

## Analiza działania wiatru na układ budynek z rusztowaniem

Paulina Jamińska<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,  
e-mail: p.jaminska@pollub.pl

**Streszczenie:** W niniejszej pracy podjęto próbę określenia wpływu wiatru na układ budynek z rusztowaniem. Analizę przeprowadzono na podstawie symulacji komputerowych w programie ANSYS FLUENT, z wykorzystaniem modelu turbulencji przepływu RNG  $k-\varepsilon$ . Obliczenia wykonano w przepływie dwuwymiarowym, dla przypadku budynku o przekroju prostokątnym. Zamodelowano opływ samego budynku oraz budynku z rusztowaniem ustawionym przy dłuższej ze ścian, przy czterech różnych kątach natarcia wiatru:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , i  $90^\circ$   $135^\circ$ . Otrzymane wyniki przedstawiono w postaci wykresów ciśnień na ścianach modelu oraz rozkładów prędkości w domenie i porównano je do zaleceń normowych dotyczących rusztowań. Uzyskane rezultaty wskazują, że opływ rzeczywisty wokół układu budynku z rusztowaniem jest dużo bardziej skomplikowany niż opływ normowy. Oddziaływanie wiatru może powodować siły wywołujące momenty skręcające rusztowanie i w związku z tym prowadzić do zawalenia się rusztowania.

**Słowa kluczowe:** Komputerowa Mechanika Płynów, model turbulencji  $k-\varepsilon$ , rusztowanie, budynek o przekroju prostokątnym

### 1. Wprowadzenie

Oddziaływanie wiatru ma charakter stochastyczny w czasie i przestrzeni. Jest trudne do przewidzenia i może mieć znaczny wpływ na obiekty płytowo-prętowe, jakimi są rusztowania wznoszone przy zewnętrznych ścianach budynków. Pomimo wciąż występujących katastrof budowlanych rusztowań spowodowanych oddziaływaniem wiatru [1], aspekt dotyczący obciążenia wiatrem rusztowań oraz zmiany pola opływu wokół budynku z ustawionym rusztowaniem jest rzadko poruszany w literaturze. Sytuacja ta jest prawdopodobnie związana z faktem, iż zgodnie z definicją, zawartą w normie [2], rusztowania są tymczasowymi konstrukcjami, wznoszonymi głównie na placach budowy.

Dostępna literatura zawiera pozycje skupiające się na stateczności konstrukcji [3], kotwieniu [4], analizie uszkodzeń [5] i nośności węzłów [6] oraz bezpieczeństwie użytkownika [7], [8] i katastrofach rusztowań. Bardzo nieliczne dotąd badania dotyczyły oddziaływania wiatru na budynki z rusztowaniem z zakryciem ochronnym i zostały przeprowadzone w Japonii w skali rzeczywistej [9] oraz w tunelu aerodynamicznym [10].

Niniejsza praca ma na celu wykazanie, iż oddziaływanie wiatru na rusztowanie wzniesione przy ścianie budynku jest znacznie bardziej skomplikowane niż podają zalecenia normowe. Niedoszacowanie wartości sił powstałych w skutek wiatru działającego na tymczasową konstrukcję, może doprowadzić do katastrofy spowodowanej np. przez zbyt rzadkie rozmieszczenie kotew rusztowań. Z drugiej strony, stosowanie dużych wartości współczynników bezpieczeństwa, może prowadzić do sytuacji, w której rusztowanie w ogóle nie byłoby wzniesione, z powodu zbyt dużego obciążenia na nie działającego.

### 2. Ujęcie normowe oddziaływania wiatru na konstrukcje rusztowań

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 r. [11] rusztowania, które nie są opisane w instrukcji montażu producenta są rusztowaniami nietypowymi i wymagają wykonania projektu. Ogólne zasady projektowania rusztowań oraz zalecenia dotyczące sposobu zbierania i przykładania obciążenia wiatrem na konstrukcję rusztowania znajdują się w normie [2].

