

ANALIZA NUMERYCZNA OBCIĄŻENIA WIATREM KOPUŁY O PODSTAWIE KOŁA I ELIPSY

Paulina Jamińska

*Politechnika Lubelska, Katedra Mechaniki Budowli
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: p.jaminska@pollub.pl*

Streszczenie: W niniejszej pracy przedstawiono wyniki symulacji przepływu wiatru wokół trzech kopuł o wysokości 20 m: dwóch o podstawie koła, o stosunku wyniosłości do długości średnicy podstawy (H/D) 0,2 i 0,25 oraz wokół kopuły o podstawie elipsy o wymiarach w rzucie poziomym 100 m x 80 m. Wszystkie kopuły przyjęto jako ustawione bezpośrednio na poziomie gruntu. Wyniki oddziaływania wiatru na kopuły, w postaci współczynników ciśnienia, zostały porównane z zaleceniami PN – EN 1991-1-4 sformułowanymi dla kopuł na rzucie kołowym.

Słowa kluczowe: obciążenie wiatrem, kopuła, analiza numeryczna, współczynniki ciśnienia, komputerowa mechanika płynów

1. WPROWADZENIE

Wyznaczenie prawidłowego obciążenia wiatrem budowli w procesie projektowania jest skomplikowanym procesem. Wpływ na to ma przestrzenno-czasowy losowy charakter oddziaływania wiatru.

Kopuły dzięki swojej konstrukcji mogą wieńczyć budowle o dużym rozstawie ścian, dlatego jako sklepienia obiektów stosowano je już od czasów starożytnych. Obecnie są często wykorzystywane przy przekryciach hal sportowych i widowiskowych, zapewniając otwarte przestrzenie bez elementów wsporczych jakie byłyby niezbędne w przypadku płaskich konstrukcji dachów.

Dotychczas przeprowadzone badania w tunelach aerodynamicznych dotyczyły oddziaływania wiatru na kopuły półkuliste i paraboliczne na planie okręgu, nigdy elipsy.

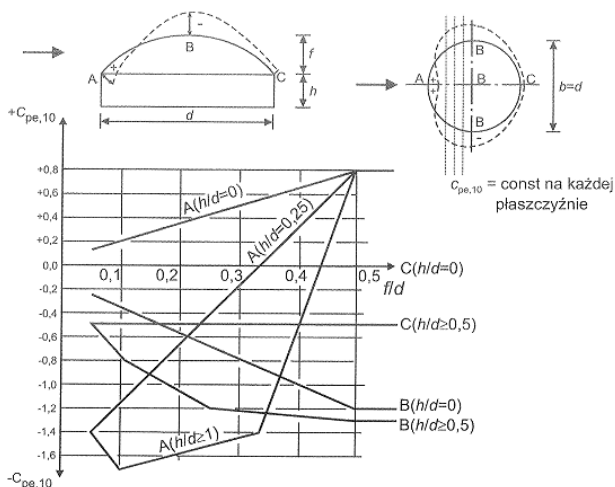
Jedne z pierwszych badań kopuł w tunelu aerodynamicznym z warstwą przyścienną opisał Taylor [10]. Przeprowadził eksperyment w sakli modelowej na gładkich kopułach o stosunku wysokości do średnicy równym: 1, 1/2 i 1/3 dla liczb Reynoldsa w zakresie $Re = 1,1 \cdot 10^5 - 3,1 \cdot 10^5$. Na

podstawie wykonanych badań stwierdził, że przy intensywności turbulencji większej niż 15%, dla $Re > 1,7 \cdot 10^5$ rozkład ciśnienia na kopule jest względnie niezależny od liczby Reynoldsa. Z kolei Cheng i Fu [3] wykonali badania modelowe w tunelu aerodynamicznym dla kopuł półkulistych, przy turbulentnym przepływie wiatru w zakresie liczby $Re = 5,3 \cdot 10^4 - 2,0 \cdot 10^6$. Wykazali, że przy $Re = 1,0 - 2,0 \cdot 10^5$ rozkład ciśnienia na kopule jest niezależny od liczby Reynoldsa. Podobne badania, dla gładkich i szorstkich powierzchni kopuł parabolicznych, wykonali Letchford i Sarkar [5], przy wartościach liczby Reynoldsa w zakresie $2,3 \cdot 10^5 - 4,6 \cdot 10^5$, dla której rozkład ciśnienia jest niezmienny. Dodatkowo, na podstawie przeprowadzonych badań zauważyli, że oddziaływanie wiatru na kopuły paraboliczne jest w dużym stopniu zbliżone do działania na kopuły półkuliste. Meroney i in. [7] przeprowadzili symulację komputerową turbulentnego przepływu wiatru wokół gładkiej i szorstkiej kopuły parabolicznej oraz zestawu dwóch kopuł, przy $Re = 1,85 \cdot 10^5$ i $Re = 1,44 \cdot 10^6$. Rezultaty symulacji porównali z wynikami badań modelowych w tunelu.

