walców), to zachowują się jak jedno ciało i powstaje za nimi jedna ścieżka wirowa. Jeżeli  $1,1D \leq L_w < 3D$  to za walcami powstają dwie ścieżki wirowe: mniejsza i większa, gdy  $L_w \geq 3D$  powstają dwie symetryczne ścieżki. W drugim układzie walce ustawione są jeden za drugim wzdłuż kierunku wiatru. Gdy  $L_w < 2D$ , ścieżka wirowa tworzona jest tylko z wirów odrywających się od nawietrznego przekroju, gdy  $2D \leq L_w < 4D$  również wiry odrywające się z walca zawietrznego uczestniczą w powstaniu ścieżki, natomiast gdy  $L_w \geq 4D$  za walcami tworzą się dwa oddzielne ślady aerodynamiczne. Trzeci obszar odnosi się do kątów napływu wiatru na inne ustawienia walców niż opisane powyżej.

W omawianym w tym rozdziale przypadku obliczeń, przyjęto odległość między słupkami odpowiadającą najmniejszemu możliwemu rozstawowi typowego systemu rusztowania równemu 0,732 m. Zwiększenie rozstawu słupków spowodowałoby zmniejszenie oddziaływania między nimi. Przy średnicy słupka 0,0483 m, stosunek  $L_w$  do  $D$  wynosi 15,25, a więc nie występują inne zjawiska aerodynamiczne niż podstawowy wpływ zaburzeń spowodowanych obecnością nawietrznego cylindra. Wobec powyższego nie istnieje możliwość wystąpienia zjawiska interferencji aerodynamicznej.

## 7.2 Opis domeny obliczeniowej CFD

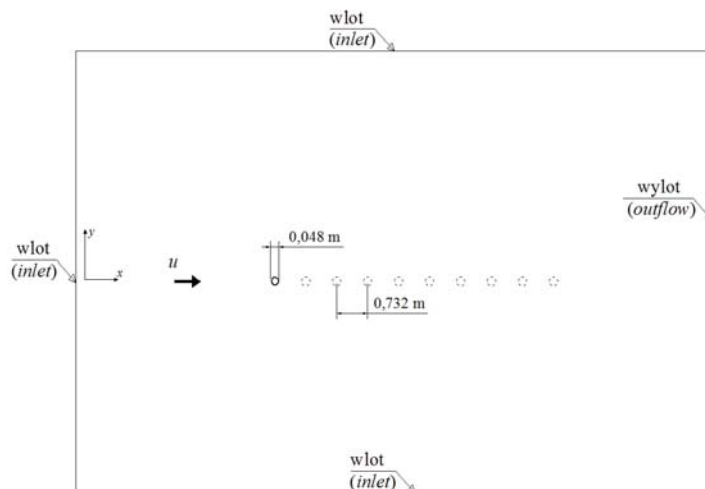
W związku z różnicą w skali geometrycznej obiektów oraz niewystarczającą mocą obliczeniową, symulacje przepływu wokół budynku z rusztowaniem nie były możliwe do wykonania w przestrzeni trójwymiarowej. W związku z tym

analizy dotyczące samych słupków także wykonano dla układu dwuwymiarowego (płaskiego).

Obliczenia wykonano za pomocą programu ANSYS FLUENT 15.0 i 16.2 jako zmienne w czasie. Do rozwiązywania równań opisujących ciśnienie i prędkość w przepływie wybrano solver *Pressure-based* i odpowiednio algorytm SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) oraz *implicit second-order scheme for unsteady terms*. Równania ruchu modelu  $k-\omega$  SST zostały rozwiązane za pomocą dyskretyzacji drugiego rzędu, natomiast człon dyfuzji metodą *upwind scheme*.

Wszystkie domeny obliczeniowe użyte w symulacjach posiadały takie same warunki brzegowe, tj.: wlot (*inlet*), wylot (*outflow*) i ścianę przekroju kołowego zamodelowaną jako gładką (*wall, no shear*), Rys. 7.3. Na wlocie przyjęto stałe wartości prędkości napływu, intensywności turbulencji i skali długości turbulencji równe odpowiednio 5 m/s, 5%, 0,0483 m. Te same wartości zostały przyjęte jako warunki inicjujące symulację, co po przeliczeniu na energię kinetyczną turbulencji oraz jednostkową dyssypację energii kinetycznej turbulencji dało odpowiednio  $k = 0,09375 \text{ m}^2/\text{s}^2$  oraz  $\omega = 11,64619 \text{ 1/s}$ . Przy prędkości wiatru równej 5 m/s liczba Reynoldsa dla pojedynczego słupka wynosiła  $1,6 \cdot 10^4$ .

Wymiary domen obliczeniowych, przyjęte na podstawie rekomendacji sformułowanych w [111], [112] zapewniały brak wpływu domeny na przepływ, ponieważ odległość słupka lub zestawu słupków była równa co najmniej  $5D$  ( $D$  – średnica słupka) od wlotów, oraz  $15D$  od wylotu.



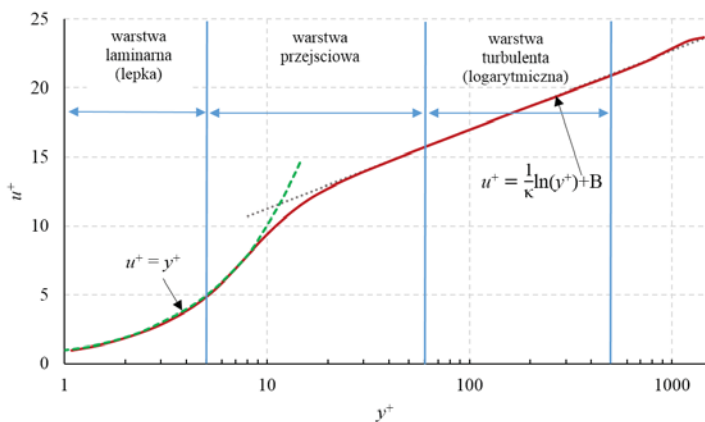
Rys. 7.3. Schemat domeny z rozmieszczeniem słupków i warunkami brzegowymi

W kolejnych punktach opisano trzy przypadki wykonanych symulacji: dla jednego, dwóch i dziesięciu słupków ustawionych jeden za drugim. Tak jak pokazano na rysunku 7.3, słupki dodawano w stałym module równym 0,732 m.

### 7.3 Modelowanie przepływu w warstwie przyściennej

Wszystkie siatki numeryczne wykonano przy użyciu programów ANSYS ICEM oraz ANSYS MESHING. Główną ideą wykonania prawidłowej siatki MOS domeny obliczeniowej jest znalezienie takiej, która pozwoli na uzyskanie prawidłowych wyników przy jak najmniejszym wykorzystaniu czasu i mocy obliczeniowej.

Przepływ przy ścianie, w warstwie przyściennej, cechuje się dużym gradientem prędkości wzdłuż osi prostopadłej do ściany oraz efektami lepkości [113], [96], [114], [115], [63], [116]. Zmiany prędkości w bezpośrednim sąsiedztwie ściany są nieliniowe, a warstwy przepływu dzielimy na: warstwę lepłą, przejściową oraz turbulentną (Rys. 7.4).



Rys. 7.4. Profil bezwymiarowej prędkości wiatru  $u^+$  w warstwie przyściennej [116]

Podstawowymi parametrami numerycznymi opisującymi przepływ przy ścianie są: bezwymiarowy dystans od ściany  $y^+$  oraz bezwymiarowa prędkość  $u^+$ . Pierwszy z nich definiujemy jako:

$$y^+ = \frac{y u_r}{\nu} \quad (40)$$

gdzie:  $y$  – odległość od ściany,  $u_r = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$  – prędkość tarcia ( $\tau_w$ ) o ścianę,  $\nu$  – współczynnik lepkości kinematycznej. Bezwymiarowa prędkość  $u^+$  oznacza stosunek prędkości stycznej ( $u_T$ ) przy ścianie do prędkości tarcia:

$$u^+ = \frac{u_T}{u_r} \quad (41)$$

Przedstawiony na rysunku 7.4 nieliniowy profil wiatru (czerwona krzywa) można wyznaczyć w sposób bezpośredni poprzez wykonanie dokładnej siatki w obszarze warstwy laminarnej i przejściowej. Inną możliwością jest skorzystanie z tzw. funkcji przyściennych (*wall functions*), czyli dopasowania funkcji empirycznych do profilu wiatru w warstwie laminarnej (Rys. 7.4, zielona krzywa – funkcja liniowa), oraz turbulentnej (Rys. 7.4, szara krzywa – funkcja logarytmiczna). W modelu turbulencji  $k-\varepsilon$  zaimplementowano funkcje przyścienne: *standard* i *scalable* oraz *non-equilibrium*. Ich dokładny opis można znaleźć w pracach [116], [117], [118]. Warunkiem prawidłowego działania tych funkcji jest zastosowanie siatki z pierwszą komórką przy ścianie o wysokości  $30 < y^+ < 300$ , w obrębie której używana jest funkcja logarytmiczna.

Używając modelu turbulencji  $k-\omega$  oraz  $k-\varepsilon$  można zamodelować warstwę przyścienną w sposób bezpośredni, pod warunkiem utworzenia pierwszej komórki przy ścianie o wysokości  $y^+ < 1$ . W przypadku modelu  $k-\omega$  należy zastosować korektę ze względu na niską wartość liczby Re w warstwie przyściennej (*Low-Re correction*). Z kolei w modelu  $k-\varepsilon$  należy zastosować funkcję przyścienną *enhanced*.

Model turbulencji  $k-\omega$  SST oraz  $k-\varepsilon$  z funkcją *enhanced* łączą funkcje przyścienne z bezpośrednim modelowaniem, używając odpowiedniego podejścia zależnego od wysokości pierwszej komórki i dodatkowych funkcji pośrednich w obszarze przejściowym. Możliwe jest więc użycie siatki, w której wysokość pierwszej komórki nie spełnia warunku  $y^+ < 1$ , pod warunkiem że głównym celem symulacji nie jest wyznaczenie przepływu w warstwie lepkiej.

Porównanie fragmentów siatek obliczeniowych przy ścianie przy zastosowaniu modelowania bezpośredniego oraz funkcji przyściennych przedstawiono na rysunku 7.5. Funkcje przyścienne pozwalają na zmniejszenie liczby komórek w warstwie przyściennej, a więc i w całej domenie, znacząco skracając czas trwania obliczeń. Jeżeli jednak istotne dla przepływu są efekty lepkości przy ścianie należy użyć modelowania bezpośredniego.



Rys. 7.5. Modelowanie warstwy przyściennej za pomocą: funkcji przyściennych i bezpośredniego modelowania [116], niebieski punkt oznacza środek pierwszej komórki

W obliczeniach przeprowadzonych dla wolnostojących słupków, warstwa przyścienna dookoła każdego z nich składała się ze 150 warstw elementów czworokątnych. Ponadto, każdy słupek został podzielony na 256 odcinków wzdłuż obwodu. Wymiar pierwszej komórki przy ścianie słupka, prostopadły do niej, wynosił 0,00004 m i został wyznaczony tak, aby  $y^+ < 1$ .

Jakość elementów siatek została sprawdzona przy użyciu dwóch parametrów: wydłużenia (*skewness*) i ortogonalności (*orthogonal quality*), które opisano w tabeli 7.1.

Tab. 7.1. Parametry opisujące jakość elementów siatki obliczeniowej w programie ANSYS FLUENT [116]

Jakość elementów					
Doskonała	Bardzo dobra	Dobra	Akceptowalna	Zła	Nieakceptowalna
Wydłużenie elementów ( <i>skewness</i> )					
0-0,25	0,25-0,50	0,50-0,80	0,80-0,94	0,94-0,97	0,97-1
Ortogonalność ( <i>orthogonal quality</i> )					
0,75-1,00	0,70-0,75	0,20-0,69	0,10-0,20	0,001-0,1	0-0,001

## 7.4 Przepływ wokół jednego słupka

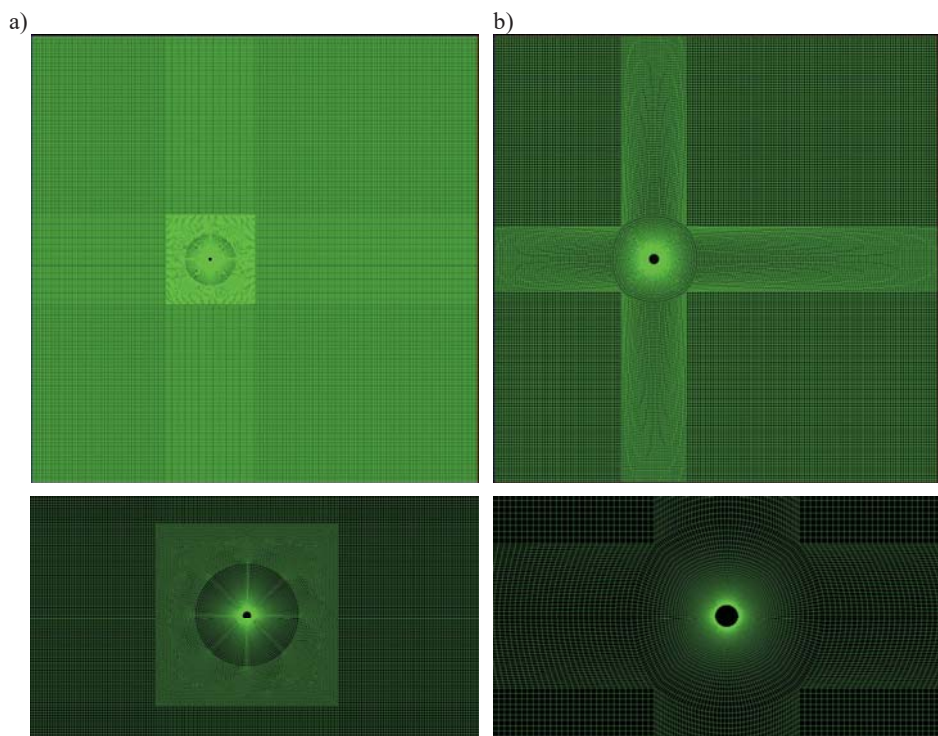
W celu przeprowadzenia symulacji przepływu wokół jednego słupka, wykonano domenę obliczeniową o rozmiarze 5 m × 5 m. Przeanalizowano cztery warianty siatek obliczeniowych: strukturalną, hybrydową, oraz typu *tri* (z elementów trójkątnych) i *quad* (z elementów czworokątnych). Siatka strukturalna (Rys. 7.6a) była symetryczna i składała się z elementów prostokątnych oraz czworokątnych zakrzywionych typu *o-grid*. Siatka hybrydowa (Rys. 7.6b) składała się z elementów prostokątnych w obszarze oddalonym od słupka oraz z elementów trójkątnych wokół warstwy przyściennej. Taki zabieg miał zapewnić zagęszczenie siatki w obszarze odrywania się wirów oraz rozrzedzenie w pozostałej części domeny. Siatki niestrukuralne typu *quad* i *tri* (Rys. 7.7a,b) zostały wygenerowane automatycznie odpowiednio z elementów czworokątnych oraz trójkątnych z zachowaniem warstwy przyściennej przy słupku, zbudowanej z elementów czworokątnych.

Zestawienie liczby komórek, z których zbudowano poszczególne siatki oraz ich jakość pokazano w tabeli 7.2.

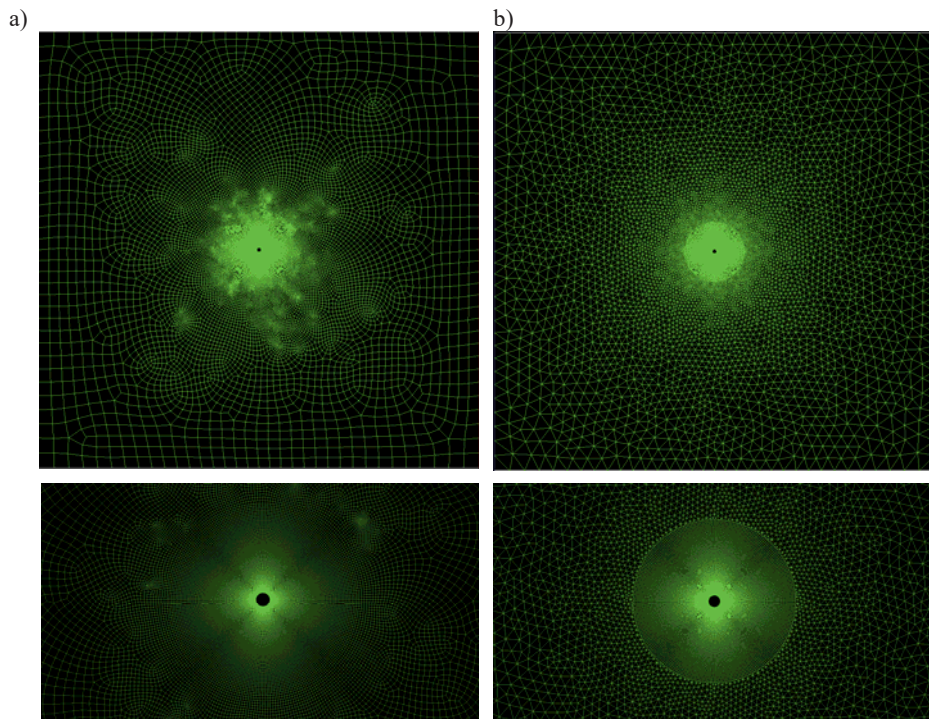
Tab. 7.2. Zestawienie parametrów siatek obliczeniowych użytych w symulacjach opływu wokół jednego słupka

Rodzaj siatki	<i>o-grid</i>	<i>hybrid</i>	<i>quad</i>	<i>tri</i>
Liczba elementów	55 812	141 272	51 647	48 904
Maksymalne wydłużenie elementów	-	-	0,69	0,72
Minimalna ortogonalność	0,79	0,76	0,63	0,55

W każdym przypadku udało się utworzyć siatkę o co najmniej akceptowalnej jakości elementów. Siatka *hybrid* posiadała prawie trzy razy więcej elementów niż siatka typu *tri*, przy jedynie 38% zwiększeniu ich jakości. Zastosowanie siatek strukturalnych (*o-grid*) i hybrydowych daje największą kontrolę nad jakością komórek siatki, ale jest też dużo bardziej pracochłonne niż wykorzystanie generatora siatki typu *quad* lub *tri* jaki został użyty dla siatek niestukturalnych.

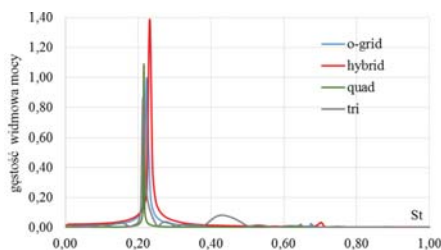


Rys. 7.6. Siatka domeny obliczeniowej o wymiarze  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  oraz siatka w bezpośrednim sąsiedztwie słupka dla przepływu wokół jednego słupka: a) typu *o-grid*, b) hybrydowa

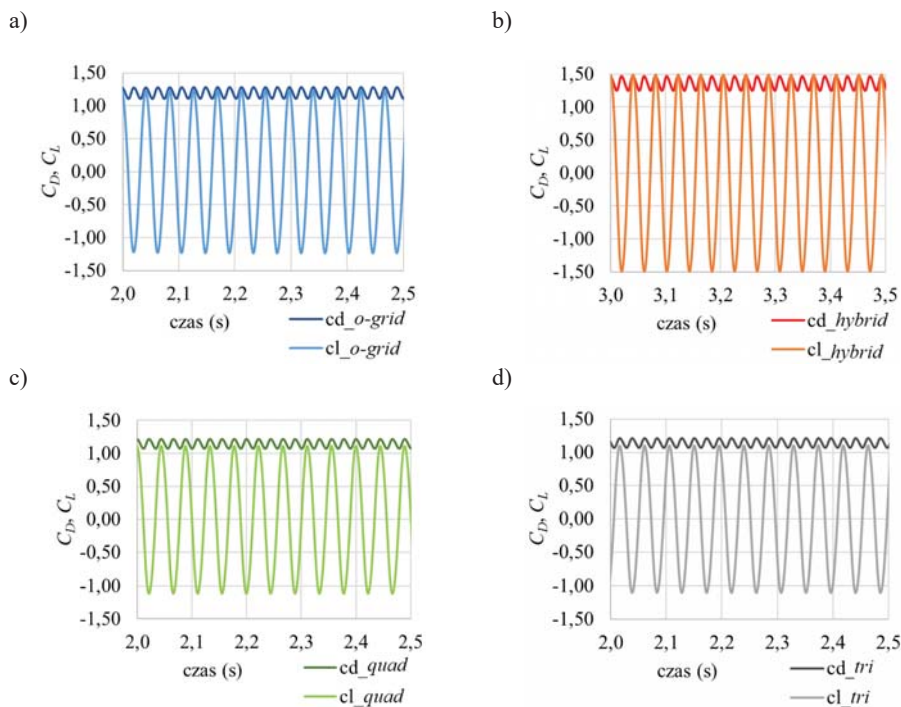


Rys. 7.7. Siatka domeny obliczeniowej o wymiarze  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  oraz siatka w bezpośrednim sąsiedztwie słupka dla przepływu wokół jednego słupka: a) typu *quad*, b) typu *tri*

Początkowe obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem modeli  $k-\epsilon$ : *standard*, RNG oraz *realizable*. Niestety modele te, w wariancie obliczeń zmiennych w czasie, nie były w stanie odtworzyć rzeczywistego oddziaływania wiatru – nie dochodziło do odrywania się wirów z powierzchni słupka. W związku z tym zastosowano model turbulencji  $k-\omega$  SST. Wyniki symulacji uzyskane dla wszystkich czterech rodzajów siatek były do siebie zbliżone. Na rysunku 7.9 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe współczynników  $C_L$  oraz  $C_D$ , a na rysunku 7.8 liczbę Strouhala, która została wyznaczona na podstawie częstotliwości określonych z przebiegu czasowego  $C_L$ .

