

# Wyznaczenie obciążeń wiatrem dla budynku wysokiego o złożonej geometrii z wykorzystaniem analizy przepływu CFD

mgr inż. Robert Okoński, dr hab. inż. Andrzej Ambroziak, prof. uczelni, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska

## 1. Wprowadzenie

Obciążenie klimatyczne, w tym obciążenie wiatrem, budynków i budowli, jest jednym z podstawowych obciążeń oddziałujących na projektowane obiekty budowlane [1]. W budynkach wysokich i wysokościowych obciążenia pochodzące od wiatru stanowią znaczący problem w projektowaniu konstrukcji tych budynków [2–5]. W przypadku gdy wytyczne normowe nie obejmują swym zakresem sposobu przyjmowania obciążenia od wiatru, z uwagi na jego wysokość lub kształt, jednym ze sposobów jego określenia są symulacje numeryczne, które na etapie końcowego procesu projektowania są uzupełniane o badania modelowe w tunelu aerodynamicznym [6–9]. Coraz szerszy dostęp do oprogramowania i systemów komputerowych umożliwia wykonanie zaawansowanych symulacji i analiz numerycznych z wykorzystaniem cyfrowego tunelu aerodynamicznego – tzw. analiza CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*) [10–12]. Umożliwia to wyznaczenie obciążeń pochodzących od wiatru na etapie projektowania nie tylko dla prostych typów konstrukcji budynków [13], ale także dla bardziej złożonej i skomplikowanej geometrii. Analiza CFD używana jest nie tylko do analizy i wyznaczania obciążeń pochodzących od wiatru [14–19], lecz także do modelowania rozwoju pożaru oraz rozprzestrzeniania się dymu [20–23], projektowania wentylacji oddymiającej [24–27] oraz w innych dziedzinach naukowo-inżynierskich [28, 29].

Dużą zaletą wykorzystania analiz numerycznych jest możliwość przeprowadzenia wielu symulacji przy stosunkowo niewielkim nakładzie finansowym w porównaniu z badaniami modelowymi, co pozwala w procesie projektowania dokonać wyboru korzystnego kształtu i systemu konstrukcyjnego budynku. Ogólna procedura pracy z analizą CFD polega na przygotowaniu spójnego modelu geometrycznego obiektu, określenie warunków brzegowych, dobór solvera numerycznego oraz określenie typu analizy. Niedogodnościami związanymi z wykorzystaniem w/w podejścia są trudności w określeniu warunków brzegowych oraz konieczność weryfikacji

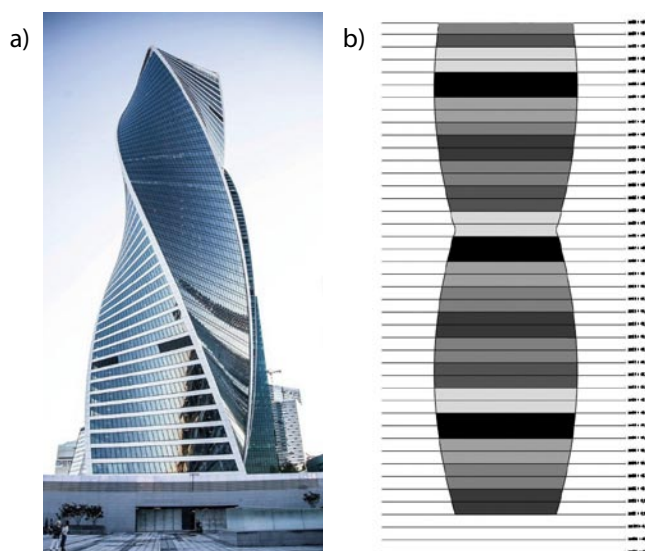
ostatecznego modelu za pomocą wyników dla podobnego typu konstrukcji lub poprzez badania modelowe w tunelu aerodynamicznym.

W artykule wykorzystano analizę przepływu CFD do wyznaczenia obciążeń wiatrem dla wybranego budynku wysokiego o złożonej geometrii przestrzennej. Dokonano oceny wpływu zmian geometrycznych budynku w zakresie wpływu kąta skrętu (modyfikacja typu makro) i zaokrąglenia/fazowania narożników (modyfikacja typu mikro) na wypadkowe siły od obciążenia wiatrem oraz na aerodynamiczne współczynniki sił.

## 2. Obciążenie wiatrem budynku wysokiego o złożonej geometrii przestrzennej

### 2.1. Opis ogólny budynku

Model numeryczny budynku wysokiego o złożonej geometrii przestrzennej wzorowano na kształcie wieżowca Evolution Tower (rys. 1a) zaprojektowanego przez biuro RMJM [30], którego charakterystycznym elementem jest skrzyżowana bryła budynku o całkowitym kącie obrotu równym  $152^\circ$ .



Rys. 1. Wizualizacja analizowanego budynku [30] (a) oraz przyjęta geometria obiektu dla uproszczonej analizy analitycznej (b)

**Tabela 1.** Wartości podstawowych parametrów dla analizy obciążenia wiatrem

Parametr	Oznaczenie i wartość
Wartość podstawowej bazowej prędkości wiatru	$v_{b,o} = 26$ [m/s]
Wymiar chropowatości dla terenu kategorii IV	$z_0 = 1,0$ [m]
Wysokość minimalna dla terenu kategorii IV	$z_{min} = 10$ [m]
Wysokość maksymalna	$z_{max} = 200$ [m]
Wartość współczynnika sezonowego	$c_{season} = 1,0$
Współczynnik rzeźby terenu (orografii)	$c_o = 1,0$
Współczynnik kierunkowy	$c_{dir} = 1,0$
Gęstość powietrza	$\rho = 1,25$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Współczynnik turbulencji	$k_l = 1,0$

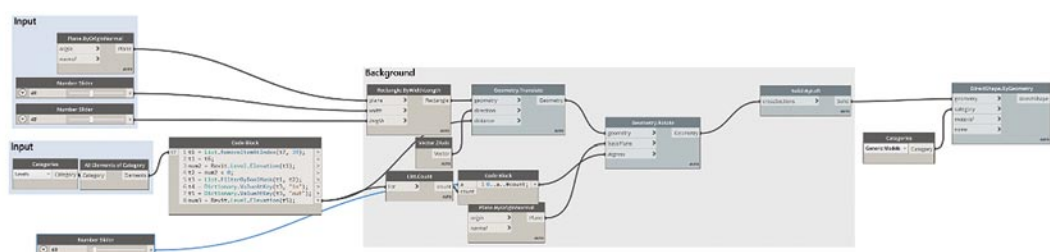
**Tabela 2.** Zestawienie wartości parametrów oraz szczytowego ciśnienia prędkości

z [m]	$c_r(z)$	$v_b$ [m/s]	$v_m$ [m/s]	$I_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m <sup>2</sup> ]
40	0,864	26	22,475	0,271	914,755
50	0,917		23,834	0,256	990,341
60	0,959		24,945	0,244	1053,814
70	0,996		25,844	0,235	1108,684
80	1,026		26,698	0,228	1157,105
90	1,043		27,415	0,222	1200,502
100	1,079		28,057	0,217	1239,868
110	1,101		28,638	0,213	1275,922
120	1,122		29,168	0,209	1309,205
130	1,141		29,656	0,205	1340,132
140	1,158		30,107	0,202	1369,032
150	1,174		30,528	0,200	1396,165
155	1,182		30,727	0,198	1409,139
194,5	1,235		32,110	0,190	1500,321

Ze względu na skomplikowaną bryłę budynku wysokiego norma PN-EN 1991-1-4 [31] nie zawiera żadnych szczególnych wytycznych wskazujących sposób przyjmowania obciążeń od wiatru dla tego typu kształtu budynku. Przyjęto, że zebranie oddziaływań od wiatru będzie wykonane jak dla prostego budynku, przy zachowaniu zmiennej szerokości na wysokości (rys. 1b).