Wartość charakterystyczną wiatru działającą na rusztowanie zapisano w postaci siły, zgodnie ze wzorem:

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

gdzie:  $c_s$  – współczynnik miejsca,  $c_{fi}$  – współczynnik siły aerodynamicznej,  $A_i$  – pole powierzchni odniesienia (powierzchni każdego elementu wystawionego na kierunek działania wiatru),  $q_i$  – ciśnienie dynamiczne,  $i$  –  $i$ -ty element rusztowania.

Współczynnik miejsca  $c_s$  oraz aerodynamiczny  $c_f$  należy określić na podstawie normy [12] i [13], w zależności od tego czy rusztowanie jest zakryte siatką ochronną czy nie. Dodatkowo, w przypadku rusztowania obciążonego wiatrem prostopadle do elewacji, przy której jest zamocowane, wyznaczając  $c_s$ , należy uwzględnić otwory, jakie mogą znajdować się w budynku. Jest to bardzo istotne w przypadku rusztowań przy dopiero wznoszonych budowlach.

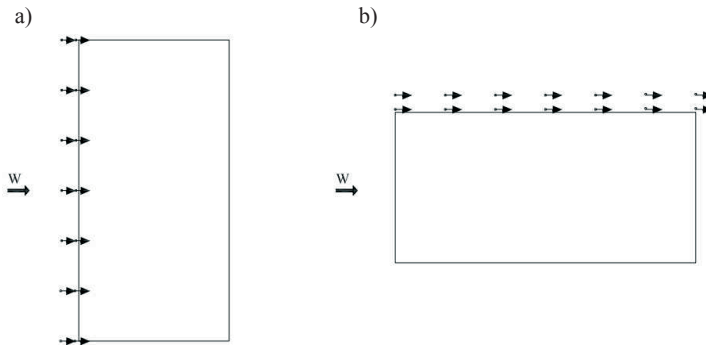
Ciśnienie dynamiczne  $q_i$  działające na powierzchnię odniesienia  $A_i$  rusztowania wyraża równanie:

$$q_i = c_e \cdot q_b \quad (2)$$

gdzie:  $c_e$  – współczynnik ekspozycji,  $q_b$  – wartość bazowa ciśnienia prędkości.

Wielkość  $c_e$  należy wyznaczyć na podstawie normy [14]. Bazowe ciśnienie prędkości  $q_b$  można również odczytać z normy [14], z wykresu znajdującego się w normie [12], lub w przypadku obciążenia roboczego rusztowania przyjąć wartość  $q_b = 0,2 \text{ kN/m}^2$ , podaną w normie [2].

Zgodnie z zaleceniami normowymi, oddziaływanie wiatru wyrażone za pomocą siły  $F_k$  z wzoru (1), należy uwzględnić oddzielenie dla kierunku wiatru równoległego i prostopadłego do fasady, przy której znajduje się konstrukcja rusztowania (rys. 1).



Rys. 1. Normowy schemat przykładania obciążenia wiatrem: a) gdy wiatr działa prostopadle do ściany zewnętrznej budynku, b) gdy wiatr działa równolegle do ściany zewnętrznej budynku.

Występujące najczęściej budynki mają prostokątny przekrój poprzeczny, a na ostrych krawędziach dochodzi do oderwania wirów, co prowadzi do powstania ssania na ścianach bocznych. W przypadku, kiedy wiatr wieje z boku rusztowania, część konstrukcji może znaleźć się w obrębie wiru, co spowoduje pojawienie się sił o przeciwnych zwrotach, działających na rusztowanie, co w rezultacie może doprowadzić nawet do oderwania rusztowania od ściany lub jego silnego skręcenia.

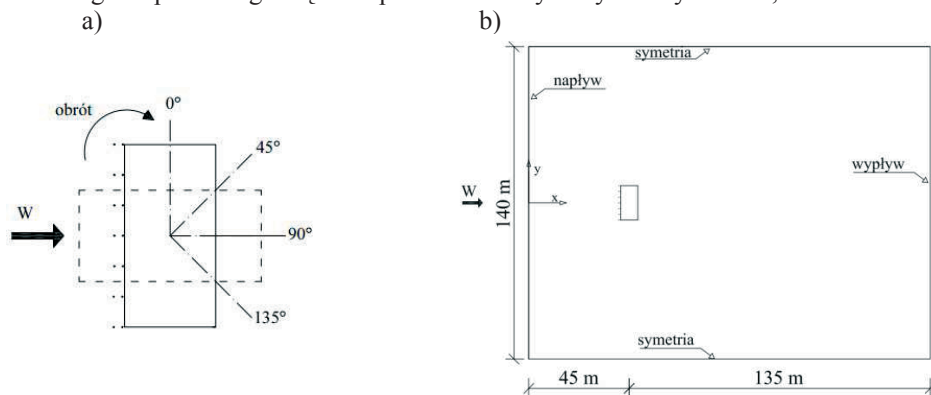
W niniejszej pracy przedstawiono porównanie opływu wynikającego z normy i rzeczywistego, dotyczącego rusztowania bez przekrycia ustawionego przy budynku o prostokątnym przekroju poprzecznym.