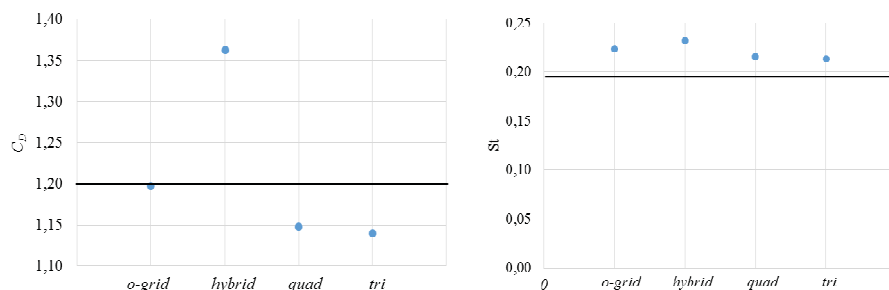


Rys. 7.8. Liczba Strouhala dla siatek: *o-grid*, *hybrid*, *quad* i *tri*



Rys. 7.9. Przebieg czasowe współczynników sił aerodynamicznych  $C_D$  i  $C_L$  dla siatek: a) *o-grid*, b) *hybrid*, c) *quad*, d) *tri*

Średnie wartości  $C_D$  oraz  $St$  zostały zestawione na rysunku 7.10. Ponadto, obliczone wartości odpowiadające  $Re = 1,6 \cdot 10^4$  zestawiono w tabeli 7.3 wraz z wynikami uzyskanymi w innych badaniach. Na podstawie przeglądu literatury opisanego w pracy [97], jako wartości bazowe przyjęto:  $St \approx 0,195$  oraz  $C_D = 1,2$  (poziome kreski na rysunku 7.10). Najbardziej zbliżone do bazowych wyniki uzyskano dla siatek typu *tri* oraz *quad*.

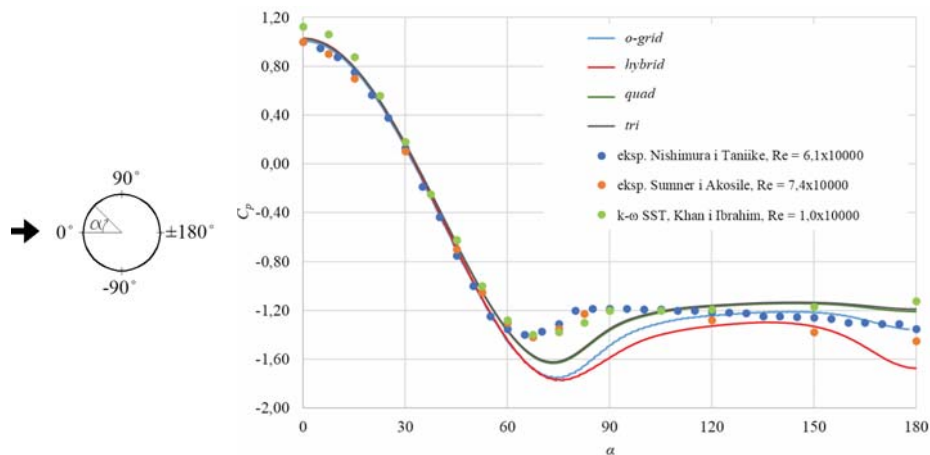


Rys. 7.10. Średnie wartości  $C_D$  oraz  $St$  dla siatek: *o-grid*, *hybrid*, *quad* i *tri*

Tab. 7.3. Porównanie otrzymanych wartości  $C_D$  oraz  $St$  z wynikami innych badań

Badania	Re	$C_D$	St
Norberg [97] (na podstawie przeglądu badań modelowych)	$1,0 \times 10^4$	1,2	0,195
$k-\omega$ SST, Khan i Ibrahim [104]	$1,0 \times 10^4$	1,149	0,200
DES, Nguyen i Nguyen [103]	$1,0 \times 10^4$	1,133	0,200
Eksperyment, Nishimura i Taniike [100]	$6,1 \times 10^4$	$\sim 1,20$	0,202
Eksperyment, Sumner i Akosile [99]	$7,4 \times 10^4$	1,222	$\sim 0,19$
$k-\omega$ SST, <i>quad</i> , obliczenia własne	$1,6 \times 10^4$	1,148	0,216
$k-\omega$ SST, <i>tri</i> , obliczenia własne	$1,6 \times 10^4$	1,140	0,213
$k-\omega$ SST, <i>hybrid</i> , obliczenia własne	$1,6 \times 10^4$	1,362	0,232
$k-\omega$ SST, <i>o-grid</i> , obliczenia własne	$1,6 \times 10^4$	1,197	0,223
$k-\epsilon$ <i>realizable</i> , <i>quad</i> , obliczenia własne	$1,6 \times 10^4$	0,504	0,288

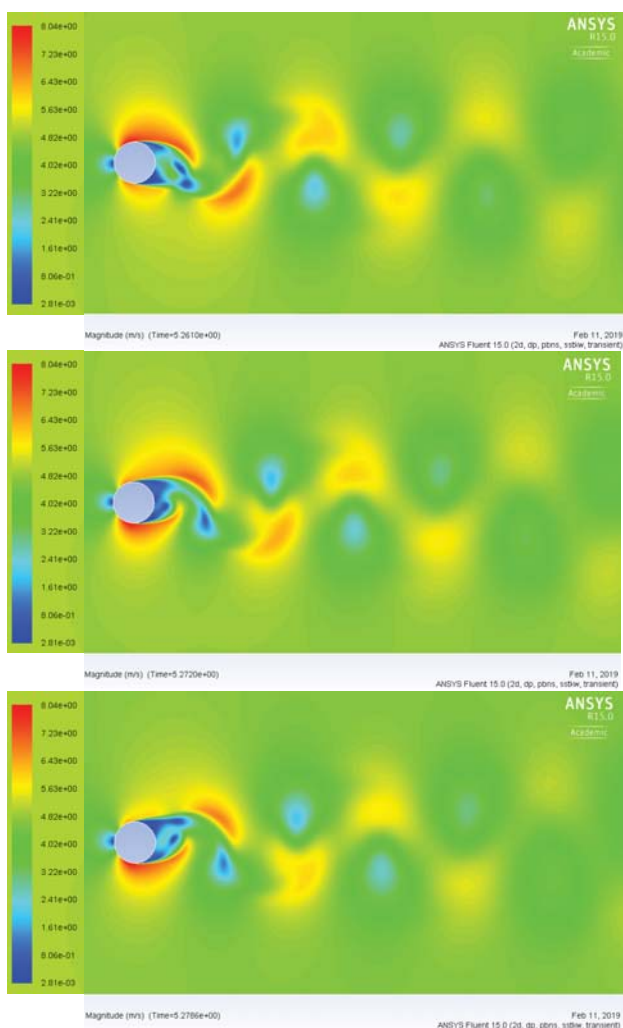
Rozkład wzdłuż obwodu słupka uśrednionego w czasie współczynnika ciśnienia, wraz z porównaniem z analogicznymi badaniami przedstawiono na rysunku 7.11. Wyniki uzyskane dla siatek typu *quad* i *tri* są praktycznie identyczne i najbardziej zbliżone do wyników eksperymentalnych. Minimalna wartość  $C_p$  dla tych siatek jest równa -1,64 dla kąta około  $73^\circ$  ( $0^\circ$  znajduje się w punkcie spiętrzenia po stronie nawietrznej), natomiast dla siatek *o-grid* i *hybrid* -1,76 dla  $76^\circ$ , co jest pewną różnicą w stosunku do danych z literatury, dla których wartość ta wynosi około -1,40 dla  $65^\circ$ . W zakresie kąta od  $0^\circ$  do  $60^\circ$  widać bardzo dobrą zgodność obliczeń z wynikami eksperymentalnymi dla wszystkich typów siatek. Różnice pojawiające się w zakresie od  $60^\circ$  do  $90^\circ$  wynikają z nieznacznego przesunięcia punktu oderwania się wiru od ściany przekroju kołowego. W przypadku własnych symulacji punkt ten pojawia się dalej wzdłuż obwodu. Prawdopodobnie jest to spowodowane zastosowaniem intensywności turbulencji na poziomie 5% jako warunku na wlocie domeny, podczas gdy w porównywanych badaniach wynosiła ona około 0,01%. W zakresie kąta od  $90^\circ$  do  $180^\circ$  wartości po stronie zawietrznej ponownie się zgadzają. Przykładowe bitmapy ze zmianami przepływu w czasie, wraz z widocznym oderwaniem się wirów i ścieżką wirową za słupkiem pokazano na rysunku 7.12.



Rys. 7.11. Rozkład współczynnika średniego ciśnienia  $C_p$  dla siatek: *o-grid*, *hybrid*, *quad* i *tri*, porównanie z wynikami podanymi w [100], [99], [104]

Wartości  $C_D$  oraz  $St$  uzyskane dla poszczególnych siatek były do siebie zbliżone. Dla siatki typu *hybrid*, obliczone wartości  $C_D$ ,  $St$  oraz  $C_p$  najbardziej odbiegały od danych z literatury. Pomimo bardzo dobrej jakości elementów, ze względu na ich dużą liczbę obliczenia w tym wariancie trwały najdłużej. Dodatkowo, wykonanie tego typu siatki jest bardzo pracochłonne. Ponadto, ze względu na bardzo wąskie komórki może nawet doprowadzić do uzyskania nieprawidłowych wyników, ponieważ układ komórek może wymuszać kierunek przepływu. Stąd też zdecydowano się pozostać przy generatorach siatek nie-strukturalnych typu *quad* i *tri*, które zapewniają dokładność wyników na akceptowalnym poziomie i są łatwiejsze do wykonania.

Pomimo nieuzyskania dokładnego punktu oderwania strugi powietrza od powierzchni słupka, wartości  $C_D$  uznano za zgodne w zadowalającym stopniu z danymi zgromadzonymi z literatury. Można więc stwierdzić, że użyty model turbulencji  $k-\omega$  SST oraz zastosowane warianty siatek są prawidłowe. Dalsze obliczenia przeprowadzono dla parametrów określonych na podstawie przedstawionych symulacji.

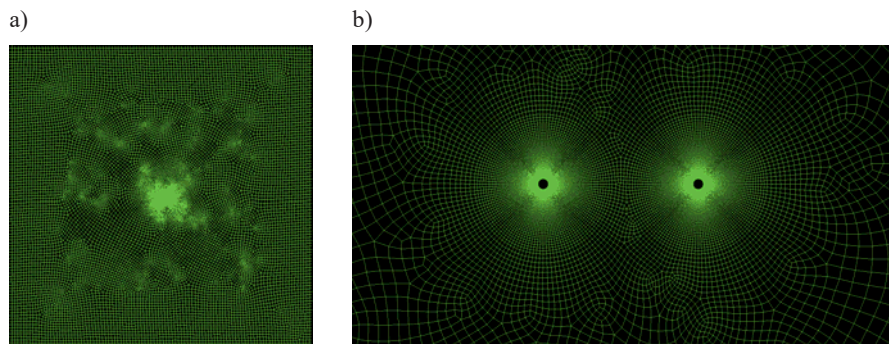


Rys. 7.12. Ścieżka wirowa za pojedynczym słupkiem w chwili: 5,2610 s, 5,2720 s, 5,2786 s od rozpoczęcia symulacji

## 7.5 Przepływ wokół dwóch słupków

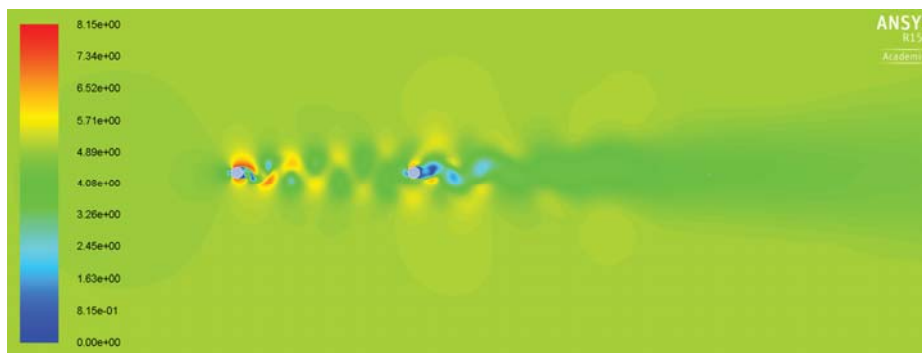
W przypadku opływu wokół dwóch słupków oddalonych od siebie o 0,732 m przyjęto domenę obliczeniową o wymiarze  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ . Odległość od słupków do każdej ze ścian wynosiła  $20 \times 0,732 \text{ m}$ , a więc krawędzie zewnętrzne domeny nie blokowały przepływu. Na podstawie wniosków wyciągniętych z analiz dla jednego słupka wykonano siatkę obliczeniową złożoną z 112220 elementów czworokątnych typu *quad*.

Najgorsze, pojedyncze elementy siatki miały wydłużenie na poziomie 0,67 oraz ortogonalność równą 0,68. Siatka obliczeniowa utworzona dla przepływu wokół dwóch słupków została przedstawiona na rysunku 7.13.



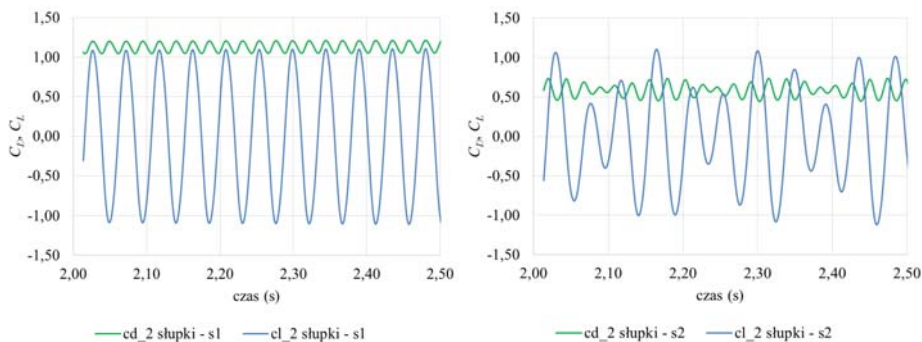
Rys. 7.13. Siatka o rozmiarze 30 m x 30 m dla przepływu wokół dwóch słupków: a) w całej domenie obliczeniowej, b) w bezpośrednim sąsiedztwie słupków

Symulację opływu, wykonano za pomocą modelu turbulencji  $k-\omega$  SST, przy prędkości wiatru równej 5 m/s ( $Re = 1,6 \cdot 10^4$ ), intensywności turbulencji na poziomie 5% oraz skali długości turbulencji równej 0,0483 m. Przyjęto pięć kierunków napływu wiatru:  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ . Kąt napływu równy  $0^\circ$  oznaczał działanie wiatru wzdłuż linii ustawienia słupków (wzdłuż osi  $x$  domeny). Słupki oznaczono, od lewej, jako  $s1$  i  $s2$ .

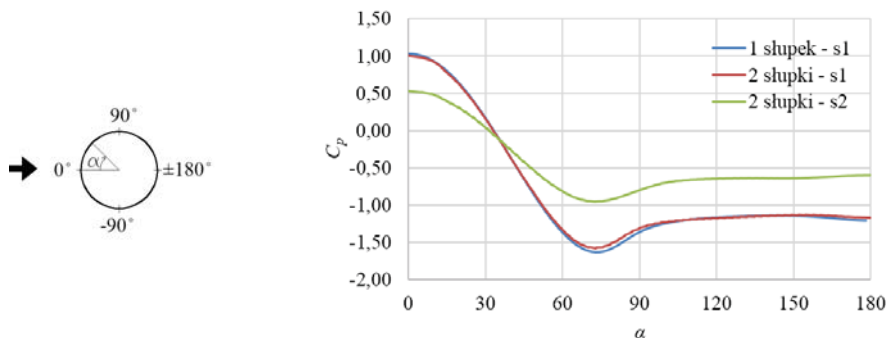


Rys. 7.14. Chwilowa prędkość wiatru dla opływu wokół dwóch słupków, kąt napływu  $0^\circ$

Na rysunku 7.14, przy przepływie wzdłuż domeny (kąt  $0^\circ$ ) można zauważyć, że słupek zawietrzny  $s2$  znajduje się w śladzie aerodynamicznym nawietrznego  $s1$  (por. [107], [108], [109], [110]), a więc w obszarze o zmniejszonej prędkości. Wpływa to na współczynniki oporu aerodynamicznego oraz ciśnienia na powierzchni przekroju zawietrznego, co pokazano odpowiednio na rysunkach 7.15 i 7.16.

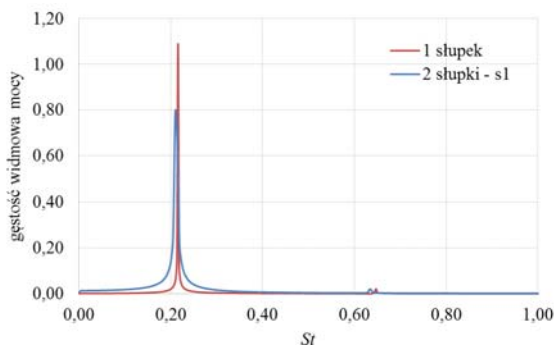


Rys. 7.15. Przebiegi czasowe  $C_D$  i  $C_L$  w przypadku opływu wokół dwóch słupków: s1 i s2



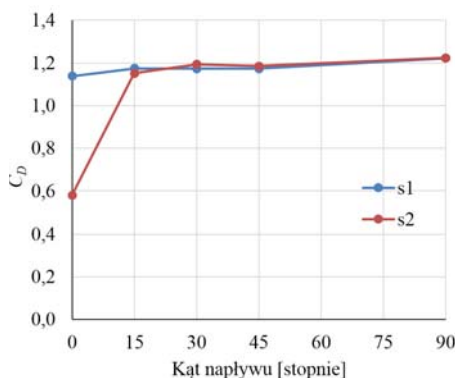
Rys. 7.16. Rozkład współczynnika średniego ciśnienia  $C_p$  na ścianach słupków w przypadku opływu wokół jednego i dwóch słupków

Dodatkowo, na rysunku 7.17 przedstawiono porównanie liczby Strouhala wyznaczonej dla słupka nawietrznego w przypadkach opływu jednego i dwóch słupków. Wartości liczby  $St$  są zgodne dla obu przypadków.



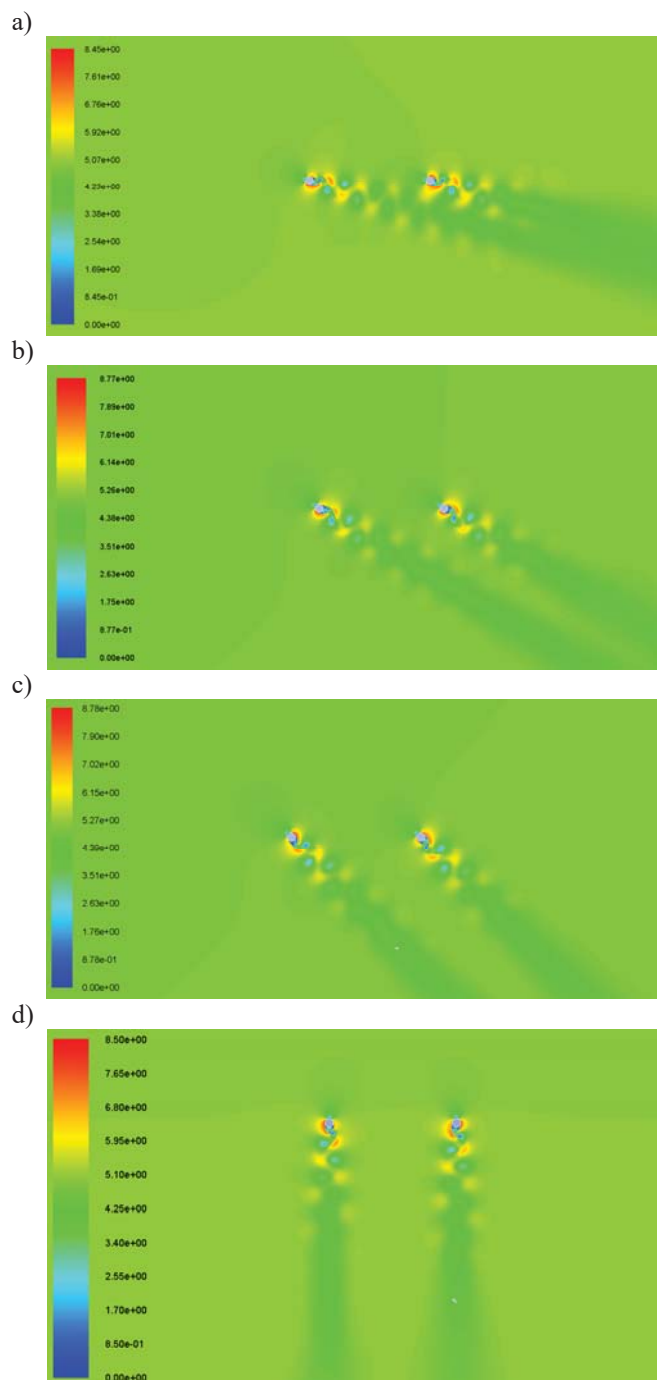
Rys. 7.17. Liczba  $St$  w przypadku opływu wokół jednego i dwóch słupków – dla słupka s1

Na podstawie zestawienia współczynników  $C_D$  dla różnych kątów napływu wiatru pokazanego na rysunku 7.18, można zauważyć ponad dwukrotne zmniejszenie wartości dla zawietrznego słupka (s2) w stosunku do nawietrznego (s1), przy kącie równym  $0^\circ$ . Przy innych kątach wartość  $C_D$  dla słupka s2 zbliża się do wartości dla s1, co wynika ze zmiany położenia śladu aerodynamicznego. Oznacza to, że zmniejszony współczynnik na kolejnych słupkach występuje tylko dla zakresu kąta napływu równego około  $0^\circ$ .