Trójwymiarowy model budynku został opracowany w programie Revit 2021 z wykorzystaniem skryptu do programowania

**Rys. 2.** Skrypt programowania wizualnego Dynamo do generacji budynku



wizualnego – Dynamo [32, 33]. Przygotowany skrypt wykonywał generację modeli trójwymiarowych o zdefiniowanym kącie skrętu (rys. 2). Po wygenerowaniu modelu cała geometria jest łączona w bryłę 3D za pomocą węzła Solid.By-Loft i następnie eksportowana do programu Revit za pomocą węzła DirectShape.ByGeometry.

**2.2. Obliczenia według normy PN-EN 1991-1-4 [31]**

Do celów niniejszej analizy obliczeniowej przyjęto, iż omawiany budynek o wysokości  $h = 195,5$  m o wymiarach 40x40 m zlokalizowany będzie w Gdańsku (180 m n.p.m.) w 2 strefie obciążenia wiatrem. Podstawowe parametry niezbędne do wyznaczenia obciążeń zestawiono w tabeli 1. Wyznaczone wartości szczytowego ciśnienia prędkości przedstawiono w tabeli 2. Wysokość  $z_{strip}$  przyjęto równą wysokości 2 kondygnacji, czyli  $z_{strip} = 10$  m.

Zestawienie obliczonych sił wywieranych przez wiatr na konstrukcję przedstawiono w tabeli 3. Współczynnik ciśnienia zewnętrznego przyjęto jak dla  $h/d = 5$  ( $h/d = 194,5/40 = 4,875$ )  $c_{pe} = 0,80$  dla parcia i  $c_{pe} = -0,70$  dla ssania. Wartość sumaryczną siły działającej na konstrukcję, która wynosi  $F_{w,e} = 15 659,9$  kN, obliczono w tabeli 3.

**Tabela 3.** Zestawienie sił wiatru oddziałujących na konstrukcję

z [m]	$q_p(z)$ [N/m <sup>2</sup> ]	$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	$c_s c_d$ [-]	$\Sigma c_{pe}$ [-]	$F_{w,e}$ [kN]
40	914,755	1947,276	0,866	1,50	2313,883
50	990,341	557,36			717,017
60	1053,814	562,845			770,481
70	1108,684	559,759			806,154
80	1157,105	545,081			819,300
90	1200,502	519,449			810,056
100	1239,868	483,435			778,615
110	1275,922	437,44			725,023
120	1309,205	416,781			708,802
130	1340,132	462,254			804,706
140	1369,032	501,547			891,937
150	1396,165	533,254			967,119
155	1409,139	275,093			503,550
194,5	1500,321	2074,623			4043,268
	$\Sigma A_{ref}$	<b>9876,197</b>			

Całkowity moment wywracający od oddziaływania wiatru obliczono za pomocą poniższej zależności:

$$M_w = \sum_{i=1} F_{w,e,i} \cdot \left( \frac{h_i - h_{i-1}}{2} + h_{i-1} \right) = 15\,229\,525 \text{ kNm} \quad (1)$$

### 2.3. Obliczenia numeryczne

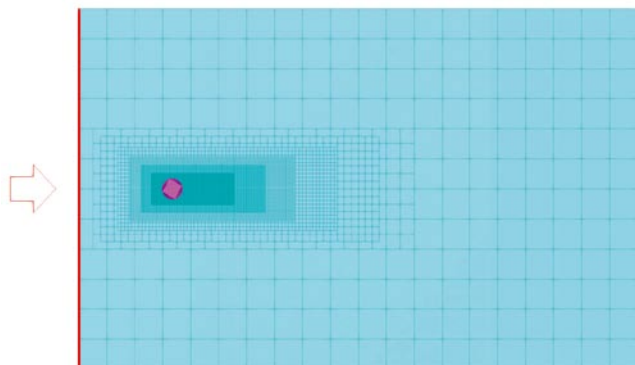
Jako parametry wejściowe analizy (prędkość na wlocie oraz intensywność) przyjęto parametry wyznaczone w analizie analitycznej. Wymiary tunelu aerodynamicznego przyjęto o wymiarach 1560x960x800 m. Widok z góry na tunel aerodynamiczny przedstawiono na rysunku 3.

Gęstość siatki przyjęto na poziomie 50%, co przekłada się na 3,6 mln komórek obliczeniowych siatki o minimalnej wielkości około 31 cm. W analizie przyjęto ilość iteracji równą 2000, dodatkowo weryfikowano kształt wykresu ciśnienia szczątkowego w każdym z poszczególnych przypadków i wartość ciśnienia szczątkowego (rys. 4). Wartość ciśnienia szczątkowego od ok. 240 iteracji jest poniżej wartości zalecanej 0,001, natomiast od ok. 1600 iteracji jest poniżej wartości 0,0001.

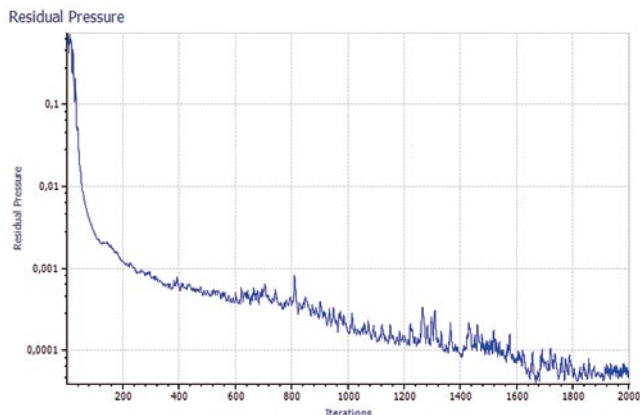
Na podstawie przeprowadzonej analizy numerycznej wygenerowano następujące wyniki: widoki izometryczne z rozkładem współczynnika ciśnienia na powierzchni (rys. 5), wektory rozkładu prędkości (rys. 6), rozkład pola prędkości (rys. 7), widok na rozkład strumieni prądu powietrza (rys. 8) oraz widok na konstrukcje z pokazanym rozkładem ciśnienia na powierzchni wraz z wypadkową siłą od oddziaływań wiatru (rys. 9).

### 2.4. Porównanie uzyskanych wyników

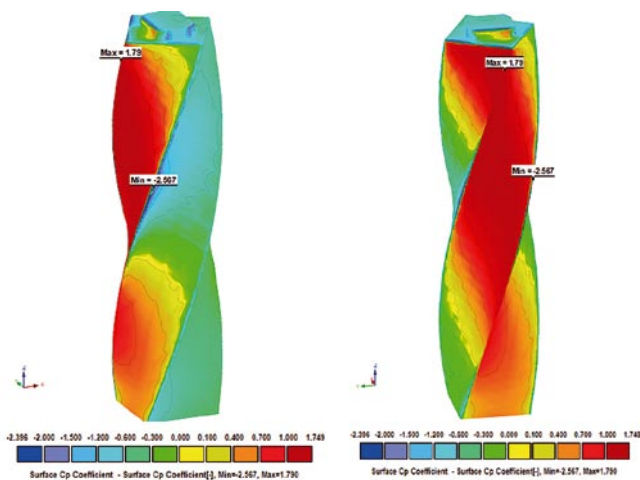
Obliczenia dokonane zgodnie z procedurą przedstawioną w normie PN-EN 1991-1-4 [31] zostały przeprowadzone przy założeniu prostej nieskręconej geometrii, co pozwoliło na szybkie oszacowanie wartości oddziaływania wiatru. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych stwierdzono, że wartości współczynnika parcia wiatru dla analizowanego budynku znacznie odbiegają od uproszczonych analitycznych obliczeń. Maksymalna wartość współczynnika parcia dla ściany zawietrznej wyznaczona według [31] wynosi 0,8, natomiast z obliczeń w programie R-WIND



