

ANALIZA PORÓWNAWCZA CIŚNIENIA WIATRU NA BUDYNEK NA PODSTAWIE BADAŃ TUNELOWYCH, SYMULACJI KOMPUTEROWYCH I NORM PROJEKTOWYCH

Marcin SZKOBODZIŃSKI*, Czesław MIEDZIAŁOWSKI

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 E, 15-351 Białystok

Streszczenie: W artykule poruszono temat ustalania obciążenia wiatrem budowli za pomocą symulacji komputerowych (CFD), badań tunelowych i ich porównanie do wytycznych normowych. Opisano podstawowy zakres teorii związanej z symulacjami CFD i wybrane modele turbulencji. Porównanie współczynników ciśnienia wiatru uzyskanych z badań tunelowych, symulacji komputerowych i modeli normowych przedstawiono na dwóch przykładach: budynku o dachu dwuspadowym i budowli o kształcie walca kołowego.

Słowa kluczowe: obciążenie wiatrem, modele normowe, tunel aerodynamiczny, komputerowa mechanika płynów.

1. Wprowadzenie

Proces wyznaczania obciążenia wiatrem budowli o nietypowych kształtach napotyka wiele trudności związanych z określeniem wiarygodnego rozkładu ciśnienia na połaciach dachowych oraz ścianach. Wynika to przede wszystkim ze sposobu przemieszczania się powietrza w strefie przyziemnej, gdzie przepływowi towarzyszą liczne turbulencje zależne od rodzaju terenu. Ze względu na wiele czynników, które mogą wpływać na zmiany składowych prędkości wiatru, zjawisko traktowane jest jako losowe. Dokładny sposób wyznaczenia rzeczywistego oddziaływania wiatru na etapie projektowym staje się więc niemożliwy i wymaga optymalnego zdefiniowania wartości ciśnień pomiędzy rozsądnym ich zawyżeniem, a zapewnieniem bezpieczeństwa budowli. Uzyskanie kompromisowego rozwiązania umożliwia wprowadzenie uśrednień czasowych podczas pomiaru prędkości wiatru, które pozwalają na inny sposób definicji zjawiska z wykorzystaniem wartości średniej oraz fluktuacyjnej.

Określenie obciążenia wiatrem budowli nietypowych charakteryzujących się skomplikowanym kształtem jest zagadnieniem wykraczającym w większości przypadków poza wytyczne i modele zawarte w normach projektowych. Zachodzi więc potrzeba poszukiwania rozwiązań, które umożliwiłyby szybkie, proste i tanie rozwiązanie problemu przy jednoczesnym wskazaniu jak najlepszych rezultatów, odwzorowujących obciążenie rzeczywiste. Norma PN-EN 1991-1-4:2008 *Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Obciążenia wiatrem* wskazuje, że obciążenie

wiatrem może być przyjęte w sposób inny niż normowy w oparciu o uznane i wiarygodne źródła. Zazwyczaj w takich sytuacjach stosowane są tunele aerodynamiczne, lecz badania pociągają za sobą obok wielu zalet również wady skupiające się głównie wokół wysokich nakładów finansowych i małej dostępności aparatury badawczej. Przykłady analiz rozkładu ciśnienia i wytyczne badań w tunelach aerodynamicznych można znaleźć między innymi w pracach Li i in. (2006), Yi i Li (2015), Mamou i in. (2008), Davenport (2007), Pereira (2011).

Obecny potencjał mocy obliczeniowej komputerów pozwala na opis zjawiska przepływu powietrza wokół analizowanej budowli. Pomimo, iż do tej pory nie opracowano jeszcze uniwersalnej metody pozwalającej na badanie przepływów płynów, to istnieją algorytmy o specjalnym przeznaczeniu, wykorzystywane do badań konkretnych zjawisk. Symulacje komputerowe nazywane również analizami CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*) dają zazwyczaj najlepsze rezultaty, kiedy stosowane są jako tak zwane metody półempiryczne. Wstępnie przeprowadzona analiza może natomiast stanowić podstawę do przyjęcia podstawowych założeń podczas doświadczeń w tunelach aerodynamicznych.

W poniższym opracowaniu przedstawiono w jakim stopniu symulacje komputerowe przepływu powietrza wokół konstrukcji są w stanie przewidzieć zjawisko oddziaływania wiatru i jego ciśnienie na budowlę, w nawiązaniu do obowiązujących norm projektowych i badań w tunelach aerodynamicznych. Celem pracy jest przedstawienie obecnego stanu wiedzy dotyczącego poruszanej tematyki.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.sz kobodzinski@doktoranci.pb.edu.pl

2. Przewidywanie obciążenia wiatrem za pomocą symulacji komputerowych

2.1. Teoria przepływów turbulentnych

Przepływ powietrza wokół analizowanego obiektu można wyrazić za pomocą układu nieliniowych równań różniczkowych Naviera-Stockesa (N-S) i równania ciągłości, stanowiących podstawę obliczeń numerycznych. W przypadku badania przepływu płynu, którym w tym przypadku jest powietrze, przyjmowane jest założenie ośrodka newtonowskiego i nieściśliwego. Ruch powietrza poruszającego się wokół analizowanego obiektu jest traktowany jako przepływ turbulentny, któremu towarzyszy powstawanie licznych zaburzeń. Matematyczne możliwości opisanie przepływu turbulentnego jako zjawiska losowego są ograniczone, dlatego też do obliczeń numerycznych stosowana jest zasada uśrednień Reynoldsa polegająca na założeniu, że chwilowe składowe prędkości i ciśnienia są rozdzielone na wartości średnie oraz fluktuacyjne, w dowolnym czasie i punkcie przestrzeni (Elsner, 1987; Lipecki, 2015; Bogusławski i in., 2008).

Składowe ciśnienia (p) i prędkości (u) są wyrażone równaniami (1) i (2):

$$p = \bar{p} + p' \quad (1)$$

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (2)$$

Uwzględnienie zasady uśredniania Reynoldsa pozwala zapisać równania N-S w postaci (3):

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(2\mu S_{ji} - \overline{\rho u'_j u'_i} \right) \quad (3)$$

gdzie: U_i jest składową wektora prędkości, x_i są współrzędnymi układu globalnego, ρ jest gęstością powietrza, P jest ciśnieniem, μ jest dynamiczną lepkością płynu, a f_i jest wektorem sił masowych.

