

Projektowanie i analiza stalowych jednowarstwowych przekryć walcowych

Dr inż. Robert Szmit, Wydział Geoinżynierii, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

1. Wprowadzenie

Przestrzenne prętowe przekrycia strukturalne są obecnie popularnym sposobem zadaszania dużych powierzchni umożliwiającymi zastosowanie niewielkiej liczby podpór pośrednich. Konstrukcje te są generalnie postrzegane jako rozwiązania ekonomiczne przy budowie obiektów użyteczności publicznej i przemysłowych. Mogą być skonstruowane w wielu różnych konfiguracjach cechujących się różnym rozmieszczeniem prętów oraz różną wyniosłością. Konstrukcje przestrzenne dachu walcowego lub beczkowego pozwalają projektować konstrukcję z uwzględnieniem teorii łuków, a zastosowanie stali zapewnia wysoką wytrzymałość osiową i na zginanie, dzięki czemu możliwe są duże prześwity i małe wysokości struktury [3]. Podstawowe zalety zadaszeń ze sklepieniem walcowym to:

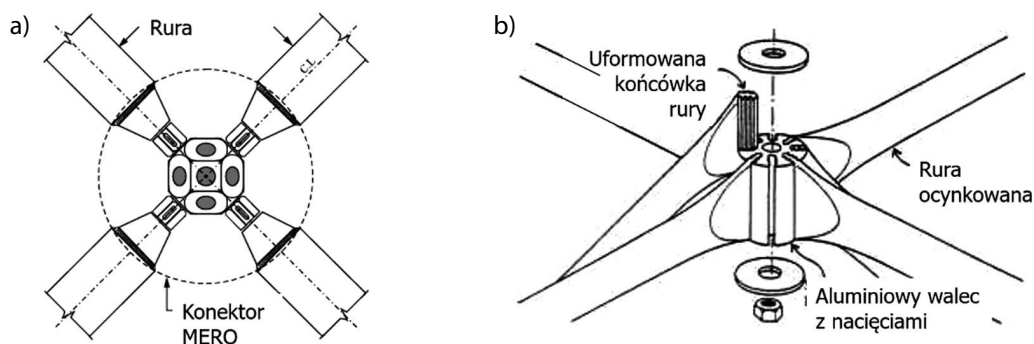
- szybkość i dokładność wykonania: projekt i montaż konstrukcji przestrzennej ze sklepieniem walcowym można wykonać z wysokim stopniem dokładności i w bardzo krótkim czasie dzięki zastosowaniu powtarzalnych elementów,
- niewielki ciężar: jedną z najważniejszych zalet konstrukcji przestrzennej jest jej lekkość ze względu na równomierny przestrzenny rozkład obciążeniem materiałem konstrukcyjnym i jednocześnie dużą nośność,
- efektywność kosztowa: jedną z największych zalet stosowania tego typu przekryć przestrzennych jest to, że są stosunkowo opłacalne,
- elastyczność konstrukcji: jest to jedna z najbardziej elastycznych i wytrzymałych konstrukcji wykorzystywanych do budowy budynków komercyjnych i nieruchomości mieszkalnych,
- ekologia: te przestrzenne konstrukcje w 100% mogą podlegać recyklingowi, stąd są przyjazne dla środowiska,

- uniwersalność struktury: rama przestrzenna ma wszechstronność kształtu i formy, może wykorzystywać standardowy moduł do generowania różnych płaskich siatek przestrzennych, kratowanej, zakrzywionych i innych dowolnych kształtów (np. kopuły).

Projektowanie przestrzennych konstrukcji prętowych jest znaczącym punktem w umiejętnościach projektanta-konstruktora. Jest to wieloetapowy proces, na który wpływ ma wiele czynników, takich jak zaprojektowanie geometrii konstrukcji, w tym przeanalizowanie różnych wariantów triangulacji siatki konstrukcji oraz ich wpływ na zapewnienie stateczności konstrukcji, sposoby łączenia prętów w węzłach, podparcia konstrukcji, wymiary i ekspozycja konstrukcji czy też sposób jej obciążenia. Modelowanie konstrukcji lekkich charakteryzuje się poszukiwaniem optymalnych rozwiązań i zapewnieniem wymaganej nośności i stabilności konstrukcji przy jednoczesnym ekonomicznym wykorzystaniu materiału.