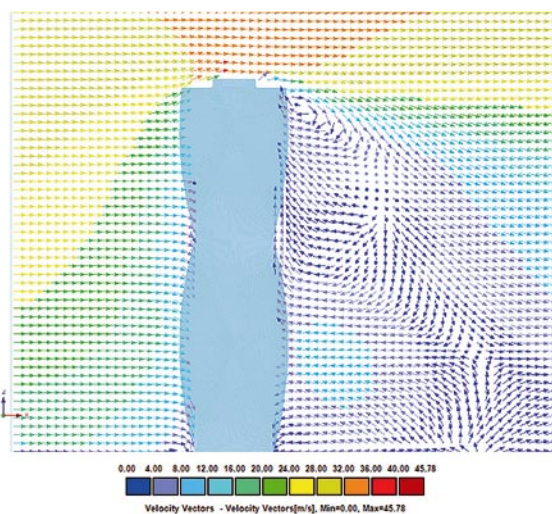
Rys. 3. Wizualizacja tunelu aerodynamicznego



Rys. 4. Wykres ciśnienia szczątkowego



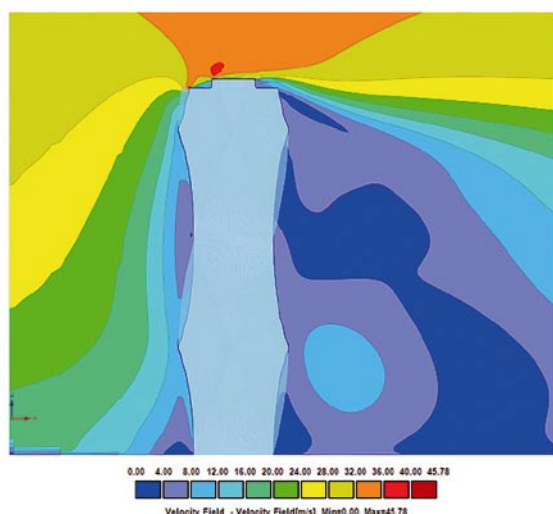
Rys. 5. Rozkład współczynnika  $c_p$  na powierzchni



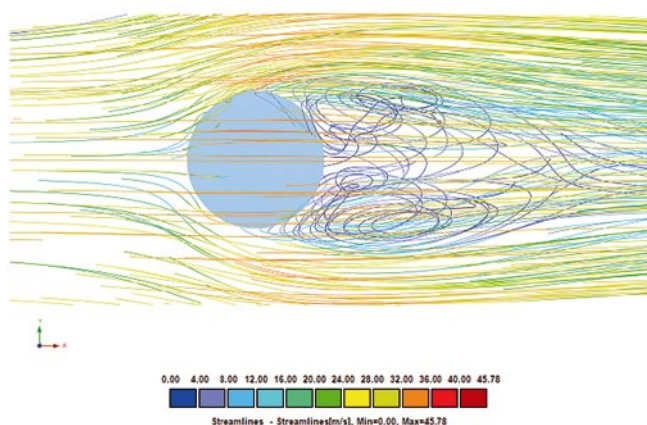
Rys. 6. Widok rozkładu wektorów prędkości

uzyskano wartość 1,749 (rys. 5). Najmniejszą wartość współczynnika parcia uzyskano na krawędziach, na których występuje gwałtowne odrywanie strumieni powietrza z uwagi na nachylenie powierzchni do kierunku działającego wiatru (-2,567, rys. 5). Zgodnie z przewidywaniami na powierzchniach na kierunku oddziałującego wiatru odnotowano



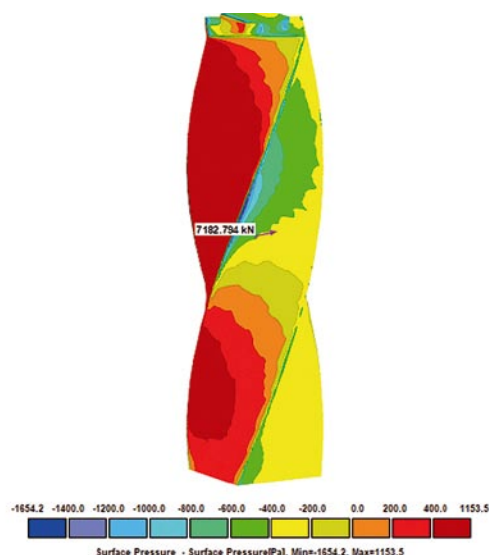


Rys. 7. Widoki rozkładu pola prędkości w obrębie budynku



Rys. 8. Widok na rozkład strumieni prądu powietrza – widok z góry

dodatkowo wartości współczynnika, a na powierzchniach zawietrznych wartości ujemne. Analizując profil rozkładu prędkości wiatru wokół budynku (rys. 6–8) zauważono, że wiatr na pewnej odległości za obiektem ma tendencję do zawracania i zmiany kierunku swojego oddziaływania. Skutkiem takiego oddziaływania wiatru jest powstawanie wirów za budynkiem (rys. 8). Zgodnie z ogólną teorią przepływów widoczny jest spadek prędkości bezpośrednio przy budynku (rys. 7). Porównując wyniki ciśnienia wiatru na powierzchni, można dostrzec niewielkie różnice. Wartość szczytowa ciśnienia prędkości obliczona według [31] wynosi  $q_p(z) = 1500,3$  Pa, natomiast wartość współczynnika ciśnienia dla ściany nawietrznej wynosi  $c_{pe} = 0,80$ , otrzymujemy zatem  $w_e = 1200$  Pa. Maksymalna wartość parcia wiatru uzyskanego w programie R-WIND wynosi  $w_e = 1153,5$  Pa. Wypadkowa siła oddziaływania wiatru w kierunku równoległym do działania wiatru wynosi  $F_{w,e} = 7088$  kN, a moment wywracający liczony względem podstawy wyniósł  $M_w = 771\,274$  kNm. Na tym etapie widzimy spadek wypadkowej siły do 55% wartości obliczonej według obliczeń analitycznych (tab. 3) oraz spadek wartości momentu wywracającego do 49% (równanie 1). Dodatkowo



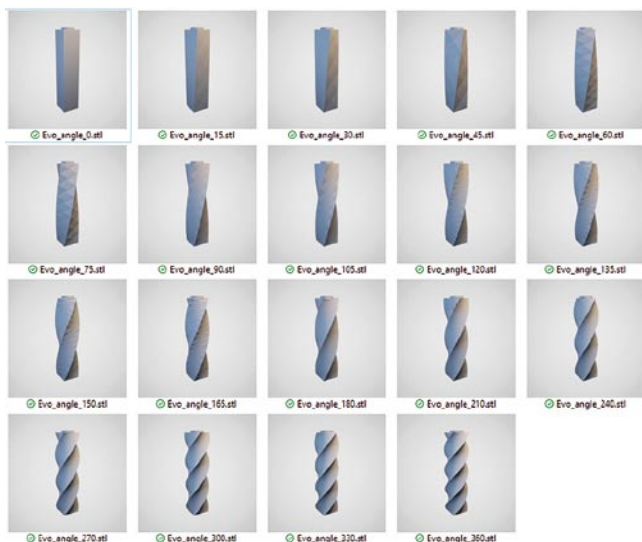
Rys. 9. Rozkład ciśnienia na powierzchni konstrukcji wraz z wypadkową siłą oddziałującą na budynek

w symulacjach numerycznych uzyskano wartości pozostałych składowych oddziaływania wiatru: wypadkowa wiatru działająca prostopadle do kierunku działania wiatru wynosi  $F_{w,e,Y} = -422$  kN, moment wywracający działający względem osi działania wiatru wynosi  $M_{w,X} = 58\,562$  kNm oraz moment skręcający obiekt będący wynikiem zrotowanej bryły, który wynosi  $M_{w,Y} = 1552$  kNm. Opisane poniżej wyniki zostały wyznaczone w zewnętrznym oprogramowaniu ParaView, które pozwala na obróbkę danych wyjściowych z programu R-WIND. Różnice wypadkowej siły wynikają z innego algorytmu całkującego siły wypadkowe na poszczególnych komórkach elementów skończonych.

