

Polska Norma a Eurokod – porównanie toku projektowego turbiny wiatrowej pod kątem zestawienia obciążeń od wiatru i analizy posadowienia

Mgr inż. Marcin Ćwirko, dr hab. inż. Małgorzata Jastrzębska
Politechnika Śląska w Gliwice, Wydział Budownictwa

Celem pracy jest porównanie toku projektowania elektrowni wiatrowej na podstawie zbioru Polskich Norm oraz Eurokodów, ze szczególnym naciskiem na zestawienie obciążenia od wiatru oraz sprawdzenia warunków nośności fundamentu bezpośredniego. Do porównania przyjęto konkretny model turbiny wiatrowej o mocy 70 kW oraz istniejące warunki lokalne na terenie Śląskiego Ogrodu Botanicznego w Mikołowie, zarówno w zakresie ukształtowania powierzchni terenu, jak i panujących wa-

runków meteorologicznych [12, 13] oraz parametrów gruntów występujących na miejscu planowanej inwestycji.

CHARAKTERYSTYKA INWESTYCJI

Celem całego przedsięwzięcia jest dostarczenie energii pozyskanej z odnawialnych źródeł energii (OZE) na potrzeby Cen-

trum Edukacji Przyrodniczej i Ekologicznej (CEPiE) znajdującego się na terenie Sośniej Góry (332,9 m n.p.m.) w Mikołowie, będącego częścią Śląskiego Ogrodu Botanicznego (ŚOB). Biorąc pod uwagę różne kryteria zapotrzebowania na energię elektryczną [10], zaproponowano kilka rozwiązań na jej dostarczenie. W jednej z koncepcji przewidywano wykonanie między innymi elektrowni wiatrowej o mocy 70 kW. Konstrukcja elektrowni wiatrowej składa się z gondoli wraz z łopatomy, które są umieszczone na wysokim maszcie, zamocowanym w fundamencie. Ze względu na szczególne ukształtowanie terenu Sośniej Góry oraz fakt występowania na terenie ŚOB licznych kolekcji roślinnych ustalono, że optymalnym miejscem do budowy elektrowni wiatrowej jest bezpośrednia okolica budynku administracyjnego znajdującego się niemal na szczycie Sośniej Góry. Jest to miejsce, w którym wirnik elektrowni wiatrowej nie pozostawałby w cieniu aerodynamicznym wzniesienia i wysokich drzew. W tym miejscu nie występują również chronione kolekcje roślin. Ze względu na to, aby istniejąca zabudowa miała jak najmniejszy wpływ na wydajność elektrowni wiatrowej, zdecydowano się umieścić oś poziomą wału turbiny na wysokości 30 m nad poziomem terenu.

WARUNKI GRUNTOWO-WODNE

Na potrzeby wcześniejszej budowy budynku CEPiE opracowano dokumentację geotechniczną [11], na podstawie której ustalono parametry geotechniczne gruntów występujących w podłożu. Na analizowanym obszarze wykonano 5 otworów badawczych, które pozwoliły rozróżnić trzy warstwy geotechniczne:

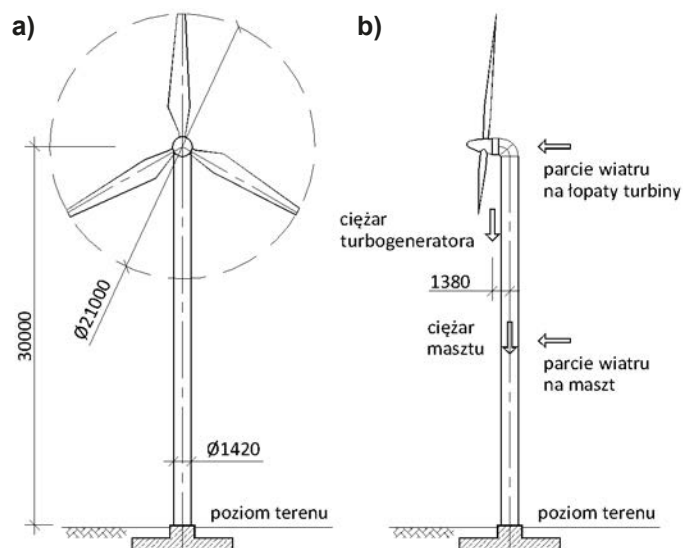
- płytko zalegające grunty spoiste nieskonsolidowane „C”, głównie gliny pylaste zwięzłe oraz gliny piaszczyste w stanie półzwałym,
- grunty ilaste „D”, głównie łyły w stanie półzwałym i zwałym,
- występująca głębiej wapienna skała miękka, mocno spękana, o wytrzymałości na ściskanie do 5 MPa – wapień.