### 3. Model numeryczny

Obliczenia komputerowe opływu dwuwymiarowego wykonano w programie ANSYS FLUENT w wersji 14.0. Do symulacji przepływu niezmiennego w czasie użyto metody objętości skończonych oraz modelu turbulencji  $k-\epsilon$  w wersji RNG [15]. Układ równań

Naviera-Stokes'a był rozwiązywany metodą aproksymacji *simple* do 1000 iteracji, a następnie metodą *coupled*, wyznaczającą w pierwszej kolejności prędkość i ciśnienie, a następnie pozostałe parametry przepływu.

Wykonano obliczenia dwuwymiarowe, dla dwóch przypadków: budynku z rusztowaniem, które zostało przedstawione w postaci słupków rusztowania i samego budynku. Kierunek napływu wiatru zmieniał się co  $45^\circ$  zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 2a. Wymiar domeny obliczeniowej wzdłuż i w poprzek przepływu wynosił odpowiednio 180 m i 140 m. Środek modelu budynku o wymiarach  $b = 7,72$  m i  $d = 15,43$  m znajdował 45 m od początku układu współrzędnych umieszczonego na środku wlotu domeny (rys. 2b). Rusztowanie modelowały słupki, przyjęte w obliczeniach płaskich jako koła o średnicy 0,0483 m. Wzdłuż dłuższej ściany budynku ustawiono czternaście słupków w dwóch rzędach przedstawiających sześć pól rusztowania o wymiarach 2,572 m x 0,732 m. Odległość pierwszego rzędu słupków od fasady budynku wynosiła 0,15 m.

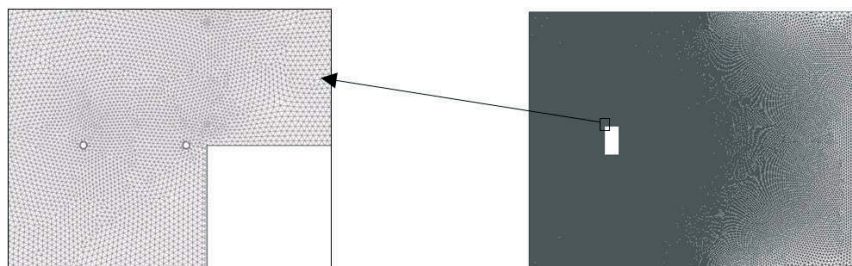


Rys. 2. Przyjęte założenia: a) obrót modelu, b) domena obliczeniowa.

W domenie obliczeniowej zastosowano następujące warunki brzegowe: na krawędzi nawierzchni – napływ (*velocity inlet*), na krawędziach domeny równoległych do kierunku przepływu – symetria (*symmetry*), na krawędzi równoległej do wlotu domeny – wypływ (*outflow*). Na krawędziach modelu oraz na słupkach rusztowania użyto warunku ściana (*wall*), bez poślizgu (*no slip*).

Wszystkie symulacje przeprowadzono przyjmując prędkość wiatru na wlocie  $u = 10$  m/s, intensywności turbulencji  $I_u = 10\%$  oraz skali długości turbulencji  $L = 140$  m. Liczba Reynoldsa wyznaczona na podstawie wymiaru modelu oraz początkowej prędkości wiatru wynosiła  $Re = 1,06 \times 10^7$ .