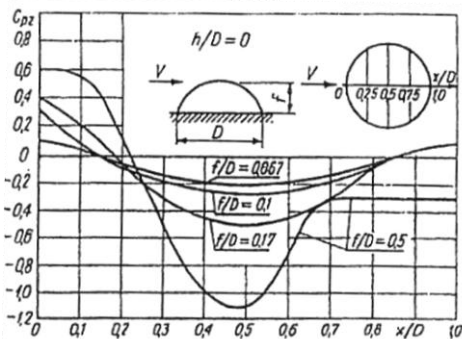
Normy oraz poradniki do projektowania opisują sposób określania obciążenia wiatrem kopuł w formie uproszczonej. Żadna z poniżej opisanych procedur nie podaje jak wyznaczać wartości obciążenia dla przekryć, które w rzucie są elipsami.

Eurokod [8] przedstawia zalecenia dotyczące przekryć w postaci kopuł na rzucie koła o różnym stosunku wysokości kopuły do średnicy podstawy. Z normy można odczytać wartości współczynnika ciśnienia aerodynamicznego w trzech punktach na kopule, a wartości między nimi interpolować zakładając, że wartość C_p jest stała na każdym łuku powstałym z przecięcia czaszy płaszczyzną prostopadłą do kierunku wiatru (rys. 1).

W poradniku do projektowania [1] podano schematy warstwicy współczynnika ciśnienia, określone dla półkuli gładkiej i szorstkiej oraz dla czterech gładkich kopuł o różnym stosunku średnicy do wysokości, określone na podstawie badań przeprowadzonych w tunelu aerodynamicznym bez warstwy przyściennej przy prędkości średniej wiatru $V_{sr} = 47,2$ m/s, podane za Maherem [6]. Również Żurański [12] podaje schematy przyjmowania obciążeń na kopułach o różnych wyniosłościach (rys.2) powołując się na pracę Mahera [6].



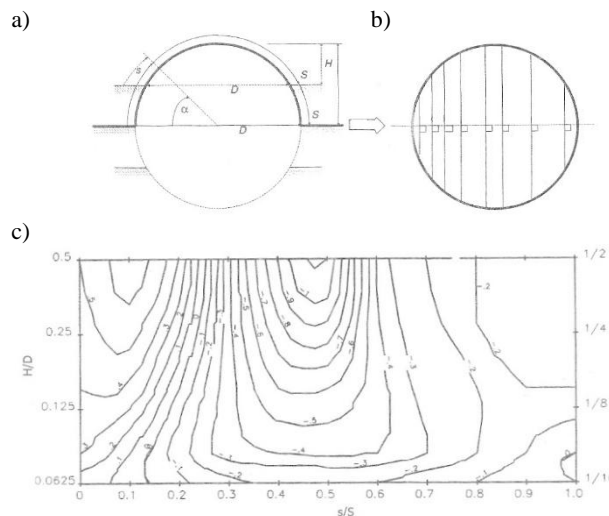
Rys. 1. Schemat przyjmowania obciążenia na kopuły wg [8].
Fig. 1. Wind load estimation according to [8].



Rys. 2. Rozkład ciśnienia na kopule spoczywającej na ziemi [12].
Fig. 2. Pressure distribution for dome placed on a ground [12].

W książce [2] opisano sposób określania średniego współczynnika ciśnienia wiatru na podstawie załączonych schematów i rysunków (rys.3). Kluczowy rysunek zawiera rozkład izobar współczynnika ciśnienia dla osi głównej kopuły, równoległej do kierunku wiatru. Na wykresie podano wartości dla kopuł o różnym stosunku wyniosłości do średnicy.