W żadnym z badanych otworów nie stwierdzono występowania wody gruntowej. Parametry wytrzymałościowe gruntu określono za pomocą metody „B” i „C” według normy [3]. Ze względu na rodzaj konstrukcji oraz warunki geotechniczne ustalono drugą kategorię geotechniczną. Biorąc pod uwagę niewielką miąższość (około 70 cm) przypowierzchniowej warstwy glin pylastych i piaszczystych oraz fakt, że nie w każdym z otworów stwierdzono występowanie skał wapiennych, postanowiono traktować podłoże jako jednorodne, składające się z ilów.

ANALIZA OBCIĄŻENIA KONSTRUKCJI

Obciążenia stałe

Na fundament elektrowni wiatrowej działają obciążenia stałe pochodzące od ciężaru dwóch elementów: gondoli (wraz z wirnikiem) i masztu. W przypadku różnych oznaczeń występujących w PN i PN-EN, w nawiasach klamrowych { } podano oznaczenia zgodne z Eurokodem.



Rys. 1. Geometria elektrowni wiatrowej

a) widok z przodu, b) widok z boku z naniesionym układem sił

Zgodnie z danymi producenta [9] do obliczeń przyjęto następujące wartości:

- ciężar turbogeneratora z gondolą i obrotnicą:

$$G_t = 6\,040 \text{ kG} = 60,4 \text{ kN}$$

- środek ciężkości głowicy względem osi wieży

$$e = 1,38 \text{ m}$$

Na przekrój masztu przyjęto rurę stalową o średnicy zewnętrznej $D = 1420 \text{ mm}$ i ściance o grubości $T = 17,5 \text{ mm}$, czyli taką, jak w typowej konstrukcji o wysokości 18 m, lecz bez różnicowania grubości ścianki profilu rurowego na wysokości masztu. Profil $\phi 1420 \times 17,5 \text{ mm}$ ma masę jednostkową $m = 605 \text{ kg/m}$, zatem ciężar całego masztu o wysokości 30 m wynosi $G_m = 181,5 \text{ kN}$. Geometrię elektrowni wiatrowej przedstawiono na rys. 1.

Na podstawie przedstawionych danych obliczono charakterystyczne siły wewnętrzne działające w podstawie masztu:

- charakterystyczna siła pionowa od obciążeń stałych:

$$N_k(G) \{F_{x,k}(G)\} = G_t + G_m = 60,4 + 181,5 = 241,9 \text{ kN}$$

- charakterystyczny moment zginający od obciążeń stałych:

$$M_k(G) = G_t \cdot e = 60,4 \cdot 1,38 = 81,5 \text{ kNm}$$

Obciążenia zmienne

Celem przytoczonej analizy jest porównanie podejścia obliczeniowego oraz oszacowanie otrzymanych wyników na podstawie dwóch rodzin norm. W związku z tym nie przeprowadzono pełnej analizy obciążeń zmiennych, tylko uwzględniono wiodące obciążenie wiatrem.

Na podstawie [8, 9] stwierdzono, że najbardziej niekorzystnym schematem obciążenia wiatrem jest sytuacja, w której doszło do awarii łopat w przypadku podmuchu wiatru „od tyłu”,

Tabl. 1. Porównanie zestawienia obciążenia wiatrem według Polskiej Normy i Eurokodu. W nawiasach klamrowych podano oznaczenia zgodne z Eurokodem