Siatka obliczeniowa domeny została wygenerowana w programie Gambit. Dla budynku bez rusztowania zawierała 561436 trójkątnych komórek i 282922 wierzchołków, dla budynku z rusztowaniem 560890 trójkątnych komórek i 282502 wierzchołków. Przy obliczeniach budynku z rusztowaniem, siatka różniła się wyłącznie brakiem elementów w miejscu występowania słupków rusztowania. Na rys. 3 pokazano siatkę domeny obliczeniowej.

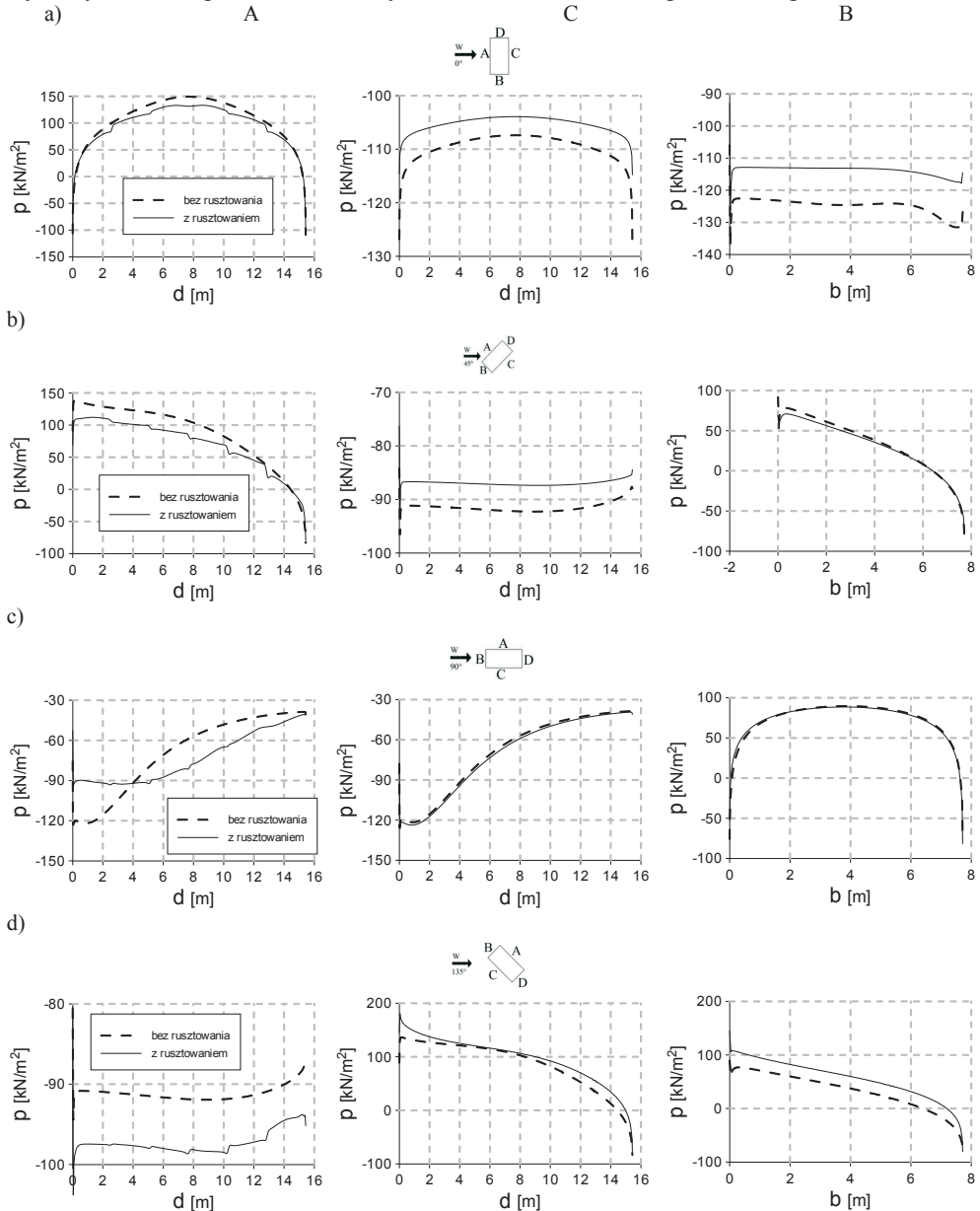


Rys. 3. Siatka domeny obliczeniowej w wariancie ze słupkami.