Dodatkowy w stosunku do równań Naviera-Stockesa człon $-\overline{\rho u'_j u'_i}$ nazywany tensorem naprężeń Reynoldsa posiada sześć niewiadomych, co sprawia, że przy nieznanym ciśnieniu i trzech składowych prędkościach suma niewiadomych wielkości jest równa dziesięciu. Mając do dyspozycji jedynie równanie ciągłości i trzy równania N-S niemożliwe jest rozwiązanie zagadnienia i konieczne jest wprowadzenie dodatkowych zależności umożliwiających rozwiązanie. Są one nazywane modelami turbulencji lub hipotezami zamykającymi (Wilcox, 1993).

Uśrednienia równań N-S można dokonywać stosując uśrednienie czasowe (modele RANS – ang. *Reynolds Averaged Navier Stokes*) lub przestrzenne (LES – ang. *Large Eddy Simulation*) i to właśnie grupy tych modeli są najczęściej wykorzystywane w analizach budowli (Lipecki, 2015). Istnieje również metoda bezpośredniego rozwiązywania równań (DNS – ang. *Direct Numerical Simulation*) oraz metoda bezsiatkowa (DVM – ang. *Discrete Vortex Method*), których zastosowanie przedstawiają przykładowo prace Saedi i in. (2012) i Nowickiego (2015).

2.2. Wybrane modele turbulencji wykorzystywane w analizach CFD budowli

W związku z dużą liczbą modeli turbulencji wykorzystywanych w analizach CFD o różnorodnym charakterze badawczym, opisano jedynie wybrane z nich, które wykazują popularność zastosowania do oceny zjawiska oddziaływania wiatru na budowle. W skrócie opisano model turbulencji k - ε standard (RANS) i LES.

2.2.1. Model k - ε standard

Model k - ε standard (RANS), po raz pierwszy przedstawiony w pracy Launder i Spalding (1973), jest zaliczany do grupy modeli dwurównaniowych, ponieważ wprowadza dwa dodatkowe równania dotyczące kinetycznej energii turbulencji (4) i dyssypacji energii kinetycznej turbulencji (5) (Wilcox, 1993).

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

Wyrażenie definiujące dynamiczny współczynnik lepkości turbulentnej (6) i stałe modelu:

$$\mu_T = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44; C_{\varepsilon 2} = 1,92, C_\mu = 0,09, \sigma_k = 1,0, \sigma_\varepsilon = 1,3$$

Zaletą modelu jest fakt, iż jest jednym z najlepiej zweryfikowanych modeli turbulencji i tym samym znane są jego ograniczenia. W wielu jednak zastosowaniach technicznych analizy przepływów, w których głównie występują zjawiska wirowości i wysokich naprężeń ścinających, wykazuje słabą dokładność wyników (Błazik-Borowa (2008).

2.2.2 Model LES

Model turbulencji LES pozwala na symulację wirów poprzez uśrednianie przestrzenne przepływu. Duże wiry o rozmiarze zbliżonym do rozmiaru siatki są symulowane, natomiast o rozmiarach mniejszych są modelowane za pomocą tak zwanych modeli SGS (ang. *subgrid-scale model*). Za pomocą filtrowania równania ciągłości i N-S możliwe jest pominięcie wirów mniejszych w przepływie, co pozwala na redukcję nakładów ponoszonych na obliczenia. Równania N-S z uwzględnieniem filtracji opisuje wzór (7) (Lipecki, 2015; Zhiyin, 2015).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (7)$$

Tensor naprężeń SGS określa wyrażenie (8):

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\nu \overline{S_{ij}} \quad (8)$$

Przy czym

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right),$$

natomiast ν_t jest lepkością turbulentną, która w pierwszym modelu SGS zaproponowanym w pracy (Smagorinsky, 1963) określa wzór (9):

$$\nu_t = (C_s \Delta_g)^2 \sqrt{2\overline{S_{ij}S_{ij}}} \quad (9)$$

gdzie: C_s jest stałą, a Δ_g rozmiarem siatki obliczeniowej.

3. Modele normowe

Normy projektowe opisują sposób definiowania obciążenia wiatrem dla typowych konstrukcji najczęściej spotykanych w praktyce inżynierskiej. W wielu przypadkach może jednak zachodzić potrzeba wyznaczenia oddziaływania na obiekty o specyficznych kształtach. Poszukiwane są więc rozwiązania mające na celu wiarygodne odzwierciedlenie obciążenia wiatrem konstrukcji. Wytyczne normowe wskazują, że w przypadkach budowli nietypowych wyznaczone wartości ciśnienia należy definiować na podstawie badań w tunelach aerodynamicznych na specjalnie przygotowanych modelach (Cook, 2007; PN-EN 1991-1-4:2008; PN-77/B-02011).

Adaptacja norm projektowych do opisu obciążenia wiatrem konstrukcji złożonych, polegająca na połączeniu kilku schematów prostych, nie odzwierciedla w wiarygodny sposób oddziaływania na siebie interferujących mas opływającego powietrza. Może to skutkować przyjęciem niewłaściwego rozkładu obciążenia szczególnie w przypadkach, gdy analiza odnosi

się do budowli już istniejących i wymaga bardziej szczegółowego sposobu jej przeprowadzenia. Pomimo to, bazując na pojęciu granicznego stanu nośności dobór schematów pozwalających w racjonalny sposób zawyżyć obciążenie wydaje się być rozwiązaniem efektywnym.

Sposób interpretacji zaleceń normy PN-77/B-02011 *Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem* przedstawiono między innymi w pracach: Żurański (1978), Biegus (2010), Żurański i Gaczek (2011), natomiast obowiązującej normy PN-EN 1991-1-4:2008 w opracowaniach: Żurański (2005, 2010), Żurański i Gaczek (2010, 2011), Biegus (2010), Cook (2007).