Rys. 7.18. Wartość współczynnika  $C_D$  dla dwóch słupków w zależności od kąta natarcia wiatru

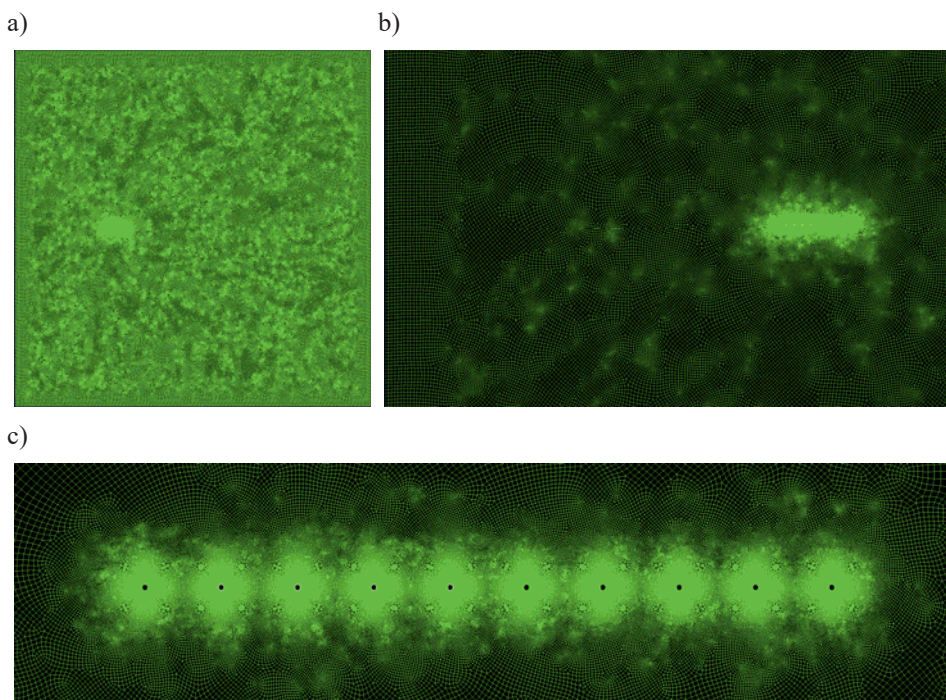
Jak pokazano na rysunku 7.19a, przy kącie napływu wiatru równym  $15^\circ$ , drugi słupek prawie nie znajduje się w śladzie aerodynamicznym pierwszego. Przy kątach  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$  (Rys. 7.19b – Rys. 7.19d), efekt przesłaniania się nie występuje. W rzeczywistości kierunek działania wiatru nie jest stały, a więc należy zawsze uwzględniać maksymalną wartość współczynnika oporu  $C_D$  dla słupka, czyli w sytuacji kiedy nie jest on przesłonięty i wiatr oddziałuje bezpośrednio na niego.



Rys. 7.19. Chwilowa prędkość wiatru w przypadku opływu wokół dwóch słupków, kąt napływu wiatru: a)  $15^\circ$ , b)  $30^\circ$ , c)  $45^\circ$ , d)  $90^\circ$

## 7.6 Przepływ wokół dziesięciu słupków

Dla opływu wokół dziesięciu słupków oddalonych od siebie o moduł 0,732 m przyjęto domenę obliczeniową o wymiarze  $135\text{ m} \times 135\text{ m}$ . Brzegi domeny nie zaburzały przepływu dzięki umieszczeniu pierwszego słupka w odległości wynoszącej pięć-, dziesięcio- i piętnastokrotność dystansu pomiędzy pierwszym a ostatnim słupkiem, liczonego odpowiednio od wlotu przedniego, od wlotów bocznych i od wylotu z domeny (por. Rys. 7.3). Siatka obliczeniowa składała się z elementów czworokątnych typu *quad* (754901 elementów), podobnie jak w przypadku jednego i dwóch słupków. Najgorsze, pojedyncze elementy cechowało wydłużenie na poziomie 0,87 oraz ortogonalność równa 0,467. Całą domenę oraz jej szczegóły przy słupkach pokazano na rysunku 7.20.



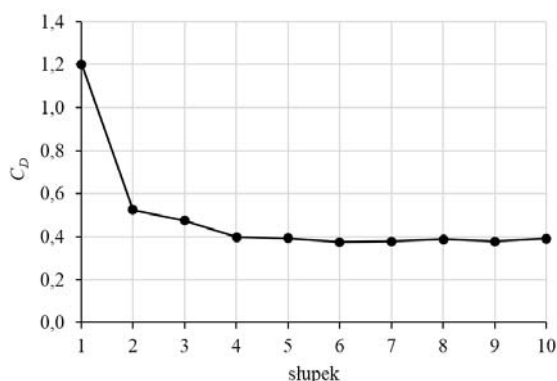
Rys. 7.20. Siatka o rozmiarze  $135\text{ m} \times 135\text{ m}$  dla przepływu wokół dziesięciu słupków: a) w całej domenie, b) powiększenie, c) szczegół w bezpośrednim sąsiedztwie słupków

Rysunek 7.21 pokazuje, że w przypadku kąta napływu wiatru równego  $0^\circ$  (wzdłuż linii słupków), pierwszy słupek jest nawietrzny a dziewięć kolejnych zawietrznych. Pierwsze trzy słupki znajdują się w obszarze o prędkości równej prędkości napływu, natomiast prędkość przed i za kolejnymi słupkami maleje. Widać to również na wykresie współczynnika  $C_D$  dla każdego z dziesięciu przekrojów, przedstawionym na rysunku 7.22. Podobnie jak w przypadku dwóch

słupków, przy kącie napływu równym  $0^\circ$ , można zaobserwować ponad dwukrotny spadek wartości  $C_D$  dla drugiego przekroju, w stosunku do pierwszego. Od czwartego do dziesiątego słupka wartość  $C_D$  stabilizuje się i wynosi około 0,4.



Rys. 7.21. Chwilowa prędkość wiatru w przypadku opływu wokół dziesięciu słupków kątem napływu wiatru  $0^\circ$



Rys. 7.22. Średni współczynnik siły oporu  $C_D$  dla dziesięciu słupków, kątem napływu wiatru  $0^\circ$

## 7.7 Podsumowanie

Na podstawie symulacji opływu wokół wolnostojących słupków rusztowania do dalszych obliczeń wybrano siatki typu *quad* i *tri* oraz model turbulencji *k- $\omega$  SST*. Dodatkowo zauważono, że efekt przesłaniania się słupków występuje jedynie dla ograniczonego kąta napływu wiatru, od  $0^\circ$  do  $15^\circ$ , co oznacza, że ze względu na zmienność kierunku wiatru w rzeczywistości, należy zawsze uwzględniać maksymalną wartość współczynnika  $C_D$  dla każdego słupka.



## 8 SYMULACJE PRZEPŁYWU WOKÓŁ BUDYNKU Z RUSZTOWANIEM

### 8.1 Wybór obiektu w skali naturalnej

W celu dodatkowej walidacji przyjętego modelu obliczeniowego wykonano symulacje przepływu dla budynku z rusztowaniem, na którym przeprowadzono pomiary wiatru w skali naturalnej. Na podstawie analiz prędkości i kierunku wiatru zmierzonych w trakcie badań in-situ na poszczególnych rusztowaniach, które szczegółowo opisano w rozdziale 6, do dalszych symulacji wybrano obiekt P10. Była to konstrukcja ustawiona przy budynku biurowym o prostokątnym kształcie, w którego otoczeniu znajdowały się dwa inne obiekty (Rys. 8.1). W promieniu 150 m analizowany budynek był najwyższym obiektem, a jego wymiary były następujące: długość  $L = 88$  m, szerokość  $D = 16$  m, wysokość  $H = 15,5$  m. Rusztowanie składało się z 16 rzędów ramek i 8 poziomów pomostów. Całkowita długość wynosiła 45 m, a wysokość 16 m. Rusztowanie ustawiono wzdłuż wschodniej elewacji budynku, zaczynając w połowie, a kończąc przy północno-wschodnim narożu. Wewnętrzne słupki znajdowały się w odległości około 0,25 m od fasady budynku, zewnętrzne 0,72 m dalej. Ostatnia ramka była wysunięta poza naroże budynku o około 0,50 m. Widok budynku z rusztowaniem przedstawiono na rysunku 8.2.

Poniżej ostatniego poziomu pomostów zamocowano anemometry, zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 6. Schemat rozmieszczenia anemometrów 2D pokazano na rysunku 8.3a, a ich rzeczywiste usytuowanie na rysunku 8.4a. Na dachu budynku, w okolicy siódmego słupka z prawej, ustawiono maszt, na którym na wysokości 3 m zamontowano anemometr 3D (Rys. 8.3b i Rys. 8.4b).

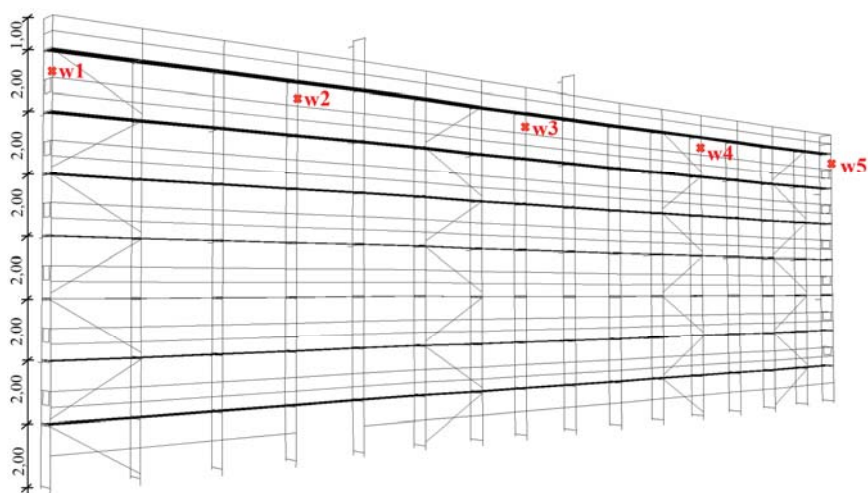


Rys. 8.1. Widok budynku (na czerwono) z góry [źródło: <https://www.geoportal.gov.pl/>]

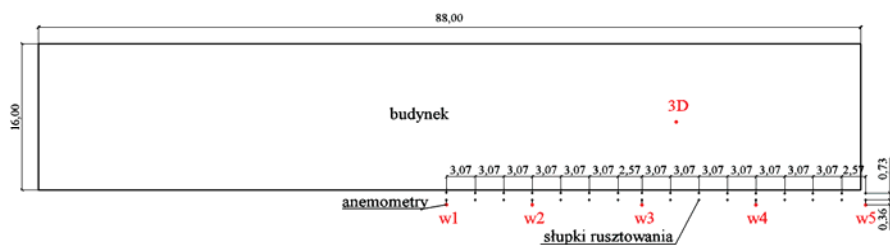


Rys. 8.2. Widok rusztowania P10 ustawionego przy budynku [fot. P. Jamińska-Gadomska]

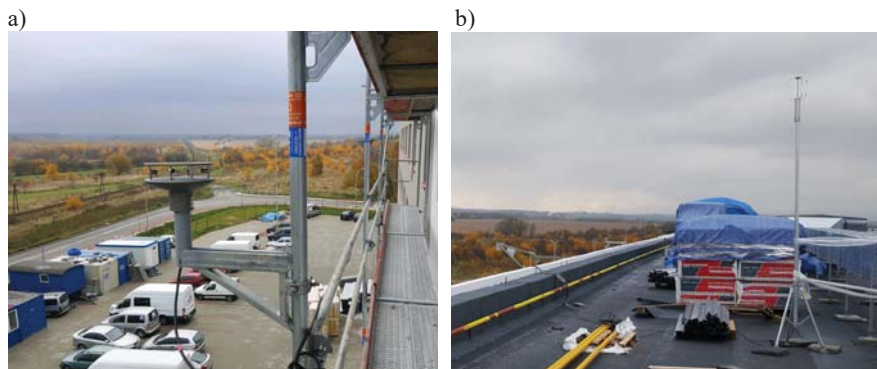
a)



b)



Rys. 8.3. Schemat rusztowania P10 z rozmieszczeniem anemometrów 2D (w1–w5) i 3D, wymiary w [m]: a) widok izometryczny, b) widok z góry na rusztowanie i budynek



Rys. 8.4. Sposób zamontowania i ustawienia anemometrów: a) 2D, b) 3D na rusztowaniu P10 [fot. P. Jamińska-Gadomska]

Do walidacji symulacji CFD wykorzystano dwugodzinne przebiegi czasowe zarejestrowane w trakcie pomiarów prędkości oraz kierunku wiatru wykonanych 26 października 2016 roku. Na podstawie zmierzonych wartości chwilowych prędkości (trzy składowe z anemometru 3D, pięć wypadkowych po jednej z każdego anemometru 2D) oraz kierunków (pięć kierunków po jednym z każdego anemometru 2D) wyznaczono wartości średnie 10-minutowe, wykorzystując do tego celu średnią ruchomą. Dodatkowo, obliczono odchylenia standardowe składowych prędkości oraz poziomego kąta natarcia wiatru i określono intensywność turbulencji.

W celu wyznaczenia pionowego profilu średniej prędkości wiatru przyjęto prędkość referencyjną na wysokości ustawienia anemometru 3D nad ziemią,  $z_{ref} = 19$  m, zakładając że występuje tam przepływ niezaburzony. Wyznaczono średnią 10-minutową wypadkowej poziomej zarejestrowanej na anemometrze 3D,  $u_{ref} = 4,5$  m/s. Odpowiadała ona najmniejszym fluktuacjom kąta natarcia wiatru dla średniej ruchomej 10-minutowej, co miało miejsce przy najniższym odchyleniu standardowym kąta napływu ( $\sigma = 9,72^\circ$ ). Ze względu na lokalizację budynku z rusztowaniem na przedmieściu, przyjęto wymiar chropowatości  $z_0 = 0,3$  m, jak dla kategorii III terenu, zgodnie z [21]. Pionowy profil wiatru wyznaczono przy użyciu wzorów (36) i (37). Walidacja wyników została przeprowadzona dla średnich 10-minutowych odczytanych z anemometrów 2D umieszczonych na wysokości 13 m. W związku z tym, z pionowego profilu wiatru, dla tej wysokości wyznaczono wartość prędkości wiatru w przepływie niezaburzonym, która wynosiła  $u = 4,117$  m/s. Uzyskaną w ten sposób prędkość rozłożono na składowe, zgodnie z kątem natarcia wiatru odczytanym na anemometrze 3D. Tak wyznaczone wartości posłużyły jako warunki brzegowe i inicjujące w symulacji CFD. Liczba Reynoldsa wyznaczona na podstawie wymiarów budynku wynosiła  $2,4 \cdot 10^7$ . Reasumując, na podstawie prędkości i kierunku wiatru zmierzonych in-situ na anemometrze 3D przeprowadzono

symulacje, a walidacja polegała na porównaniu kąta i prędkości wiatru odczytanych z anemometrów 2D w badaniach in-situ i symulacjach.

Analizy opisane w niniejszym rozdziale dotyczą:

- analizy wrażliwości siatki obliczeniowej,
- walidacji symulacji (modelu CFD) na podstawie badań in-situ.

W celu kompleksowego przedstawienia zagadnienia opływu wiatru wokół budynku z rusztowaniem dodatkowo przeprowadzono studia parametryczne, które pozwoliły porównać wybrane parametry opisujące przepływ. W symulacjach wykorzystano następujące modele:

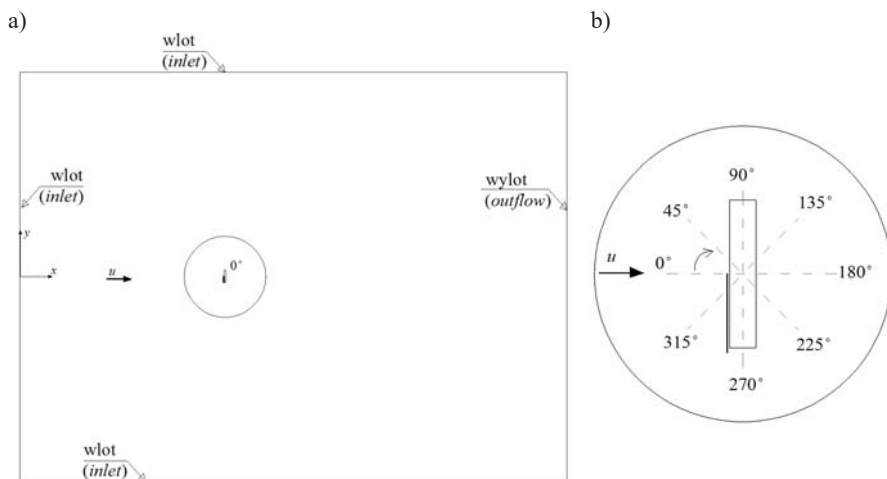
- budynek z rusztowaniem (B+R),
- budynek z wnękami okiennymi i rusztowaniem (BW+R),
- budynek bez rusztowania (B),
- budynek z wnękami okiennymi bez rusztowania (BW).

Dodatkowo, analizowano oddalenie słupków rusztowania od fasady budynku oraz zmiany kąta napływu wiatru.

## 8.2 Warunki brzegowe symulacji CFD

Obliczenia wykonano przy użyciu programu ANSYS FLUENT 15 dla dwuwymiarowego pola prędkości i przepływu niestacjonarnego. Do rozwiązania równań opisujących ciśnienie i prędkość w przepływie wybrano odpowiednio algorytm SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) oraz *implicit second-order scheme for unsteady terms*. Równania ruchu modelu turbulencji  $k-\omega$  SST zostały rozwiązane za pomocą dyskretyzacji drugiego rzędu, natomiast człon dyfuzji metodą *upwind scheme*. Wybór poszczególnych metod został dokonany na podstawie symulacji opływu wokół wolnostojących słupków przedstawionych w rozdziale 7.

Analiza CFD została przeprowadzona dla płaskiego przekroju poziomego budynku z rusztowaniem, wykonanego na wysokości montażu anemometrów 2D równej 13 m. Budynek zamodelowano jako prostokąt, a rusztowanie w miejscu ustawienia słupków przedstawiono jako okręgi o średnicy 0,048 m. Na wysokości analizowanego przekroju budynek był najwyższym obiektem w promieniu 100 m, a więc nie było konieczności modelowania innych budowli. Domena obliczeniowa miała wymiary 4000 m x 3000 m i spełniała warunki przepływu zalecane w [111], Rys. 8.5. Odległość krawędzi budynku od granic zewnętrznych domeny wynosiła w każdym kierunku co najmniej 17 długości budynku, co przy wymiarach budynku 88 m x 16 m dało współczynnik blokady (stosunek największego wymiaru budynku do najmniejszego wymiaru domeny) równy 0,17%. Tak niska wartość współczynnika blokady zapewniła brak wpływu ścian domeny na przepływ w jej wnętrzu.

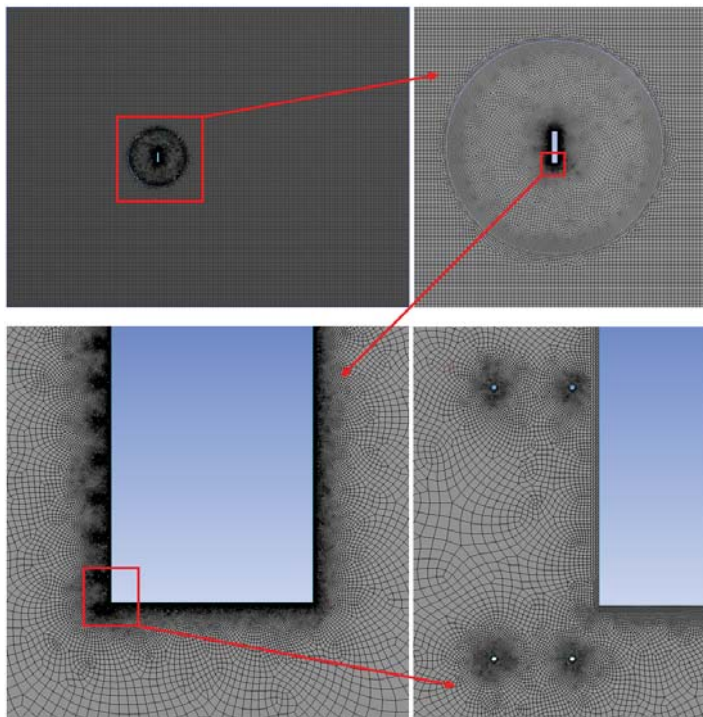


Rys. 8.5. Domena obliczeniowa budynku z rusztowaniem P10: a) domena z warunkami brzegowymi, b) schemat budynku wraz z kątami napływu wiatru (położenie rusztowania oznaczono kreską)

Na wlotach domeny przyjęto stałą wartość prędkości wiatru  $u = 4,117$  m/s, rozłożoną na dwie składowe, intensywność turbulencji równą 15,4% oraz skalę długości turbulencji równą 88 m. Wartości te zostały również przyjęte jako warunki inicjujące symulację. Ze względu na błąd pomiarowy kąta napływu wiatru wynoszący  $1^\circ$ , wynikający z dokładności anemometrów oraz możliwy błąd ustawienia anemometru w warunkach pomiaru, obliczenia walidacyjne wykonano dla kąta napływu  $279^\circ$  odczytanego z anemometru 3D (kąąt początkowy) oraz dla kątów  $\pm 2^\circ$ .

### 8.3 Siatka domeny obliczeniowej

Siatka domeny obliczeniowej została zbudowana z elementów czworokątnych typu *quad*. Jak pokazano na rysunku 8.6, składała się z dwóch części: koła o promieniu 300 m (zapewniającego możliwość obrotu obiektu) oraz prostokąta o wymiarach domeny obliczeniowej. Siatka pomiędzy tymi częściami była zgodna, a połączenie obu powierzchni zapewniono przy użyciu warunku *interface*.



Rys. 8.6. Siatka domeny obliczeniowej

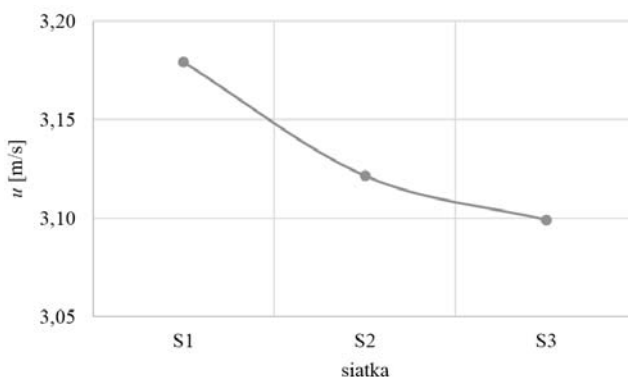
Podstawowym problemem przy analizie była różnica skali pomiędzy budynkiem a słupkami rusztowania. Wielkość domeny obliczeniowej musiała być dostosowana do wymiarów budynku, tak aby umożliwić odrywanie się wirów i rozwinięcie ścieżki wirowej za budynkiem. Natomiast najmniejszy wymiar komórki wynikał z wielkości słupka (okręgu odwzorowującego jego przekrój poprzeczny). Zastosowany podział wzdłuż obwodu słupka również musiał umożliwiać odrywanie się wirów z jego powierzchni. Dodatkowo, wielkość najmniejszych komórek zdeterminowana była koniecznością odtworzenia warstwy przyściennej przy budynku i słupkach, czyli wszystkich elementach typu ściana (*wall*). Zbudowanie siatki obliczeniowej z wartością  $y^+ > 30$  oznaczałoby utworzenie pierwszej komórki przy słupku większej niż sam słupek, stąd wysokość pierwszej komórki przy elementach typu ściana była większa niż opisana w rozdziale 7 i wynosiła 0,005 m, czyli  $y^+ \approx 12$ .