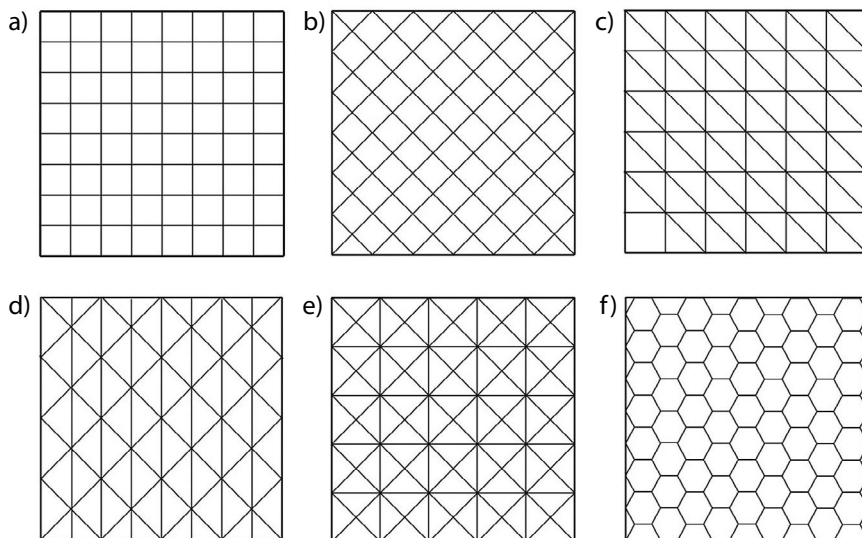
2. Kształtowanie geometrii

W odróżnieniu od struktur dwuwarstwowych, w których węzły modeluje się najczęściej jako przegubowe, w powłokach jednowarstwowych przyjmuje się węzły sztywne, które znacznie zwiększają sztywność i zapewniają konstrukcji stateczność globalną. Racjonalnym sposobem łączenia prętów jest przyjęcie węzłów z bogatej oferty istniejących opatentowanych rozwiązań systemowych oferowanych przez różnych producentów. Najbardziej rozpowszechnione systemy połączeń to np. Mero i Triodetic (rys. 1) czy też Unibat lub Unistrut, które przy odpowiednim doborze zapewniają wymaganą nośność, skrócenie czasu montażu oraz zmniejszenie kosztów inwestycji.



Rys. 1. Przykładowe węzły systemowe stosowane w prętowych strukturach przestrzennych: a) system Mero, b) system Triodetic

Rys. 2. Wybrane siatki prętów: a) ortogonalne (O), b) diagonalne (D), c-e) trójkątne (T) trój- i czterodrożne f) heksagonalne (H)



Nowoczesnymi systemowymi sposobami łączenia elementów konstrukcji strukturalnych są konstrukcje stalowe wykonane z rur wycinanych i obrabianych laserowo, które następnie są bezpośrednio łączone ze sobą za pomocą spawania.

Podstawą kształtowania konstrukcji przestrzennych jest sposób rozmieszczenia prętów w projektowanej strukturze i to m.in. on decyduje o nośności przekrycia oraz zastosowaniu rozwiązań systemowych węzłów przedstawionych wcześniej. Przekrycia strukturalne mogą być utworzone na płaskiej lub zakrzywionej powierzchni. Najprostszą i najczęściej projektowaną jest forma cylindryczna o stałej krzywiznie łuku jako struktura jednowarstwowa lub dwuwarstwowa. Podstawowe siatki prętów tworzące warstwy (pasy) struktury przedstawiono na rysunku 2.

Analizując sposób podparcia, który ma bardzo duży wpływ na pracę zadaszeń walcowych, możemy wyróżnić trzy główne oparcia konstrukcji na ścianach bądź fundamentach. Powłoka, której oparcie stanowią podpory zlokalizowane wzdłuż boków przekrycia rozpatruje się jako strukturę łukową (rys. 3a). Struktury takie charakteryzują się stosunkowo małą sztywnością [5]. Drugim typem rozmieszczenia podpór jest zlokalizowanie ich na krawędzi krzywej tworzącej łuk przekrycia walcowego (rys. 3b). Elementy konstrukcyjne rozpatruje się wtedy podobnie jak belki proste, a w porównaniu do poprzedniego schematu taki typ zakotwień stanowi stosunkowo sztywną strukturę. Kolejnym typem jest podparcie powłoki na wszystkich jej krawędziach (rys. 3c). W takiej strukturze można zastosować analogię jak dla płyty, zwłaszcza przy małych wyniosłościach przekrycia.