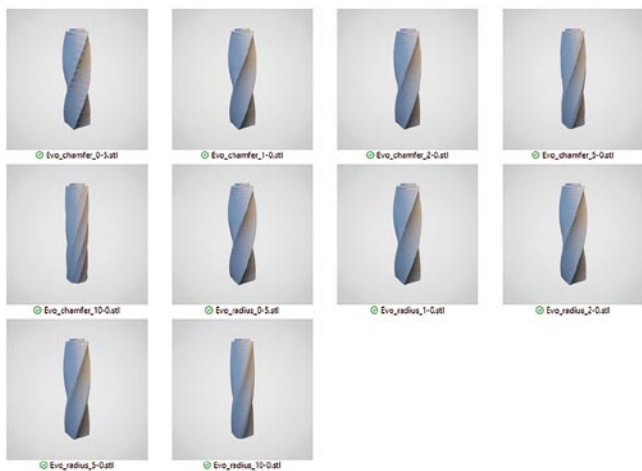
### 3. Optymalizacja geometryczna kształtu budynku

#### 3.1. Dane i założenia wstępne

Jednym z dominujących obciążeń na konstrukcje budynków wysokich jest oddziaływanie wiatru. Aby zmniejszyć negatywne oddziaływania obciążeń pochodzących od wiatru na etapie projektowania budynku, można zastosować modyfikację/zmianę sztywności układu konstrukcyjnego lub dokonać optymalizacji kształtu budynku w celu redukcji oddziaływań wiatru. W pierwszym przypadku w celu zwiększenia sztywności możemy zwiększyć wymiary elementów konstrukcyjnych, dokonać modyfikacji systemu konstrukcyjnego lub też zwiększyć wymiary zewnętrzne bryły budynku. Jednak rozwiązania te nie zawsze mogą być zastosowane, ponieważ przy zmianach wymiarów elementów nośnych jest redukowana powierzchnia użytkowa lub też ulegają zmianie walory estetyczne konstrukcji. Zmiany wielkości bryły budynku również w wielu przypadkach jest niemożliwe z uwagi na ograniczoną powierzchnię działki, na której ma zostać wybudowany dany budynek. Drugim sposobem zmniejszenia oddziaływań pochodzących



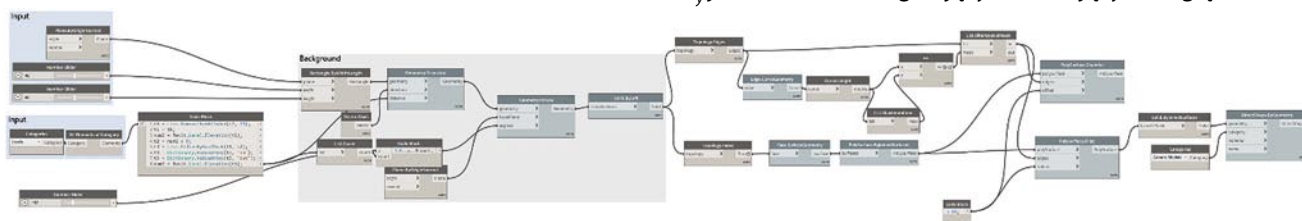
**Rys. 10.** Widok na modele budynku wykorzystane w analizie kąta skrętu



**Rys. 11.** Widok na modele budynku wykorzystane w analizie modyfikacji narożników

od wiatru na budynek wysoki jest poszukiwanie odpowiedniej formy architektonicznej. Ciekawą pozycją literaturową omawiającą modyfikacje kształtów budynków wysokich o wysokości ponad 300 m jest artykuł [34]. Modyfikacje kształtu budynku, ze względu na formę architektoniczną, możemy podzielić na dwa główne typy:

- makro – modyfikacja mający globalny wpływ na ostateczny wygląd budynku, do których można zaliczyć modyfikacje związane z m.in. zbieżną bryłą, skręceniem budynku;



**Rys. 12.** Skrypt Dynamo do generacji budynku z modyfikacją narożników

- mikro – modyfikacje związane z fazowaniem/zaokrągleniem narożników budynku itp.

Dla analizowanego budynku zastosowano dwa typy modyfikacji. Analizowano wpływ kąta skrętu (modyfikacja typu makro) na wypadkowe siły od obciążenia wiatrem oraz na aerodynamiczne współczynniki sił oraz dokonano oceny wpływu fazowania oraz zaokrąglenia narożników (modyfikacja typu mikro) na wypadkowe siły wiatru oraz na aerodynamiczne współczynniki sił. Dane wejściowe do analizy numerycznej przyjęto zgodnie z danymi opisanymi w punkcie 2.2. Na potrzeby analizy wpływu kąta skrętu obiektu przygotowano 19 modeli w programie Revit z wykorzystaniem skryptu Dynamo. Modele o kącie od 0 do 180° były generowane co 15°, a pozostałe do 360° włącznie co 30°, a następnie eksportowane do formatu \*.stl. Widok na modele przedstawiono na rysunku 10. Przeanalizowano dwa kierunki działania wiatru (0° oraz 45°). Proces ten realizowany był bezpośrednio w programie R-WIND poprzez obrót trójwymiarowej bryły obiektu względem początku układu współrzędnych.

Analizy wpływu modyfikacji narożników dokonano dla geometrii wyjściowej budynku. W tym celu przygotowanych zostało 10 modeli (rys. 11): 5 dla fazowania oraz 5 dla zaokrąglenia narożników. Wielkość fazowania/zaokrąglenia dobrano o wielkościach: 0,5; 1,0; 2,0; 5,0 i 10,0 m. W generacji modeli wykorzystano skrypt Dynamo (rys. 12). W celu jednoznacznego określenia krawędzi, względem których ma zachodzić proces modyfikacji, wyfiltrowano 4 krawędzie o największej długości, które posłużyły jako dane wejściowe dla węzłów PolySurface.Chamfer (odpowiedzialny za fazowanie) oraz PolySurface.Fillet (odpowiedzialny za zaokrąglenie). W następnym kroku otrzymaną zmodyfikowaną powierzchnię połączono w bryłę za pomocą węzła Solid.ByJoinedSurfaces, a następnie wyeksportowano ją do programu Revit za pomocą węzła DirectShape.ByGeometry.

### 3.2. Wyniki analiz numerycznych przeprowadzonych modyfikacji geometrii

Wartości sił wypadkowych otrzymanych w analizie przepływowej zostały odczytane w programie ParaView. Wartość siły  $F_x$  odpowiada wypadkowej sile wiatru w kierunku jego działania, siła  $F_y$  odpowiada wypadkowej sile działającej prostopadle do kierunku przepływu, moment zginający  $M_x$  jest momentem zginającym działającym względem osi x wywołanym wypadkową siłą  $F_y$ , moment zginający  $M_y$  jest momentem zginającym działającym względem osi y

wywołanym wypadkową siłą  $F_x$ , natomiast moment  $M_z$  jest momentem zginającym względem osi pionowej obiektu (momentem skręcającym konstrukcję).

