

Porównanie obciążenia wiatrem wyznaczonego na podstawie procedur normowych z wynikami symulacji w cyfrowym tunelu aerodynamicznym dla hali stalowej



dr inż.
WOJCIECH MIGDA
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej
i Środowiska
ORCID: 0000-0001-8605-5683



dr inż.
PATRYK DENIZIAK
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej
i Środowiska
ORCID: 0000-0002-1570-1673



dr inż.
**MAŁGORZATA
GORDZIEJ-ZAGÓRSKA**
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej
i Środowiska
ORCID: 0000-0001-8893-0322



mgr inż.
WIOLETTA LESZCZYŃSKA
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej
i Środowiska
ORCID: 0009-0005-3979-2986

W niniejszym opracowaniu porównano obciążenie wiatrem wyznaczone na podstawie procedur normy Eurokod z wynikami analizy numerycznej uzyskanej w cyfrowym tunelu aerodynamicznym. Jako przykład reprezentacyjny wykorzystano cztery typowe budynki halowe o różnych wymiarach. Porównano stopień wykorzystania konstrukcji oraz lokalizację najbardziej wytężonego elementu przy zastosowaniu obu metod. Analizy numeryczne przeprowadzono w programie RWIND 2 wersja Pro, wykorzystującym w symulacjach numeryczną dynamikę płynów CFD.

Projektowanie stalowych budynków halowych bez transportu, będących najczęściej lekkimi konstrukcjami o jednej kondygnacji, z uwagi na wymiarowanie warunkowane jest w dużej części od określenia obciążeń środowiskowych, takich jak śnieg i wiatr. Wyznaczenie obciążenia pochodzącego od śniegu jest stosunkowo proste. Natomiast w przypadku wiatru, będącego o wiele bardziej złożonym zjawiskiem, z pomocą przychodzi nowoczesne oprogramowanie do analizy konstrukcji, pozwalające zarówno na przyjęcie obciążenia wiatrem zgodnie z zapisami normowymi [1], jak i przeprowadzenie analizy przepływu wiatru w cyfrowym tunelu aerodynamicznym i wynikających z tego obciążeń.

Obecnie w niektórych komercyjnych programach do statycznej analizy konstrukcji

dostępne są moduły pozwalające na wyznaczenie obciążenia od wiatru w cyfrowym tunelu aerodynamicznym wykorzystującym w symulacjach numeryczną dynamikę płynów CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*). Szczegółowe podstawy teoretyczne dotyczące inżynierii wiatrowej dostępne są np. w obszernej pracy [2]. Inżynierskie programy do statyki konstrukcji umożliwiające obliczenia w cyfrowym tunelu aerodynamicznym cechuje uproszczone podejście w zakresie modelowania oraz mniejsze możliwości sterowania parametrami analizy, co odróżnia je od programów naukowych. Są jednak wystarczającym narzędziem inżynierskim umożliwiającym dokładne wyznaczenie obciążeń pochodzących od wiatru.

Analizując międzynarodową literaturę w zakresie inżynierii budowlanej, można

zauważyć, że metodę CFD stosuje się do analizy nietypowych, skomplikowanych konstrukcji, takich jak mosty, stadiony, zbiorniki [3], budynki wysokie [4], jak również do określania przepływu powietrza wokół grup budynków i budowli [5, 6]. W ostatnich latach, wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów oraz upowszechnieniem programów umożliwiających tego typu analizy, widoczne jest coraz większe zainteresowanie określeniem obciążenia wiatrem metodą CFD również na stosunkowo proste obiekty budowlane w zwykłej praktyce inżynierskiej [7, 8, 9].