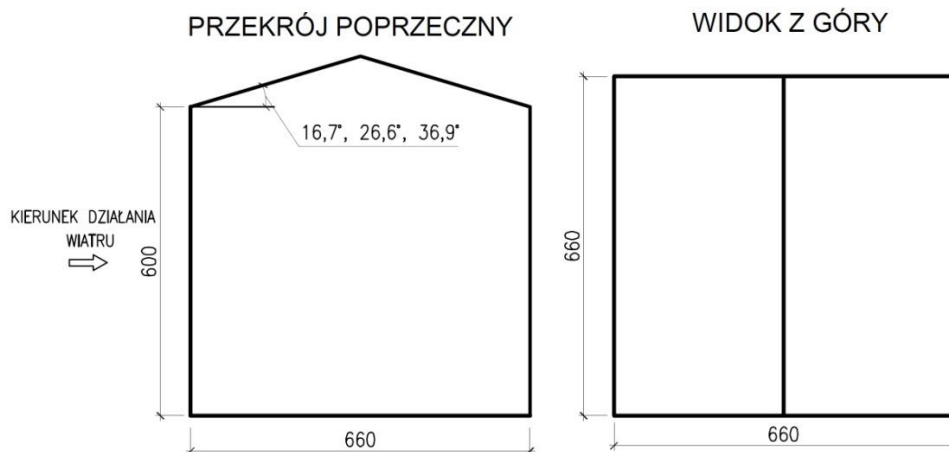
4. Porównanie modeli normowych z badaniami eksperymentalnymi i symulacją komputerową

W celu porównania podejść normowych (PN-77/B-02011 i PN-EN 1991-1-4:2008) z badaniami przeprowadzonymi w tunelu aerodynamicznym i analizami numerycznymi przeanalizowano podobieństwo współczynników ciśnienia wiatru. Wyniki przedstawiono na przykładzie budynku o dachu dwuspadowym i budowli o kształcie walca kołowego.

4.1. Budynek o dachu dwuspadowym

Analizowanym obiektem był budynek zaproponowany w opracowaniu (Tominaga i in., 2015) posiadający dach dwuspadowy oraz podstawę w kształcie kwadratu o boku 6,6 m. Wysokość ścian wynosiła 6,0 m. Przedstawiono trzy warianty obliczeń budynków różniąc kątem nachylenia połaci dachowych: 16,7°, 26,6° i 36,9°. Obiekt schematycznie pokazano na rysunku 1.

W pracy (Tominaga i in., 2015) przedstawiono wyniki badań wykonanych w tunelu aerodynamicznym i uzyskane z symulacji CFD. Rezultaty rozszerzono o porównanie wartości współczynników ciśnienia wiatru obliczone według modeli normowych PN-77/B-02011 i PN-EN 1991-1-4:2008.



Rys. 1. Schemat budynku przyjęty w badaniach Tominaga i in. (2015)

Norma PN-EN 1991-1-4:2008 pozwala na bezpośrednie określenie współczynników ciśnienia pól A do E w zależności od stosunku h/d oraz pól F do J dachów dwuspadowych w zależności od kąta nachylenia połaci. Dla wartości pośrednich umożliwiono stosowanie interpolacji liniowej. Wyznaczone wartości współczynników ciśnienia zewnętrznego przyjętego budynku zestawiono w tabeli 1.

Sposób prowadzenia obliczeń według normy PN-77/B-02011 jest zbliżony do podejścia normy europejskiej z tym wyjątkiem, że w przypadku ścian współczynniki są określane na podstawie dwóch wielkości H/L i B/L . Obciążenie dachu dwuspadowego jest otrzymywane na podstawie współczynników zależnych od kąta nachylenia połaci i stosunku h/L . Podział połaci na kilka pól oddziaływania wiatru zostaje zastąpiony jednym jednolitym polem odpowiednio dla połaci nawietrznej i zawietrznej. Uzyskane wartości współczynników zestawiono w tabeli 2.

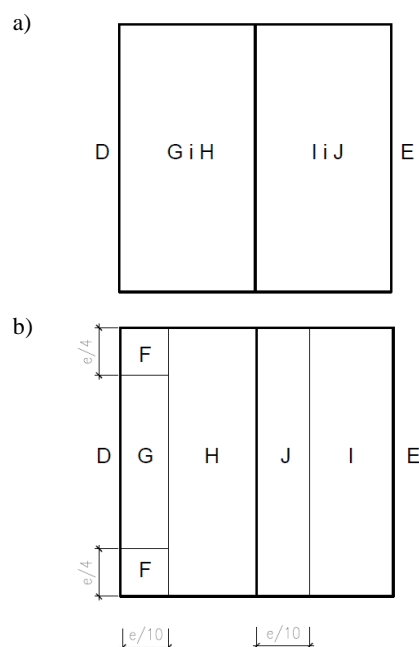
Badania przedstawione w Tominaga i in. (2015) zostały przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym z warstwą przyścienną w Instytucie w Niigacie. Sekcja robocza urządzenia posiadała wymiary przekroju poprzecznego 1,8 m na 1,8 m oraz długość 13 m. Model badanego obiektu wykonano w skali 1:30 natomiast wymiar chropowatości uzyskany za pomocą różnego rodzaju przeszkód na wlocie został oszacowany na $z_0 = 1,0 \cdot 10^{-4}$ m. Prędkość wlotowa wynosiła $U = 2,6$ m/s w celu uzyskania możliwie jak najwyższej wartości liczby Reynoldsa wynoszącej w tym przypadku około 35000. Ciśnienie mierzono w 24 punktach rozmieszczonych wzdłuż ścian i połaci dachu przy użyciu wielopunktowego przetwornika Kyowa Electronic Instruments F94-2206 (Tominaga i in., 2015).