Ze względu na zmieniające się pole powierzchni rzutu obiektu na płaszczyznę oddziaływania wiatru (wartość odczytana z programu R-WIND jako YZ-Projected Area) intuicyjną jest zmiana wypadkowej siły  $F_x$ . W celu oceny wpływu kąta skrętu na oddziaływania wiatru wprowadzono aerodynamiczne współczynniki sił określone za pomocą poniższych zależności:

$$C_{F_x} = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho v_H^2 B' H}, \quad (2)$$

$$C_{M_x} = \frac{M_x}{\frac{1}{2} \rho v_H^2 B' H^2}, \quad (3)$$

$$C_{F_y} = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho v_H^2 B' H}, \quad (4)$$

$$C_{M_y} = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \rho v_H^2 B' H^2}, \quad (5)$$

$$C_{M_z} = \frac{M_z}{\frac{1}{2} \rho v_H^2 (B')^2 H}, \quad (6)$$

gdzie:  $v_H$  (m/s) – prędkość powietrza na wysokości  $H$ ;  $B'$  (m) =  $A/H$  – średnia szerokość budynku;  $A$  (m<sup>2</sup>) – pole przekroju powierzchni nawięzkiej,  $H$  (m) – wysokość całkowita.

Wykresy zmienności sił, momentów oraz aerodynamicznych współczynników sił w zależności od kąta skręcenia budowli przedstawiono na rysunkach 13–17. Wyniki dla analizy wpływu wielkości fazowania/zaokrąglenia na wartości sił, momentów oraz aerodynamicznych współczynników sił przedstawiono na rysunkach 18–22.

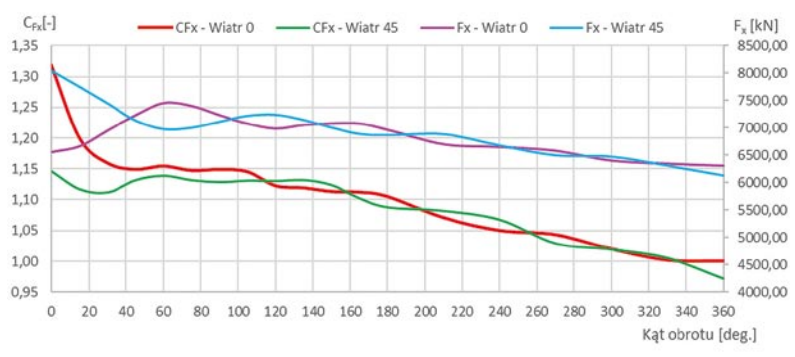
### 3.3. Wnioski

Modyfikacje polegające na skręceniu bryły obiektu w dużym zakresie kątów wpływają pozytywnie na redukcje obciążeń wiatrem (rys. 13–17). Natomiast nie są widoczne znaczne pozytywne wpływy modyfikacji w zakresie modyfikacji od 0 do około 45°. W zadanym zakresie dla kierunku wiatru 0° zauważono przyrost siły o 10%, która w głównej mierze wynika z większej powierzchni nawięzkiej spowodowanej skręceniem obiektu, co jest widoczne jako redukcja wartości współczynnika siły aerodynamicznej o około 13%. Dodatkowo na niekorzyść tych rozwiązań przemawia zmienność charakteru odpowiedzi budynku przy zmianie kierunku działania wiatru, mianowicie przy skręcaniu budynku w zakresie od 0 do 60°, dla wiatru działającego pod kątem 45° odnotowujemy przyrost siły wypadkowej  $F_x$  przy braku zmian współczynnika  $C_{F_x}$ . Przy uwzględnieniu wyłącznie odpowiedzi w postaci wypadkowej siły  $F_x$  korzystne

rozwiązanie jest dla kąta około 270°, które redukuje wartość współczynnika  $C_{F_x}$  o 21% dla kierunku wiatru 0° oraz redukcje o 11% w przypadku wiatru dla kierunku 45°. Dla sił otrzymujemy przyrost wartości o niespełna 0,3% dla kierunku 0° oraz redukcje o 19% w przypadku wiatru działającego pod kątem 45°. Powyższe rozwiązanie jest również korzystne pod względem działania momentu wywracającego obiekt – dla wiatru o kierunku 0° otrzymujemy nieznaczny przyrost momentu o 0,2% i redukcję aerodynamicznego współczynnika momentu o 21%; dla wiatru o kierunku 45° otrzymujemy redukcję momentu o 20% oraz redukcję aerodynamicznego współczynnika momentu o 11%. W kierunku poprzecznym przy coraz większym kącie skrętu otrzymujemy przyrost wartości wypadkowej siły  $F_y$  jak i momentu zginającego  $M_x$  (rys. 14–15). Pomijając początkowy zakres najbardziej korzystne rozwiązanie widoczne jest dla kątów około 115 oraz 210°. Odpowiedzi konstrukcji w zadanym kierunku dla ww. wartości kątów nie różnią się znacznie przy różnych kierunkach działania wiatru. Przyrost siły wypadkowej dla najbardziej niekorzystnego kierunku wiatru wynosi około 280 kN, co stanowi niespełna 5% wartości siły wypadkowej działającej w kierunku podłużnym. Jeśli chodzi o rozwiązanie korzystne pod względem momentu skręcającego konstrukcję, optymalna wartość kąta skrętu wynosi około 90–100°, dla którego odpowiedź obiektu dla wiatru w kierunku działania wiatru 0 oraz 45° jest podobna, a wartość momentu skręcającego  $M_z$  wynosi około 1000–1200 kNm (rys. 17). Pomimo braku możliwości uwzględnienia odpowiedzi budynku w dziedzinie czasu, na podstawie wizualizacji rozkładu strumienia wiatru (rys. 23) widoczny jest pozytywny wpływ kąta skrętu, który wprowadza dodatkowe składowe prędkości i wynikiem tego jest chaotyczny rozkład wiatru za budynkiem. Pozytywny aspekt tego zjawiska polega na odpowiedzi dynamicznej budynku, która w przypadku chaotycznego zachowania wiatru nie pozwala w łatwy sposób na wzbudzenie rezonansowe konstrukcji.