Celem niniejszej pracy jest opisanie obciążenia wiatrem kopuł skonstruowanych na planie okręgu i elipsy za pomocą komputerowej mechaniki płynów (CFD). W analizach numerycznych przyjęto trzy kopuły posadzone bezpośrednio na gruncie: dwie o kołowym przekroju poziomym przy podstawie, o średnicy 100 m i 80 m, wysokości 20 m oraz jedną o przekroju przy podstawie w kształcie elipsy o wymiarach 100 m x 80 m i wysokości 20 m.



Rys. 3. Schematy dla kopuły: a) wymiary, b) kontury ciśnień, c) współczynnik ciśnienia [2].

Fig. 3. Key to dome data: a) dimensions, b) pressure contours, c) pressure coefficients for domes [2].

2. ZAŁOŻENIA PRZYJĘTE W SYMULACJACH

Analizowany obiekt, dla którego przeprowadzono symulację przepływu wiatru, jest gładką kopułą o podstawie elipsy o wymiarach $D = 100$ m i $B = 80$ m. Wysokość kopuły H wynosi 20 m.

W celach weryfikacyjnych oraz ze względu na brak odniesień w literaturze i zaleceniach do projektowania wykonano dodatkowo obliczenia dla dwóch kopuł na planie okręgu o średnicach równych wymiarowi D i B przy zachowanej wysokości H .

Wszystkie obliczenia przeprowadzono w programie Fluent korzystając z modelu turbulencji standard $k-\epsilon$. Przyjęto II kategorię terenu ($z_0 = 0,05$ m) i prędkość średnią bazową $u = 22$ m/s. Na wlocie domeny obliczeniowej założono pionowe profile: średniej prędkości wiatru $U(z)$, energii kinetycznej turbulencji $k(z)$ oraz dyssypacji energii kinetycznej turbulencji $\epsilon(z)$. Do ich wyznaczenia użyto następujących równań pochodzących z zaleceń COST [4] i AIJ [11], zaproponowanych przez Richardsa i Hoxeya [9]:

$$U(z) = \frac{u_{ABL}^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) \quad (1)$$

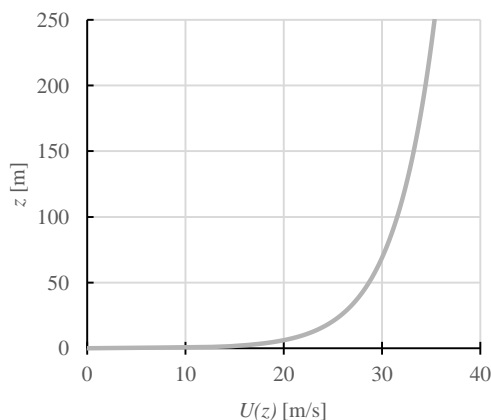
$$k(z) = \frac{u_{ABL}^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \quad (2)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_{ABL}^{*3}}{\kappa(z+z_0)} \quad (3)$$

gdzie κ – stała von Karmana ($\approx 0,40-0,42$), C_μ – stała modelu $k-\varepsilon$ standard (0,09), u_{ABL}^* – prędkość tarciaowa w warstwie przyziemnej atmosfery wyznaczona na podstawie prędkości U_{ref} odczytanej na wysokości referencyjnej z_{ref} :

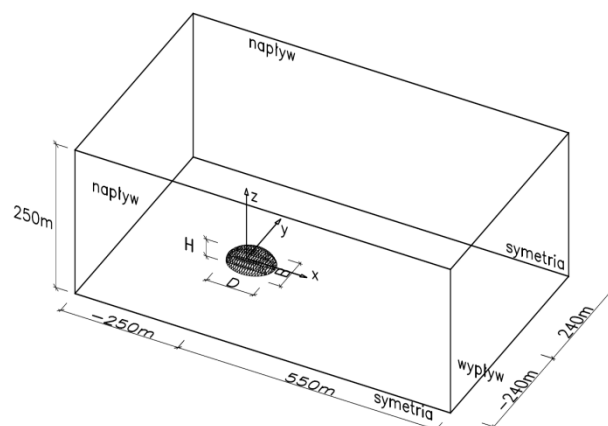
$$u_{ABL}^* = \frac{\kappa U_{ref}}{\ln\left(\frac{z_{ref}+z_0}{z_0}\right)} \quad (4)$$

Do obliczeń użyto wartości z_{ref} równej wysokości kopuły i odpowiadającej jej wartości U_{ref} odczytanej z pionowego profilu prędkości wiatru $U(z)$ zadanego na wlocie domeny (rys. 4).