Celem przedstawionych w niniejszym artykule badań jest ocena możliwości wykorzystania dostępnych komercyjnych, inżynierskich narzędzi do analizy przepływu wiatru oraz możliwości zastąpienia procedur normowych analizą cyfrowego przepływu

Ograniczenia podejścia normowego pojawiają się przy nietypowych układach geometrycznych budynków lub dachów.

wiatru. Porównano obciążenia od wiatru wyznaczone metodą normową oraz w cyfrowym tunelu aerodynamicznym, uwzględniając wynikającą z tego potencjalną korzyść oraz ryzyko. Obliczenia bazujące na wytycznych zawartych w normie [1] pozwalają na szybkie wyznaczenie obciążenia od wiatru dla typowych budynków halowych. Ograniczenia podejścia normowego pojawiają się przy nietypowych układach geometrycznych budynków lub dachów. Zastosowanie cyfrowego tunelu aerodynamicznego pozwala przeprowadzić symulację dla dowolnej geometrii, jednak niesie ze sobą bardziej złożoną procedurę generowania obciążenia, zwiększa stopień niepewności z uwagi na uzyskane wyniki oraz zdecydowanie wydłuża czas analiz. W związku z powyższym, w celu zapewnienia możliwości porównania wyników z obu metod, w niniejszych badaniach przyjęto budynki halowe o typowej geometrii. Pozwoli to przeanalizować, na ile z punktu widzenia projektowania możliwe jest zaufanie rozwiązaniom uzyskanym z badań w cyfrowym tunelu aerodynamicznym. Dodatkowe informacje na temat korelacji obu metod wyznaczania obciążenia wiatrem zawarto w pracach [7, 8].

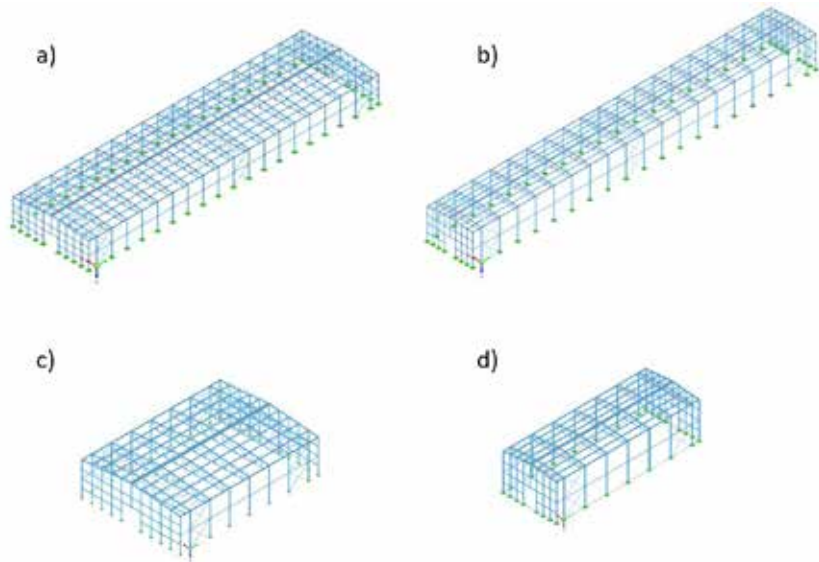
Metodyka

Analizom poddano typowy budynek hali na planie prostokąta z dwuspadowym dachem w czterech wariantach geometrycznych. We wszystkich analizowanych halach przyjęto jednakową wysokość słupów (H) równą 10 m, natomiast zróżnicowano długość hali (L) oraz szerokość hali (B). Założono stałe pochylenie dachu równe 5°. W tab. 1. przedstawiono wymiary i proporcje geometryczne analizowanych obiektów, gdzie (V) to objętość hali i (A) to sumaryczna powierzchnia wszystkich zewnętrznych przegród tęczynie z posadzką. Na rys. 1. pokazano modele numeryczne badanych konstrukcji, przedstawiające ich geometrię.

Do analiz przyjęto jako lokalizację hal miejscowość Kartuzy (woj. pomorskie), przyjmując za wysokość 230 m n.p.m., oraz odpowiednio strefę 2 obciążenia wiatrem i II kategorię terenu. Zakładając, iż hala znajduje się na terenie płaskim, przyjęto współczynnik orografii (chropowatości) $c_o=1$, natomiast współczynnik konstrukcyjny przyjęto $c_s c_d=1$. W obliczeniach statycznych uwzględniono: ciężar własny konstrukcji, obciążenia technologiczne,

Tab. 1. Wymiary i proporcje geometryczne analizowanych obiektów. L – długość hali, B – szerokość hali, H – wysokość słupa ściany bocznej, V – objętość hali, A – sumaryczna powierzchnia przegród