Symulacja komputerowa została przeprowadzona z wykorzystaniem programu komputerowego ANSYS Fluent. Model oraz domenę obliczeniową zdefiniowano w sposób odpowiadający badaniom tunelowym. Na wlocie zadano warunek brzegowy w postaci profilu prędkości wiatru, kinetycznej energii turbulencji, odpowiadające pomiarom eksperymentalnym, oraz zerowe ciśnienie statyczne na wylocie. Wartość ε uzyskano przy założeniu lokalnej równowagi produkcji energii kinetycznej turbulencji i jej dyssypacji. Powierzchnie badanego obiektu opisano za pomocą standardowej funkcji ściany (*standard wall function*), której użyto również do opisu gruntu wprowadzając modyfikację polegającą na uwzględnieniu chropowatości terenu. Górę oraz ściany domeny obliczeniowej zdefiniowano za pomocą warunku brzegowego symetrii (ang. *symmetry*). Analizy

przeprowadzono dla czterech modeli turbulencji $k-\varepsilon$ standard, RNG $k-\varepsilon$, RLS $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST, z czego do porównania z wartościami eksperymentalnymi użyto modelu RNG $k-\varepsilon$.

Wymiary domeny obliczeniowej przyjęto odpowiadające wymiarom komory roboczej tunelu aerodynamicznego, w którym przeprowadzono badania doświadczalne. Wynosiły one: wysokość $H = 9 \cdot h$, szerokość $W = 9 \cdot h$, długość $L = 21 \cdot h$, gdzie h jest wysokością ściany obiektu (Tominaga i in., 2015).

Porównanie przedstawiono w formie graficznej uzupełniając wyniki badań tunelowych i symulacji komputerowych o wartości współczynników normowych (rys. 3).



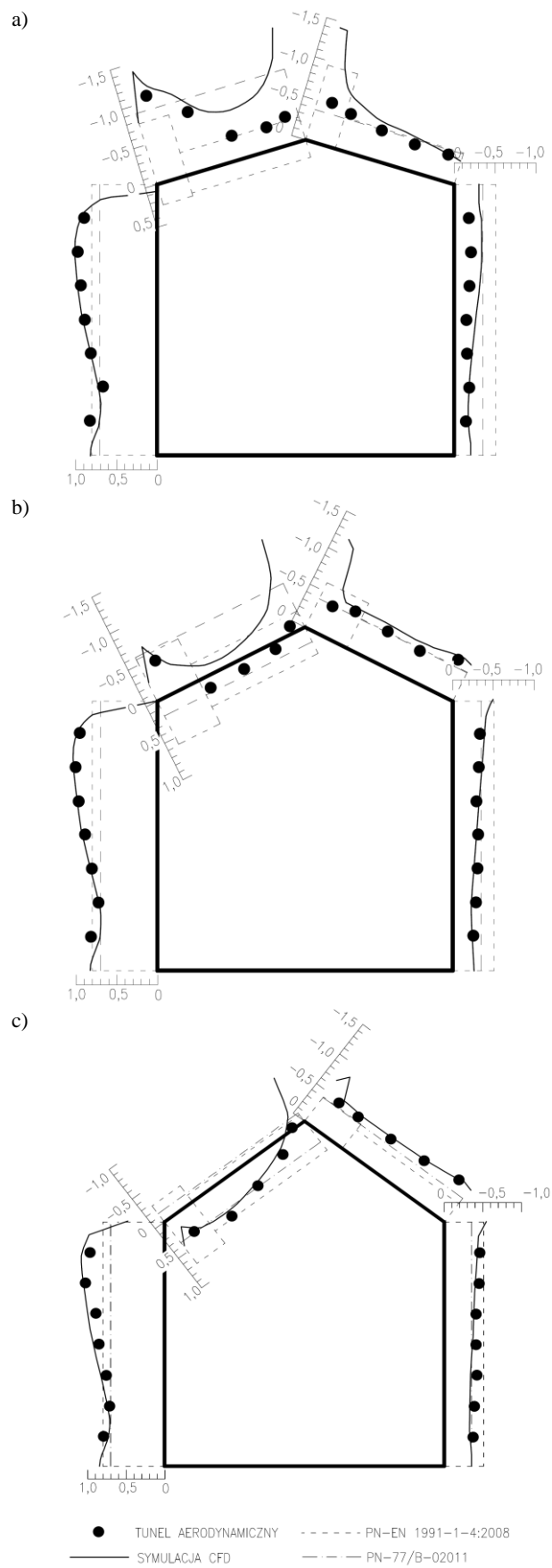
Rys. 2. Pola podziału ścian i połaci dachu według oznaczeń dla tabeli 1 i 2: a) PN-77/B-02011, b) PN-EN 1991-1-4:2008

Tab. 2. Zestawienie współczynników ciśnienia według normy PN-77/B-02011

Kąt	D	E	G i H	I i J	
16,7°	+0,70	-0,35	-0,90	-	-0,40
26,6°	+0,70	-0,35	-0,60	+0,20	-0,40
36,9°	+0,70	-0,35	-0,14	+0,35	-0,40

Tab. 1. Zestawienie współczynników ciśnienia według normy PN-EN 1991-1-4:2008

Kąt	D	E	G	H	I	J				
16,7°	+0,80	-0,51	-0,77	+0,26	-0,29	+0,22	-0,40	+0,00	-0,95	+0,00
26,6°	+0,80	-0,51	-0,57	+0,59	-0,22	+0,36	-0,40	+0,00	-0,61	+0,00
36,9°	+0,80	-0,51	-0,27	+0,70	-0,11	+0,49	-0,31	+0,00	-0,41	+0,00



Rys. 3 Porównanie współczynników ciśnienia zewnętrznego budynku o różnym nachyleniu dachu dwuspadowego: a) kąt nachylenia połaci 16,7°, b) kąt nachylenia połaci 26,6°, c) kąt nachylenia połaci 36,9°

4.2. Budowla o kształcie walca kołowego

Przeanalizowano budowlę w kształcie walca kołowego poddanego przepływowi powietrza o charakteryzującej liczbie Reynoldsa w zakresie odpowiadającym wartościom podanym w normie PN-EN 1991-1-4:2008. W celu porównania wartości normowych z badaniami eksperymentalnymi i symulacjami komputerowymi skorzystano z wyników zawartych w pracach: Roshko (1960), Achenbach (1968), Warschauer i Leene (1971), Nunen (1974), Travin i in. (1999), Catalano i in. (2002), Krishnani i Squires (2006), Merrick i Bitsuamlak (2008), Yeon (2014). Analizowano wykresy współczynnika ciśnienia zewnętrznego przepływów o zbliżonych wartościach liczby Reynoldsa określonych na podstawie przeglądu literatury. Wykresy normowe wyznaczono według danych przyjętych w badaniach eksperymentalnych.