Według PN-77/B-02011	Według PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1
Dane podstawowe: Lokalizacja: Mikołów, I {1} strefa obciążenia wiatrem, wysokość nad poziomem morza 329,5 m	
Charakterystyczna prędkość wiatru: $V_k = 20,00 \text{ m/s}$ Charakterystyczne ciśnienie prędkości wiatru: $q_k = 250 \cdot 1,2 = 300 \text{ Pa}$	Podstawowa bazowa prędkość wiatru: $V_b = 22,39 \text{ m/s}$ Charakterystyczne ciśnienie prędkości wiatru: $q_k = 311 \text{ Pa}$
Współczynniki: Rodzaj terenu: B Współczynnik ekspozycji: $C_e = 1,295$ Współczynnik uwzględniający planowany czas użytkowania: $C_{ie} = 1,00$ Współczynnik oporu aerodynamicznego: $C = 1,00$ Współczynnik chropowatości terenu: $r = 0,1$	Kategoria terenu: III Współczynnik kierunkowy: $c_{dir} = 1,00$ Współczynnik sezonowy: $c_{season} = 1,00$ Wymiar chropowatości terenu: $z_0 = 0,3 \text{ m}$ Współczynnik terenu: $k_r = 0,215$ Współczynnik chropowatości terenu: $c_f(z) = 0,990$
Wpływ ukształtowania terenu (orografii): Wysokość wzniesienia: $h \{H\} = 36 \text{ m}$ Długość stoku nawietrznego: $l \{L_u\} = 80 \text{ m}$ Położenie osi wału nad poziomem terenu: $z = 30 \text{ m}$ Położenie osi nad umownym poziomem gruntu: $z_0 = 66 \text{ m}$	Nachylenie stoku nawietrznego: $\phi = 0,45$ Efektywna długość stoku nawietrznego: $L_e = 120 \text{ m}$ $x/L_u = 0; z/L_e = 0,25 \Rightarrow$ współczynnik miejsca: $s = 0,63$ Współczynnik rzeźby terenu (orografii): $c_0(z) = 1,378$
Wpływ rodzaju i parametrów konstrukcji: Współczynnik oddziaływania turbulentnego o częstościach pozarezonansowych: $k_b = 1,370$ Częstotliwość drgań własnych: $n = 0,84 \text{ Hz}$ Współczynnik szczytowej wartości obciążenia: $\psi = 3,691$ Współczynnik zmniejszający oddziaływanie rezonansowe: $K_L = 0,1738$ Współczynnik energii porywów o częstościach rezonansowych: $K_O = 0,0798$ Logarytmiczny dekrement tłumienia: $\Delta = 0,04$ Współczynnik turbulentny: $k_r = 2,179$ Współczynnik działania porywów wiatru: $\beta = 2,93$	Współczynnik turbulencji: $k_t = 1,00$ Intensywność turbulencji: $I_t(z) = 0,1576$ Współczynnik konstrukcyjny według 6.2 (1) d: $c_s c_d = 1,00$ Współczynnik siły (jak dla tablic): $c_f = 1,80$ Gęstość powietrza: $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$
Parametry wiatru: Prędkość wiatru na wysokości budowli: $V_H = V_k \cdot C_e^{1/2} = 22,76 \text{ m/s}$ Charakterystyczne obciążenie wiatrem: $P_k = q_k \cdot C_e \cdot C \cdot C_e \cdot \beta = 1138 \text{ Pa}$	Średnia prędkość wiatru zależna od wysokości: $V_m(z) = V_k \cdot c_f(z) \cdot c_0(z) = 30,54 \text{ m/s}$ Szczytowa wartość ciśnienia prędkości: $q_p(z) = V_m(z) \cdot I_v(z) \cdot \rho = 1226 \text{ Pa}$
Obciążenie przypadające na łopaty wirnika: Powierzchnia odniesienia łopat wirnika: $A \{A_{ref}\} = 34,2 \text{ m}^2$ Siła wiatru działająca na łopaty wirnika: $P^{wirnik} = p_k \cdot A = 38,9 \text{ kN}$	Siła wiatru działająca na łopaty wirnika: $F_w^{wirnik} = q_p(z) \cdot c_s c_d \cdot c_f \cdot A_{ref} = 75,5 \text{ kN}$
Obciążenie przypadające na maszt: Wysokość masztu: $l \{h\} = 30 \text{ m}$ Średnica masztu: $d \{b\} = 1,42 \text{ m}$ Smukłość masztu: $\lambda = 42,25$ Współczynnik oporu aerodynamicznego: $C_{\infty} = 1,2$ Współczynnik k (według Z1-17): $k = 0,906$ Współczynnik oporu aerodynamicznego zależny od smukłości: $C_X = C_{\infty} \cdot k = 1,087$ Siła wiatru działająca na maszt: $P^{maszt} = q_k \cdot C_e \cdot C_X \cdot l \cdot d \cdot \beta = 52,7 \text{ kN}$	Prędkość szczytowa wiatru: $v = 44,29 \text{ m/s}$ Lepkość kinetyczna powietrza: $\eta = 0,000015 \text{ m}^2/\text{s}$ Liczba Reynoldsa: $Re = 4192786$ Współczynnik wpływu swobodnego końca: $\psi_{\lambda} = 0,91$ Chropowatość powierzchni: $k = 0,02 \text{ mm}$ Chropowatość względna: $k/b = 1,408 \cdot 10^{-5}$ Współczynnik oporu aerodynamicznego bez wpływu swobodnego końca: $c_{f0} = 0,645$ Współczynnik oporu aerodynamicznego z wpływem swobodnego końca: $c_f = 0,587$ Siła wiatru działająca na maszt: $F_w^{maszt} = q_p(z) \cdot c_f \cdot h \cdot b = 30,7 \text{ kN}$
Obciążenie od odrywania się wirów Benarda-Karmana: Liczba Struhala: $St = 0,2$ Prędkość krytyczna: $V_{kr} = 5,964 \text{ m/s}$ Współczynnik według tablicy 5: $C_p = 0,20$ Ciśnienie prędkości odpowiadające prędkości krytycznej: $q_{kr} = 21,82 \text{ Pa}$ Obciążenie: $p_y = 0,689 \text{ kN/m}$ Siła wypadkowa w połowie wysokości masztu: $P^{B-K} = 20,7 \text{ kN}$	–
Siły charakterystyczne sprowadzone do poziomu fundamentu: Siła pozioma (poprzeczna do osi masztu): $T_k(Q) = P^{wirnik} + P^{maszt} + P^{B-K} = 112,3 \text{ kN}$ Moment zginający: $M_k(Q) = P^{wirnik} \cdot z + (P^{maszt} + P^{B-K}) \cdot z/2 = 2268 \text{ kNm}$	Siła pozioma (poprzeczna do osi masztu): $F_{z,k}(Q) = F_w^{wirnik} + F_w^{maszt} = 106,2 \text{ kN}$ Moment zginający: $M_k(Q) = F_w^{wirnik} \cdot z + F_w^{maszt} \cdot z/2 = 2726 \text{ kNm}$