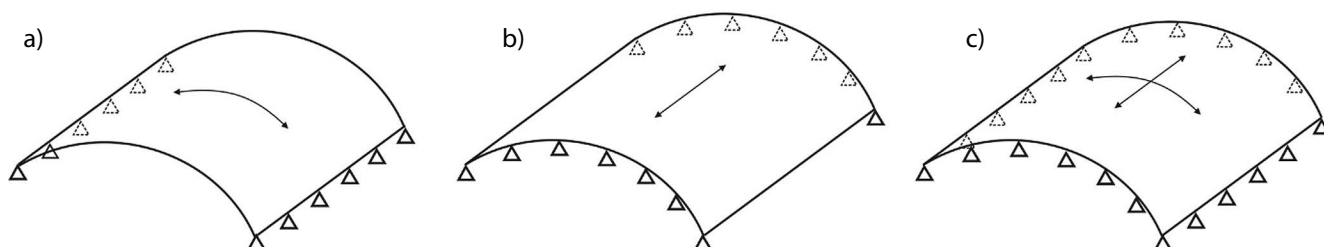
Projektując topologie prętowych struktur przestrzennych, wygodnie jest wykorzystywać narzędzie optymalizacyjne np. w postaci języka programowania Formian, który został

opracowany z myślą o generowaniu parametrycznych obiektów o skomplikowanej geometrii [4, 6]. Za jego pomocą można matematycznie zdefiniować kształt nawet bardzo złożonych form struktur przestrzennych, a następnie eksportować do programów inżynierskich, w których wykonywana będzie analiza statyczno-wytrzymałościowa. Można również korzystać z wyspecjalizowanych narzędzi modelowania parametrycznego, np. Autodesk Dynamo czy też Rhino/Grasshoper współpracujących z programami BIM.

3. Analiza numeryczna wybranych przekryć walcowych

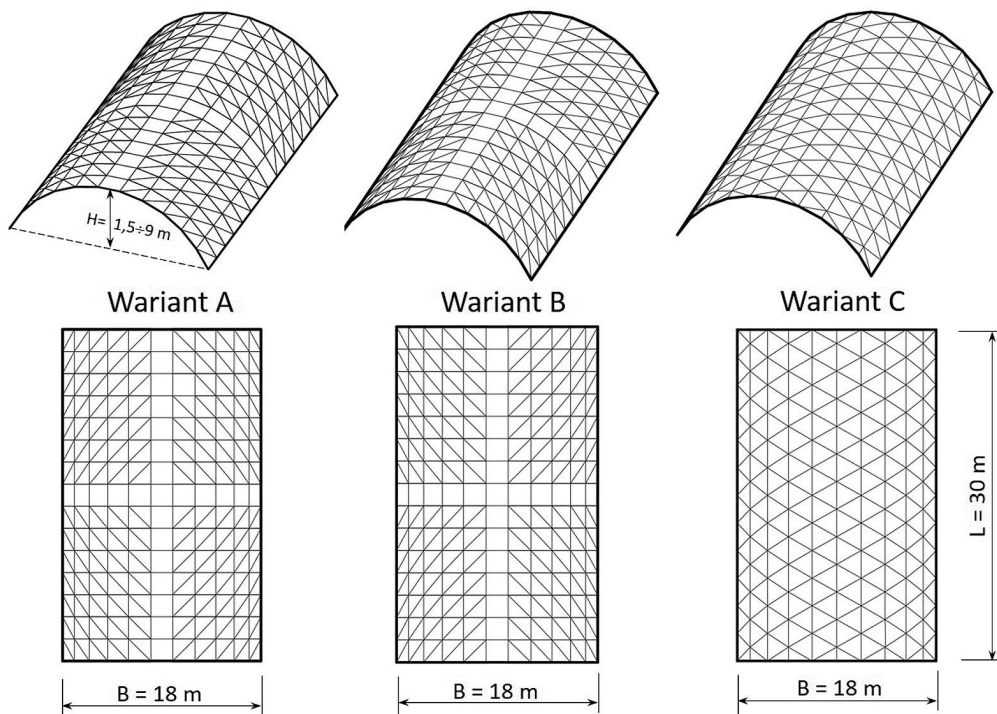
Przeprowadzono analizy numeryczne różnych wariantów struktur, których celem było przedstawienie wpływu kształtowania geometrii przekrycia na deformacje struktur i wyężenia tworzących prętów oraz ekonomiczność poszczególnych rozwiązań. Wykonując analizy porównawcze na etapie projektowania, a następnie wybierając rozwiązanie najbardziej optymalne, można w znacznym stopniu zmniejszyć zużycie materiałów przy jednoczesnym zoptymalizowaniu przekrojów prętów zastosowanych w konstrukcji.