#### 4. Analiza wyników obliczeń

W wyniku przeprowadzonych symulacji otrzymano pola wypadkowej prędkości wiatru, rozkład ciśnienia na ścianach modelu oraz siły skupione działające na rusztowanie.

W celu ułatwienia interpretacji wyników wprowadzono następujące oznaczenia ścian – w ustawieniu  $0^\circ$  ściana A jest nawietrzną, B i D są ścianami bocznymi, zaś C to ściana zawietrzna. Rusztowanie było ustawione przy ścianie A. Te same oznaczenia zostały wykorzystane do opisu ścian dla innych kątów natarcia, według załączonego schematu.



Rys. 4. Rozkład ciśnienia na ścianach budynku przy kącie natarcia wiatru: a)  $0^\circ$ , b)  $45^\circ$ , c)  $90^\circ$ , d)  $135^\circ$ .

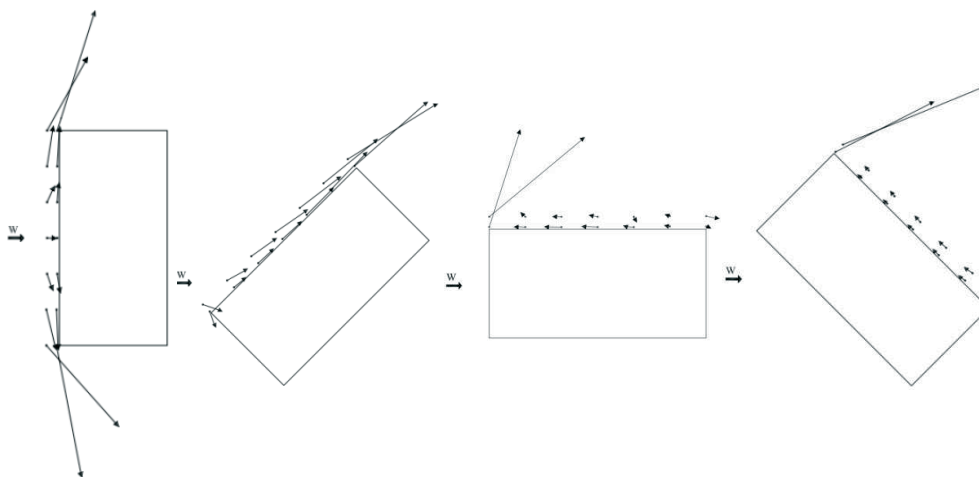
Na rys. 4 widać wyraźnie zmianę wartości ciśnienia na ścianie A za słupkami, przy czym dla kąta  $0^\circ$  i  $45^\circ$  jest to spadek parcia, dla kąta  $90^\circ$  przy krawędzi nawierzchni spadek ssania, zaś przy krawędzi zawietrznej wzrost, natomiast dla kąta  $135^\circ$  na całej długości ściany występuje wzrost ssania. Kształt rozkładu ciśnienia jest zbliżony we wszystkich przypadkach oprócz ściany A przy kącie natarcia wiatru  $90^\circ$ . Różnica ta jest prawdopodobnie wywołana faktem, iż wir oderwany na krawędzi ściany nawierzchni został odsunięty od ściany bocznej przez słupki rusztowania znajdujący się przy tej krawędzi.

W przypadku kąta natarcia  $0^\circ$  (ściany C i B) i  $45^\circ$  (ściana B) widać również mniejsze ssanie dla budynku z rusztowaniem. Słupki znajdujące się na ścianie od strony nawierzchni spowodowały zmniejszenie się wartości prędkości oraz parcia na ścianie A, a co za tym idzie zmniejszenia prędkości oraz ciśnienia na ścianach B, D oraz C. Z kolei wartości ciśnienia na ścianie C praktycznie nie różnią się w przypadku kąta natarcia wiatru  $90^\circ$  i  $135^\circ$ , ponieważ rusztowanie w tych ustawieniach nie znajduje się od strony nawierzchni. Opływ dla ściany C jest bardzo bliski opływowi budynku bez rusztowania ( $90^\circ$  i  $135^\circ$ ).