Norma PN-EN 1991-1-4:2008 określa współczynniki ciśnienia zewnętrznego walców kołowych uzależniając ich wartość od liczby Reynoldsa. Na podstawie wartości tabelarycznych istnieje możliwość wskazania kąta określającego punkt najniższego ciśnienia α_{\min} , najmniejszą wartość współczynnika ciśnienia $c_{p0,\min}$, kąt określający punkt oderwania przepływu α_A oraz współczynnik bazowy ciśnienia $c_{p0,h}$. Norma umożliwia również redukcję wartości współczynnika ciśnienia ze względu na efekt swobodnego końca wprowadzając współczynnik zależny od kąta α oraz smukłości elementu analizowanego λ . W zestawieniu porównawczym przyjęto, iż wartość chropowatości względnej wynosi $k/b < 5 \cdot 10^{-4}$.

Norma PN-77/B-02011 pozwala na wyznaczenie współczynnika ciśnienia zewnętrznego na podstawie wykresu zawartego w normie lub równania (10) określających wielkość szukaną w zależności od kąta α .

$$C_\alpha = \sum_{n=0}^{n=6} a_n \cdot \cos n\alpha \quad (10)$$

Wyrazy szeregu trygonometrycznego (10) wynoszą:

$$a_0 = -0,356, a_1 = 0,322, a_2 = 0,636, a_3 = 0,501, a_4 = 0,058, a_5 = -0,128, a_6 = -0,034$$

Wartościom współczynnika ciśnienia mniejszym od zera zalecono uwzględnienie parametru k stanowiącego funkcję odwrotności smukłości D/H , czyli stosunku średnicy do wysokości walca, natomiast dla kątów powyżej 110° przyjęcie wartości stałej równej $-0,4$. Do obliczeń przyjęto wartość współczynnika k równą 1,0 odpowiadającą stosunkowi D/H równemu 0,5.

Wykresy obrazujące porównanie wyników badań przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

5. Podsumowanie

W pracy zaprezentowano porównanie wartości współczynników ciśnienia wiatru otrzymanych na podstawie norm PN-EN 1991-1-4:2008 i PN-77/B-02011 z wynikami otrzymanymi z symulacji

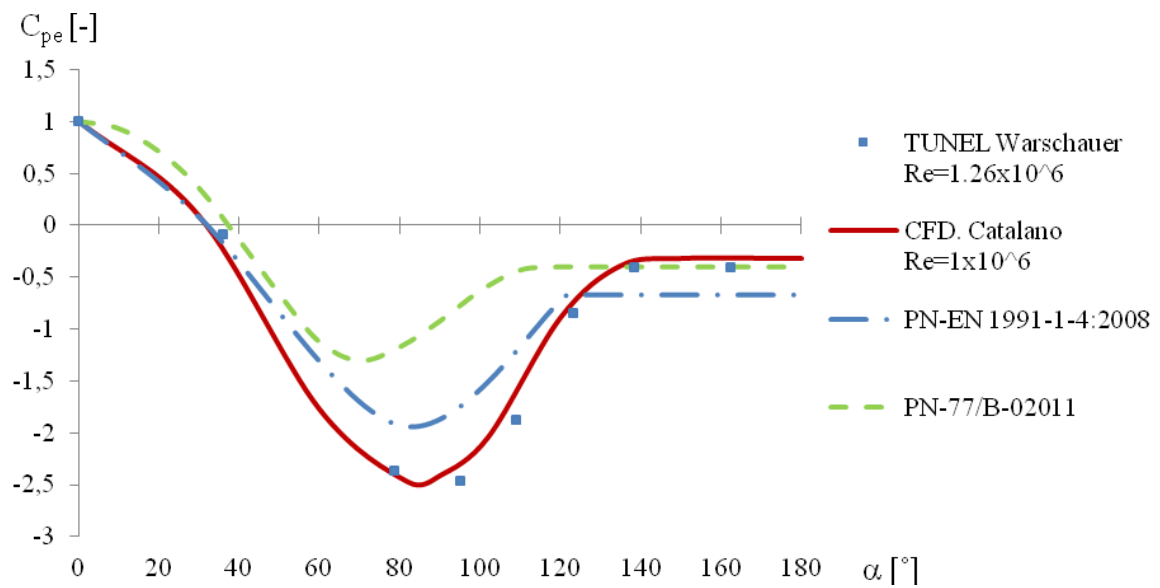
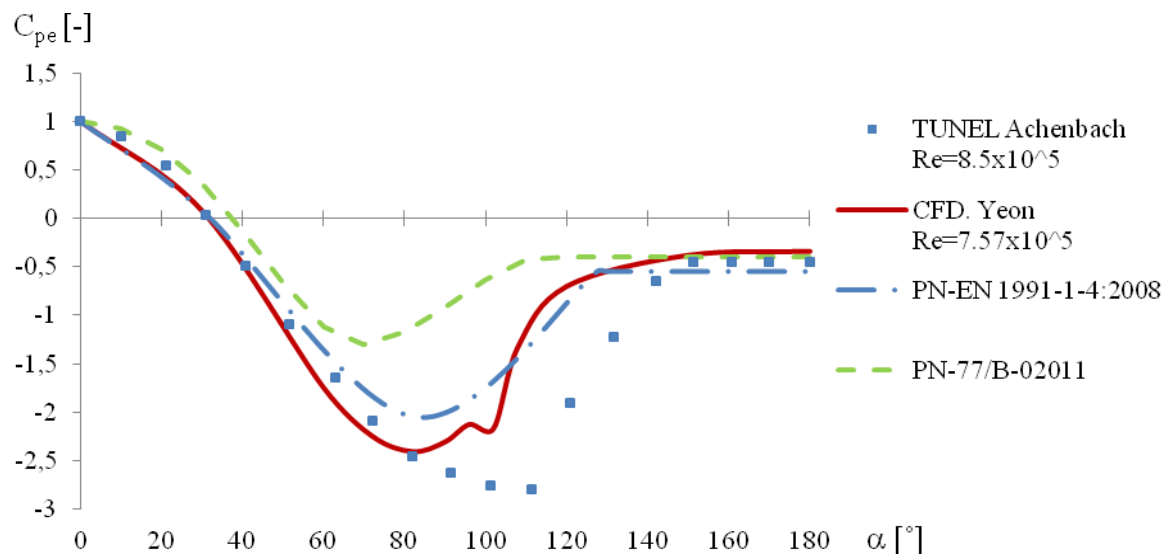
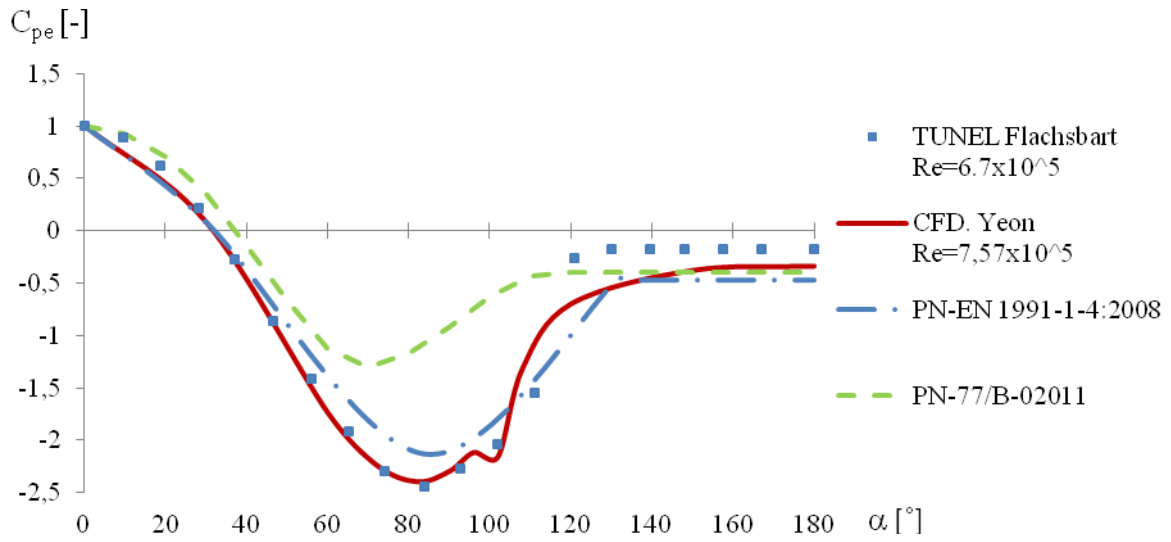
komputerowych i badań w tunelu aerodynamicznym. Wartości współczynników ciśnienia porównano na przykładach budynku o dachu dwuspadowym i budowli o kształcie walca kołowego.