W celu dobrania optymalnej siatki ze względu na dokładność obliczeń oraz czas ich trwania, wykonano analizę wrażliwości. Analiza polegała na przyjęciu wariantów o różnej wielkości elementów i zbadaniu wpływu zmian ich wielkości i liczby na wybrane wyniki. W tym celu przyjęto trzy siatki obliczeniowe, o rzadkich – S1, normalnych – S2 i gęstych – S3 oczkach. Liczba elementów każdej z siatek oraz parametry definiujące ich jakość przedstawiono w tabeli 8.1.

Tab. 8.1. Charakterystyka siatek obliczeniowych

Siatka	S1	S2	S3
Liczba elementów	230 518	267 122	355 761
Maksymalne wydłużenie elementów	0,88	0,89	0,83
Minimalna ortogonalność	0,28	0,42	0,51

Ze względu na opisane powyżej problemy wynikające z różnicy skali nie udało się otrzymać wzrostu liczby elementów siatki o zalecaną wartość 1,4 [111]. Stosunek liczby elementów siatek S3 do S2 oraz S2 do S1 wynosił odpowiednio 1,3 oraz 1,2. Wpływ liczby elementów na jakość uzyskanych wyników zbadano na podstawie prędkości wiatru w punkcie lokalizacji anemometru w1 (Rys. 8.7). Ponieważ, wraz ze wzrostem liczby elementów wyniki zmieniły się nieznacznie (między siatką S3 i S2 oraz S2 i S1 różnica względna wynosiła odpowiednio 0,7% oraz 1,8%), przyjęto że siatka S2 jest wystarczająca do dalszych symulacji i zapewnia poprawne rozwiązanie.



Rys. 8.7. Prędkość wiatru w punkcie ustawienia anemometru w1 dla siatek o różnym zagęszczeniu

Wszystkie siatki obliczeniowe opisane w kolejnych rozdziałach posiadały taką samą liczbę podziałów krawędzi, liczbę elementów warstwy przyściennej, tempo wzrostu rozmiaru komórek oraz wielkość maksymalnej komórki jak siatka S2.

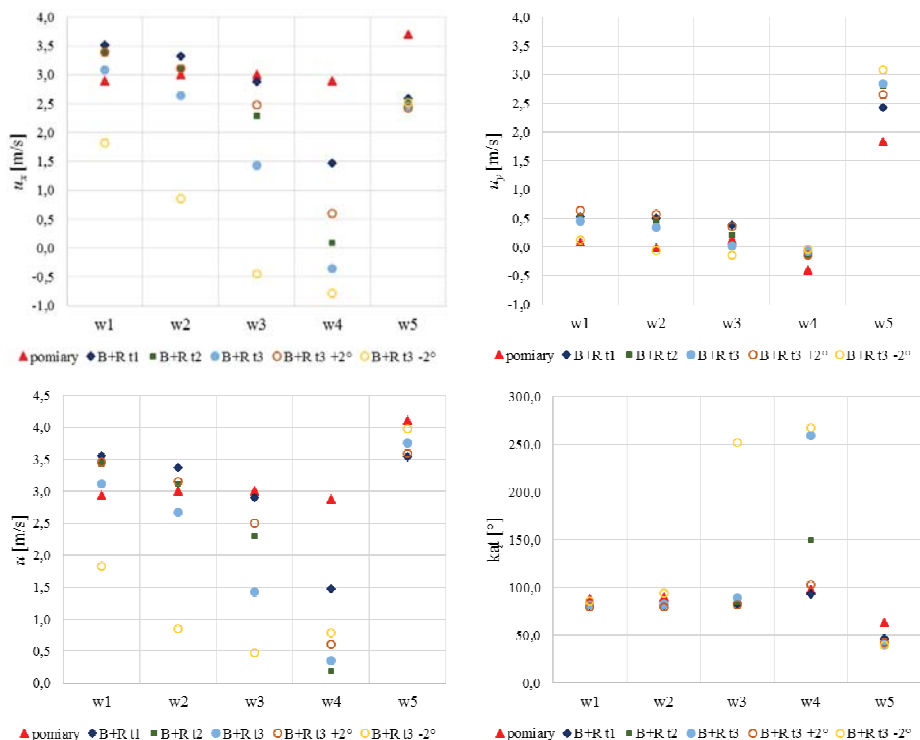
## 8.4 Walidacja modelu CFD

Stosując procedurę walidacyjną opisaną w rozdziale 8.1 porównano wyniki symulacji i badań in-situ. W tabeli 8.2 zestawiono wyniki pomiarów in-situ podając dwie składowe prędkości wiatru ( $u_x$ ,  $u_y$ ), wypadkową prędkość ( $u$ ) oraz kąt napływu dla każdego anemometru 2D.

Tab. 8.2. Wartości średnie 10-minutowe prędkości oraz kierunku wiatru odczytane z anemometrów 2D

	w1	w2	w3	w4	w5
$u_x$ [m/s]	2,9	3,0	3,0	2,9	3,7
$u_y$ [m/s]	0,1	0,0	0,1	-0,4	1,8
$u$ [m/s]	2,9	3,0	3,0	2,9	4,1
kąt [°]	88	90	88	98	64

Dane pomiarowe porównano z wynikami obliczeń, które odczytano w punktach odpowiadających lokalizacji anemometrów w1–w5, czyli 0,36 m przed zewnętrznym słupkiem rusztowania (por. Rys. 8.3b). Porównanie prędkości i kierunków pokazano na rysunku 8.8.

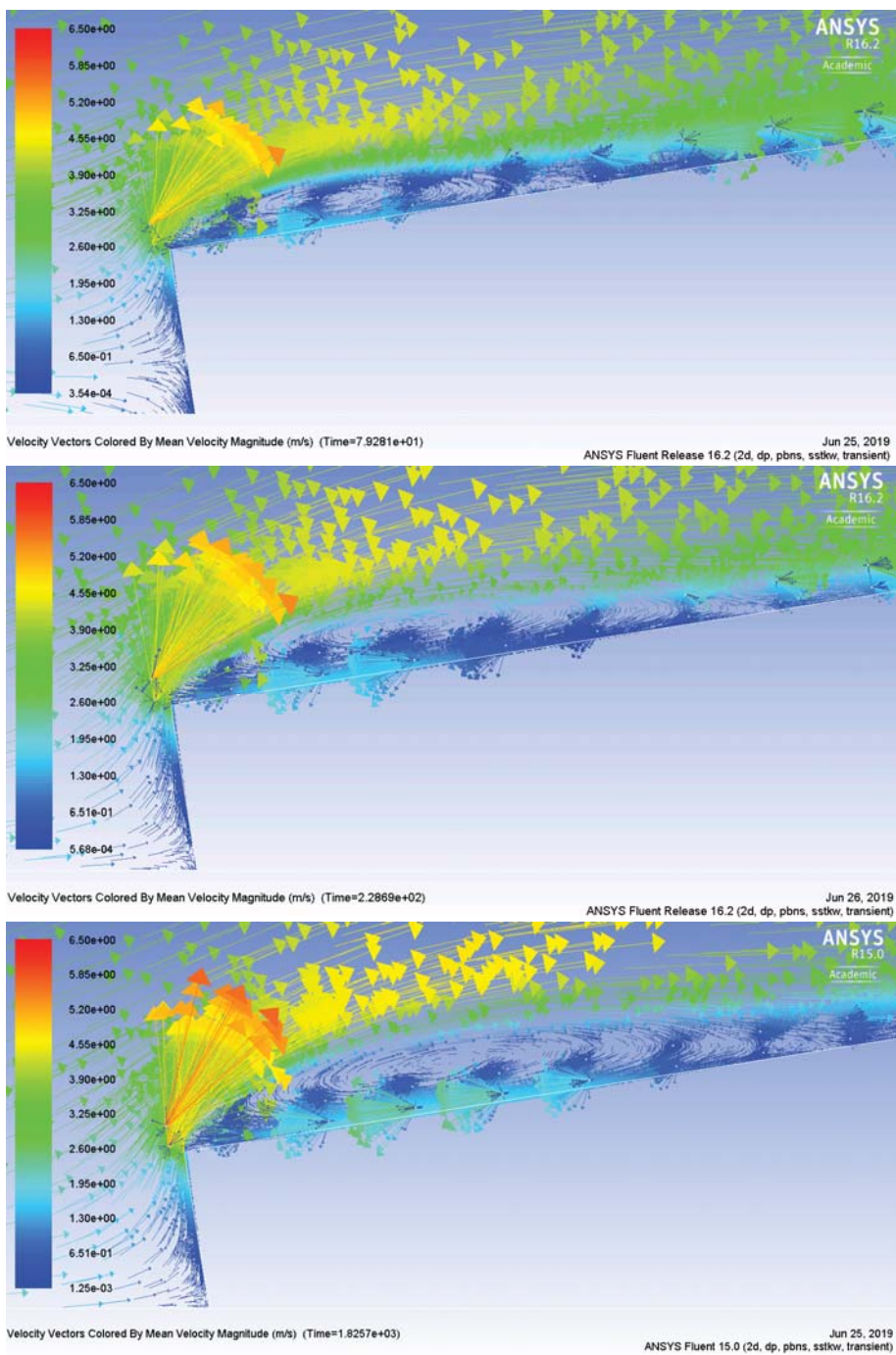


Rys. 8.8. Prędkość oraz kierunek wiatru w punktach w1–w5 dla budynku z rusztowaniem (B+R), uśrednione w różnych okresach czasu: t1, t2, t3, porównanie z wartościami zmierzonymi

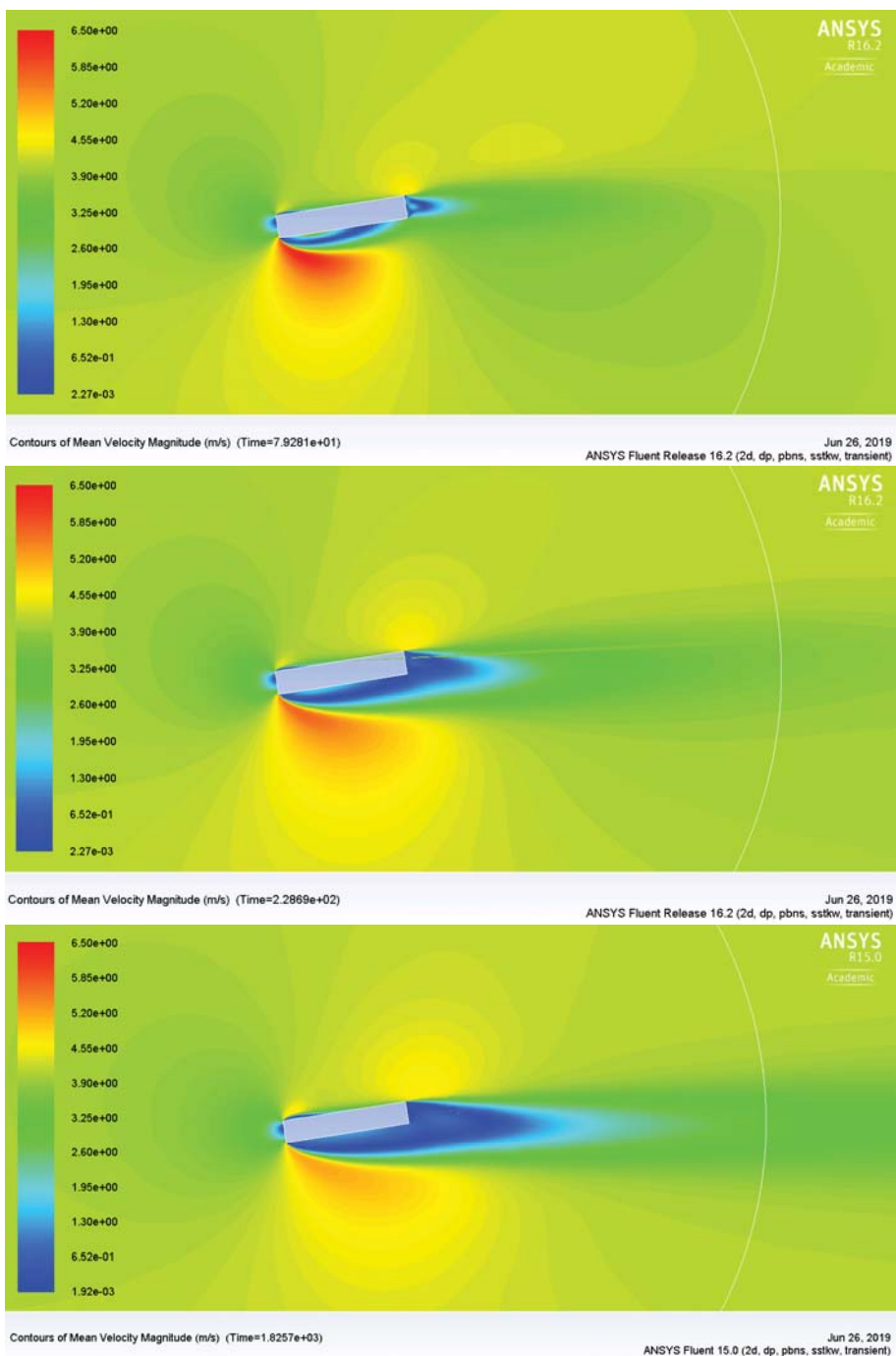
Obliczenia przeprowadzono dla kąta  $279^\circ$  jako zmienne w czasie, aż do uzyskania przepływu ustalonego. W celu sprawdzenia wpływu czasu uśredniania wyników na prędkość i kierunek wiatru pokazano wyniki dla trzech okresów uśredniania:  $t_1$ ,  $t_2$  i  $t_3$ , które wynosiły odpowiednio 79 s, 229 s i 1826 s. Dodatkowo dla czasu uśredniania  $t_3$  zaprezentowano wyniki przy zmianie kąta o  $\pm 2^\circ$  w stosunku do kąta bazowego  $279^\circ$ .

W zależności od czasu, w którym uśredniono wyniki poziom zbieżności z pomiarami był różny. Najlepszą zgodność wartości składowych oraz wypadkowej prędkości zaobserwowano dla okresu uśredniania  $t_1$ . Na rysunkach 8.9 i 8.10 można zauważyć, że w czasie  $t_1$  przepływ nie jest w pełni rozwinięty, a wir odrywający się od budynku ma mniejszy zasięg w kierunku prostopadłym do ściany niż w pozostałych przypadkach. Maksymalna procentowa różnica względna w uzyskanych prędkościach wypadkowych  $u$  wiatru dla  $w_1$ ,  $w_2$  i  $w_5$ , w stosunku do pomiarów, wynosiła 21% ( $t_1$ ) dla punktu  $w_1$ . Różnice w wartościach kąta sięgały maksymalnie  $23^\circ$  ( $t_3$ ) dla  $w_5$ . Rozbieżności w wynikach są najbardziej widoczne dla dwóch punktów znajdujących się w obszarze wiru ( $w_3$ ,  $w_4$ ). Duża różnica w wartościach kierunku wiatru dla  $w_4$ , uzyskana dla najdłuższego czasu uśredniania  $t_3$ , nie ma większego znaczenia, ponieważ wartości prędkości zmniejszyły się do zera. W praktyce trudno stwierdzić, dla którego czasu uśredniania symulacji należy porównywać rezultaty z badaniami. Zarówno czas  $t_1$  jak i  $t_2$  lub  $t_3$  w specyficznych warunkach terenowych może być uznany za prawidłowy.

Wartości wyznaczone dla  $+2^\circ$  w stosunku do kąta bazowego  $279^\circ$ , wykazały bardzo zbliżone kąty działania wektorów prędkości wiatru we wszystkich punktach, mniejszy spadek prędkości wiatru w obszarze wiru oraz większą prędkość w punkcie  $w_1$ . W wariancie  $-2^\circ$ , rozbieżności dotyczące kątów oraz prędkości były dużo większe. Wyniki uzyskane dla  $279^\circ$  znajdują się pomiędzy wartościami otrzymanymi przy zmianie o  $\pm 2^\circ$ . Uznano, że kąt napływu wiatru na układ budynek-rusztowanie przyjęty w symulacjach CFD był zgodny ze zmierzonym w badaniach in-situ. Można zauważyć jak duże znaczenie ma określenie właściwego kąta napływu w symulacjach, jeżeli zmiana o  $\pm 2^\circ$ , może powodować znaczne różnice w uzyskanych wynikach.



Rys. 8.9. Odrywanie wiru od naroża budynku, dla różnych okresów uśredniania: t1, t2, t3



Rys. 8.10. Rozkład prędkości wiatru dookoła budynku z rusztowaniem, dla różnych okresów uśredniania: t1, t2, t3

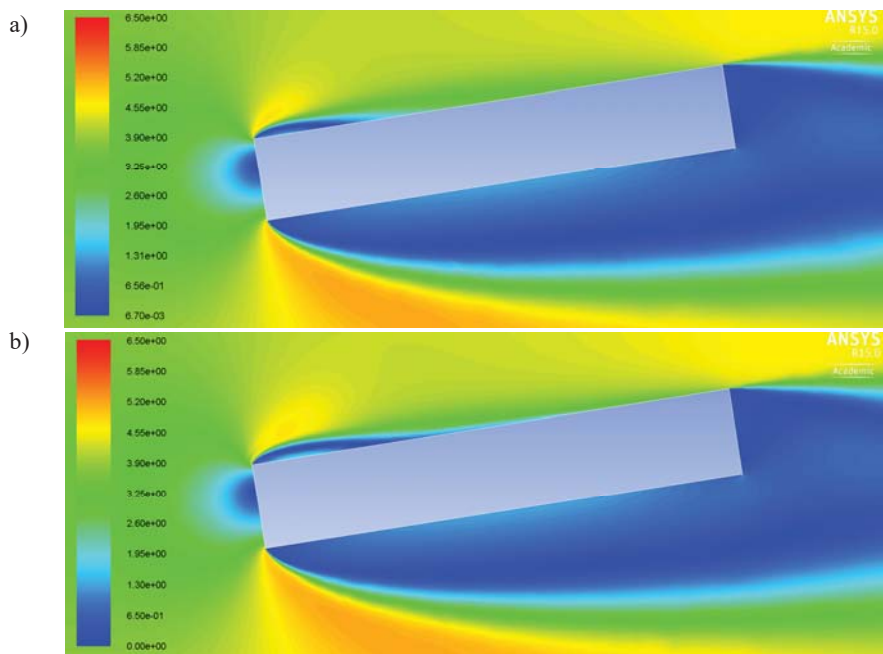
Stwierdzone różnice wyników sugerują, że w związku z zastosowanymi uproszczeniami (przekrój płaski, uwzględnienie jedynie słupków rusztowania), w symulacji CFD udało się uzyskać ściśle rozwiązanie matematyczne w postaci przepływu w pełni rozwiniętego. Zadane na wlotach prędkość oraz kierunek wiatru nie zmieniały się w czasie jak to miało miejsce w rzeczywistości. Ponadto, w warunkach in-situ przepływ był zaburzony poprzez dodatkowe elementy rusztowania (poręcze, stężenia, krawężniki) i był trójwymiarowy. Dodatkowe elementy i otoczenie niewątpliwie filtrują przepływ wiatru sprawiając, że uzyskanie w pełni rozwiniętego wiru (jak przy  $t_3$ ) w rzeczywistości jest mało prawdopodobne. W przypadku lokalizacji punktów pomiarowych poza obszarem wiru odrywającego się od naroża, spodziewano by się uzyskać większą zgodność wyników, tak jak dla punktów w1, w2 i w5.

Na podstawie przeprowadzonego porównania stwierdzono, że wyniki numeryczne i eksperymentalne wykazują zadowalającą zgodność, i że użyte w analizach CFD: siatka obliczeniowa oraz model turbulencji zostały zwalidowane i są odpowiednie do symulowania przepływów wokół budynków i budynków z rusztowaniami. Należy jednak zawsze zwracać uwagę na to, czy rusztowanie znajduje się w obszarze wirów, gdyż tam uzyskano największą rozbieżność wyników. Obszar ten generalnie cechuje się niską prędkością przepływu, a więc różnice wyników nie mają większego znaczenia dla całościowego obciążenia wiatrem rusztowania.

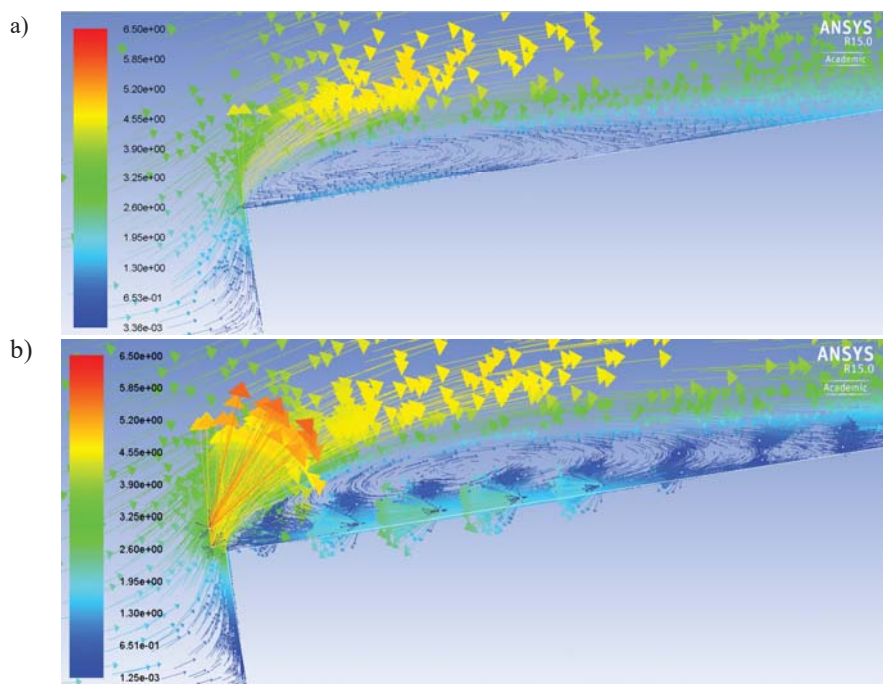
W kolejnych rozdziałach opisano wyniki analiz parametrycznych. W celu uniknięcia porównywania wyników z różnych czasów uśredniania, wszystkie opisane dalej obliczenia prowadzono aż do uzyskania przepływu ustalonego (odpowiadającego przypadkowi  $t_3$ ) i dopiero uśredniano. Przyjęcie czasu uśredniania w pełni rozwiniętego przepływu pozwoliło na jakościowe porównanie dalszych rezultatów.