Rys. 4. Profil prędkości wiatru na wlocie.
Fig. 4. Inflow velocity profile.

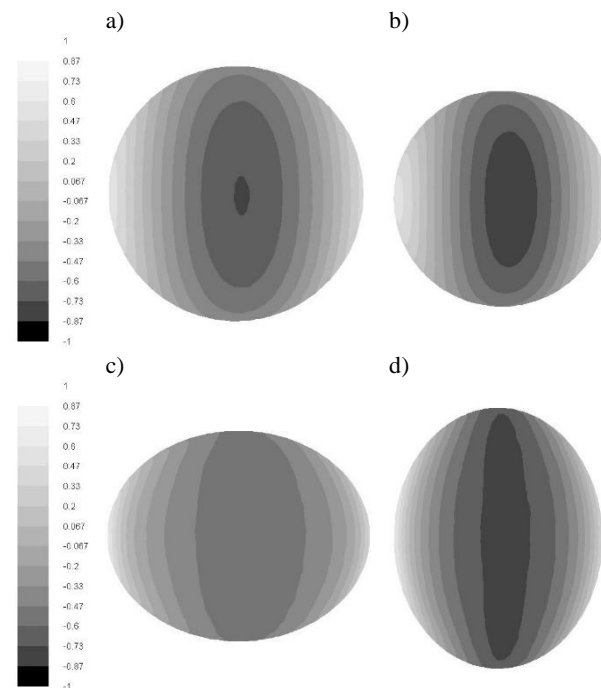
Liczba Reynoldsa obliczona na podstawie średnicy kopuły oraz prędkości U_{ref} wynosi od $1,0 \cdot 10^8$ do $2,0 \cdot 10^8$. Schemat domeny obliczeniowej wraz z wymiarami oraz warunkami brzegowymi przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat domeny obliczeniowej.
Fig. 5. Scheme of the calculation domain.

3. WYNIKI SYMULACJI

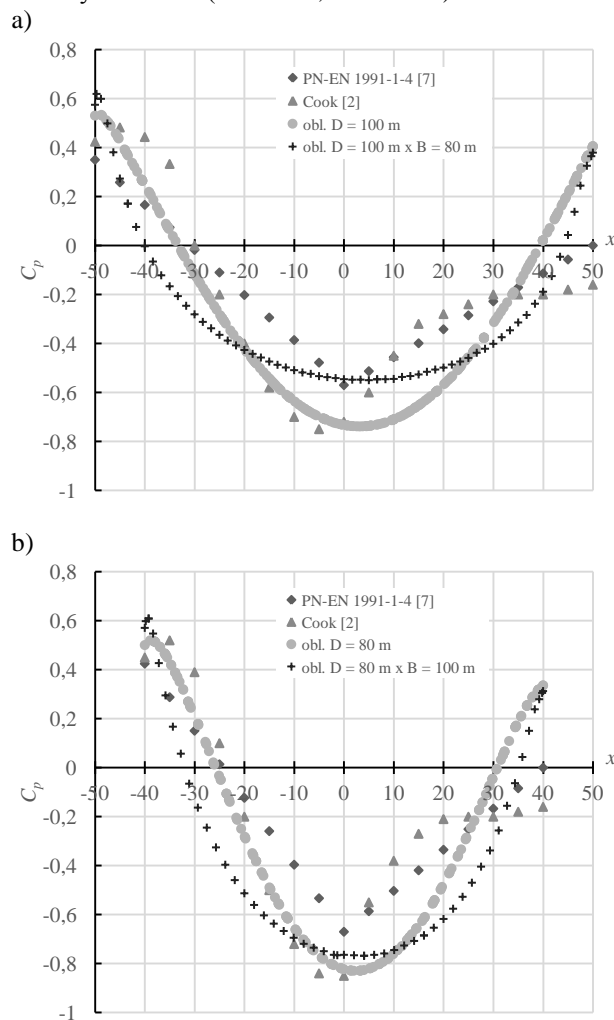
Jako wyniki przeprowadzonych symulacji przyjęto współczynniki ciśnienia, które zostały wyznaczone na podstawie prędkości referencyjnej u_{ref} odczytanej w przepływie niezaburzonym przed modelem, na wysokości odpowiadającej wyniosłości kopuły H .