Wymiary i proporcje hali	Hala 1	Hala 2	Hala 3	Hala 4
L/B/H [m]	114/30/10	114/15/10	42/30/10	42/15/10
Stosunek L/B [-]	3.8	7.6	1.4	2.8
Stosunek B/H [-]	3.0	1.5	3.0	1.5
Stosunek L/H [-]	11.4	11.4	4.2	4.2
Stosunek $\frac{V}{L \cdot B}$ [m ⁻¹]	8.8*10 ⁻³	5.8*10 ⁻³	7.9*10 ⁻³	15.8*10 ⁻³
V [m ³]	34200	17100	12600	6300
A [m ²]	9720	6000	3960	2400
Stosunek $\frac{V \cdot L \cdot B}{A}$ [m ⁴]	1.17*10 ⁷	2.92*10 ⁶	1.59*10 ⁶	3.97*10 ⁵



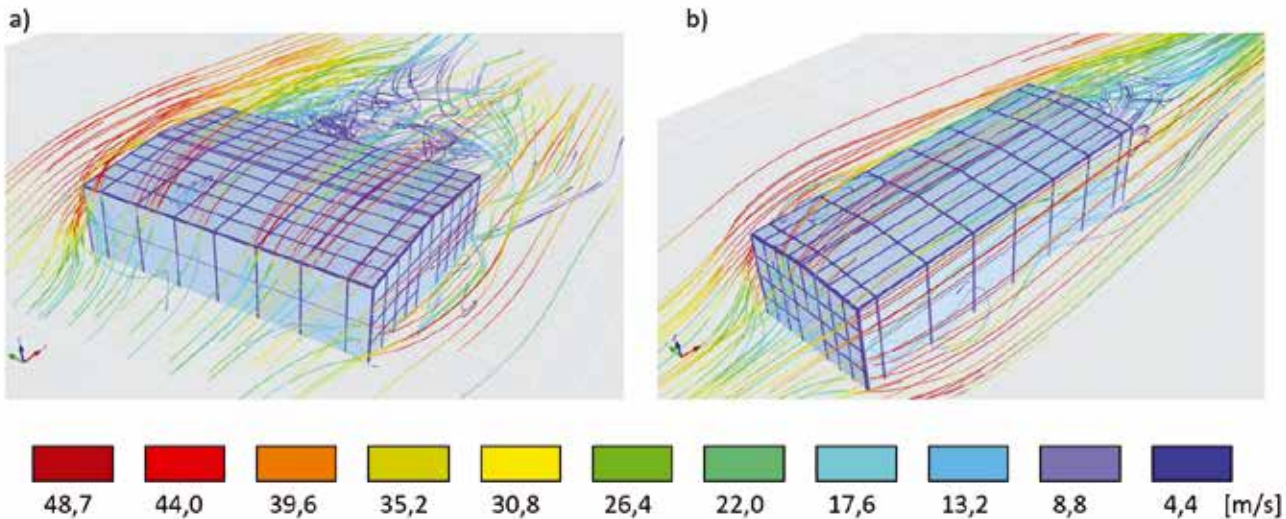
Rys. 1. Geometria czterech analizowanych konstrukcji: a) hala 1, b) hala 2, c) hala 3 oraz d) hala 4

obciążenia śniegiem oraz wiatrem wiejącym z czterech kierunków głównych. Założono, iż w budynku nie występują żadne otwory, zatem nie wyznaczano ciśnienia wewnętrznego. Analiza bazowała na 8 kombinacjach obciążeń, które uznano za miarodajne. Na potrzeby wymiarowania konstrukcji w obliczeniach zastosowano teorię drugiego rzędu.

Na pierwszym etapie budynki zwymiarowano, bazując na obciążeniach od wiatru wyznaczonych według Eurokodu 1 [1], odpowiednio przykładając obciążenie dla poszczególnych pól o zróżnicowanej wartości zgodnie z rozdziałem 7.2.2 oraz 7.2.5 ww. normy. Następnie według Eurokodu 3 [10] dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych dobrano przekroje oraz określono poziom wytrzymałości (nie mniejszy niż 85% dla głównych elementów nośnych).