## 8.5 Opływ budynku bez rusztowania

Uwzględnienie słupków rusztowania w symulacjach zmusza program do wyznaczenia przepływu w warstwie przyściennej każdego słupka, wraz z odrywającymi się od niego wirami, co znacznie wydłuża obliczenia. Wykonanie analiz dla wariantu budynku bez rusztowania (B) pozwoliło na sprawdzenie wpływu oddziaływania rusztowania na przepływ. Oprócz wyznaczenia prędkości i kierunków wiatru w punktach w1–w5, porównano kształt opływu wokół budynku (B) i układu budynek-rusztowanie (B+R). Analizy miały na celu określenie, czy przy obciążaniu wiatrem rusztowania można się opierać na symulacjach dotyczących samego budynku. Do porównania wyników wybrano kąt napływu wiatru  $279^\circ$ , dla którego wcześniej przeprowadzono walidację.

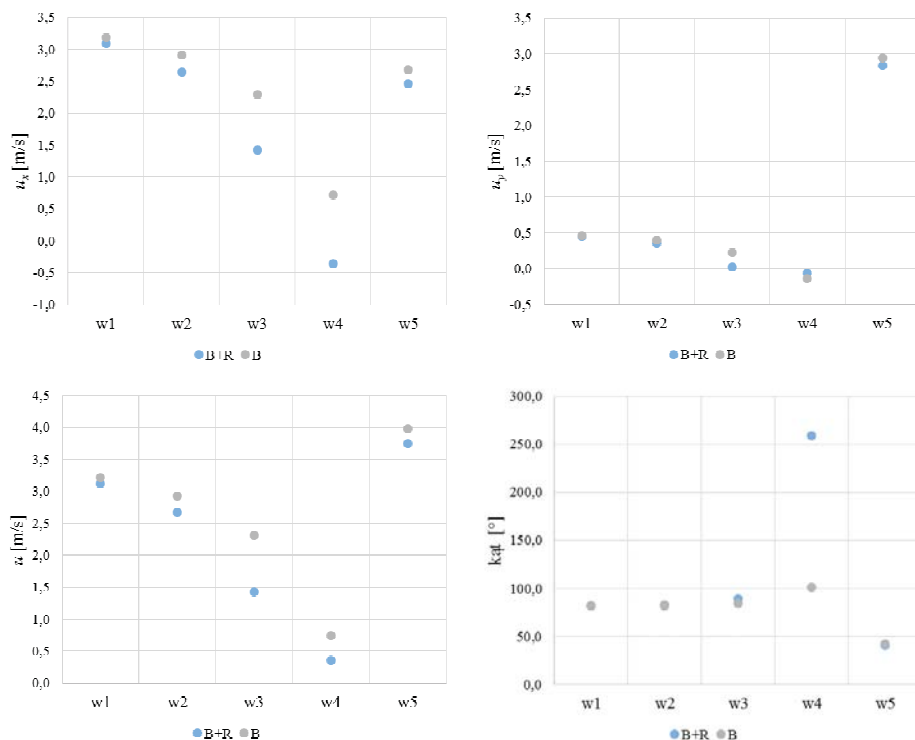


Rys. 8.11. Pole przepływu wokół: a) budynku (B), b) budynku z rusztowaniem (B+R)



Rys. 8.12. Wir przy narożu: a) budynku (B), b) budynku z rusztowaniem (B+R)

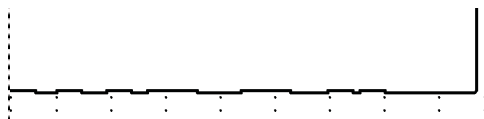
Rusztowanie wpływa głównie na długość i szerokość wiru odrywającego się od naroża budynku (Rys. 8.11, Rys. 8.12). Skutkuje to spadkiem prędkości, który jest najlepiej widoczny dla punktów w3 i w4 znajdujących się w centrum wiru. Na podstawie wykresów umieszczonych na rysunku 8.13, największe różnice względne prędkości wypadkowej wynoszą 106% (w4) i 64% (w3), dla pozostałych punktów równe są: 3% (w1), 10% (w2) i 6% (w5). Największa różnica wartości kąta wynosi  $150^\circ$  (w4), podczas gdy w punktach w1 i w2 jest zerowa. Uzyskane wyniki, po raz kolejny wskazują na największe niepewności w obszarze wiru (w3, w4). W pozostałych punktach różnice są na tyle nieduże, że można uznać, iż kierunek i prędkość wiatru działającego na rusztowanie można wyznaczyć na podstawie opływu samego budynku, odczytując odpowiednie wartości w lokalizacjach planowanych słupków. Prawdopodobnie możliwe byłoby wykonanie takiego samego przejścia z symulacji 3D opływu wokół samego budynku na prędkość i kierunek wiatru na planowanym rusztowaniu.



Rys. 8.13. Prędkość oraz kierunek wiatru w punktach w1–w5, dla budynku z rusztowaniem (B+R) i bez (B)

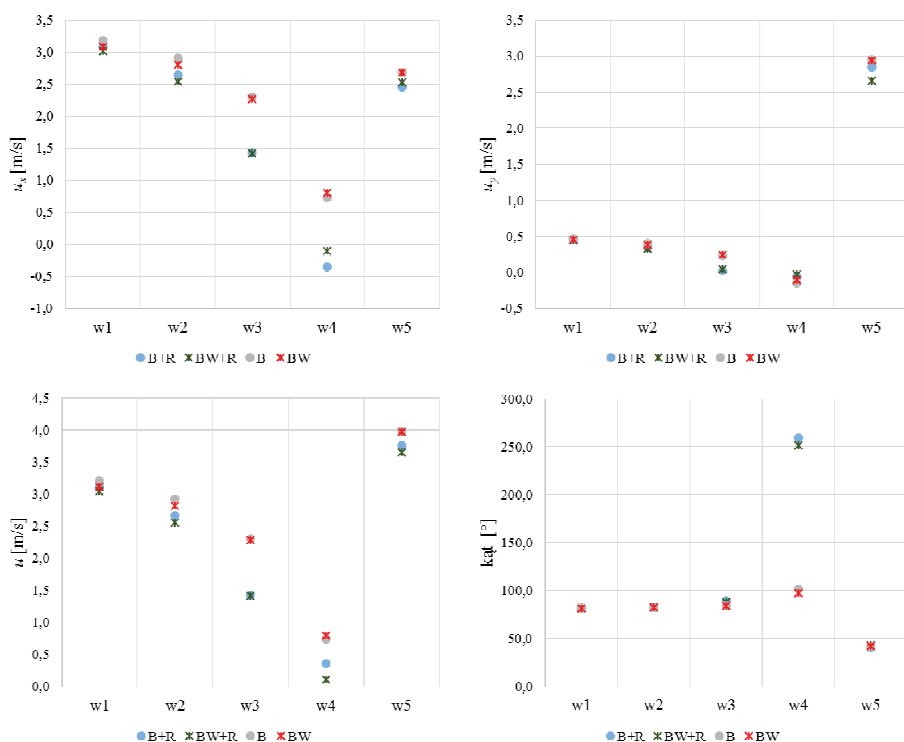
## 8.6 Wpływ odwzorowania szczegółów elewacji na wyniki

Dokonano sprawdzenia jaki wpływ na wyniki symulacji ma szczegółowe odwzorowanie budynku zrealizowane poprzez uwzględnienie wnęk okiennych w jego elewacji. Wykonano obliczenia z rusztowaniem (BW+R) i bez (BW) dla modelu budynku, w którym zamodelowano szczegóły elewacji. Głębokość wnęk okiennych wynosiła 10 cm, co odpowiadało wymiarom rzeczywistym. Okna znajdowały się wzdłuż dwóch dłuższych ścian obiektu. Fragment tak zamodelowanego budynku z rusztowaniem (BW+R) pokazano na rysunku 8.14.



Rys. 8.14. Fragment budynku z wnękami okiennymi (BW+R)

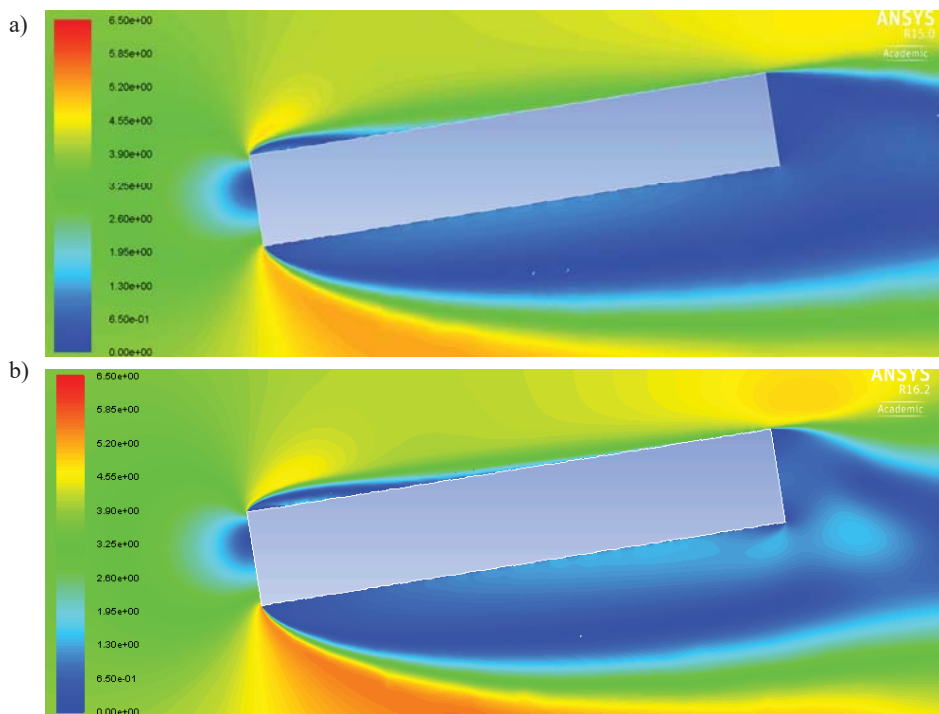
W punktach odpowiadających położeniu anemometrów (w1–w5) odczytano wartości prędkości i kierunku wiatru (Rys. 8.15).



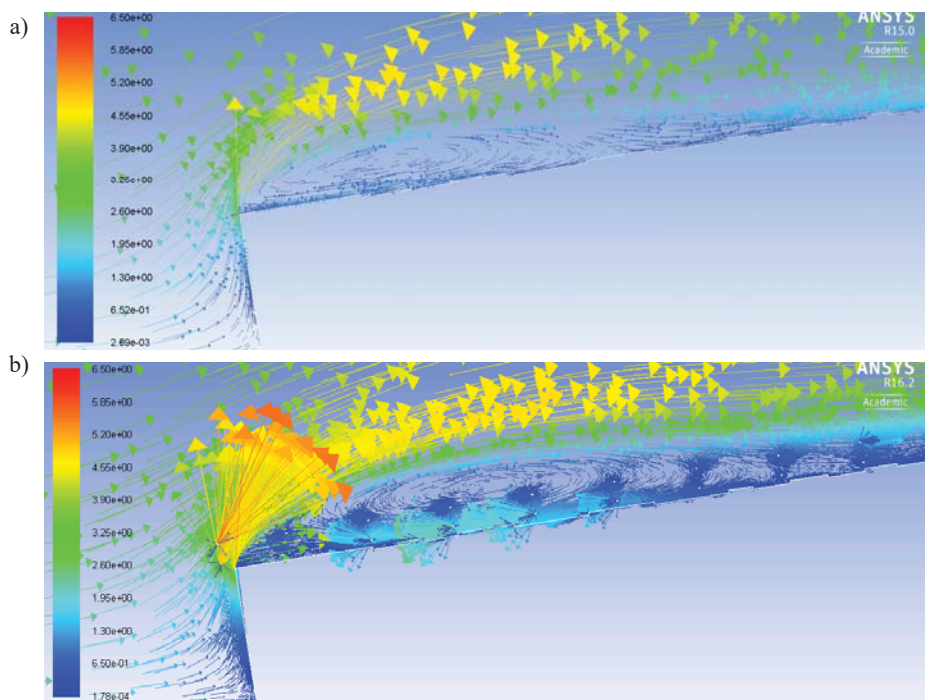
Rys. 8.15. Prędkość oraz kierunek wiatru w punktach w1–w5, dla: budynku z wnękami (BW) oraz budynku z wnękami i rusztowaniem (BW+R), porównanie z wariantami B i B+R

Wykresy pokazane na rysunku 8.15 wskazują na niewielkie zmiany w wynikach wynikające z zamodelowania wnęk okiennych. Wyjątkiem jest punkt w4 (w obszarze wiru), o najmniejszej wypadkowej prędkości, dla którego w przypadku BW+R oraz BW zanotowano odpowiednio spadek o 68% i wzrost prędkości o 9% w stosunku do przypadków bez wnęk (B+R i B). W pozostałych punktach różnice w prędkości sięgały maksymalnie 4% zarówno dla przypadku z rusztowaniem jak i bez. Pod względem kątów wyniki były do siebie bardziej zbliżone, największe rozbieżności uzyskano w w4, rzędu 8° (BW+R) oraz 4° (BW).

Fakt, iż głębokość wnęk była większa niż średnica przekroju kołowego słupka, nie miał więc dużego znaczenia dla przepływu. Punkt oderwania wiru przy narożu został zachowany (Rys. 8.16), a więc rozkład prędkości wiatru również się nie zmienił. Tak jak w przypadku budynku bez wnęk okiennych, obecność rusztowania przy elewacji spowodowała wydłużenie i odsunięcie wiru od ściany (Rys. 8.17).



Rys. 8.16. Pole przepływu wokół: a) budynku z wnękami okiennymi (BW), b) budynku z wnękami okiennymi i rusztowaniem (BW+R)

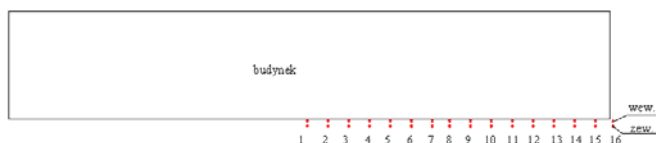


Rys. 8.17. Wir przy narożu: a) budynku z wnękami okiennymi (BW), b) budynku z wnękami okiennymi i rusztowaniem (BW+R)

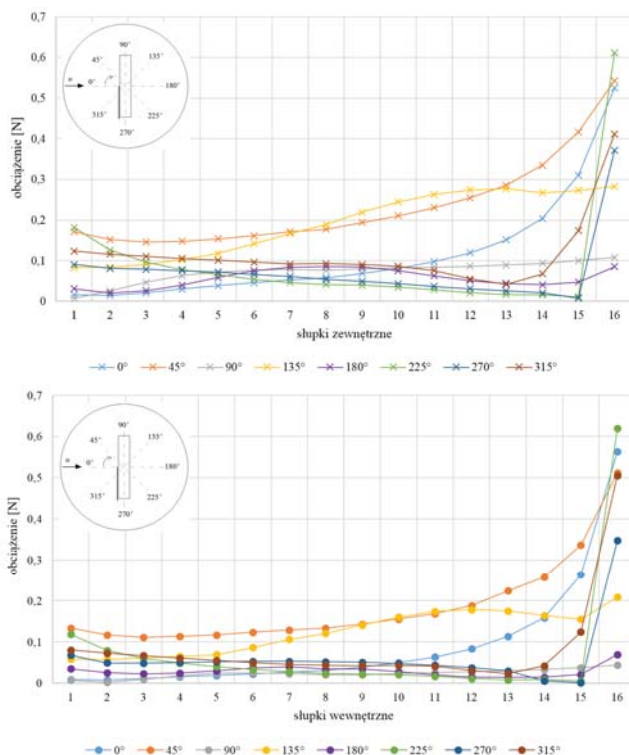
Przeprowadzone analizy wskazują, że odwzorowanie szczegółów elewacji budynku ma niewielkie znaczenie przy modelowaniu opływu płaskiego wokół tak dużego budynku. To stwierdzenie wymaga dalszych analiz zakładających odwzorowanie różnej głębokości wnęk i innych elementów elewacji.

## 8.7 Wpływ kąta natarcia wiatru na obciążenie słupków

Różnice związane ze zmianami kąta napływu wiatru na układ budynek-rusztowanie przedstawiono na podstawie obciążenia działającego na słupki. Obliczenia wykonano dla kątów napływu  $0^{\circ}$ - $360^{\circ}$  co  $45^{\circ}$ . Parametry napływu dotyczące prędkości, intensywności i skali długości turbulencji na wlocie były zgodne z wykorzystanymi w obliczeniach walidacyjnych. Do symulacji przyjęto budynek z rusztowaniem oddalonym o 25 cm (B+R). Symulacje wykonywano dla każdego kąta, aż do ustalenia wyników. Zestawienie obciążenia od wiatru w formie sił skupionych działających na przekroje poprzeczne słupków w przepływie płaskim, znajdujące się w rzędzie wewnętrznym (pierwszym od ściany) i zewnętrznym pokazano na rysunku 8.19. Numerację słupków przyjęto zgodnie z rysunkiem 8.18. Moduł obciążenia wyznaczono dla każdego słupka (symbole na rysunku 8.19), a wyniki zaprezentowano w postaci wykresów liniowych mających na celu ułatwienie śledzenia serii danych dla danego kąta.



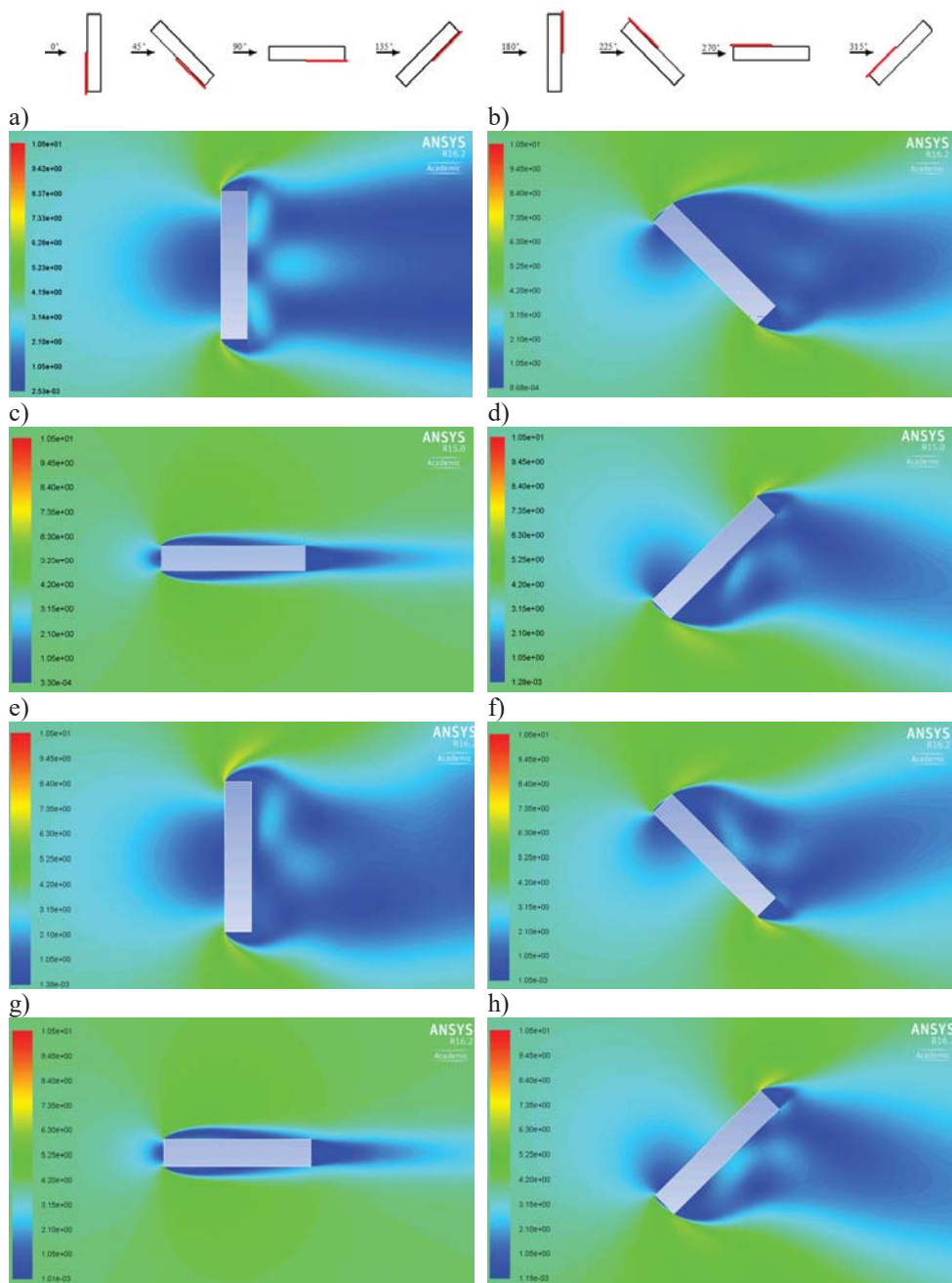
Rys. 8.18. Schemat numeracji słupków



Rys. 8.19. Obciążenie na słupki rusztowania przy różnych kątach napływu wiatru, (B+R)

Wyniki jednoznacznie wskazują, że słupki wysunięte poza krawędź budynku (16) są najbardziej obciążone. Największe wartości na słupku 16 uzyskano przy kątach napływu:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$  i  $315^\circ$ , czyli ustawieniach, w których znajdował się on przy narożu, na które wiatr działał bezpośrednio. Przy kątach napływu  $225^\circ$  i  $270^\circ$  występował największy (około 100%) wzrost pomiędzy obciążeniem słupka 16 i pozostałych w tym samym rzędzie. Wynika to z faktu, iż inne słupki znajdowały się w obszarze ponownego przyłączenia wiru oderwanego od naroża, a więc w obszarze zmniejszonej prędkości w stosunku do punktu oderwania przy słupku 16.

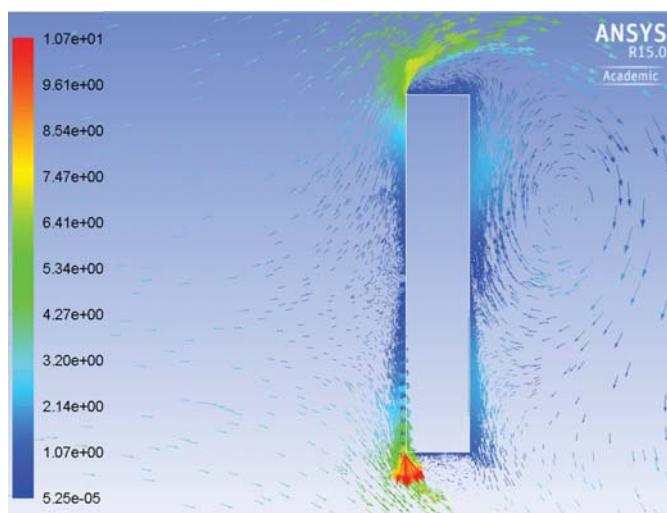
Wizualizację opływu, w formie ustalonego pola prędkości, dla kolejnych kątów pokazano na rysunku 8.20.