Na podstawie ciśnienia statycznego działającego na powierzchnie słupków rusztowania wyznaczono wartości sił wypadkowych od oddziaływania wiatru (rys. 5). Porównując zwroty uzyskanych sił z zaleceniami normowymi (rys. 1) widać, że łącznie się one między sobą różnią. W przypadku napływu prostopadłego do ściany rusztowaniem, siły aerodynamiczne nie działają prostopadle na słupki rusztowania. Słupki znajdujące się w środku przepływu przy ścianie budynku, jest obciążony tak małą siłą, iż można ją przyjąć za zerową. Na słupki odsunięte ku krawędziom od środka ściany, czyli punktu stagnacji działają siły o zwrotach niemal równoległych do ścian, a ich wartość znacznie wzrasta w narożu, czyli miejscu odrywania wirów.

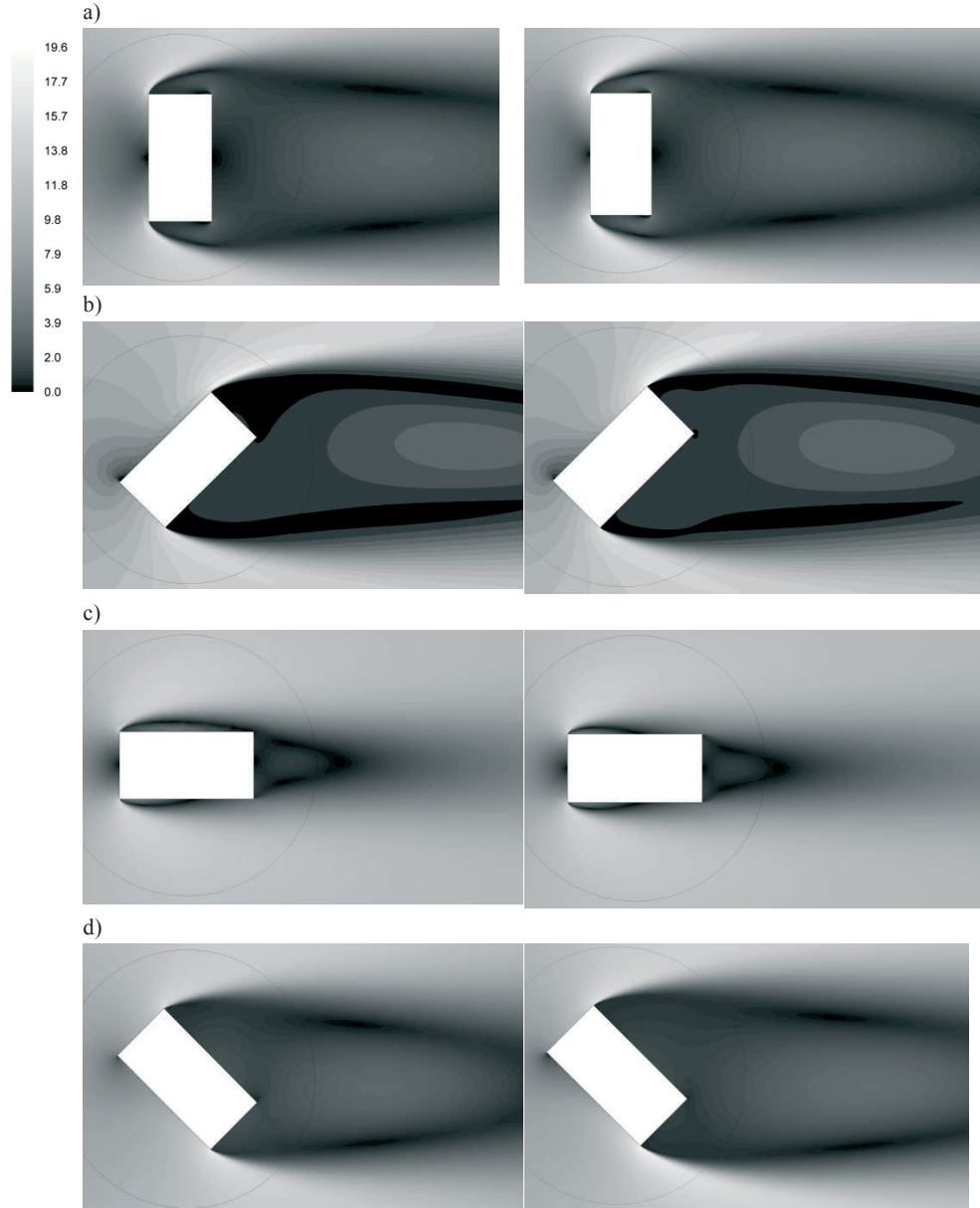
Gdy kąt natarcia wiatru jest równoległy do fasady budynku z rusztowaniem, siły działające na słupki, nie mają – tak jak jest to w przypadku normowym – zwrotów zgodnych z kierunkiem przepływu. Na krawędzi nawierzchni następuje oderwanie się wiru (siły są skierowane po kątem), który sprawia, że na dalsze słupki rusztowania działają siły o zwrocie przeciwnym do kierunku wiatru przed budynkiem.