Dla zaprojektowanych w poprzednim kroku budynków halowych przeprowadzono analizy w cyfrowym tunelu aerodynamicznym, który pozwolił na wyznaczenie obciążeń od wiatru dla zadanego kierunku oraz intensywności wiatru. Wykorzystano program RWIND 2 Pro, który umożliwia numeryczną analizę opartą o dynamikę płynów CFD. W celu symulacji wiatru przyjęto: typ symulacji jako przepływ stacjonarny, gęstość powietrza $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$, lepkość kinematyczną $\nu = 0,000015 \text{ m}^2$. W programie aktywowano opcję uwzględniającą turbulencje. Model obliczeniowy turbulencji przyjęto jako RAS k- ϵ . Program automatycznie dostosował wielkość cyfrowego tunelu aerodynamicznego adekwatnie do wymiarów analizowanych hal (hala 1, 2, 3, 4). Z uwagi na ograniczenia programu w obliczeniach





Rys. 2. Graficzna interpretacja przepływu wiatru w cyfrowym tunelu aerodynamicznym na przykładzie: a) hali 3, kierunek 180 stopni, b) hali 4, kierunek 270 stopni

obciążeń przeprowadzonych w cyfrowym tunelu aerodynamicznym podatność stalowych konstrukcji hal nie była uwzględniana.

Dla wyznaczonych w cyfrowym tunelu aerodynamicznym obciążeń wiatru ponownie obliczono stopień wyężenia poszczególnych elementów konstrukcji. Na koniec porównano zmiany wyężenia poszczególnych elementów w zależności od zastosowanej metody wyznaczenia obciążenia wiatrem.

Wyniki analiz

Na rys. 2. przedstawiono na przykładzie hali 3 i hali 4 wizualizację przepływu wiatru dla wybranych kierunków wiatru. Rysunek 3. przedstawia graficzną interpretację rozkładu ciśnień dla hal i kierunków wiatru przedstawionych na rys. 2. Porównując wyniki otrzymane za pośrednictwem procedur normy [1] z rezultatami pochodzącymi z analizy

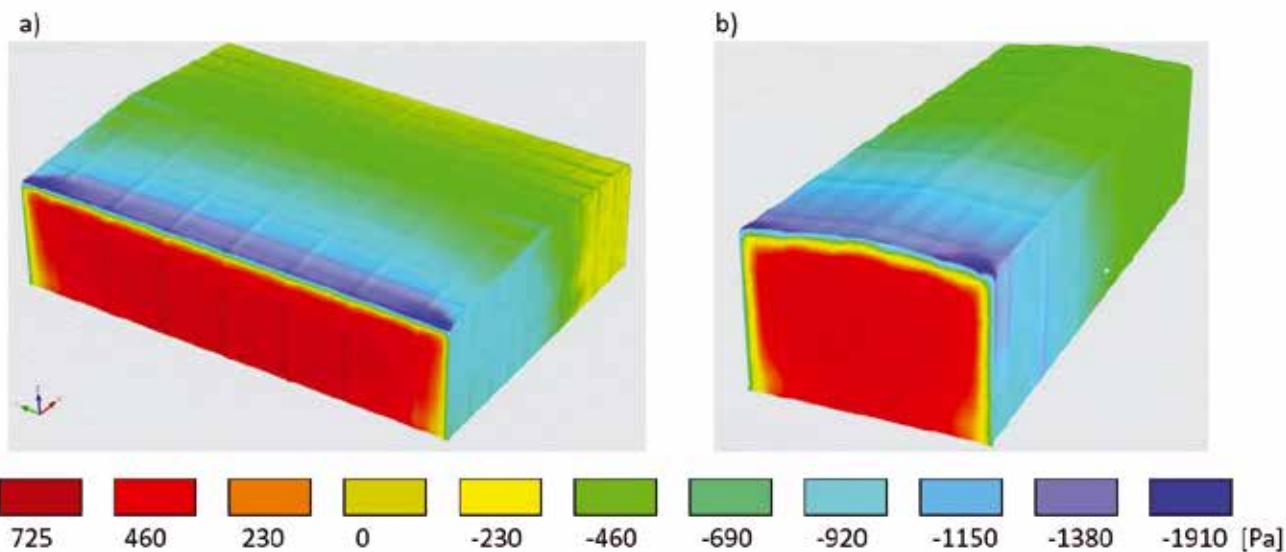
cyfrowego tunelu aerodynamicznego, zauważono podobieństwo wyników zarówno dla ścian, jak i dachu hali. Jednak dzięki analizie w cyfrowym tunelu aerodynamicznym możliwy jest do uzyskania dokładniejszy, bardziej zbliżony do rzeczywistego rozkład ciśnień na wszystkich powierzchniach. Podkreślić jednak należy fakt, że na krawędziach potaci ścian i dachu zauważono lokalne zróżnicowanie wartości ciśnień, które w ujęciu normowym ma bardziej rozmyty charakter.