Rys. 6. Rozkład współczynnika ciśnienia C_p na kopułach: a) $D = 100$ m, b) $D = 80$ m, c) $D = 100$ m i $B = 80$ m, d) $D = 80$ m i $B = 100$ m.

Fig. 6. Pressure coefficient C_p distribution for domes: a) $D = 100$ m, b) $D = 80$ m, c) $D = 100$ m and $B = 80$ m, d) $D = 80$ m and $B = 100$ m.

Na rys. 6 a i b przedstawiono zestawienie współczynników aerodynamicznych ciśnienia C_p (kierunek działania wiatru – od lewej do prawej strony kopuły) na dwie kopuły kuliste o średnicach $D = 100$ m i 80 m. Z kolei na rys. 6 c i d pokazano kopułę o przekroju poziomym w kształcie elipsy, która została ustawiona prostopadłe w stosunku do napływu wiatru odpowiednio krótszym ($D = 100$ m, $B = 80$ m) i dłuższym bokiem ($D = 80$ m, $B = 100$ m).



Rys. 7. Rozkład współczynnika ciśnienia wzdłuż osi głównej równoległej do średniego kierunku prędkości wiatru na kopule kulistej i o podstawie elipsy o: a) $D = 100$ m, b) $D = 80$ m.

Fig. 7. Pressure coefficient distribution along main axis parallel to mean wind speed direction for dome with circular and elliptical base with dimensions: a) $D = 100$ m, b) $D = 80$ m.

Rozkład ciśnienia na wszystkich czterech kopułach jest zbliżony i symetryczny względem osi x . Wartości parcia dla kopuł kulistych, po stronie nawietrznej są niemal identyczne. Natomiast w przypadku ssania, występującego bliżej szczytu, wartość maksymalna współczynnika ciśnienia dla kopuły o $D = 100$ m wynosiła -0.74 , a dla kopuły o $D = 80$

m – -0.84 . Taka zgodność między wynikami wynika z faktu, że oba obiekty miały taką samą wysokość H , a różnica między średnicami nie była duża.

Na podstawie schematów przedstawionych na rys. 1 i rys. 3 obliczono wartości współczynników ciśnienia wzdłuż głównej osi każdej kopuły, równoległej do napływu wiatru. Zestawiono je na rys. 7 wraz z wartościami współczynników ciśnienia uzyskanymi w wyniku symulacji komputerowych.

W przypadku obu kopuł o podstawie koła, wartości parcia po stronie nawietrznej przekrycia są zbliżone do siebie. Ssanie po stronie nawietrznej kopuły ma taki sam trend w przypadku symulacji komputerowych oraz wartości proponowanych w pracy [2], jednakże wartość maksymalna ssania wyznaczona w symulacjach pojawia się za szczytem kopuły. Wartości uzyskane na podstawie normy [8] są mniejsze od obliczonych zarówno w przypadku ssania jak i parcia.

W przypadku wartości odczytanych na podstawie pracy [2] i normy [8] po stronie zawietrznej kopuły, za jej punktem środkowym dochodzi do szybkiego spadku ssania aż do zera. Wyniki obliczeń przedstawiają łagodny spadek i przejście do parcia przy podstawie kopuły. Jest to prawdopodobnie spowodowane przeszacowaniem energii kinetycznej turbulencji k w wykorzystanym w obliczeniach modelu przepływu $k-\epsilon$.

Dla kopuły o podstawie elipsy ustawionej krótszym bokiem prostopadłe do kierunku działania wiatru ($D = 100$ m) można zauważyć szybki spadek parcia i wzrost ssania po stronie nawietrznej. Wartość ssania na środku kopuły jest mniejsza niż dla kopuły kulistej o tym samym wymiarze D , ale większa po stronie zawietrznej kopuły. Przy ustawieniu kopuły dłuższym bokiem prostopadłe do kierunku działania wiatru ($D = 80$ m) trend jest podobny. Jednakże różnice we współczynniku ciśnienia w stosunku do kopuły kulistej są mniejsze, a wartość ssania w punkcie środkowym jest zbliżona.