Rys. 8.20. Pole prędkości wiatru wokół układu budynek-rusztowanie (B+R): a) 0°, b) 45°, c) 90°, d) 135°, e) 180°, f) 225°, g) 270°, h) 315°

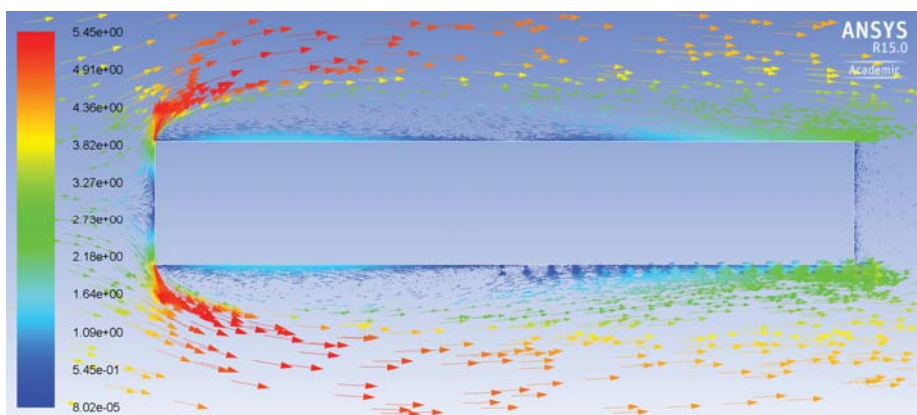
Przy kątach napływu  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $315^\circ$ , przy których rusztowanie znajduje się po stronie nawietrznej budynku, widać tendencję wzrostową od pierwszego do ostatniego słupka w obu rzędach. Przy kątach  $90^\circ$  i  $270^\circ$ , kiedy rusztowanie znajduje się wzdłuż przepływu, obciążenie jest niemal stałe w całym rzędzie, z widocznym lekkim wzrostem dla słupków wystających poza krawędź budynku. W pozostałych przypadkach ( $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ) rusztowanie znajduje się po stronie zawietrznej budynku. Przy kącie  $135^\circ$ , trend obciążenia obu rzędów słupków różni się od pozostałych, ze względu na położenie rusztowania w obszarze wiru odrywającego się od zawietrznej krawędzi budynku.

Kierunek działania wiatru na słupki, w przeważającej większości przypadków, nie był zgodny z kierunkiem napływu wiatru na rusztowanie. Zmianę kierunku wywołaną obecnością budynku pokazano na rysunku 8.21, na przykładzie kąta napływu  $0^\circ$ . Przepływ napotykać przeszkodę w postaci ściany zostaje zakrzywiony i zmienia kierunek na równoległy do fasady obiektu (por. Rys. 4.2). Rozchodzi się na boki od tak zwanego punktu stagnacji, aż do dotarcia do naroży budynku gdzie dochodzi do jego oderwania i powstania wirów.

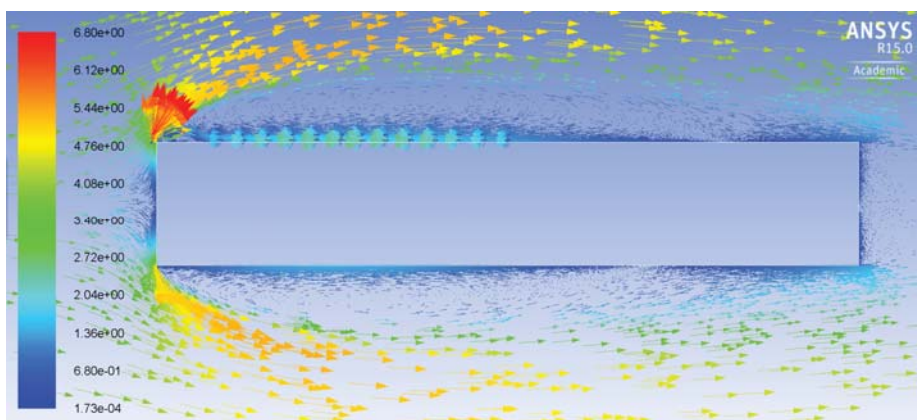


Rys. 8.21. Wektory chwilowej prędkości wiatru wokół budynku z rusztowaniem (B+R), kąt napływu  $0^\circ$

Jeżeli wiatr jest prostopadły do krótszej ściany budynku ( $90^\circ$ ,  $270^\circ$ ), wówczas zwroty wektorów prędkości w obszarze wiru przy dłuższych ścianach są przeciwne do zwrotu wektora napływu. W pozostałej części ściany, za wirem, kierunki prędkości przy ścianie są zgodne z napływem, ponieważ dochodzi do jego ponownego przyłączenia do powierzchni ściany. Dlatego przy kącie  $270^\circ$  na większość słupków działa wiatr o kierunku przeciwnym (Rys. 8.23), a przy  $90^\circ$  zgodny z napływem (Rys. 8.22).

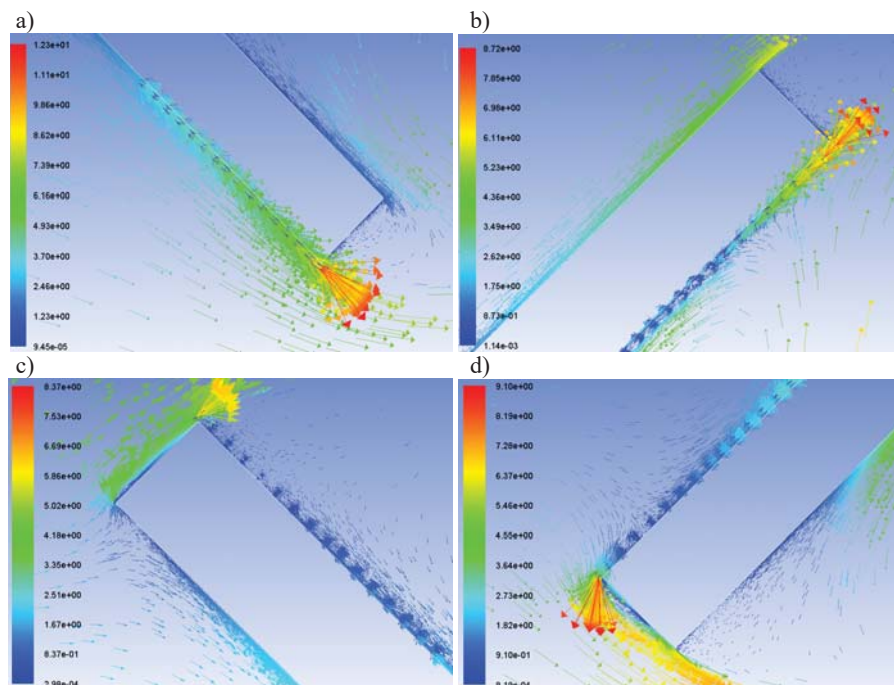


Rys. 8.22. Wektory chwilowej prędkości wiatru wokół budynku z rusztowaniem(B+R), kąt napływu:  $90^\circ$



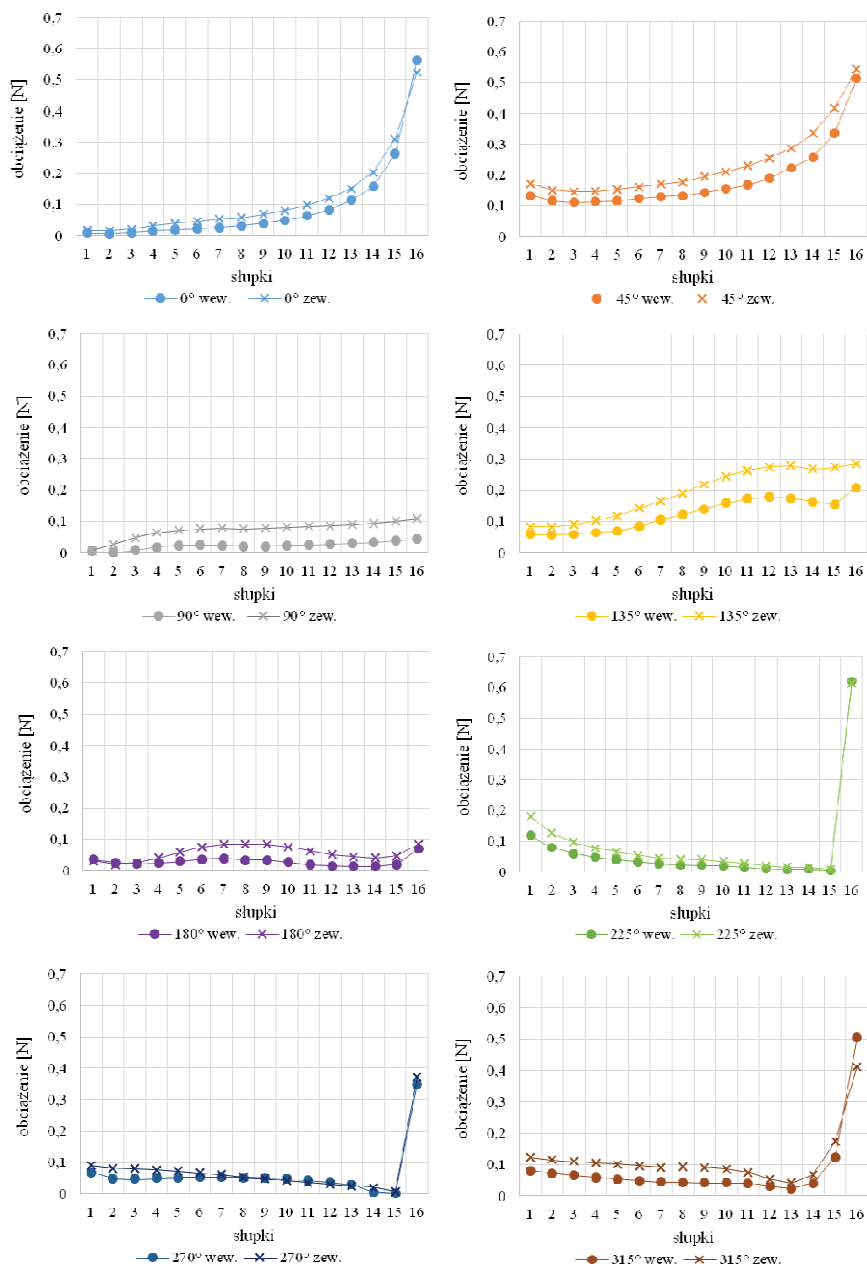
Rys. 8.23. Wektory chwilowej prędkości wiatru wokół budynku z rusztowaniem (B+R), kąt napływu:  $270^\circ$

Gdy kąt napływu jest równy  $45^\circ$ , na wszystkie słupki oprócz tych znajdujących się przy samym narożu, działa wiatr równoległy do fasady rusztowania (Rys. 8.24a). Przy kątach napływu  $315^\circ$ ,  $135^\circ$  i  $225^\circ$  rusztowanie znajduje się częściowo w obszarze gdzie wektory prędkości wiatru są prostopadłe do fasady, ale ich wartości są bliskie zeru. W pierwszym przypadku wynika to z faktu, iż rusztowanie znajduje się na fasadzie nawietrznej, w obszarze punktu spiętrzenia i rozchodzenia się przepływu wzdłuż krawędzi budynku (Rys. 8.24d). W dwóch kolejnych (rusztowanie na fasadzie zawietrznej) z formowania się wiru za nawietrznym narożem (Rys. 8.24b,c). W takich przypadkach powstałe obciążenie prostopadłe do fasady rusztowania jest znikome i może być zaniebawalne.



Rys. 8.24. Wektory chwilowej prędkości wiatru wokół budynku z rusztowaniem (B+R), kąt napływu: a) 45°, b) 135°, c) 225°, d) 315°

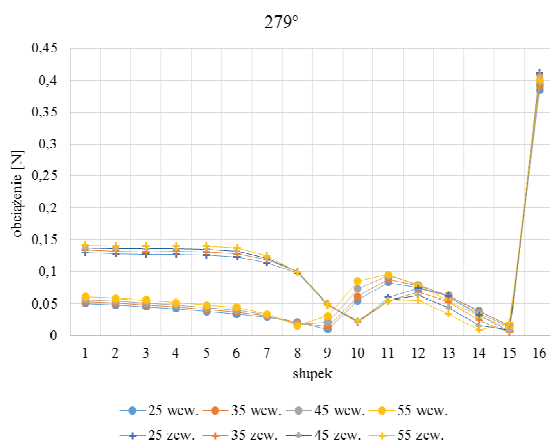
Na rysunku 8.25 przedstawiono porównanie obciążenia działającego na słupki obu rzędów rusztowania. Zaobserwowano niższe wartości na większości słupków wewnętrznych, niezależnie od kąta. Ponieważ, przepływ bezpośrednio przy budynku jest równoległy do jego fasady, minimalna odległość między słupkami w tym kierunku jest równa co najmniej 2,5 m. Biorąc pod uwagę dystans między elementami rusztowania oraz wyniki przedstawione w rozdziale 7, można stwierdzić, że efekt przesłaniania nie występuje. Mniejsze obciążenie słupków wewnętrznych jest więc efektem małej odległości od ściany budynku, a nie przesłaniania się słupków. Zwiększenie obciążenia w rzędzie wewnętrznym wystąpiło na słupkach nr 16 przy kątach 0°, 225°, 315° (o odpowiednio 7%, 1% oraz 22%), ze względu na wystawianie tych elementów poza krawędź budynku, czyli brak blokady przepływu przez fasadę. Ponadto, w tych ustawieniach, znajdowały się one bliżej punktu oderwania, czyli naroża budynku. Wzrost obciążenia elementów rzędu zewnętrznego, w stosunku do rzędu bliższego ścianie, był różny w zależności od słupka i kąta, wynosił średnio (dla całego rzędu) od 22% dla 45° do 67% dla 90°. Większe obciążenie na słupki wewnętrzne może wystąpić lokalnie, w obszarze występowania wirów, tak jak to miało miejsce przy kącie 270°. W takim przypadku prędkości są niskie, a więc i obciążenie jest małe w porównaniu do innych elementów.



Rys. 8.25. Obciążenie działające na szupki rusztowania (B+R) w rzędzie wewnętrznym oraz zewnętrznym, przy kątach napływu wiatru: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°

## 8.8 Wpływ oddalenia rusztowania od budynku na obciążenie słupków

Sprawdzono również jaki wpływ na obciążenie wiatrem słupków ma odsunięcie rusztowania od fasady budynku. Przeprowadzono analizę dla budynku o pełnych ścianach, kąta natarcia wiatru  $279^\circ$  i czterech przypadków odsunięcia osi wewnętrznych słupków od ściany budynku. Wyjściową odległością było 25 cm (wszystkie inne analizy B+R i BW+R dotyczą tej odległości), kolejne to: 35 cm, 45 cm i 55 cm. Drugi, zewnętrzny rząd był zawsze w stałej odległości od pierwszego, wynoszącej 0,732 m w osiach. Na rysunku 8.26 pokazano zmiany obciążenia działającego na kolejne elementy rusztowania.

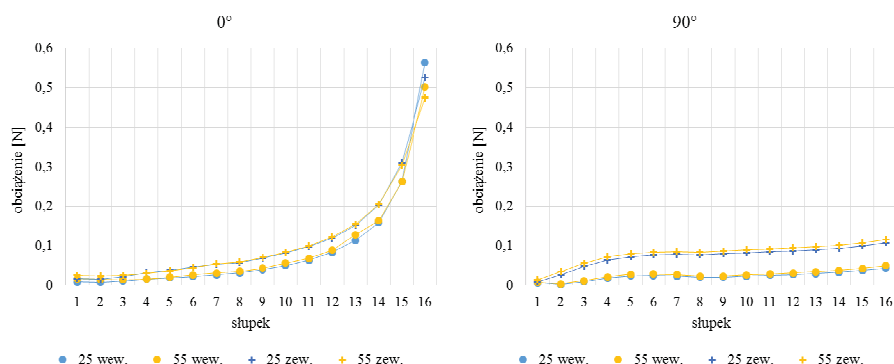


Rys. 8.26. Obciążenie słupków w obu rzędach, w czterech wariantach odsunięcia rusztowania od budynku, przy kącie napływu wiatru  $279^\circ$

Można zauważyć, że wraz z odsuwaniem rusztowania od ściany budynku obciążenie na słupki znajdujące się w obu rzędach rosło, z wyjątkiem obszaru oddziaływania wiru (słupki 12–14) odrywającego się od naroża. Obciążenie na słupki zewnętrzne zwiększyło się przy 35 cm, 45 cm i 55 cm o 6%, 11% i 16%, a na słupki wewnętrzne o 6%, 13% i 21% w stosunku do przypadku odsunięcia rusztowania od ściany o 25 cm.

Ponieważ, największe różnice w wynikach uzyskano przy największym odsunięciu rusztowania od budynku (55 cm), dla tego przypadku wykonano dodatkowe symulacje przy kącie natarcia  $0^\circ$  i  $90^\circ$  (Rys. 8.27) i porównano je do przypadku (B+R). Wyniki są łatwiejsze do zinterpretowania ponieważ żaden ze słupków nie znajduje się w obszarze wiru. Podobnie jak przy kącie  $279^\circ$ , odsunięcie rusztowania od budynku spowodowało zwiększenie obciążenia na słupki w rzędzie zewnętrznym o 10% dla obu kątów oraz w rzędzie wewnętrznym o 12% i 16% odpowiednio dla  $0^\circ$  i  $90^\circ$ . Trend obciążenia przy obu kątach napływu również nie uległ zmianie. Największe wartości zaobserwowano na

słupkach przy narożu budynku, najmniejsze na słupkach w środku rozpiętości elewacji budynku. Oznacza to, że odsunięcie rusztowania nie zmieniło charakteru przepływu wokół niego, a słupki nadal pozostały w obszarze oddziaływania budynku. Analizując przepływ dla budynku B+R (Rys. 8.21, Rys. 8.22, Rys. 8.23, Rys. 8.24) można stwierdzić, że odsunięcie rusztowania aż o połowę szerokości budynku (około 8 m) mogłoby spowodować, że słupki znajdą się w obszarze poza warstwą przyścienną budynku (gdzie kierunek wiatru jest nierównoległy do fasady). Ponadto, dopiero odsunięcie rusztowania o kilkanaście metrów od budynku pozwoliłoby traktować je jako konstrukcję wolnostojącą.

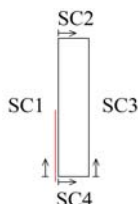


Rys. 8.27. Obciążenie słupków w obu rzędach w wariancie odsunięcia rusztowania od budynku o 55 cm, przy kącie napływu wiatru  $0^\circ$  i  $90^\circ$

## 8.9 Wpływ rusztowania na obciążenie elewacji budynku

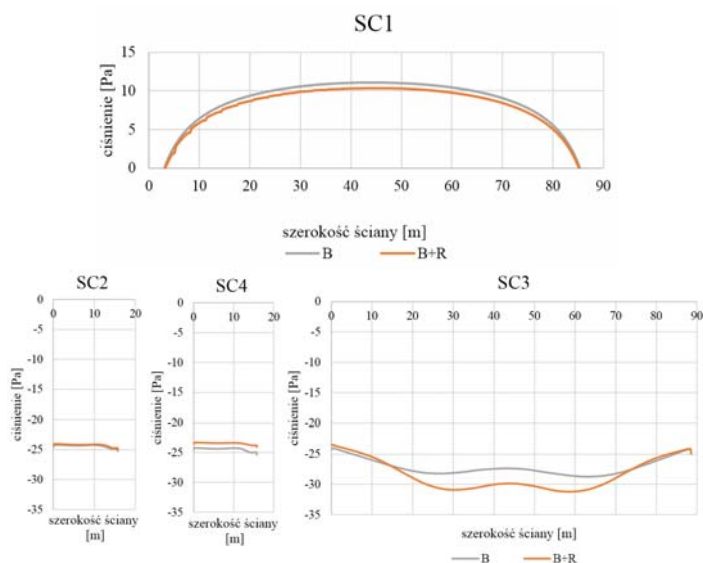
Zmiana pola przepływu wywołana obecnością rusztowania została pokazana dla kąta napływu  $279^\circ$  na rysunkach 8.11 i 8.16. W niniejszym rozdziale podjęto próbę określenia wpływu, jaki może mieć rusztowanie na zmiany ciśnienia prędkości wiatru na elewacjach budynku, przy którym stoi.

Ciśnienie prędkości wiatru odczytano z symulacji dla wszystkich ścian budynku. Zgodnie z rysunkiem 8.28 ściana, przy której ustawione było rusztowanie została oznaczona jako SC1. Rozkłady ciśnienia wzdłuż obwodu pokazano na rysunkach 8.29 i 8.30 na przykładzie kątów  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  i  $135^\circ$ , dla wariantów: budynek (B) oraz budynek z rusztowaniem (B+R).