Tabela 2. prezentuje stopień wyężenia wybranych elementów konstrukcyjnych w zależności od zastosowanej metody wyznaczenia obciążenia wiatrem. W halach nr 1, 2 i 3 najbardziej wyężony stęp główny występował jako stęp ściany bocznej zlokalizowany w połowie długości hali. Natomiast w przypadku hali nr 4 najbardziej wyężonym stępem okazał się stęp narożny. Najbardziej

Analizom poddano typowy budynek hali na planie prostokąta z dwuspadowym dachem w czterech wariantach geometrycznych.

wyężony pas dolny i pas górny kratownicy, we wszystkich analizowanych typach hali, występował jako drugi lub trzeci wiązar kratowy, licząc od strony ściany szczytowej. Zarówno najbardziej wyężona płatew pośrednia, jak i okapowa zlokalizowane były w strefie zlokalizowanej przy ścianie szczytowej.

W tab. 3. zaprezentowano przemieszczenia konstrukcji odpowiednio dla dwóch głównych kierunków wiatru W1 oraz W2



Rys. 3. Graficzna interpretacja rozkładu ciśnień w cyfrowym tunelu aerodynamicznym na przykładzie: a) hali 3, kierunek 180 stopni, b) hali 4, kierunek 270 stopni



Tab. 2. Stopień wyęteżenia wybranych elementów konstrukcyjnych w zależności od zastosowanej metody

	Stopień wyęteżenia elementów konstrukcji [%]							
	Hala 1		Hala 2		Hala 3		Hala 4	
	Podęjsie normowe	Cyfrowy tunel	Podęjsie normowe	Cyfrowy tunel	Podęjsie normowe	Cyfrowy tunel	Podęjsie normowe	Cyfrowy tunel
Stup główny	94,5%	49,5%	98,2%	52,6%	89,8%	45,8%	92,9%	104,2%
Pas dolny kratownicy	89,4%	78,2%	95,3%	79,7%	91,8%	75,4%	94,3%	76,7%
Pas górny kratownicy	95,9%	49,2%	82,9%	31,3%	86,8%	36,8%	84,8%	48,5%
Płatew pośrednia	97,4%	68,1%	93,8%	50,3%	92,6%	46,0%	84,3%	924,9%
Płatew okapowa	66,8%	31,4%	72,8%	35,2%	67,2%	421,2%	76,0%	127,3%

wyznaczonych dwiema rozważanymi metodami. Analizując wyniki zawarte w tab. 2. i 3., widać, iż zarówno wyęteżenie, jak i przemieszczenia w przypadku hali 1, 2 i 3 są wyraźnie mniejsze w przypadku obliczeń bazujących na cyfrowym tunelu aerodynamicznym. Natomiast w przypadku hali nr 4 sytuacja jest inna, gdyż stopień wyęteżenia elementów konstrukcyjnych jest większy z cyfrowego tunelu aerodynamicznego przy równoczesnym zachowaniu wartości przemieszczeń w analogicznej relacji jak w przypadku hal 1, 2 i 3 (przemieszczenia są mniejsze z obliczeń w cyfrowym tunelu aerodynamicznym). Przyczyny takiego zachowania można dopatrzeć się w różnicy proporcji $H / L / B$ oraz stosunku $V / H / L / B$ wyrażającego relacje pomiędzy objętością hal a wymiarami zewnętrznymi, które dla hali 4 są zdecydowanie największe (tab. 1.). Oznacza to, że hala 4 spośród wszystkich analizowanych hal jest najbardziej zbliżona kształtem do sześcianu, co przekłada się na proporcje i odpowiedni wpływ stref oddziaływania wiatru. Jest to zgodne z wytycznymi zawartymi w normie, wskazującymi konieczność zastosowania współczynnika c_{pe1} dla płaszczyzn poniżej 1 m^2 powierzchni i odpowiednio dla współczynnika c_{pe10} określonego dla powierzchni 10 m^2 i większych. Oznacza to, że