W przypadku kąta natarcia wiatru  $45^\circ$ , siły działające na rusztowanie są równoległe do ściany budynku, ich zwrot jest zgodny z przepływem, a przy narożu ściany następuje zwiększenie ich wartości, wywołane przyspieszeniem wiatru. Przy kącie  $135^\circ$  ściana z rusztowaniem znajduje się w strefie podciśnienia, a wiatr nie oddziałuje na nią bezpośrednio. Siły działające na słupki rusztowania spowodowane są wirami odrywającymi się z krawędzi nawierzchni, mają małą wartość, są równoległe do ściany. Na rusztowanie znajdujące się przy narożu, działa z kolei duże parcie, spowodowane odrywaniem się wiru (podobnie jak dla kąta  $90^\circ$ ).



Rys. 5. Siły aerodynamiczne działające na słupki rusztowania.

Pola prędkości wiatru w domenie obliczeniowej, w zależności od kąta natarcia pokazano na rys. 6. Wprowadzenie rusztowania przy dłuższej ze ścian budynku nie zmienia w znaczny sposób opływu tego układu. Jedynie przy kącie obrotu  $90^\circ$  widać, że wir oderwany na krawędzi zewnętrznej jest dłuższy na ścianie gdzie znajduje się rusztowanie.



Rys. 6. Pola średniej prędkości przepływu wiatru w domenie obliczeniowej w przypadku układu budynku z rusztowaniem (od lewej) i bez (z prawej): a)  $0^\circ$ , b)  $45^\circ$ , c)  $90^\circ$ , d)  $135^\circ$ .



## 5. Wnioski

Przeprowadzone badania mają charakter wstępny. Analizy wykonano dla przepływu dwuwymiarowego, dzięki czemu znacznie skrócono czas potrzebny na modelowanie i wykonanie obliczeń. Jednocześnie wykonanie badań płaskich poziomego przekroju budynku z rusztowaniem odpowiada zaleceniom normowym, przy projektowaniu rusztowań, do których porównano otrzymane wyniki. W przyszłości planowane jest przeprowadzenie obliczeń dla modelu 3D opływu budynku z rusztowaniem, jednakże trzeba mieć na uwadze, że duża różnica pomiędzy średnicą słupka rusztowania, a długością ściany budynku może znacznie utrudnić modelowanie i obliczenia.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń wskazują jednoznacznie, iż opływ budynku z rusztowaniem zalecany przez normy europejskie, jest niezgodny z rzeczywistością. Proponowane przez normy obciążenie prostopadłe do fasady budynku, przy którym ustawiono rusztowanie może być prawdziwe tylko w przypadku bardzo dużych otworów w budynku. Rzeczywiste siły wywołane przez wiatr, znacznie różnią się kierunkiem, zwrotem oraz wartością. Fakt ten może doprowadzić do sytuacji, w której źle zaprojektowane rusztowanie ulegnie zawaleniu.

Problem obciążenia wiatrem rusztowań jest wciąż zagadnieniem nie poznany w wystarczającym stopniu. Oddziaływanie wiatru może spowodować zmianę rozkładu sił wewnętrznych w elementach rusztowania, w tym wzrost wartości sił normalnych w stężeniach, który może doprowadzić do przekroczenia nośności węzłów, w których zamocowane są stężenia.