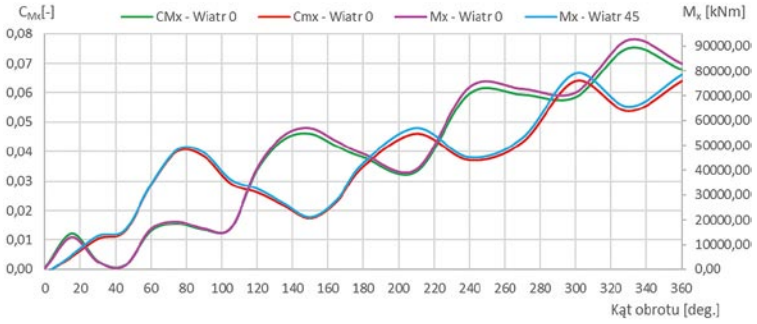
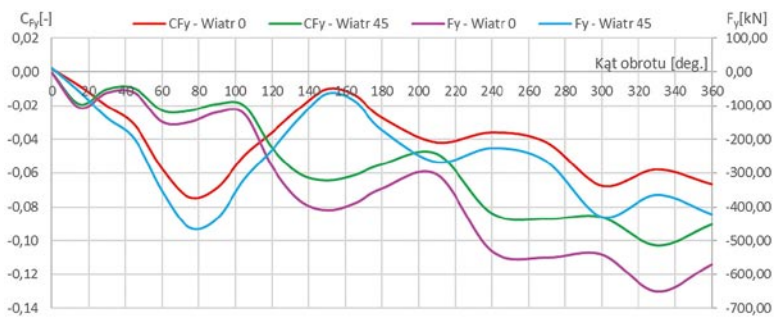
Wyniki analizy związanej z modyfikacją narożników konstrukcji pozwalają zdefiniować ogólny wniosek mówiący, że każda z przeanalizowanych modyfikacji wpływa na wielkość sił od oddziaływań wiatru (rys. 18–22). Największy wpływ widoczny jest dla aerodynamicznych współczynników sił działających w kierunku wiejącego wiatru, tj. siły  $C_{F_x}$  (rys. 18) oraz momentu  $C_{M_y}$  (rys. 20), dla których redukcja w przypadku fazowania narożników wynosi odpowiednio 25% oraz 22%, natomiast dla zaokrąglenia wynosi odpowiednio 29% oraz 26%. W przypadku kierunku poprzecznego dla fazowania odnotowujemy spadek wartości współczynników przy wielkości fazowania około 3–4 m, natomiast powyżej tej wartości siła poprzeczna zmienia swój znak i przy maksymalnej wielkości fazowania otrzymujemy zbliżone wartości jak dla modelu wyjściowego. Dla modyfikacji związanej z zaokrągleniem narożników otrzymujemy tylko redukcję wartości





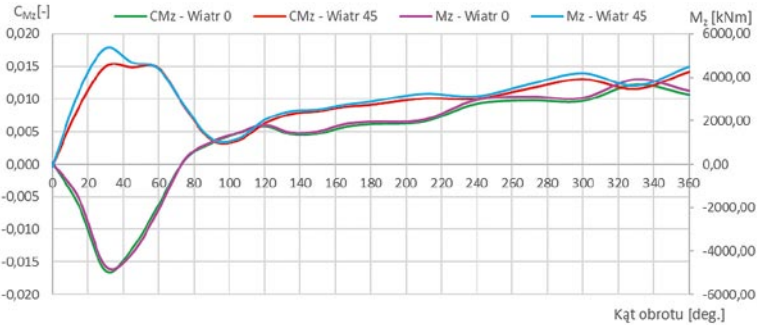
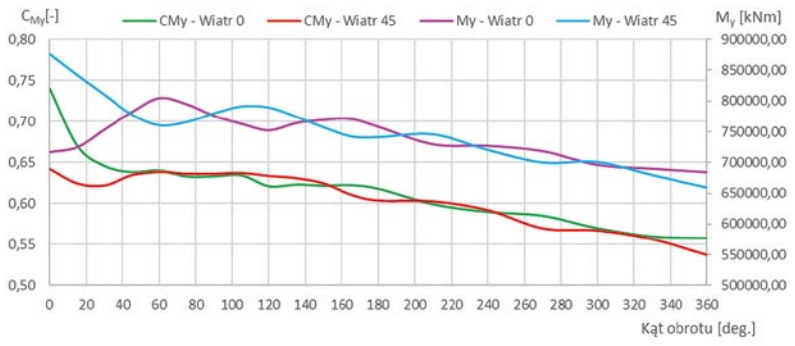
**Rys. 13.** Zmiana sił i współczynnika aerodynamicznego siły w zależności od kąta skrętu dla kierunku podłużnego

**Rys. 14.** Zmiana sił i współczynnika aerodynamicznego siły w zależności od kąta skrętu dla kierunku poprzecznego



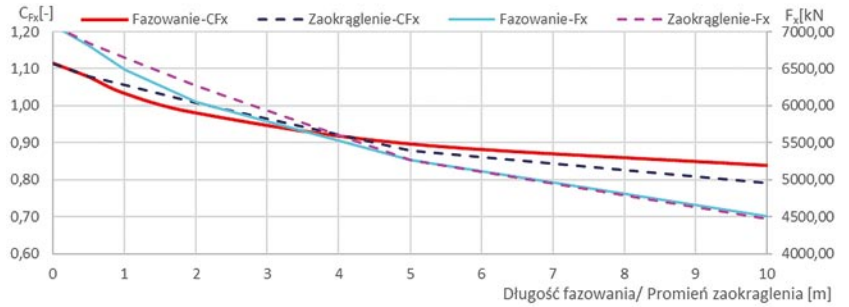
**Rys. 15.** Zmiana współczynnika aerodynamicznego momentu w zależności od kąta skrętu dla rotacji względem osi X

**Rys. 16.** Zmiana współczynnika aerodynamicznego momentu w zależności od kąta skrętu dla rotacji względem osi Y

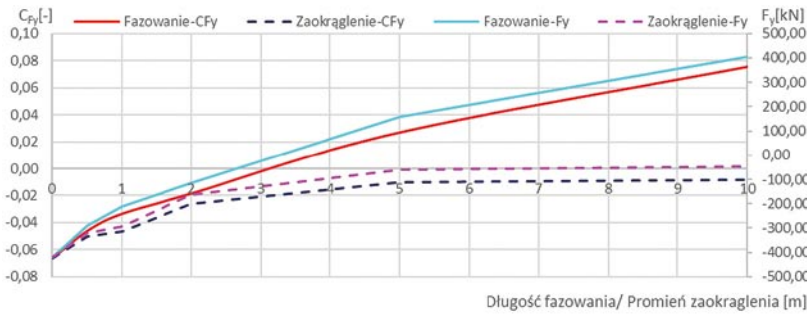


**Rys. 17.** Zmiana współczynnika aerodynamicznego momentu w zależności od kąta skrętu dla rotacji względem osi podłużnej Z

**Rys. 18.** Zmiana współczynnika aerodynamicznego siły w zależności od wielkości fazowania/zaokrąglenia dla kierunku podłużnego



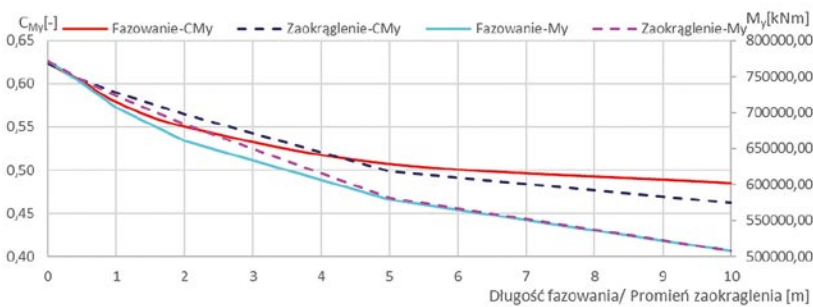
**Rys. 19.** Zmiana współczynnika aerodynamicznego siły w zależności od wielkości fazowania/zaokrąglenia dla kierunku poprzecznego



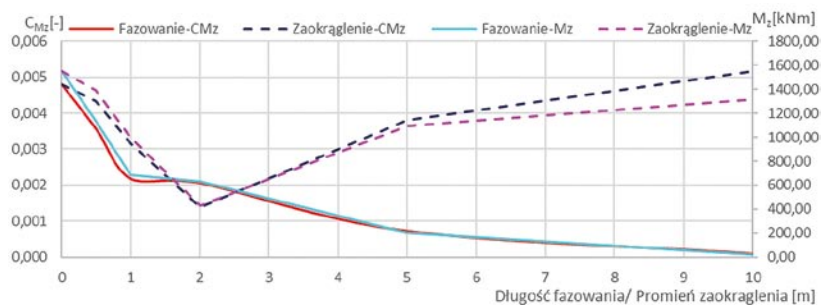
**Rys. 20.** Zmiana współczynnika aerodynamicznego momentu w zależności od wielkości fazowania/zaokrąglenia dla rotacji względem osi X