co przedstawiono na rys. 1b. Łopaty wirnika są w takiej sytuacji maksymalnie wyeksponowane na działanie wiatru, a moment zginający od ciężaru mimośrodowo ustawionego generatora oraz od wiatru sumują się. Tok postępowania wraz z otrzymanymi wartościami obciążenia przedstawiono w tabl. 1.

Dotychczasowa Polska Norma [2] nie stawia specjalnych wymagań ani nie precyzuje postępowania w przypadku obciążenia wiatrem turbiny wiatrowej, co ułatwia całą procedurę. Dodatkowo w normie są podane zależności pozwalające określić parcie wiatru na poszczególne elementy, biorąc pod uwagę jedynie ich geometrię.

Analiza oddziaływania wiatru według Eurokodu [6] jest bardzo skomplikowana i niemal niemożliwa do przeprowadzenia w pełnej zgodności z zaleceniami normy, jeżeli projektant nie dysponuje dokładnymi danymi geometrycznymi i materiałowymi samych łopat turbiny, które są potrzebne do obliczenia współczynnika konstrukcyjnego $c_s c_d$. Dodatkowo nie określono precyzyjnie współczynnika oporu aerodynamicznego, a przyjęcie wartości współczynnika jak dla tablic wolnostojących ($c_f = 1,80$) wydaje się być w pierwszym momencie przeszacowane.

Warto zwrócić uwagę na stosunkowo niewielką rozbieżność wyników otrzymanych od obciążeń wiatrem na poziomie około 20%.

Kombinacje obciążeń

Kolejnym krokiem obliczeń jest przeprowadzenie kombinatoryki zebranych obciążeń według odpowiednich norm [4, 5]. Procedurę oraz wartości współczynników przedstawiono w tabl. 2. Warto zwrócić uwagę, że na tym etapie obliczeń różnice między otrzymanymi wynikami sięgają w skrajnych przypadkach prawie 40%. Należy jednak pamiętać, że pod uwagę wzięto tylko siły od parcia wiatru i ciężaru własnego, podczas gdy w pełnej analizie konstrukcji należałoby uwzględnić także inne oddziaływania, np. od nierównomiernego ogrzewania się masztu.

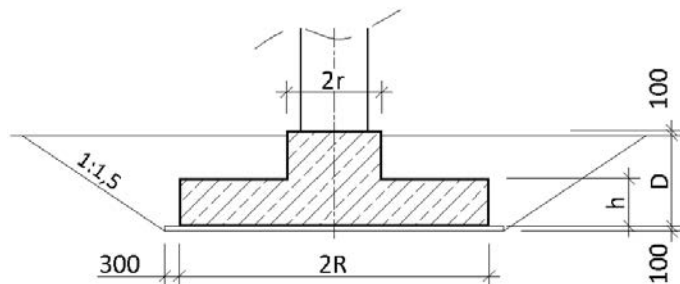
Sprawdzenie nośności fundamentu bezpośredniego

Powszechnie stosowanymi formami posadowienia lądowych turbin wiatrowych są fundamenty bezpośrednie o dużej średnicy. Do dalszej analizy przyjęto stopę fundamentową o kształcie kołowym, a jej geometrię przedstawiono na rys. 2.