Zamodelowano przekrycia walcowe jednowarstwowe w trzech wariantach podziału siatki prętów, ponadto dla każdego z wariantów rozpatrywano sześć różnych wyniosłości struktury



Rys. 3. Najczęściej stosowane podparcia konstrukcji: a) wzdłuż boków przekrycia, b) na krawędzi krzywej tworzącej łuk przekrycia, c) na wszystkich krawędziach

Rys. 4. Widoki aksonometryczne i widoki z góry trzech wariantów analizowanych struktur walcowych



(stosunek wysokości do jej rozpiętości), co w rezultacie dało aż osiemnaście przypadków analizowanych sklepień (rys. 4).

Dla każdego z trzech wariantów utworzono konstrukcję o następujących wymiarach: długość 30 m, rozpiętość 18 m, wysokości: 1,5; 3; 4,5; 6; 7,5 oraz 9 m. Jako materiał konstrukcyjny przyjęto stal gatunku S275 (granica plastyczności $f_y = 275$ MPa) oraz przekrój rur okrągłych RO 108x10 mm, który był jednakowy dla wszystkich wariantów przekryć. Analizowano też zachowanie tych wariantów dla zoptymalizowanych przekrojów prętów i dobierano je tak, żeby wyężenie w danym pręcie zawierało się w granicach 0,90–95. Pręty połączone zostały w węzłach w sposób sztywny. Podpory przegubowe bez możliwości przesuwu przyjęto wzdłuż boków.

Siatki geometryczne wykonano za pomocą programu AutoCAD [9] oraz aplikacji Formian 2 [11], a analizę statyczno-wytrzymałościową przeprowadzono w programie Autodesk Robot Structural Analysis [10].

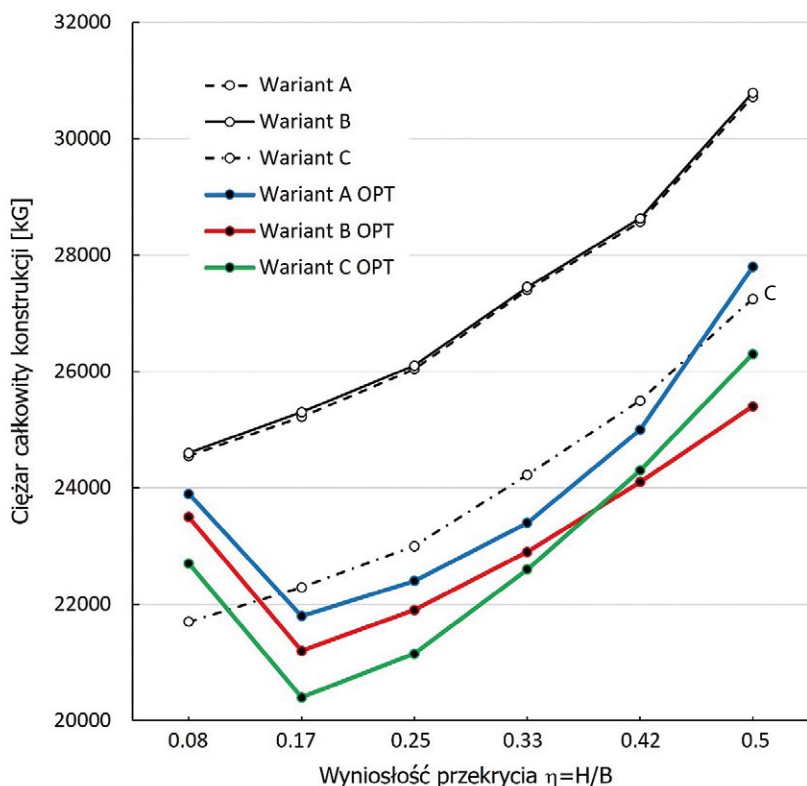
Konstrukcję przekrycia obciążano kombinacją obciążeń z ciężarem własnym, ciężarem warstw wykończeniowych, obciążeniem użytkowym oraz obciążeniami atmosferycznymi