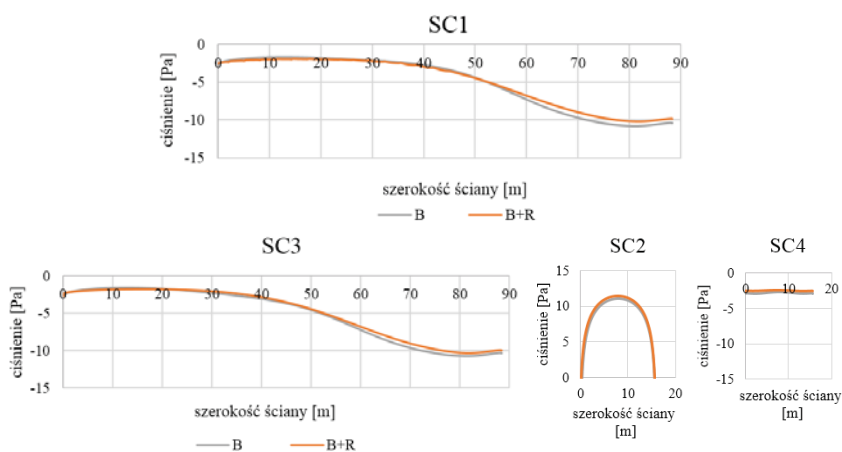


Rys. 8.28. Oznaczenie ścian budynku w stosunku do położenia rusztowania (czerwona linia)

a)



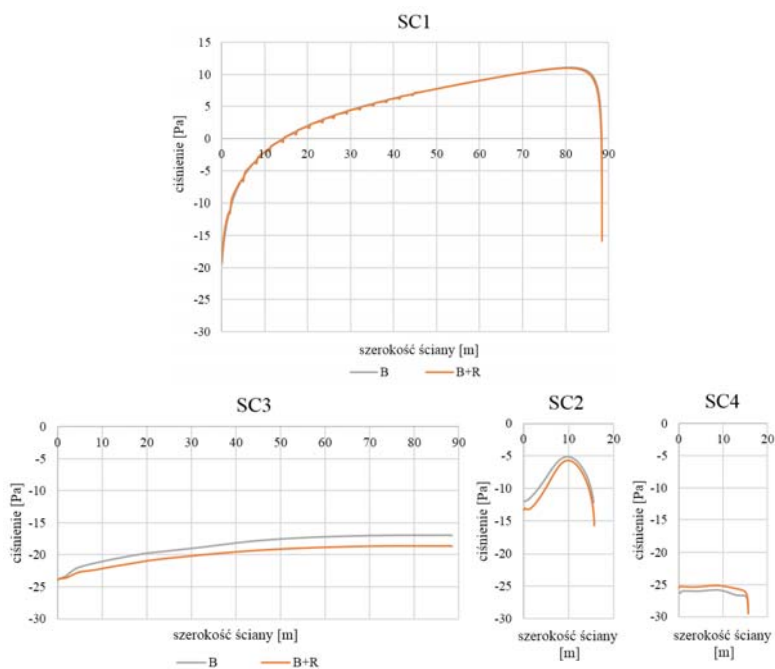
b)



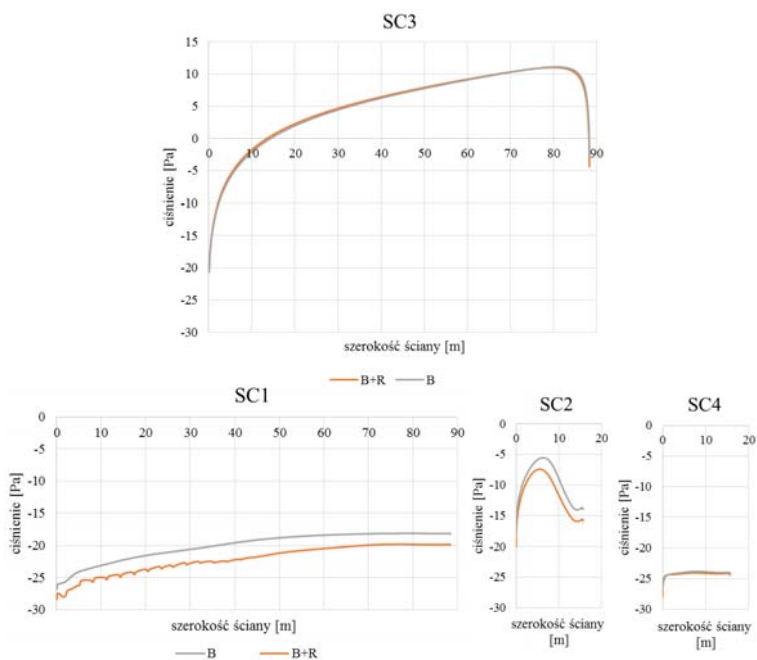
Rys. 8.29. Rozkład ciśnienia prędkości wiatru na elewacjach budynku dla wariantów: budynek (B), budynek z rusztowaniem (B+R), kąt napływu: a) 0°, b) 90°

Wyniki są do siebie bardzo zbliżone na ścianach nawietrznych. Zmniejszenie ciśnienia prędkości wiatru zaobserwowano lokalnie na każdej ścianie za słupkami rusztowania. W żadnym przypadku ustawienie rusztowania przy budynku nie spowodowało znacznych zmian w rozkładzie ciśnienia.

a)



b)



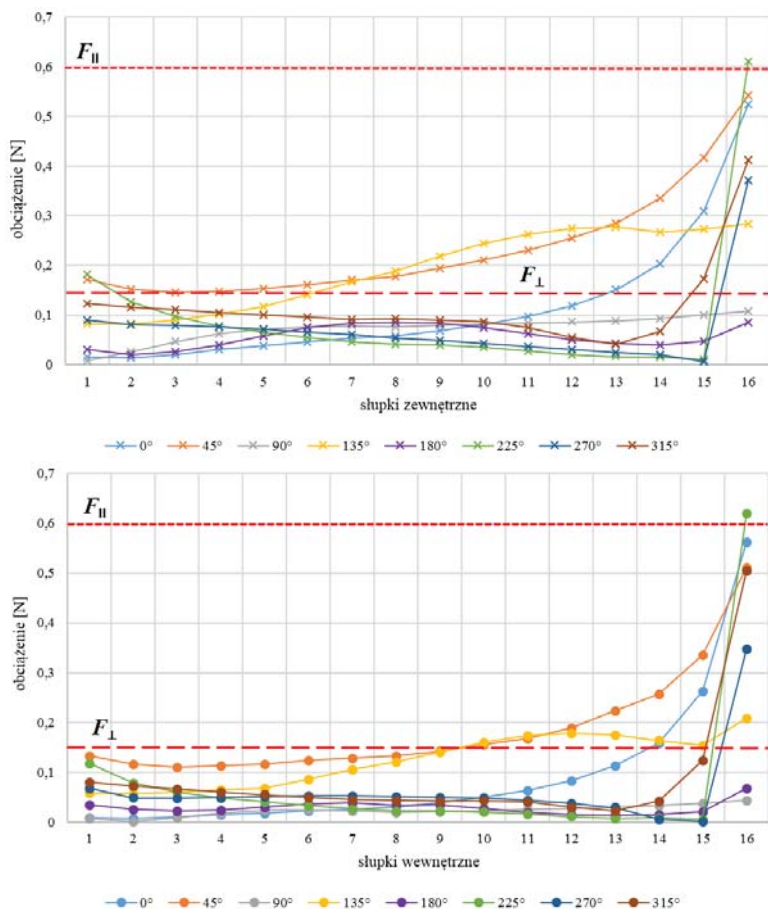
Rys. 8.30. Rozkład ciśnienia prędkości wiatru na elewacjach budynku dla wariantów: budynek (B), budynek z rusztowaniem (B+R), kąt napływu: a) 45°, b) 135°

Porównanie wyników dotyczące rozkładu ciśnienia na ścianach zawietrznych jest utrudnione pod względem ilościowym, ze względu na właściwości wykorzystanego w obliczeniach modelu RANS. Zarówno model  $k-\varepsilon$  jak i  $k-\omega$ , w obszarach oderwania warstwy przyściennej i śladu aerodynamicznego mają problem z poprawnym wyznaczeniem wartości ciśnienia. Wyraźnie widać to na wszystkich wykresach pokazujących rozkłady – na ścianach nawietrznych krzywe pokrywają się dokładnie, na zawietrznych kształt krzywych jest taki sam, ale są względem siebie przesunięte. W celu określenia dokładniejszych wartości ciśnienia należałoby użyć modelu LES.

## 8.10 Porównanie wyników symulacji z obciążeniem normowym

Wykonano obliczenia obciążenia wiatrem rusztowania zgodnie z procedurą normową [7]. Obciążenie słupka wyznaczono ze wzoru (1) przyjmując średnią prędkość  $u = 4,117$  m/s na wysokości 13 m wyznaczoną z badań in-situ i użytą w symulacjach. Na podstawie analiz opisanych w rozdziale 7 przyjęto współczynnik siły aerodynamicznej  $c_f = 1,2$ . Jest to wartość niższa niż zalecana w normie [7] ( $c_f = 1,3$ ), ale wyższa niż wynikająca z Eurokodu [23], po uwzględnieniu chropowatości powierzchni ( $c_f = 1,09$ ). Mając na uwadze, że symulacje były wykonywane jako dwuwymiarowe, zamiast pola powierzchni  $A$ , przyjęto średnicę słupka  $D = 0,0483$  m. A więc porównywano siłę skupioną działającą na przekrój poprzeczny słupka znajdującego się w przepływie płaskim. Wartość współczynnika miejsca przy obciążeniu równoległym przyjęto  $c_s = 1,0$ , przy prostopadłym  $c_s = 0,25$  (por. Rys. 3.2a), ponieważ elewacja budynku była pełna. Obliczona siła wyniosła 0,60 N i 0,15 N przy obciążeniu odpowiednio równoległym i prostopadłym do fasady.

Na rysunku 8.31 pokazano siły działające na słupki rusztowania przy różnych kątach napływu wiatru, w porównaniu do sił prostopadłych i równoległych wyznaczonych według procedury normowej (por. Rys. 3.1). Wartość równoległego obciążenia normowego ( $F_{||}$ ) była wyższa niż uzyskana z symulacji przy wszystkich kątach oprócz  $225^\circ$  (dla którego jest 3% niższa). Obciążenie prostopadłe ( $F_{\perp}$ ) było większe niż to wyznaczone przy kątach  $90^\circ$  i  $180^\circ$  oraz  $225^\circ$  i  $270^\circ$  gdyby pominąć słupek 16, który wystawał poza krawędź budynku. Oznacza to, że zalecenie normowe mówiące o przykładaniu sił w kierunku równoległym do fasady pozwala na wyznaczenie maksymalnego obciążenia jakie może wystąpić dla pełnego zakresu kątów napływu i to dodatkowo z kierunkiem zgodnym z rzeczywistym działaniem wiatru w tych przypadkach. W sytuacji, w której żaden słupek nie wystawałby poza krawędź budynku, obciążenie równoległe jest przeszacowane co najmniej o 40%, a w wielu przypadkach o kilkaset procent (przy kątach:  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$ ).



Rys. 8.31. Obciążenie słupków rusztowania przy różnych kątach napływ wiatru w porównaniu do obciążenia wyznaczonego według procedury normowej (czerwone przerywane linie)

Jak widać na rysunku 8.31, w znacznym obszarze rusztowania, głównie przy kątach 45° i 135° i dla słupków 12–16 występują siły przekraczające normowe obciążenie prostopadłe. Jednak jak wykazano wcześniej, w tych przypadkach obciążenie działało równoległe do fasady. Dlatego wydaje się mieć sens przyjęcie obciążenia normowego prostopadłego do rusztowania, czterokrotnie mniejszego od równoległego, ponieważ i tak przewyższa ono rzeczywiste występujące obciążenie w tym kierunku. Jednocześnie, jego uwzględnienie ma duże znaczenie przy projektowaniu rusztowań ze względu na obciążenie w kotwach, mogące spowodować wrywanie ich ze ściany.

Powyższe wnioski dotyczą tylko przebadanej sytuacji, kiedy rusztowanie ustawione jest przy budynku o pełnej elewacji.

## 8.11 Podsumowanie

Symulacje CFD działania wiatru na budynek z rusztowaniem zostały zwalidowane przy pomocy wybranych badań in-situ przeprowadzonych na rusztowaniu P10. Uzyskaną zgodność uznano za zadowalającą. Dalsze analizy przeprowadzono dla tego samego przypadku w wariantach: budynek (B), budynek z rusztowaniem (B+R), budynek z wnękami okiennymi (BW), budynek z wnękami okiennymi i rusztowaniem (BW+R) oraz budynek z rusztowaniem odsuniętym od fasady na różne odległości.

W oparciu o przeprowadzone obliczenia stwierdzono, że niezależnie od kąta napływu wiatru: najbardziej obciążone są słupki rusztowania wystające poza krawędź budynku, na słupki w rzędzie bliższym fasady działają mniejsze siły, obciążenie działa głównie w kierunku równoległym do rusztowania.

Na podstawie porównania ciśnienia prędkości wiatru na elewacji budynku z rusztowaniem i bez, stwierdzono że za słupkami występuje niewielkie lokalne zmniejszenie jego wartości.

Na podstawie porównania z procedurą normową zauważono, że wyznaczone obciążenie równoległe jest prawie równe największemu obciążeniu uzyskanemu z symulacji dla słupka wystającego poza krawędź budynku, niezależnie od kąta. W przypadku pozostałych słupków, obciążenie to było przeszacowane co najmniej o 40%, a prostopadłe niedoszacowane.

## 9 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

### 9.1 Podsumowanie badań in-situ i analiz numerycznych

W ramach pracy przeprowadzono badania w skali naturalnej na kilkudziesięciu rusztowaniach fasadowych. Polegały one na pomiarach prędkości i kierunku wiatru za pomocą pięciu anemometrów 2D oraz jednego 3D. Anemometry 2D były montowane do konsol zamocowanych do zewnętrznych słupków przedostatniego poziomu rusztowania. Czujnik 3D stawiano na dachu budynku, przy którym było ustawione rusztowanie, zakładając że jest to punkt, w którym można zmierzyć przepływ niezaburzony. Przy wykorzystaniu kilkogodzinnych pomiarów wyznaczono dominujące w danym okresie kierunki wiatru napływającego na rusztowanie. Na tej podstawie wykonano porównanie zmierzonych wartości średnich 10-minutowych prędkości i kierunków z wyznaczonymi z normy [7].

W kolejnym kroku wykonano symulacje CFD opływu płaskiego wokół wolnostojących słupków rusztowania (jednego, dwóch i dziesięciu). Na ich podstawie do dalszych obliczeń wybrano model turbulencji przepływu  $k-\omega$  SST.

Następnie wykonano walidację modelu numerycznego przy wykorzystaniu budynku z rusztowaniem P10, w odniesieniu do którego wcześniej przeprowadzono pomiary in-situ. Przeprowadzono dodatkowe symulacje opływu dla kilku wariantów: samego budynku (B) oraz budynku z rusztowaniem (B+R). Analizy poszerzono o symulacje dla obiektu z wnękami okiennymi (BW, BW+R) oraz z uwzględnieniem czterech różnych wariantów odległości rusztowania od fasady. Wszystkie symulacje wykonano dla parametrów napływu wiatru zgodnych ze zmierzonymi w badaniach terenowych, a następnie rozszerzono je o inne kąty natarcia. Sprawdzono również wpływ rusztowania na zmianę ciśnienia na elewacji budynku. Dodatkowo, porównano obciążenie wiatrem słupków przyjęte zgodnie z procedurą normową z wynikami symulacji CFD.

### 9.2 Wnioski wynikające z badań in-situ

Na podstawie badań w skali naturalnej stwierdzono, że wektory prędkości przed słupkami mają inny kierunek niż średni kierunek wiatru przed budynkiem. Kierunek wektorów prędkości wiatru działającego na słupki jest przeważnie równoległy do fasady. Doprowadziło to do wniosku, że oddziaływanie wiatru na rusztowanie ustawione przy fasadzie wykazuje charakter zgodny z opływem samego budynku. Zauważono także, że uwzględnienie nieprzepuszczalności obiektu poprzez współczynnik  $c_s$ , w przypadku działania wiatru prostopadle do rusztowania, prowadzi do zaniżenia obciążenia normowego dla słupków znajdujących się w narożach. Zdecydowanie największe prędkości wiatru, a więc i siły, zmierzono dla słupków skrajnych, znajdujących się przy narożu budynku lub dla tych, znajdujących się poza jego obrysem.

### 9.3 Wnioski wynikające z symulacji CFD

Na podstawie analiz CFD wykonanych dla wolnostojących słupków wybrano metodę modelowania turbulencji przepływu i zwalidowano ją na podstawie danych literaturowych i badań in-situ. Stwierdzono, że optymalne do dalszych obliczeń będą siatki typu *quad* i *tri* oraz model turbulencji *k- $\omega$*  SST.

Z symulacji wynika, że przy kącie napływu wzdłuż linii ustawienia słupków, w zakresie  $0^{\circ}$ – $15^{\circ}$ , następuje ponad dwukrotne zmniejszenie współczynnika oporu  $C_D = 1,2$  dla drugiego słupka w stosunku do pierwszego. Dla kolejnych słupków wartość  $C_D$  była ustalona na stałym poziomie ok. 0,4. Wydaje się uzasadnionym zalecenie, aby zawsze uwzględniać maksymalną wartość współczynnika dla wszystkich słupków w rzędzie, ponieważ w rzeczywistości kierunek działania wiatru nie jest stały, a więc nie możemy mieć pewności, że przesłanianie wystąpi.

W kolejnej części pracy przedstawiono obliczenia walidacyjne i parametryczne dla wybranego rusztowania (P10) dla trzech czasów uśredniania ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ). W praktyce trudno stwierdzić, dla którego czasu uśredniania symulacji można uznać rezultaty za prawidłowe i porównywać je z wynikami badań. Każdy z nich, w specyficznych warunkach terenowych, może być uznany za odpowiedni. W celu umożliwienia jakościowego porównania wyników dalszych analiz, przyjęto okres uśredniania  $t_3$ , w którym występowało pełne ustalenie się przepływu.

Różnice wyników uzyskanych z badań in-situ i symulacji CFD wynikają prawdopodobnie z zastosowanych w obliczeniach uproszczeń (przekrój płaski, uwzględnienie jedynie słupków rusztowania). Drugą przyczyną rozbieżności było przyjęcie prędkości oraz kierunku napływu wiatru jako wartości stałych na wlotach domeny, zaś w rzeczywistości wielkości te były zmienne w czasie.

Uznano, że kąt napływu wiatru przyjęty w symulacjach CFD był zgodny ze zmierzonym w badaniach in-situ i jednocześnie zauważono, że zmiana o  $\pm 2^{\circ}$ , może powodować znaczne różnice w uzyskanych wynikach.

Ostatecznie stwierdzono, że wyniki numeryczne i eksperymentalne wykazują zadowalającą zgodność oraz że użyta siatka obliczeniowa i model turbulencji są odpowiednie do symulowania przepływu wokół układu budynek-rusztowanie. Należy przy tym zwrócić uwagę, że duże różnice w wynikach, uzyskane dla słupków znajdujących się w obszarze wirów, nie mają większego znaczenia dla całościowego obciążenia wiatrem rusztowania, gdyż obszary te cechują się niską prędkością przepływu.

Wyniki analiz parametrycznych doprowadziły do stwierdzenia, że:

- Ustawienie rusztowania przy fasadzie wpływa na długość i szerokość wiru odrywającego się od naroża budynku.
- W obszarze rdzenia wiru dochodzi do spadku prędkości wiatru niemal do zera.

- Kierunek i prędkość wiatru działającego na rusztowanie można w przybliżeniu wyznaczyć na podstawie opływu samego budynku, odczytując odpowiednie wartości w planowanych lokalizacjach słupków.
- Zamodelowanie wnęk okiennych o głębokości 10 cm nie miało dużego znaczenia dla przepływu płaskiego wokół dużego budynku (P10), rozkład prędkości wiatru się nie zmienił w stosunku do przypadku budynku bez wnęk okiennych (z rusztowaniem jak i bez).
- Ze słupków znajdujących się w obu rzędach, najbardziej obciążone są te wysunięte poza krawędź budynku. Największe działające na nie obciążenia odnotowano w przypadkach, gdy znajdowały się przy narożu budynku, na które wiatr działał bezpośrednio, co odpowiadało kątom napływu:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$  i  $315^\circ$ .
- Kierunek działania wiatru na słupki, w przeważającej większości przypadków, nie był zgodny z kierunkiem napływu wiatru na rusztowanie.
- Biorąc pod uwagę oba rzędy słupków rusztowania, mniejsze obciążenie występowało dla rzędu wewnętrznego (przy ścianie), co jest efektem małej odległości od fasady budynku, a nie przesłaniania się słupków.
- Wraz z odsuwaniem rusztowania od ściany budynku obciążenie działające na słupki znajdujące się w obu rzędach rosło, z wyjątkiem obszaru formowania się wiru odrywającego się od naroża. Największe wartości zaobserwowano na słupkach przy narożu budynku, najmniejsze w środku rozpiętości elewacji.
- Odsunięcie rusztowania na odległość 55 cm od fasady nie zmieniło charakteru przepływu wokół niego, a słupki pozostały w obszarze oddziaływania budynku. Dopiero odsunięcie go aż o połowę szerokości budynku (około 8 m) mogłoby spowodować, że znajdzie się w obszarze poza warstwą przyścienną budynku.
- Należałoby odsunąć rusztowanie od budynku aż o kilkanaście metrów, aby można było traktować je jako konstrukcję wolnostojącą.

Na podstawie porównania wartości wyznaczonych według procedury normowej z wynikami uzyskanymi z symulacji CFD zaobserwowano, że:

- Równoległe obciążenie normowe było większe niż uzyskane z symulacji przy wszystkich kątach napływu oprócz  $225^\circ$  (3% różnicy).
- Prostopadłe obciążenie normowe było większe niż wyznaczone w symulacjach przy kątach  $90^\circ$  i  $180^\circ$  oraz (gdyby pominąć słupki w bezpośrednim sąsiedztwie naroża budynku)  $225^\circ$  i  $270^\circ$ . Dla większości słupków jego wartość była niższa niż wyznaczona z symulacji dla pozostałych kątów.

## 9.4 Wnioski końcowe

Sformułowano następujące główne wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz:

- Symulacje CFD mogą być użyte do analizy przepływów wokół układu budynek-rusztowanie. Wyniki numeryczne i eksperymentalne wykazują zadowalającą zgodność.
- Rusztowanie ustawione przy budynku nie zmienia znacznie ciśnienia na elewacjach budynku. Bezpośrednio za słupkami występuje nieznaczny spadek ciśnienia, ale ma on charakter lokalny.
- Decydujący wpływ na obciążenie wiatrem rusztowania ma opływ budynku wynikający z jego kształtu. Przy skomplikowanych kształtach oszacowanie obciążenia wiatrem działającego na rusztowanie można przyjąć na podstawie analizy CFD opływu wokół samego budynku.
- Słupki stojące w pierwszym rzędzie przy fasadzie są mniej obciążone, co wynika ze zmniejszenia prędkości wiatru wywołanego bezpośrednim sąsiedztwem ściany, a nie przesłanianiem się słupków.
- Niezależnie od kąta natarcia wiatru, dominującym kierunkiem obciążenia działającego na słupki jest kierunek równoległy do fasady.
- Największe wartości wektorów prędkości, a w konsekwencji również sił, występują przy słupkach znajdujących się w okolicy naroży budynku.
- Słupki wysunięte poza krawędź budynku są narażone na działanie obciążenia wiatrem znacznie większego niż pozostałe, nawet te przy narożu.
- Zjawisko przesłaniania (ekranowania) słupków występuje tylko w przypadku małych odległości między nimi i tylko, gdy kierunek wiatru jest równoległy do linii ich ustawienia.