Przeprowadzone badania mają prowadzić do opracowania nowych, właściwych zaleceń dotyczących obciążenia wiatrem podczas analizowania stanu naprężenia w konstrukcji rusztowania, sformułowanych na podstawie pełnej znajomości opływu powietrza wokół układu budynek-rusztowanie

Pomimo, iż w przeprowadzonych symulacjach opływ wokół budynku nie uległ dużej zmianie w związku ze wstawieniem rusztowania, planuje się sprawdzenie czy w przypadku innych kształtów budynku będzie podobnie. Pełniejsze wyjaśnienie zmian spowodowanych wstawieniem rusztowania w pole wiatru dadzą obliczenia zmienne w czasie, które również planuje się wykonać.

## Literatura

- 1 Kajfasz S. Lekcje z awarii 2005 - 2007 za granicą. Mat. XXIII Konferencji Naukowo-Technicznej „Awarie budowlane” (2007) 67-80.
- 2 PN-EN 12811-1. Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy. Część 1: Rusztowania. Warunki wykonania i ogólne zasady projektowania.
- 3 Chan S. L., Zhou Z. H., Chen W. F., Peng J. L., Pan A. D. Stability analysis of semirigid steel scaffolding. *Engineering Structure* 17 (8) (1995) 568–574.
- 4 Algin H. M. Investigation of masonry wall fixings subject to pullout load and torque. *Construction and Building Materials* 21(12) (2007) 2041-2046.
- 5 Lacalle R., Cicero S., Ferreno D., Alvarez J. A. Failure analysis of a bolt in a scaffolding system. *Engineering Failure Analysis*, 15(3) (2008). 237-246.
- 6 Pieńko M., Błazik-Borowa, E. Numerical analysis of load-bearing capacity of modular scaffolding nodes. *Engineering Structures* 48 (2013) 1-9.
- 7 Whitaker S.M., Graves R. J., James M., McCann P. Safety with access scaffolds: Development of prototype decision aid based in accident analysis. *Journal of Safety Research* 34 (2003) 249-261.
- 8 Halperin K. M., McCann M. An Evaluation of scaffold safety at construction sites. *Journal of Safety Research* 35 (2004) 141-150.
- 9 Ohdo K., Takanashi S., Hino Y., Saito K. Measurement of Wind Load Acting on the Scaffolds, Specific Research Reports of the National Institute of Industrial Safety. NIIS-SRR-NO.31 (2005) 9-18.
- 10 Wang F., Tamura Y. Yoshida A., Okada R. Wind force characteristics of scaffoldings with sheets. BBAA7, 2012.

- 11 Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych. Dz.U. 2003 nr 47 poz. 401
- 12 PN-EN 12810-1:2010. Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych – część 1: Specyfikacje techniczne wyrobów.
- 13 PN-EN 12810-2:2010. Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych – część 2: Specjalne metody projektowania konstrukcji.
- 14 PN-EN 1991-1-4. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Oddziaływania wiatru.
- 15 Błazik-Borowa E. Problemy ze stosowaniem modelu turbulencji k- $\epsilon$  do wyznaczania parametrów opływu budynków. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2008.

## The Analysis of wind action on building and scaffolding system

Paulina Jamińska<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: p.jaminska@pollub.pl*

**Abstract:** In the present study an attempt to evaluate the effect of wind action on the building - scaffolding system was made. Analysis was based on the CFD simulations using ANSYS FLUENT and RNG  $k$ - $\epsilon$  turbulence model. Calculations were performed for 2D case of building of rectangular cross-section. Turbulent wind flow was modelled around the building and the building with a scaffolding set along longer wall. Four different angles of wind attack: 0 °, 45 °, 90 ° and 135 ° were taken into account. The results are shown in the form of pressure distribution on the walls of model and the velocity distribution in the computational domain, and later compared to the standard recommendations for scaffoldings. The analysis indicated that the actual flow around a building with scaffolding is much more complicated than the flow shown in standards. It can even lead to scaffold collapse due to the wind induced torque forces.

**Keywords:** CFD, scaffolding, turbulent flow, rectangular building.