Dominującymi obciążeniami w przypadku elektrowni wiatrowych są siły poziome, a tym samym znaczne momenty zginające działające w poziomie posadowienia przy niewielkim udziale siły pionowej od ciężaru własnego. Taki układ sił powoduje silnie mimośrodowe obciążenie fundamentu, generujące odrywanie fundamentu od podłoża gruntowego. Pomimo różnego podejścia do opisanego problemu zarówno w Polskiej Normie [3], jak i w Eurokocie [7], okazało się, że decydującym kryterium determinującym wymiary fundamentu jest warunek ograniczenia szerokości szczeliny pod fundamentem (ograniczenie mimośrodu działania siły).

Tok postępowania oraz wyniki otrzymane na poszczególnych etapach obliczeń posadowienia przedstawiono w tabl. 3.

Warto zauważyć, że nawet gdyby głównym warunkiem decydującym o wymiarach fundamentu nie była konieczność ograniczenia mimośrodu działania siły pionowej, to również wykorzystanie warunku nośności na siłę pionową w przypadku obu grup norm byłoby na bardzo podobnym poziomie.



Rys. 2. Geometria fundamentu elektrowni wiatrowej

Tabl. 2. Porównanie kombinacji obciążeń według Polskiej Normy i Eurokodu

Według PN-82/B-02000	Według PN-EN 1990:2004 Eurokod 0
<p>Współczynniki:</p> <p>Współczynnik obciążenia stałego: $\gamma_f^G = 1,1$ Współczynnik obciążenia zmiennego: $\gamma_f^Q = 1,3$ Współczynnik jednoczesności obciążeń zmiennych: $\psi_{o1} = 1,0$</p>	<p>Współczynnik oddziaływania stałego: $\gamma_G = 1,35$ Współczynnik redukcyjny obciążenia stałego: $\xi_j = 0,85$ Współczynnik oddziaływania zmiennego wiodącego: $\gamma_{Q,1} = 1,50$ Współczynnik wartości kombinacyjnego oddziaływania zmiennego wiodącego (wiatru): $\psi_{Q,1} = 0,60$</p>
<p>Kombinacje obciążeń:</p> <p>Kombinacja podstawowa: $\gamma_f^G \cdot G_k + \gamma_f^Q \cdot Q_k \cdot \psi_{o1}$</p>	<p>Dla STR i GEO mniej korzystne z wyrażień:</p> <p>a) $\gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k \cdot \psi_{Q,1}$ b) $\xi_j \cdot \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k$</p>
<p>Siły obliczeniowe sprowadzone do poziomu fundamentu:</p> <p>Siła pionowa: $N_d = N_k(G) \cdot \gamma_f^G = 266,1 \text{ kN}$</p> <p>Siła pozioma: $T_d = T_k(Q) \cdot \gamma_f^Q = 146,0 \text{ kN}$</p> <p>Moment zginający: $M_d = M_k(G) \cdot \gamma_f^G + M_k(Q) \cdot \gamma_f^Q = 3038 \text{ kNm}$</p>	<p>Siła pionowa:</p> <p>a) $F_{x,d} = F_{x,k}(G) \cdot \gamma_G = 326,6 \text{ kN}$ b) $F_{x,d} = \xi_j \cdot F_{x,k}(G) \cdot \gamma_G = 277,6 \text{ kN}$</p> <p>Siła pozioma:</p> <p>a) $F_{z,d} = F_{z,k}(Q) \cdot \gamma_Q \cdot \psi_{Q,1} = 95,6 \text{ kN}$ b) $F_{z,d} = F_{z,k}(Q) \cdot \gamma_Q = 159,3 \text{ kN}$</p> <p>Moment zginający:</p> <p>a) $M_d = M_k(G) \cdot \gamma_f^G + M_k(Q) \cdot \gamma_f^Q \cdot \psi_{Q,1} = 2563 \text{ kNm}$ b) $M_d = \xi_j \cdot M_k(G) \cdot \gamma_f^G + M_k(Q) \cdot \gamma_f^Q = 4182 \text{ kNm}$</p>