## 9.5 Wnioski w odniesieniu do zaleceń normowych

Przedstawione powyżej wnioski uzyskane na podstawie przeglądu literatury, badań w skali naturalnej oraz symulacji CFD odniesiono do zaleceń normowych w zakresie projektowania rusztowań bez zakrycia ustawionych przy budynkach o pełnej elewacji i sformułowano następujące uwagi:

- Przy przykładaniu obciążenia do elementów rusztowania nie należy uwzględniać ekranowania (zgodnie z zaleceniami PN-EN 12811-2 [7]). Zalecenie to dotyczy również konstrukcji wolnostojących oraz ustawionych przy budynkach szkieletowych.
- Ze względu na zmniejszenie prędkości wiatru przy budynku, obciążenie słupków ustawionych w pierwszym rzędzie przy fasadzie może być zmniejszone o około 20%. Nie dotyczy to elementów ustawionych przy narożu.

- Jeżeli słupki rusztowania, dla których wyznaczane jest obciążenie wiatrem, są wysunięte poza krawędź budynku, nie powinno się używać współczynnika zmniejszającego  $c_s$ .
- Elementy rusztowania znajdujące się w pobliżu naroży budynku należy dodatkowo kotwić, ponieważ narażone są na największe obciążenie (zgodnie z zaleceniami normy PN-M-47900-2 [25]).
- Ponieważ, niezależnie od kąta natarcia, dominującym kierunkiem działania wiatru na słupki jest kierunek równoległy do fasady, należy stosować kotwienie typu V (powszechnie stosowane kotwy pracują tylko na wrywanie w kierunku prostopadłym do fasady) zwłaszcza przy krańcach zewnętrznych rusztowania.
- Jeżeli żaden element rusztowania nie znajduje się przy narożu budynku obciążenie równoległe normowe jest przeszacowane co najmniej o 40%, w związku z tym można rozważyć jego zmniejszenie. W analizowanym przypadku P10 zmniejszenie obciążenia normowego dotyczyłoby wszystkich słupków znajdujących się w odległości około 6 m od naroża budynku. Uogólnienie tego stwierdzenia wymaga dalszych obliczeń.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Dziennik Ustaw, *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych*, nr 47, poz. 401. 2003.
- [2] PN-EN 12811-1:2007, *Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy. Część 1: Rusztowania. Warunki wykonania i ogólne zasady projektowania*, Warszawa: PKN, 2007.
- [3] PN-EN 12810-1:2010, *Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych. Część 1: Specyfikacje techniczne wyrobów*, Warszawa: PKN, 2010.
- [4] Bambhava H.D., Pitroda J., Bhavsar J., *A comparative study on bamboo scaffolding and metal scaffolding in construction industry using statistical methods*, International Journal of Engineering Trends and Technology, t. 4, nr 6, 2013.
- [5] Fang D., Shen Q., Wu S., Liu G., *A comprehensive framework for assessing and selecting appropriate scaffolding based on analytic hierarchy process*, Journal of Safety Research, t. 34, nr 5, s. 589–596, 2003.
- [6] PN-EN 12810-2:2010, *Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych. Część 2: Specjalne metody projektowania konstrukcji*, Warszawa: PKN, 2010.
- [7] PN-EN 12811-2:2007, *Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy. Część 2: Informacje o materiałach*, Warszawa: PKN, 2007.
- [8] PN-EN 1993-1-1:2006, Eurokod 3. *Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*, Warszawa: PKN, 2006.
- [9] PN-EN 1999-1-1:2011, Eurokod 9. *Projektowanie konstrukcji aluminiowych. Część 1-1: Reguły ogólne*, Warszawa: PKN, 2011.
- [10] PN-EN 74-1:2006, *Złącza, sworznie centrujące i podstawki stosowane w deskowaniach i rusztowaniach. Część 1: Złącza do rur. Wymagania i metody badań*, Warszawa: PKN, 2006.
- [11] PN-EN 74-1:2009, *Złącza, sworznie centrujące i podstawki stosowane w deskowaniach i rusztowaniach. Część 2: Złącza specjalne. Wymagania i metody badań*, Warszawa: PKN, 2009.
- [12] PN-EN 74-1:2007, *Złącza, sworznie centrujące i podstawki stosowane w deskowaniach i rusztowaniach. Część 3: Podstawki płaskie i sworznie centrujące – Wymagania i metody badań*, Warszawa: PKN, 2007.

- [13] PN-EN 1263-1:2015-02, *Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy - Siatki bezpieczeństwa. Część 1: Wymagania bezpieczeństwa, metody badań*, Warszawa: PKN, 2015.
- [14] PN-EN 1263-2:2015-02, *Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy. Siatki bezpieczeństwa. Część 2: Wymagania bezpieczeństwa dotyczące instalowania siatek bezpieczeństwa*, Warszawa: PKN, 2015.
- [15] PN-EN 353-1:2015-01, *Środki ochrony indywidualnej przed upadkiem z wysokości. Urządzenia samozaciskowe z prowadnicą. Część 1: Urządzenia samozaciskowe ze sztywną prowadnicą*, Warszawa: PKN, 2015.
- [16] PN-EN 353-2:2005, *Środki ochrony indywidualnej chroniące przed upadkiem z wysokości. Część 2: Urządzenia samozaciskowe z giętką prowadnicą*, Warszawa: PKN, 2005.
- [17] PN-EN 354:2012., *Środki ochrony indywidualnej chroniące przed upadkiem z wysokości. Linki bezpieczeństwa*, Warszawa: PKN, 2012.
- [18] PN-EN 361:2005, *Środki ochrony indywidualnej chroniące przed upadkiem z wysokości. Szelki bezpieczeństwa*, Warszawa: PKN, 2005.
- [19] Błazik-Borowa E., Pieńko M., *Scaffoldings*, Politechnika Lubelska, 2017.
- [20] PN-EN-1990, Eurokod 0. *Podstawy projektowania konstrukcji*, Warszawa, PKN, 2004.
- [21] PN-EN 1991-1-3:2005, Eurokod 1. *Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne - Obciążenie śniegiem*, Warszawa, PKN, 2005.
- [22] PN-B-02013:1987. *Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne środowiskowe. Obciążenie oblodzeniem*, Warszawa: PKN, 1987.
- [23] PN-EN 1991-1-4:2008, Eurokod 1. *Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru*, Warszawa: PKN, 2008.
- [24] Błazik-Borowa E., *Obciążenia i oddziaływania na rusztowania jako konstrukcje inżynierskie*, Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2018.
- [25] PN-M-47900-2:1996, *Rusztowania stojące metalowe robocze. Rusztowania stojakowe z rur*, 1996.
- [26] Scruton C., Rogers E. W. E., *Steady and unsteady wind loading of buildings and structures*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences, t. 269, nr 1199, s. 353–383, 1971.

- [27] Mallick M., *Variation of drag coefficient on rough cylindrical bodies*, National Institute of Technology Rourkela, 2014.
- [28] Flaga A., *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*, Warszawa: Arkady, 2008.
- [29] Holmes J.D., *Wind loading of structures*, London: Spon Press, 2001.
- [30] Żurański J.A., *Obciążenie wiatrem*, Warszawa: Arkady, 1978.
- [31] Hui Y., Tamura Y., Yoshida A., *Mutual interference effects between two high-rise building models with different shapes on local peak pressure coefficients*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 104–106, s. 98–108, 2012.
- [32] Hui Y., Tamura Y., Yoshida A., Kikuchi H., *Pressure and flow field investigation of interference effects on external pressures between high-rise buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 115, s. 150–161, 2013.
- [33] Hui Y., Yoshida A., Tamura Y., *Interference effects between two rectangular-section high-rise buildings on local peak pressure coefficients*, Journal of Fluids and Structures, t. 37, s. 120–133, 2013.
- [34] Lo Y., Kim Y.C., Li Y., *Downstream interference effect of high-rise buildings under turbulent boundary layer flow*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, t. 159, nr October, s. 19–35, 2016.
- [35] Dyrbye C., Hansen S.O., *Wind loads on structures*, John Wiley & Sons, 1997.
- [36] Simiu E., Scanlan R.H., *Wind effects on structures - fundamentals and applications to design*, Wiley, 1996.
- [37] Żurański J.A., *Wpływ warunków klimatycznych i terenowych na obciążenie wiatrem konstrukcji budowlanych*, Warszawa: Wydawnictwa ITB, 2005.
- [38] Lipecki T., *Struktura wiatru i badania modelowe obciążenia wiatrem budowli prostopadłościennych*, Lublin: Politechnika Lubelska, 2015.
- [39] Fang F.-M., Chang S.-X., Chung C.-Y., Li Y.-C., Chen C.-H., *Experimental investigation on the wind force of a scaffolding system*, [w:] EACWE2017, 2017.
- [40] Yue F., Yuan Y., Li G., Ye K., Chen Z., Wang Z., *Wind load on integral-lift scaffolds for tall building construction*, Journal of Structural Engineering, t. 131, nr 5, s. 816–824, 2005.

- [41] Yue F., Yuan Y., Li G., Ye K., *Wind tunnel test on the self-climbing scaffold attached to tall buildings in construction* (in Chinese), Journal of Tongji University. Natural Science, t. 29, nr 10, s. 1220–1224, 2001.
- [42] Wang F., *Aerodynamic characteristics of scaffolding with nonporous cladding*, Tokyo Polytechnic University, 2013.
- [43] Wang F., Tamura Y., Yoshida A., *Wind loads on clad scaffolding with different geometries and building opening ratios*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 120, s. 37–50, 2013.
- [44] Wang F., Tamura Y., Yoshida A., *Interference effects of a neighboring building on wind loads on scaffolding*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 125, s. 1–12, 2014.
- [45] Irtaza H., Beale R.G., Godley M.H.R., *A wind-tunnel investigation into the pressure distribution around sheet-clad scaffolds*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 103, s. 86–95, 2012.
- [46] Richards P.J., Hoxey R.P., *Wind loads on the roof of a 6 m cube*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 96, nr 6–7, s. 984–993, 2008.
- [47] Richards P.J., Hoxey R.P., Connell B.D., Lander D.P., *Wind-tunnel modelling of the Silsoe Cube*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 95, nr 9–11, s. 1384–1399, 2007.
- [48] ASCE. *Minimum design loads for buildings and other structures*, American Society of Civil Engineers, 2010.
- [49] Charuvisit S., Hino Y., Ohdo K., Maruta E., Kanda M., *Wind tunnel experiment on wind pressures acting on the scaffolds in strong winds*, Journal of Wind Engineering, t. 32, nr 1, s. 1–10, 2007.
- [50] Ohdo K., *Introduction*, [w:] Specific Research Reports of the National Institute of Industrial Safety. No. 31, 2005, s. 1–8.
- [51] Takanashi S., Ohdo K., *Influence of construction error on the mechanical characteristics of scaffold*, [w:] Specific Research Reports of the National Institute of Industrial Safety. No.31, 2005, s. 59–68.
- [52] Takanashi S., Ohdo K., *Influence of construction error on the mechanical properties of tie*, [w:] Specific Research Reports of the National Institute of Industrial Safety. No.31, 2005, s. 51–58.
- [53] Ohdo K., Hino Y., Takanashi S., Sato N., *Experimental study on risk of assembling and dismantling works of the scaffolds under strong winds*, [w:] Specific Research Reports of the National Institute of Industrial Safety. No.31, 2005, s. 69–78.

- [54] Ohdo K., Takanashi S., Hino Y., Saito K., *Measurement of wind load acting on the scaffolds*, [w:] Specific Research Reports of the National Institute of Industrial Safety. No.31, 2005, s. 9–18.
- [55] Hino Y., Sato N., Phongkumsing S., Ohdo K., Takanashi S., *The predictability of wind pressure acting on the actual scaffolds by the wind tunnel test*, [w:] Specific Research Reports of the National Institute of Industrial Safety. No.31, 2005, s. 19–26.
- [56] Hino Y., Phongkumsing S., *Study on the estimation method of wind pressure acting on the temporary scaffolds*, [w:] Specific Research Reports of the National Institute of Industrial Safety. No. 31, 2005, s. 27–42.
- [57] Hino Y., Ohdo K., *Study on a new reinforcement method of temporary scaffolds*, [w:] Specific Research Reports of the National Institute of Industrial Safety. No.31, 2005, s. 43–50.
- [58] Irtaza H., *Experimental and computational determination of wind loads on netted/sheeted scaffold*, School of Built-Environment Oxford Brookes University, 2009.
- [59] Irtaza H., Beale R.G., Godley M.H.R., Jameel A., *Pressure distribution around net clad scaffolds using computation fluid dynamics techniques*, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, t. 3, s. 54–62, 2010.
- [60] Jamińska P., *Analiza działania wiatru na układ budynek z rusztowaniem*, Budownictwo i Architektura, t. 12, nr 2, s. 111–118, 2013.
- [61] Jamińska P., Błazik-Borowa E., Lipecki T., *CFD study on wind action on building-scaffolding system*, [w:] 6th International Symposium on Computational Wind Engineering, s. 74–75, 2014.
- [62] Geurts C.P.W., *Wind-induced pressure fluctuations on building facades*, Technische Universiteit Eindhoven, 1997.
- [63] Błazik-Borowa E., *Problemy związane ze stosowaniem modelu turbulencji  $k-\varepsilon$  wyznaczania parametrów opływu budynków*, Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2008.
- [64] Easom G., *Improved turbulence models for computational wind engineering*, University of Nottingham, 2000.
- [65] Flaga A., Błazik-Borowa E., Podgórski J., *Aerodynamika smukłych budowli i konstrukcji prętowo-ciężnowych*, Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2004.
- [66] Patankar S., *Numerical heat transfer and fluid flow*, Taylor & Francis, 1980.

- [67] Ferziger J.H., Peric M., *Computational methods for fluid dynamics*, Springer, 2002.
- [68] Argyropoulos C.D., Markatos N.C., *Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows*, Applied Mathematical Modelling, t. 39, nr 2, s. 693–732, 2015.
- [69] Chung T.J., *Computational Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, 2002.
- [70] Murakami S., *Overview of turbulence models applied in CWE-1997*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 74–76, s. 1–24, kwi. 1998.
- [71] Leschziner M.A., *Modelling turbulence in physically complex flows*, [w:] XXIV IAHR Congress „Hydra 2000”, 1995, s. 1–33.
- [72] Smagorinsky J., *General circulation experiments with the primitive equations*, Monthly Weather Review, t. 91, nr 3, s. 99–164, 1963.
- [73] Paszko M., Łygas K., *Współczesne metody modelowania przepływów turbulentnych w otoczeniu poruszającego się autobusu miejskiego*, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, t. 17, nr 12, s. 1269–1272, 2016.
- [74] Spalart P.R., *Detached-eddy simulation*, Annual Review of Fluid Mechanics, t. 41, nr 1, s. 181–202, 2009.
- [75] Versteeg H.K., Malalasekera W., *An introduction to Computational Fluid Dynamics – the Finite Volume Method*, Fluid flow handbook. McGraw-Hill, 1995.
- [76] Nichols R.H., *Turbulence models and their application to complex flows*, University of Alabama at Birmingham, 2001.
- [77] Spalart P.R., Allmaras S.R., *A one-equation turbulence model for aerodynamics flows*, La Recherche Aerospatiale, t. 1, s. 5–21, 1944.
- [78] Tominaga Y., Stathopoulos T., *Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: Comparison of various types of  $k-\varepsilon$  models*, Atmospheric Environment, t. 43, nr 20, s. 3200–3210, 2009.
- [79] Yu H., Thé J., *Validation and optimization of SST  $k-\omega$  turbulence model for pollutant dispersion within a building array*, Atmospheric Environment, t. 145, s. 225–238, 2016.
- [80] Launder B.E., Spalding D.B., *Lectures in mathematical models of turbulence*, London: Academic Press, 1972.

- [81] Tominaga Y., Stathopoulos T., *CFD simulations of near-field pollutant dispersion with different plume buoyancies*, [w:] 7th European and African Conference on Wind Engineering, EACWE 2017, 2017.
- [82] Shih T.-H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J., *A new  $k-\varepsilon$  eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows*, Computers & Fluids, t. 24, nr 3, s. 227–238, 1995.
- [83] Shao J., Liu J., Zhao J., *Evaluation of various non-linear  $k-\varepsilon$  models for predicting wind flow around an isolated high-rise building within the surface boundary layer*, Building and Environment, t. 57, s. 145–155, 2012.
- [84] David C. Wilcox, *Turbulence modeling for CFD*, DCW Industries, Inc, 1994.
- [85] Menter F.R., *Zonal two equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows*, AIAA Paper, s. 93–2906, 1993.
- [86] Zhang J., Yang Q., Li Q.S., *Application of nonlinear eddy viscosity model in simulations of flows over bluff body*, [w:] 7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7), 2012, s. 214–223.
- [87] Yang L., Gurley K.R., Prevatt D.O., *Probabilistic modeling of wind pressure on low-rise buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 114, s. 18–26, 2013.
- [88] Li Q.S., Xiao Y.Q., Wong C.K., Jeary A.P., *Field measurements of wind effects on the tallest building in Hong Kong*, Structural Design of Tall and Special Buildings, t. 12, nr 1, s. 67–82, 2003.
- [89] Goliber M., Sritharan S., Partha S., *An investigation of the accuracy of pressure measurements and pressure interpolation on the roof of a low-rise building*, Ames: Iowa State University, 2010.
- [90] Li Q.S., Xiao Y.Q., Wong C.K., Jeary A.P., *Field measurements of typhoon effects on a super tall building*, Engineering Structures, t. 26, nr 2, s. 233–244, 2004.
- [91] Richards P.J., Hoxey R.P., *Pressures on a cubic building-Part 1: Full-scale results*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 102, s. 72–86, 2012.
- [92] Sumorek A., *System do pomiarów obciążenia wiatrem rusztowań elewacyjnych*, Informatics Control Measurement in Economy and Environment Protection, t. 6, nr 4, s. 37–42, 2016.
- [93] Jamińska-Gadomska P., Lipecki T., Błazik-Borowa E., Bęc J., *Metodyka badań in-situ oddziaływania wiatru na rusztowania budowlane*, Building Physics in Theory and Practice, t. 9, r 2, s. 9–12, 2017.

- [94] Lipecki T., Jamińska P., Błazik-Borowa E., Bęc J., *Szacowanie oddziaływania wiatru na rusztowanie w świetle badań w skali rzeczywistej*, Building Physics in Theory and Practice, t. 9, nr 4, s. 9–14, 2017.
- [95] Lipecki T., Jamińska P., Sumorek A., Błazik-Borowa E., Bęc J., *A system for measuring environmental data in full-scale*, Journal of Physics: Conference Series, t. 1101, s. 1–8, 2018.
- [96] Richards P.J., Hoxey R.P., *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering model using the  $k$ - $\epsilon$  turbulence model*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 46–47, s. 145–153, 1993.
- [97] Norberg C., *Fluctuating lift on a circular cylinder: Review and new measurements*, Journal of Fluids and Structures, t. 17, nr 1, s. 57–96, 2003.
- [98] Lipecki T., *Wzbudzenie wirowe budowli wieżowych o kołowych przekrojach poprzecznych*, Politechnika Lubelska, 2006.
- [99] Sumner D., Akosile O.O., *On uniform planar shear flow around a circular cylinder at subcritical Reynolds number*, Journal of Fluids and Structures, t. 18, s. 441–454, 2003.
- [100] Nishimura H., Taniike Y., *Aerodynamic characteristics of fluctuating forces on a circular cylinder*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 89, s. 713–723, 2001.
- [101] Tonin R.F., Bies D.A., *Free vibration of circular cylinders of variable thickness*, Journal of Sound and Vibration, t. 62, nr 2, s. 165–180, 1979.
- [102] Griffin O.M., Skop R.A., Koopmann G.H., *The vortex-excited resonant vibrations of circular cylinders*, Journal of Sound and Vibration, t. 31, nr 2, s. 235–249, 1973.
- [103] Nguyen V.T., Nguyen H.H., *Detached eddy simulations of flow induced vibrations of circular cylinders at high Reynolds numbers*, Journal of Fluids and Structures, t. 63, s. 103–119, 2016.
- [104] Khan N.B., Ibrahim Z., *Numerical investigation of vortex-induced vibration of an elastically mounted circular cylinder with one-degree of freedom at high Reynolds number using different turbulent models*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, s. 1–11, 2018.
- [105] Liu H., Zhao Q., Wang X., Zhou T., Wang D., Liu J., Chen Z., *Experimental and analytical studies on the stability of structural steel tube and coupler scaffolds without X-bracing*, Engineering Structures, t. 32, nr 4, s. 1003–1015, 2010.

- [106] Dong S., Karniadakis G.E., Ekmekci A., Rockwell D., *A combined direct numerical simulation-particle image velocimetry study of the turbulent near wake*, Journal of Fluid Mechanics, t. 569, s. 185–207, 2006.
- [107] Zhou Y., Alam M., *Wake of two interacting circular cylinders: A review*, International Journal of Heat and Fluid Flow, t. 62, s. 510–537, 2016.
- [108] Zdravkovich M.M., *Aerodynamics of two parallel circular cylinders of finite height at simulated high Reynolds numbers*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 6, nr 1–2, s. 59–71, 1980.
- [109] Sumner D., *Two circular cylinders in cross-flow: A review*, Journal of Fluids and Structures, t. 26, nr 6, s. 849–899, 2010.
- [110] Błazik-Borowa E., Flaga A., Kazakiewicz M.I., *Problemy interferencji aerodynamicznej dwóch walców kołowych*, Archiwum Inżynierii Łądowej, Studia z Zakresu Inżynierii Łądowej, zeszyt nr 42, Warszawa, 1997.
- [111] Franke J., Hellsten A., Schlünzen H., Carissimo B., *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*, t. 44. COST action, 2007.
- [112] Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M., Shirasawa T., *AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 96, nr 10–11, s. 1749–1761, 2008.
- [113] Schlichting H., *Boundary-layer theory*, McGraw-Hill Company, 1979.
- [114] Richards P.J., Norris S.E., *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, t. 99, nr 4, s. 257–266, 2011.
- [115] Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J., *CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems*, Atmospheric Environment, t. 41, nr 2, s. 238–252, 2007.
- [116] ANSYS Fluent, *User's Guide. Release 15.0*, Southpointe, Canonsburg, PA (EEUU): ANSYS Inc, 2013.
- [117] Launder B.E., Spalding D.B., *The numerical computation of turbulent flows*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, t. 3, nr 2, s. 269–289, 1974.
- [118] Salgado A.J., Gomes M.E., Chou A., Coutinho O.P., Reis R.L., Hutmacher D.W., *Preliminary study on the adhesion and proliferation of human osteoblasts on starch-based scaffolds*, Materials Science and Engineering: C, t. 20, nr 1–2, s. 27–33, 2002.