Analiza wyników w przypadku budynku o dachu dwuspadowym wykazała, iż modele normowe w większości pól podziału obciążenia są w stanie bezpiecznie oszacować wartości współczynników ciśnienia zewnętrznego. Niemniej jednak w strefie przykrawędziowej nawietrznej połaci dachu dla kąta nachylenia $16,7^\circ$ zaobserwowano niedoszacowanie wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego na poziomie około 39% w przypadku PN-EN 1991-1-4:2008 i około 19% w przypadku PN-77/B-02011, odnosząc się do wyników eksperymentalnych. Podobna sytuacja występuje w górnej części ściany nawietrznej, gdzie zauważalne są wyższe wartości współczynników otrzymanych na podstawie doświadczenia w stosunku do norm projektowych. Rezultaty otrzymane na podstawie analizy CFD wykazują dobrą korelację z wynikami badań eksperymentalnych, lecz w strefie przykalenicowej dla mniejszych kątów nachylenia połaci widoczne jest zaniżenie wartości współczynników ciśnienia. Jak podają Tominaga i in. (2015), jest to podyktowane przeszacowaniem turbulენტnej energii kinetycznej k w tej strefie, co wynika z zastosowania modelu $k-\epsilon$.

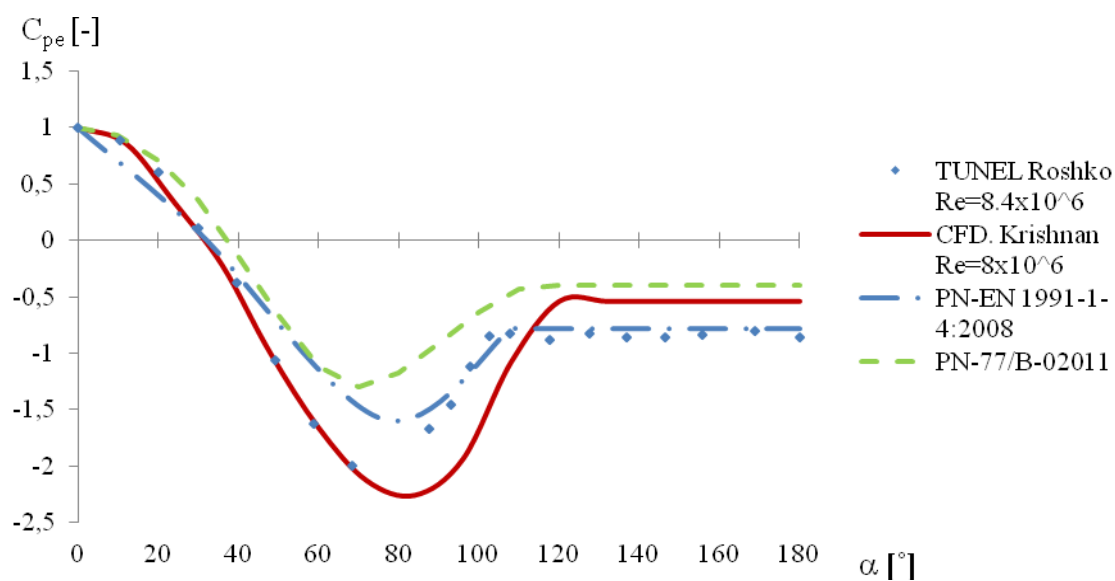
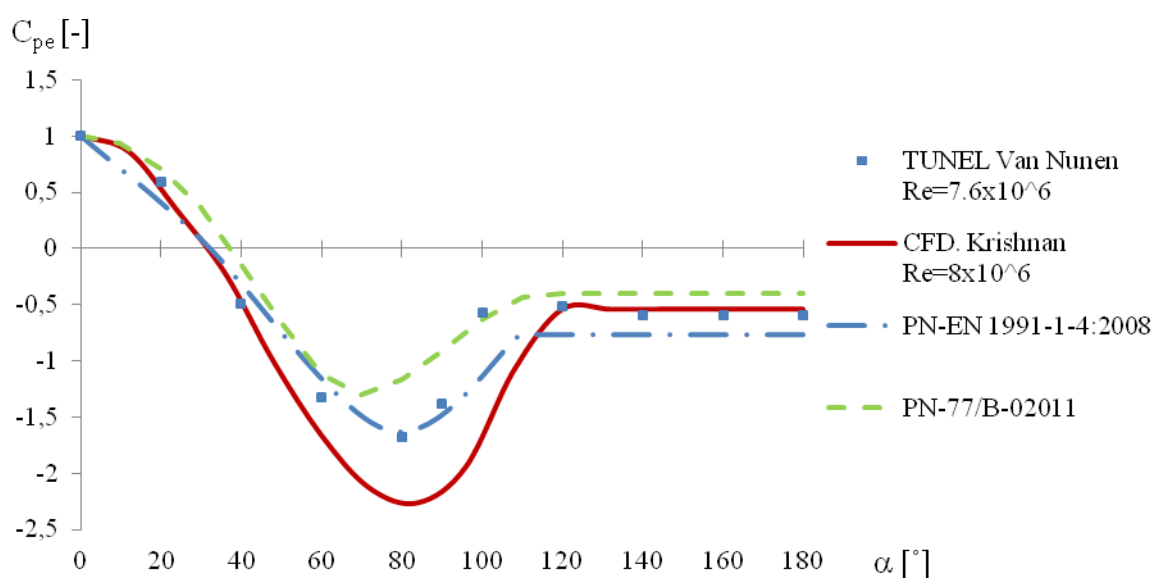
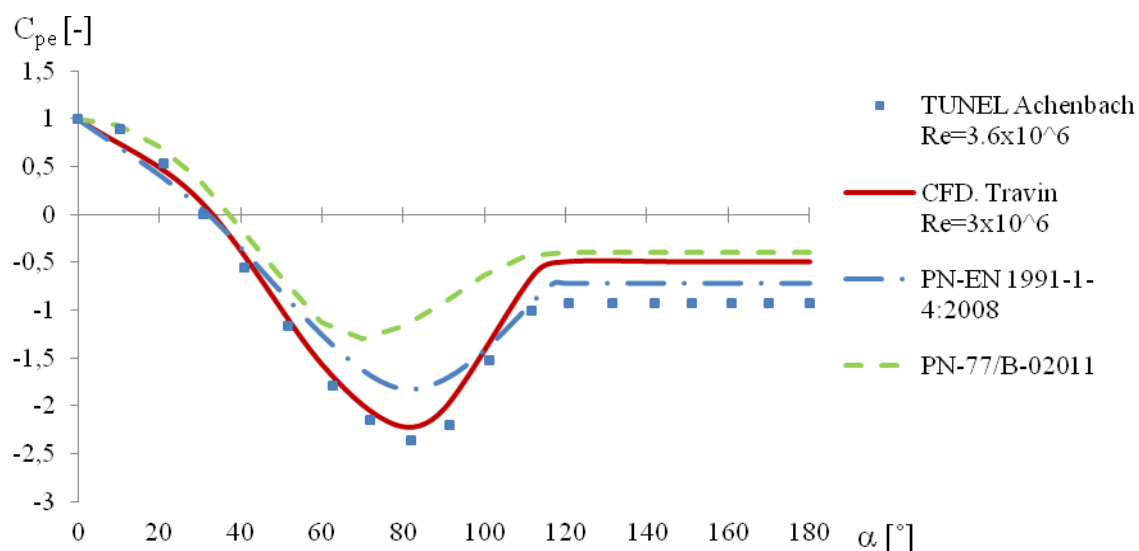
Sposób rozkładu współczynnika ciśnienia zewnętrznego na powierzchni wydzielonej walca kołowego określony według normy PN-EN 1991-1-4:2008 wskazuje na dobrą korelację z wynikami otrzymanymi na podstawie badań w tunelach