4. PODSUMOWANIE

Wartości współczynników ciśnienia po stronie nawietrznej kopuł kulistych, uzyskane na podstawie symulacji, pozostają w dość dobrej zgodności z wartościami odczytanymi z pracy [2]. Występują znaczne rozbieżności po stronie zawietrznej między zaleceniami normowymi a wynikami obliczeń. Inny spadek współczynników ssania i parcia występujący po stronie zawietrznej, przy podstawie kopuł, jest prawdopodobnie wynikiem przeszacowania turbulencji przez użyty model $k-\epsilon$. Natomiast wartości uzyskane

w obliczeniach na stronie nawietrznej kopuł są większe od normowych [8], zarówno w przypadku ssania jak i parcia. Większe wartości parcia i ssania uzyskano dla kopuł o podstawie koła, które mają większą średnicę, oraz dla kopuły o podstawie elipsy, która jest ustawiona dłuższym bokiem prostopadle do kierunku działania wiatru. Rezultaty uzyskane dla kopuły o podstawie elipsy nie odbiegają znacznie od wyników dla kopuł kulistych, jednakże wartości ssania są wyższe.

Większość dostępnych wyników jest oparta na badaniach modelowych w tunelach aerodynamicznych, przy napływie laminarnym lub turbulentnym, przy stosunkowo niskiej liczbie Re . W rzeczywistości, zakresy liczby Re są znacznie wyższe, a ponadto obiekt znajduje się w warstwie przyziemnej. W pokazanych obliczeniach uwzględniono rzeczywiste rozmiary konstrukcji, co może powodować dodatkowe źródło rozbieżności w stosunku do prezentowanych wyników [2 i 8].

Wydaje się, że w przypadku projektowania konstrukcji w postaci kopuły użycie wartości współczynników ciśnienia odczytanych z normy może prowadzić do niedoszacowania obciążenia wiatrem. Budowle o skomplikowanych kształcie, również kopuły, narażone na oddziaływanie wiatru należy poddawać w trakcie procesu projektowania badaniom w tunelu aerodynamicznym z warstwą przyścienną i symulacjom komputerowym.

Autorka jest uczestnikiem projektu „Kwalifikacje dla rynku pracy – Politechnika Lubelska przyjazna pracodawcy” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

NUMERICAL ANALYSIS OF WIND LOAD ON DOME WITH A CIRCULAR AND ELLIPTICAL BASE

Summary: The paper presents the results of a CFD simulation of the wind flow past three domes with a height of $H = 20$ m: two with a circular base with a rise ratio (H/D) 0.2 and 0.25, and one dome with an elliptical base of maximum dimensions 100 m x 80 m. All of the domes were set directly on the ground. Values of a pressure coefficient obtained from the calculations were compared with the recommendations of the PN-EN 1991-1-4 for the domes on a circular base.

Literatura

- [1] Bogucki W. i inni *Poradnik projektanta konstrukcji metalowych*. tom 2, Arkady, Warszawa, 1980
- [2] Cook C.J. *Designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static structures*. Butterworth's, 1990
- [3] Cheng C.M., Fu C.L. *Characteristic of wind loads on a hemispherical dome in smooth flow and turbulent boundary layer flow*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 98 (2010) 328–344
- [4] Franke J., Hellsten A., Schlunzen H., Carissimo B. *Best practice guideline for CFD simulation of flows in the urban environment*. COST Action 732 (2007)
- [5] Letchford C.W., Sarkar P.P. *Mean and fluctuating wind loads on rough and smooth parabolic domes*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 88 (2000) 101-117
- [6] Maher F.J. *Winds loads on basic dome shapes*. ASCE Journal of Structural Division 91(3) (1965) 219–228
- [7] Meroney R.N., Letchford C.W., Sarkar P.P. *Comparison of numerical and wind tunnel simulation of wind loads on smooth, rough and dual domes immersed in a boundary layer*. Wind and Structures 5(2–4) (2002) 347–358
- [8] PN-EN 1991-1-4 *Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru*
- [9] Richards P.J., Hoxey R.P. *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k-\epsilon$ turbulence model*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 46-47 (1993) 145-153
- [10] Taylor T.J. *Wind pressures on a hemispherical dome*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 40 (1991) 199–213
- [11] 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 96 (2008) 1749–1761
- [12] Żurański J.A. *Obciążenie wiatrem budowli i konstrukcji*. Arkady, Warszawa, 1978