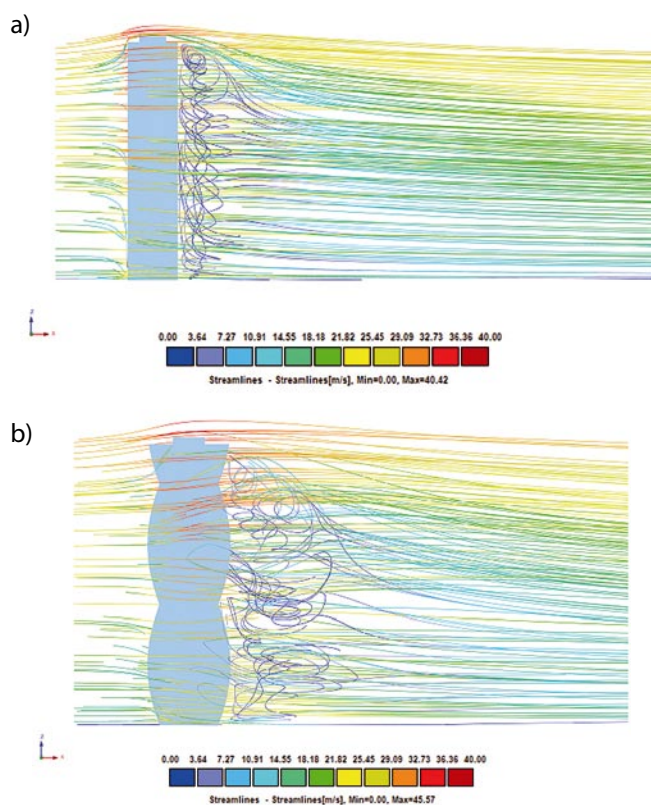
**Rys. 21.** Zmiana współczynnika aerodynamicznego momentu w zależności od wielkości fazowania/zaokrąglenia dla rotacji względem osi Y



**Rys. 22.** Zmiana współczynnika aerodynamicznego momentu w zależności od wielkości fazowania/zaokrąglenia dla rotacji względem osi podłużnej Z







Rys. 23. Strumienie wiatru dla kąt skrzywienia: a)  $0^\circ$ , b)  $210^\circ$

współczynników w pełnym spektrum analizowanych wielkości, które zbiegają się od wartości początkowych równych  $C_{Fy} = -0,066$  oraz  $C_{Mx} = 0,047$  do wartości  $C_{Fy} = -0,008$  oraz  $C_{Mx} = 0,008$ . Wartości współczynnika aerodynamicznego momentu skręcającego  $C_{Mz}$  dla fazowania zbiegają się do wartości zero, co pozwala niemalże całkowicie wyeliminować efekt skręcania obiektu wskutek oddziaływań wiatru. Odmienna sytuacja ma miejsce dla zaokrągleń narożników, gdzie wartości współczynników na początku maleją około 5-krotnie, by przy największej wartości zaokrąglenia narożnika przekroczyć wartość bez żadnej modyfikacji.

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że stosowanie analizy numerycznej CFD może przynieść duże korzyści na etapie projektowania konstrukcji. Prawie dwukrotnie mniejsze oddziaływanie wiatru na budynek wyznaczone na podstawie symulacji numerycznych pozwala na racjonalne i ekonomiczne wymiarowanie konstrukcji, mniejsze zużycie materiału, większą powierzchnię użytkową oraz bardziej estetyczną i smukłą bryłę całego obiektu. Warto mieć na uwadze, że powyższa analiza została przeprowadzona za pomocą rozwiązania układu równań RANS i modelu turbulencji  $k - \epsilon$ , który charakteryzuje się z reguły najmniej dokładnymi wynikami spośród dostępnych metod obliczania przepływu, ale za to najkrótszym czasem obliczeń [35, 36].

Ogólnym wnioskiem wysuwającym się na podstawie analizy wpływu modyfikacji kształtu jest to, że każda modyfikacja wpływa na zmianę obciążeń wiatrem. W pracy analizowano dwa różne kąty natarcia wiatru ( $0$  oraz  $45^\circ$ ), aby można było ocenić skuteczność modyfikacji w większym spektrum warunków fizycznych panujących w rzeczywistości. Pod względem czysto geometrycznym najbardziej korzystne jest rozwiązanie dla kąta około  $200^\circ$ , dla którego uzyskujemy zbliżoną odpowiedź dla różnych kierunków działania wiatru oraz uzyskujemy znaczną redukcję sił wypadkowych w kierunku podłużnym oraz stosunkowo niewielkie wartości sił działające w kierunku poprzecznym. W przypadku rozważań na temat modyfikacji narożników najbardziej korzystne rozwiązanie sprowadza się do największych wartości wielkości fazowań i zaokrągleń. Jednak uwzględniając dodatkowy składnik w postaci redukcji powierzchni użytkowej, najbardziej optymalne rozwiązanie otrzymujemy dla wartości fazowań i zaokrągleń około  $5$  m, dla których uzyskujemy redukcję sił  $F_x$  o około  $25\%$  oraz redukcję współczynnika kształtu  $C_{Fx}$  o około  $20\%$ . Podsumowując, na potrzeby szacowania obciążenia od wiatru opłacalne jest stosowanie analizy CFD, której wyniki mogą zredukować wynikowe siły oddziałujące na budynek (w rozpatrywanym przypadku skrzyśniętej bryły budynku nawet o około  $50\%$  względem wartości obliczonych analitycznie). Zdecydowaną zaletą analizy CFD jest nie tylko ww. redukcja oddziaływań, ale możliwość weryfikacji wielu modeli i rozwiązań geometrycznych przy niedużym nakładzie czasowym i finansowym. W ogólnym przypadku opłacalne są modyfikacje geometryczne zarówno w skali makro, jak i mikro. Dla modyfikacji w skali makro, trudno jednoznacznie określić optymalne rozwiązanie i propozycje modyfikacji, które dadzą największe korzyści, ponieważ każdy projekt jest tworem indywidualnym i w każdym z nich aspekt optymalizacyjny może być uwzględniany w inny sposób. Dla modyfikacji w skali mikro korzystne jest fazowanie lub zaokrąglenie narożnika o wielkość ok.  $1/8 - 1/10$  szerokości podstawy obiektu. Uzyskane wyniki z analiz numerycznych w przypadku projektowania realnej konstrukcji winny być zweryfikowane poprzez wykonanie testów w tunelu aerodynamicznym. Przeprowadzona analiza może stanowić podstawę do dalszego kontynuowania prac naukowo-inżynierskich w tym zakresie. W dalszej pracy można porównać wpływ różnych modeli turbulencji, wpływ kategorii terenu oraz przygotować ich interpretację pod względem stosowalności w analizie CFD, można również badać wpływ wielu innych typów modyfikacji geometrycznych lub skupić się na modyfikacjach narożników i przygotować więcej wytycznych dla różnych kształtów konstrukcji.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Żurański J. A., Gaczek M., Oddziaływanie wiatrów katastrofalnych na budynki w Polsce, *Przegląd Budowlany* 11/2009, str. 26–31
- [2] Paruch R., Oddziaływanie wiatru na budynek wysoki w aspekcie rozwoju form architektonicznych i systemów konstrukcyjnych, *Mechanik* 7/2016, str. 782–783. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2016.7.172>