– śniegiem i wiatrem zgodnie z normami [12, 13]. W niniejszym artykule, dla większej przejrzystości zobrazowania wpływu przyjętej geometrii na odpowiedź konstrukcji, zaprezentowano analizę wyników tylko dla kombinacji obciążeń pionowych. Wyniki analiz z uwzględnieniem oddziaływania wiatru zaprezentowane zostaną w kolejnych publikacjach.

Przedstawione wyniki mają za zadanie określenie wpływu wybranego sposobu podziału siatki na wielkość porównywalnych parametrów. Porównanie ciężarów całkowitych w zależności od przyjętych modeli konstruowanego przekrycia walcowego (wariant A, B, C) bez optymalizacji prętów oraz z optymalizacją pokazuje rysunek 5.

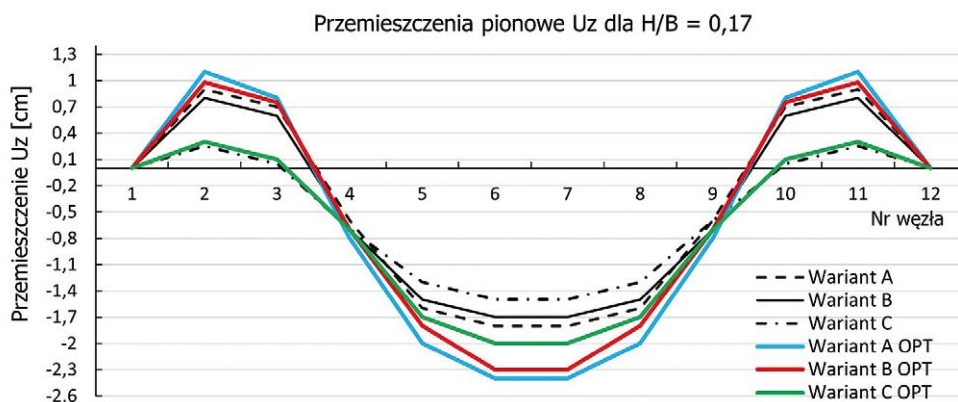
W wariantach, w których nie optymalizowano przekrojów poprzecznych prętów

Ciężar konstrukcji



Rys. 5. Porównanie ciężaru konstrukcji przed optymalizacją i po optymalizacji prętów dla różnych wartości wyniosłości H/B

Rys. 6. Porównanie przemieszczeń pionowych U_z węzłów w przekroju poprzecznym w połowie długości struktur w wariantach A, B, C dla $H=3$ m, przed optymalizacją przekrojów prętów i po niej



ciężar konstrukcji sukcesywnie wzrasta wraz z rosnącymi długościami prętów i powierzchniami przekryć.

Najlżejsza jest trójdrożna diagonalna siatka w wariantach C, która jest lżejsza około 9% od wariantów A i B mających identyczne ciężary.

Inaczej sytuacja przedstawia się, kiedy optymalizowano pręty. Z analiz jasno wynika, że najbardziej ekonomiczna wyniosłość sklepienia w stosunku do ciężaru konstrukcji wynosi 0,17. Przy tej wartości H/B ponownie najlżejsze jest przekrycie w wariantach C, lżejsze o 3,7% od wariantu B oraz 6,4% od wariantu A. Ciekawym wnioskiem jest to, że dla wyniosłości 0,5 ciężary konstrukcji znacząco wzrosły w stosunku do ciężaru dla wyniosłości 0,17: w wariantach A o 28%, w wariantach B o 20%, a w wariantach C o 29%.