przy budynkach halowych o mniejszych rozmiarach zwiększony udział oddziaływania wiatru na krawędziach (względem całego oddziaływania wiatru na budynek) zaczyna mieć zauważalny wpływ. Przekłada się to na zwiększone wyęteżenie elementów konstrukcyjnych przy krawędziach, tak jak w przypadku stupa hali 4 (tab. 2.). Natomiast przypadek wyęteżenia płatew pośredniej należy uznać za wpływ lokalnych turbulencji generujących większe obciążenie od wiatru w danym fragmencie konstrukcji lub też błąd numeryczny.

Wnioski

Analiza wyników wskazuje wyraźną tendencję: obciążenia dla konstrukcji hali wyznaczone w tunelu aerodynamicznym powodują mniejsze wyęteżenia elementów i mniejsze wartości przemieszczeń, jeżeli proporcje hali nie wymagają stosowania współczynników ciśnienia dla powierzchni mniejszych od 10 m^2 , czyli interpolacji pomiędzy współczynnikiem ciśnienia zewnętrznego c_{pe10} a c_{pe1} . Zatem podczas projektowania metodą normową uzyskujemy konstrukcję z pewnym zapasem nośności, jeżeli zwiększone obciążenie konstrukcji spowodowane działaniem wiatru przy krawędziach budynku nie jest

dominujące. Zapas nośności może w wybranych przypadkach dla niektórych elementów konstrukcji sięgać nawet 50% (hala 1, 2, 3, tab. 2.). Obciążenie wiatrem jest zjawiskiem złożonym, uzależnionym od wielu czynników, w tym takich występujących losowo. W związku z tym w procedurach normowych w celu zachowania równowagi pomiędzy czasochłonnością obliczeń a bezpieczeństwem konstrukcji zastosowano uproszczenia i współczynniki bezpieczeństwa, które mogą skutkować w rezultacie przewymiarowaną konstrukcją. Należy pamiętać jednak, że analiza konstrukcji w cyfrowym tunelu aerodynamicznym wymaga od projektanta wiedzy, doświadczenia i kontroli otrzymanych wyników. Tak jak w przedstawionym przykładzie mogą pojawiać się miejscowe zaburzenia przepływu skutkujące lokalnym wzrostem obciążenia na wybrany element konstrukcji.

Niewątpliwie metody komputerowe stają się alternatywą dla kosztownych i czasochłonnych badań w tunelu aerodynamicznym, jak również umożliwiają ocenę obciążenia wiatrem dla nietypowych, skomplikowanych geometrii obiektów budowlanych, których nie obejmują procedury normowe.

Tab. 3. Maksymalne przemieszczenie globalne konstrukcji uzyskane w zależności od zastosowanej metody

Kierunek wiatru	Maksymalne przemieszczenie globalne konstrukcji [mm]							
	Hala 1		Hala 2		Hala 3		Hala 4	
	Podęjsie normowe	Cyfrowy tunel	Podęjsie normowe	Cyfrowy tunel	Podęjsie normowe	Cyfrowy tunel	Podęjsie normowe	Cyfrowy tunel
W1	47,4	33,6	20,9	15,8	47,3	34,8	24,6	24,1
W2	97,6	47,6	111,1	51,4	94,4	37,3	91,9	53,1

W1 – wiatr wiejący wzdłuż hali (równoległe do kalenicy)