aerodynamicznych. Wyjątek stanowią przypadki, w których liczba Reynoldsa oscyluje w granicach około 10^6 , gdzie jak podaje Żurański (1978) należy spodziewać się najsilniejszego podciśnienia na walcu kołowym, lecz ze względu na fakt, iż konstrukcje w rzeczywistości są narażone na przepływ powietrza o liczbie Reynoldsa znacznie wyższej, to współczynnik ciśnienia zewnętrznego może posiadać wartość wyższą.

Wyniki uzyskane według normy PN-77/B-02011 pokazują wyraźne rozbieżności pomiędzy wartościami w stosunku do pozostałych analizowanych sposobów. W pracy (Żurański, 1978) zaznaczono, że wyrazy szeregu (10) powinny być dobierane na podstawie danych pomiarowych, a wyrazy zawarte w normie są wartościami zalecanymi, które pozwalają na osiągnięcie $C_{z,\min} = -1,3$. Fakt ten pozwala na stwierdzenie, że wartości dobranych wyrazów szeregu nie odpowiadają wszystkim przypadkom zależnym od liczby Reynoldsa przepływu powietrza.

Wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego otrzymane z symulacji komputerowej przepływu powietrza wokół walca kołowego wykazują w przypadku prac (Yeon, 2014; Catalano i in., 2002) – (LES) dobrą korelację z badaniami doświadczalnymi, nie mniej jednak widać pewne rozbieżności mogące wynikać po części z różnic w liczbie Reynoldsa. Podobna sytuacja występuje w przypadku symulacji (Travin i in., 1999) – (DES). Największe różnice zaobserwowano dla największych liczb Reynoldsa (Krishnan i Squires, 2006) – (DES).