- [3] Lipecki T., Oddziaływanie wiatru na budynki wysokie w świetle badań własnych i ujęć normowych, *Budownictwo i Architektura* 12/2013, str. 143–150
- [4] Rzymiski E., Dohojda M., Projekt budynku wysokiego w konstrukcji trzonowo-skieletowej, *Przegląd Budowlany* 3/2019, str. 38–48
- [5] Gaćkowski R., The Influence of Wind on the Work of the Structure of Columnar Elements in Reinforced Concrete Tall Buildings, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, seria Budownictwo* 1/2021, tom 27, str. 51–57 <https://doi.org/10.17512/znb.2021.1.08>.
- [6] Flaga A., Projektowanie ze względu na wiatr – rola badań w tunelach aerodynamicznych, *Builder* 8/2015, str. 60–63
- [7] Rokicki W., Pietrzak J., Wrona M., Wpływ obciążeń od wiatru na budynek wysoki o nieregularnej formie – badania modelowe, *Przestrzeń, Ekonomia, Społeczeństwo* 12/2017 str. 179–191
- [8] Lipecki T., Struktura wiatru i badania modelowe obciążenia wiatrem budowli prostopadłościennych, *Lublin, Politechnika Lubelska*, 2015
- [9] Kłaput R., Kocoń A., Flaga A., Air flow formation in the inlet of a closed circuit boundary layer wind tunnel using the one-set guide vanes solution, *Czasopismo Techniczne* 8/2017, str. 81–98 <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.17.131.6882>.
- [10] Wendt J. F. editor, *Computational fluid dynamics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [11] Wilkinson S., Hanna S., Approximating Computational Fluid Dynamics for Generative Tall Building Design, *International Journal of Architectural Computing* 12/2014, str.155–177, <https://doi.org/10.1260/1475-472X.12.2.155>
- [12] Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J., Hensen J. L. M., Application of computational fluid dynamics in building performance simulation for the outdoor environment: An overview, *Journal of Building Performance Simulation* 4/2011, str. 157–184, <https://doi.org/10.1080/19401493.2010.513740>
- [13] Okoński R., Ambroziak A., Analiza porównawcza sposobów wyznaczenia obciążeń wiatrem na podstawie norm projektowych i analizy przepływu CFD, *Przegląd Budowlany* 3–4/2022, str. 22–33
- [14] Zheng C.-R., Zhang Y.-C., Computational Fluid Dynamics study on the performance and mechanism of suction control over a high-rise building, *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 21/2012, str. 475–491, <https://doi.org/10.1002/tal.622>
- [15] Hanna S. R., Brown M. J., Camelli F. E., Chan S. T., Coirier W. J., Hansen O. R., et al., Detailed simulations of atmospheric flow and dispersion in downtown Manhattan: An applications of five computational fluid dynamics models, *Bulletin of the American Meteorological Society* 87/2006, str. 1713–1726, <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-12-1713>
- [16] Tominaga Y., Computational fluid dynamics simulation of snowdrift around buildings: Past achievements and future perspectives. *Cold Regions Science and Technology* 2018, tom 150, str. 2–14, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.05.004>.
- [17] Weerasuriya A. U., Computational Fluid Dynamic (CFD) simulation of flow around tall buildings, *Engineer* 3/2013, str. 46–43, <https://doi.org/10.4038/engineer.v46i3.6784>
- [18] Obuchowicz R., Wind resources in the urban structure – CFD numerical analysis. Possibilities of using wind energy on the example of the Słoneczne estate in Szczecin. *Space&FORM* 2021, str. 47–64, <https://doi.org/10.21005/pif.2021.46.C-04>
- [19] Piechna J., Tudruj S., Kamieniecki K., Józwiak R., Analiza numeryczna interakcji opływu pomiędzy grupami budynków o różnych wysokościach, *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce* 10/2018, str. 25–30
- [20] Sztarbała G., Prognozowanie rozprzestrzeniania się dymu w budynkach przy wykorzystaniu metod numerycznej mechaniki płynów (CFD), *Prace Instytutu Techniki Budowlanej* 2005, tom 134, str. 49–56
- [21] Węgrzyński W., Wpływ układu przegród w budynku na przepływ dymu w warunkach pożaru, *Warszawa, Instytut Techniki Budowlanej*, 2021
- [22] Sztarbała G., CFD jako narzędzie do projektowania wentylacji pożarowej garaży, *Polski Instalator* 9/2004, str. 2–6
- [23] Woźniczka P., Modelowanie komputerowe pożaru w halach wielkopowierzchniowych, *Journal of Civil Engineering and Architecture* 64/2017, str. 7–16, <https://doi.org/10.7862/rb.2017.99>
- [24] Fliszkiewicz M., Krauze A., Maciak T., Badanie skuteczności projektowanych instalacji wentylacji oddymiającej przy wykorzystaniu symulacji CFD, *Zeszyty Naukowe SGSP* 4/2012, str. 13–35
- [25] Burdzy T., Kubicki G., Analiza wpływu wydajności nawiewu w systemach oddymiania klatek schodowych na podniesienie efektywności instalacji. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 1/2019, tom 50, str. 22–28, <https://doi.org/10.15199/9.2019.1.4>
- [26] Węgrzyński W., Wentylacja pożarowa garaży zamkniętych w świetle pożarów pojazdów elektrycznych, *Instal* 7–8/2021, str. 27–32, <https://doi.org/10.36119/15.2021.7-8.4>.
- [27] Porowski R., Bańkowski P., Kłapsa W., Starzomska M., Więckowski A., Modelowanie CFD wentylacji pożarowej w tunelu drogowym, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza* 2018, tom 52, str. 140–166, <https://doi.org/10.12845/bitp.52.4.2018.9>
- [28] Walentynowicz J., Matracki J., Wrzesień S., Frant M., Doświadczalno-numeryczne badania pływania kołowego transportera opancerzonego, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej* 55/2006, str. 7–21
- [29] Chajec W., Dziubiński A., Obliczenia flatteru prostokątnego płata ze sterem za pomocą MSC Nastran, ZONA ZAERO i ANSYS Fluent – porównanie z wynikami w tunelu aerodynamicznym, *Transactions of the Institute of Aviation* 2016, tom 243, str. 53–72, <https://doi.org/10.5604/05096669.1205243>
- [30] RMJM n.d. <https://rmjm.com/>
- [31] PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru, *Warszawa, Polski Komitet Normalizacyjny*, 2018
- [32] Rocki D., Automatyzacja prac projektowych przy użyciu programu Panel Connector, *Pomiary – Automatyka – Robotyka* 2020, tom 24, str. 43–49 [https://doi.org/10.14313/PAR\\_237/43](https://doi.org/10.14313/PAR_237/43).
- [33] Salamak M., Jasinski M., Płaszczek T., Zarski M., Analytical Modelling in Dynamo. *Trans VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Services* 18/2019, str. 36–43, <https://doi.org/10.31490/tces-2018-0014>
- [34] Alaghmandan M., Elneimeiri M., Reducing Impact of Wind on Tall Buildings through Design and Aerodynamic Modifications (Architectural and Structural Concepts to Mitigate Wind Effect on Tall Buildings), *Architectural Engineering Conferences* 2013, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2013, str. 847–856, <https://doi.org/10.1061/9780784412909.083>
- [35] Błazik-Borowa E., Problemy związane ze stosowaniem modelu turbulencji k-epsilon do wyznaczenia parametrów opływu budynków, *Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej*, 2008
- [36] Błazik-Borowa E., Podgórski J., Dobór warunków brzegowych ciśnienia w metodzie k-epsilon]. *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce* 5/2010, str. 5–10