W2 – wiatr wiejący prostopadle do kalenicy

Bibliografia

- [1] PN-EN 1991-1-4:2008. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.
- [2] Flaga A., Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania, Arkady, Warszawa 2008.
- [3] Perliński A., Ziółko J., Symulacje komputerowe obciążenia wiatrem pionowego, walcowego zbiornika dwupłaszczyznowego, „Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej: Budownictwo Lądowe” 58/2006, s. 155–162.
- [4] Wijesooriya K., Mohotti D., Lee C.-K., Mendis P., A technical review of computational fluid dynamics (CFD) applications on wind design of tall buildings and structures: Past, present and future, „J. Build. Eng.” 74 (2023) 106828. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106828>.
- [5] Shirzad M., Tominaga Y., CFD evaluation of mean and turbulent wind characteristics around a high-rise building affected by its surroundings, „Build. Environ.” 2022.
- [6] Zheng S., Wang Y., Z. (John) Zhai Z. (John), Xue Y., Duanmu L., Characteristics of wind flow around a target building with different surrounding building layers predicted by CFD simulation, „Build. Environ.” 201” 2021, 107962. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107962>.
- [7] Szkobodziński M., Miedziatkowski C., Problemy ustalenia obciążenia wiatrem w nietypowych konstrukcjach budowlanych, „Civil and Environmental Engineering / Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 6 (2015), s. 201–209.
- [8] Szkobodziński M., Miedziatkowski C., Analiza porównawcza ciśnienia wiatru na budynek na podstawie badań tunelowych, symulacji komputerowych i norm projektowych, „Civil and Environmental Engineering / Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 8 (2017), s. 87–95.
- [9] Okoński R., Ambroziak A., Analiza porównawcza sposobów wyznaczania obciążeń wiatrem na podstawie norm projektowych i analizy przepływu CFD, „Przegląd budowlany” 3-4(2022), s. 46–57.
- [10] PN-EN 1993-1-1:2006. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

DOI: 10.5604/01.3001.0054.0146

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Migda Wojciech, Gordziej-Zagórska Małgorzata, Denziak Patryk, Leszczyńska Wioletta, 2023, Porównanie obciążenia wiatrem wyznaczonego na podstawie procedur normowych z wynikami symulacji w cyfrowym tunelu aerodynamicznym dla hali stalowej, „Builder” 12 (317). DOI: 10.5604/01.3001.0054.0146

Streszczenie: W niniejszych badaniach porównano obciążenia od wiatru wyznaczonego metodą normową oraz w cyfrowym tunelu aerodynamicznym. Analizom poddano typowy budynek hali na planie prostokąta z dwuspadowym dachem w czterech wariantach geometrycznych. Na pierwszym etapie budynku zwiaryowano, bazując na obciążeniach od wiatru wyznaczonych według Eurokodu. Następnie dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych określono poziomy wycięcia. Dla tak zaprojektowanych budynków halowych, w kolejnym kroku, przeprowadzono analizy w cyfrowym tunelu aerodynamicznym, który pozwolił na wyznaczenie obciążeń od wiatru. Zauważono wyraźną tendencję: konstrukcja obciążona w cyfrowym tunelu aerodynamicznym wpływa na mniejsze wycięcia przekrojów oraz mniejsze wartości przemieszczeń. Należy pamiętać jednak, że analiza konstrukcji w cyfrowym tunelu aerodynamicznym wymaga od projektanta wiedzy, doświadczenia i kontroli otrzymanych wyników.

Słowa kluczowe: hala stalowa, obciążenie wiatrem, cyfrowy tunel aerodynamiczny

Abstract: COMPARISON OF WIND LOAD BASED ON STANDARD PROCEDURES WITH RESULTS OF SIMULATION IN A NUMERICAL WIND TUNNEL FOR A STEEL HALL.

This research compared wind loads determined using the code method and virtual wind tunnel analysis results. A typical hall building on a rectangular plan with a gable roof in four geometric variants was analyzed. In the first stage, the buildings were dimensioned based on wind loads determined according to Eurocode. Then, the level of critical state was determined for individual structural elements. For the hall buildings designed in this way, in the next step, analyzes were carried out in a numerical wind tunnel, which allowed for the determination of wind loads. A clear tendency was noticed: the structure loaded in the virtual wind tunnel results in lower cross-sectional forces and lower displacement values. However, it should be remembered that the analysis of structures in a virtual wind tunnel requires knowledge, experience and control of the obtained results from the designer.

Keywords: steel hall, wind load, numerical wind tunnel