Rys. 4. Porównanie współczynników ciśnienia zewnętrznego – budowla o przekroju walca kołowego



Rys. 5. Porównanie współczynników ciśnienia zewnętrznego – budowla o przekroju walca kołowego c. d.

Literatura

- Achenbach E. (1968). Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to $Re=5 \times 106$. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 34, 625-639.
- Biegus A. (2010). Projektowanie konstrukcji budowlanych według Eurokodów: zeszyt 1 część 2 – oddziaływania na konstrukcje. *Zeszyty edukacyjne Buildera*.
- Błazik-Borowa E. (2008). Problemy związane ze stosowaniem modelu turbulencji k-e do wyznaczania parametrów opływu budynków. *Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej*, Lublin.
- Bogusławski A., Drobniak S., Tyliczszak A. (2008). Turbulencja – od losowości do determinizmu. *Modelowanie inżynierskie*, Vol. 36, 41-48.
- Catalano P., Wang, M., Iaccarino G., Moin P. (2002). Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at high Reynolds numbers. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 24, 463-469.
- Cook N. (2007). Designers' Guide to EN 1991-1-4 Eurocode 1: Actions on structures, general actions part 1-4. Wind actions. *Thomas Telford Publishing*, Londyn.
- Davenport A. G. (2007). Wind tunnel testing: a general outline. *A. G. Davenport Wind Engineering Group*, University of Western Ontario, Ontario.
- Elsner J. W. (1987). Turbulencja przepływów. *Państwowe Wydawnictwo Naukowe*, Warszawa.
- Krishnan V., Squires K. D. (2006). Prediction of the flow around a circular cylinder at high Reynolds number. *Proceeding of the 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 9-12 January 2006, Reno.
- Lauder B. E., Spalding D. B. (1973). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, 269-289.
- Li Q. S., Fu J. Y., Xiao Y. Q., Li Z. N., Ni Z. H., Xie Z. N., Gu M. (2006). Wind tunnel and full-scale study of wind effects on China's tallest building. *Engineering Structures*, Vol. 28, 1745-1758.
- Lipecki T. (2015). Struktura wiatru i badania modelowe obciążenia wiatrem budowli prostopadłościennych. *Politechnika Lubelska*, Lublin.
- Mamou M., Cooper K. R., Benmeddour A., Khalid M., Fitzsimmons J., Sengupta R. (2008). Correlation of CFD predictions and wind tunnel measurements of mean and unsteady wind loads on a large optical telescope. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, 793-806.
- Merrick R., Bitsuamlak G. (2008). Control of flow around a circular cylinder by the use of surface roughness: A computational and experimental approach. *Proceeding of the 4th International Conference Advances on Wind and Structures (AWAS08)*, Jeju.
- Nowicki T. (2015). The Discrete Vortex Method for estimating how surface roughness affects aerodynamic drag acting on a long cylinder exposed to wind. *Czasopismo Techniczne Budownictwo 2-B/2015*, Politechnika Lubelska, Lublin.
- Nunen J. V. (1974). Pressure and forces on a circular cylinder in a cross flow at high Reynolds numbers. *Flow Induced Structural Vibrations*, Springer-Verlag, Berlin, 748-754.
- Pereira J. D. (2011). Wind tunnels: aerodynamics, models and experiments. *Nova Science Publishers*, Nowy York.
- Roshko A. (1960). Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 10, No. 3, 345-356.
- Saeedi M., Lepoudre P., Wang B.C (2012). Direct Numerical Simulation of flow around a surface-mounted square-section cylinder with $AR=4$. *Proceedings of the 20th Annual Conference of the CFD Society of Canada*, Canmore.
- Smagorinsky J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 3, 99-164.
- Tominaga Y., Akabayashi S., Kitahara T., Arinami Y. (2015). Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations. *Building and Environment*, Vol. 84, 204-213.
- Travin A., Shur M., Strelets M., Spalart P. (1999). Detached-Eddy Simulations past a circular cylinder. *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 63, 293-313.
- Warschauer K.A., Leene J.A. (1971). Experiments on mean and fluctuating pressures of circular cylinders at cross flow at very high Reynolds numbers. *Proceedings of the International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, Tokyo, 305-315.
- Wilcox D. C. (1993). Turbulence modeling for CFD. *DCW Industries*, La Canada.
- Yeon S. M. (2014). Large-eddy simulation of sub-, critical and super-critical Reynolds number flow past a circular cylinder. *PhD thesis, University of Iowa*, Iowa.
- Yi J., Li Q. S. (2015). Wind tunnel and full-scale study of wind effects on a super-tall building. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 58, 236-253.
- Zhiyin Y. (2015). Large-eddy simulation: past, present and the future. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 28, 11-24.
- Żurański J. A. (1978). Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji. *Arkady*, Warszawa.
- Żurański J. A. (2005). Wpływ warunków klimatycznych i terenowych na obciążenie wiatrem konstrukcji budowlanych. *Wydawnictwa Instytutu techniki Budowlanej*, Warszawa.
- Żurański J. A. (2010). Oddziaływania wiatru na konstrukcje budowlane w ujęciu nowej normy PN-EN 1991-1-4:2008. *Inżynieria i Budownictwo*, 7/2010, 360-367.
- Żurański J. A., Gaczek M. (2010). Obciążenie wiatrem budynków w ujęciu normy PN-EN 1991-1-1:2008. *Inżynieria i Budownictwo*, 9/2010, 494-501.
- Żurański J. A., Gaczek M. (2011). Oddziaływania klimatyczne na konstrukcje budowlane według Eurokodu. *Instytut Techniki Budowlanej*, Warszawa.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF WIND PRESSURE
ON A BUILDING BASED ON WIND TUNNEL STUDY,
COMPUTER SIMULATIONS AND DESIGN
STANDARDS**

Abstract: The paper aim is to determine the wind loads on buildings by means of computer simulation (CFD), wind tunnel measurements and their comparison to the standard guidelines. The basic range of the theory with CFD simulations and selected models of turbulence are described. Comparison of wind pressure factors received from: wind tunnel research, computer simulations and the standard guidelines is shown on two examples: building with a pitched roof and structure in the shape of a circular cylinder.