Porównanie przemieszczeń pionowych węzłów w linii przekroju poprzecznego w połowie rozpiętości dłuższego boku zaprezentowano na rysunku 6. Tu również zestawiono wyniki dla wszystkich wariantów konstrukcji przy wyniosłości wynoszącej 0,17, bez optymalizacji prętów oraz z ich optymalizacją.

Minimalne ugięcia dla wszystkich trzech przekryć uzyskano dla współczynnika wyniosłości wynoszącego 0,17, czyli identycznie, jak było to przy porównywaniu ciężarów przekryć. Wraz ze wzrostem tego współczynnika wzrastały również ugięcia, co wynika m.in. z rosnącego ciężaru konstrukcji. Najmniejsze wartości ugięcia otrzymano dla przekrycia w wariantach C (w wariantach A większe o 20%, w wariantach B większe o 15%).

4. Podsumowanie

Wraz z koniecznością przekrywania coraz większych powierzchni oraz związanymi z tym wysokimi kosztami budowy coraz większą rolę odgrywa optymalizacja konstrukcji prętowych pod kątem topologii struktury oraz stosowanych materiałów [2, 7].

Przekrycia strukturalne składające się z wielu prętów stalowych o nieznacznych długościach pozwalają na racjonalne przekazywanie obciążeń na podpory, a co za tym idzie równomierne wyęteżenie elementów konstrukcji, które jest jednym z głównych czynników decydujących o ekonomiczności konstrukcji. O stopniu równomierności przekazywania obciążeń decyduje geometria całego przekrycia, poczynając

od kształtu przekrycia w planie, rozmieszczenia podpór, rodzaju podparcia, przez geometrię poszczególnych siatek tworzących, kończąc na wymiarach poszczególnych elementów powtarzalnego oczka siatki.

W jednowarstwowych przekryciach cylindrycznych sztywność połączenia prętów w węzłach ma bardzo duże znaczenie, w odróżnieniu od przekryć dwuwarstwowych [8]. Zastosowanie węzłów przegubowych znacznie obniżyłoby stabilność struktury i zwiększyłoby wrażliwość na ich przeskok [1].

W przypadku przekryć o kształcie wycinka walca zastosowanie triangulacji we wszystkich polach pozwala na uzyskanie sztywniejszej konstrukcji oraz bardziej równomiernego rozkładu naprężeń w prętach. Dzięki temu istnieje możliwość większej unifikacji przekrojów prętów stosowanych w zadaniach lub bardziej ekonomicznego wykorzystania prętów w przypadku zastosowania jednego przekroju prętów w całej konstrukcji. Chcąc zoptymalizować konstrukcję, zaleca się przyjmować jednakowe przekroje prętów w określonych strefach (pasmach) przekrycia, ale tak żeby liczba różnych przekrojów nie przekraczała 4–6 typów.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abedi K., Farmani Fard M., Samavati O., Stability Analysis of Lattice Single-Layer Barrel Vault Considering the Effects of Purlins, Proceedings of the IASS, Amsterdam, 2015
- [2] Chilton J., Space Grid Structures. Architectural Press, Oxford, 2000
- [3] Elsheikh A., Configurations of Single-Layer Barrel Vaults. Advances in Structural Engineering 4(2)2001
- [4] Grzywiński M., Modelowanie prętowych powłok walcowych z zastosowaniem algebry Formex, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej Budownictwo 22, Częstochowa, 2016
- [5] Makowski Z. S., Analysis, design and construction of braced barrel vaults, Elsevier Applied Science Publishers, London, New York, 1985
- [6] Nooshin H., Samavati O., Some Morphological Aspects of Configurations. IASS 2016 Tokyo Symposium: Spatial Structures in the 21st Century, Tokyo, 2016
- [7] Ramaswamy G. S., Eekhout M., Suresh G. R., Analysis, Design and Construction of Steel Space Frames, Thomas Telford Publishing, 2002
- [8] Szmít R., Sędrowska E., Analiza wybranych dwuwarstwowych stalowych przekryć walcowych, Materiały Budowlane 10/2017
- [9] Autodesk AutoCad 2021
- [10] Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2020
- [11] Formian 2
- [12] PN-EN 1991-1-3. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje: Obciążenie śniegiem
- [13] PN-EN 1991-1-4. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje: Oddziaływania wiatru