Tabl. 3. Porównanie sprawdzenia nośności fundamentu bezpośredniego według Polskiej Normy i Eurokodu

Według PN-81/B-03020	Według PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7
<p>Geometria fundamentu bezpośredniego (zgodnie z rys. 2):</p> <p>Promień trzonu fundamentu: $r = 1,00$ m Promień podstawy fundamentu: $R = 3,25$ m Głębokość posadowienia: $D = 1,80$ m Grubość stopy fundamentowej: $h = 0,80$ m Wskaźnik wytrzymałości podstawy fundamentu: $W = 26,96$ m³ Pole podstawy fundamentu: $A = 33,18$ m²</p>	
<p>Ustalenie obciążeń w poziomie posadowienia:</p> <p>Ciężar żelbetu: $\gamma_b = 25,0$ kN/m³ Ciężar zasyпки (gruntem rodzimym): $\gamma_c = 21,5$ kN/m³ Dodatkowy charakterystyczny ciężar fundamentu: $G_{fd} = 750,1$ kN Dodatkowy charakterystyczny ciężar zasyпки: $G_{sk} = 645,9$ kN</p>	
<p>Obliczeniowy moment zginający: $M_d = 3038$ kNm Obliczeniowa siła pozioma: $T_d = Q_f = 146,0$ kN Obliczeniowa siła pionowa: $N_d = 266,1$ kN Dodatkowy obliczeniowy ciężar fundamentu: $G_d = 1665$ kN Całkowita obliczeniowa siła pionowa: $N_r = 1931$ kN</p>	<p>Obliczeniowy moment zginający: $M_d = 4182$ kNm Obliczeniowa siła pozioma (odpowiadająca): $F_{zd} = 159,3$ kN Obliczeniowa siła pionowa (odpowiadająca): $F_{zd} = 277,6$ kN Dodatkowy obliczeniowy ciężar fundamentu: $G_d = 1885$ kN Całkowita obliczeniowa siła pionowa: $F_x = 2162$ kN</p>
<p>Warunek ograniczenia odrywania:</p> <p>Mimośród obciążenia: $e = 1,57$ m Naprężenie maksymalne: $q_{max} = 170,9$ kPa Naprężenie minimalne: $q_{min} = -54,5$ kPa Zasięg szczeliny pod fundamentem: $C = 1,57$ m Dopuszczalny zasięg szczeliny: $C' = 1,625$ m Stopień wykorzystania warunku: 96,6%</p>	<p>Mimośród obciążenia: $e = 1,93$ m Maksymalny mimośród dla stopy kołowej: $e_{max} = 1,95$ m Stopień wykorzystania warunku: 99,0%</p>
<p>Parametry wytrzymałościowe gruntu w poziomie posadowienia:</p> <p>Kąt tarcia wewnętrznego: $\phi = 13,0^\circ$ Spójność: $c = 60,0$ kPa</p>	
<p>Obliczeniowy ciężar gruntu: $\gamma^{(r)} = 19,4$ kN/m³ Obliczeniowy kąt tarcia wewnętrznego: $\phi^{(r)} = 11,7^\circ$ Obliczeniowa spójność: $c^{(r)} = 54,0$ kPa</p>	<p>Spójność w warunkach bez drenażu: $c_u = 73,8$ kPa</p>
<p>Nośność na siłę pionową:</p> <p>Dla fundamentu kołowego: $B = L = 1,77R = 5,75$ m $\underline{B} = \underline{L} = 2,61$ m Współczynniki nośności: $N_D = 2,89$; $N_C = 9,13$; $N_B = 0,294$ Współczynniki wpływu nachylenia wypadkowej obciążenia: $i_B = 0,78$; $i_D = 0,90$; $i_C = 0,85$ Pionowa składowa obliczeniowego oporu granicznego podłoża: $Q_{fNB} = 5317$ kN Współczynnik korekcyjny: $m = 0,81$ Warunek nośności: $N_r = 1931$ kN $\leq mQ_{fNB} = 4307$ kN Stopień wykorzystania nośności: 44,8%</p>	
<p>Efektywne obliczeniowe pole podstawy fundamentu: $A' = 12,65$ m² Efektywny promień fundamentu: $R' = 2,01$ m NOŚNOŚĆ W WARUNKACH Z ODPLYWEM: Współczynniki bezwymiarowe nośności: $N = 3,26$; $N = 31,31$; $N_\gamma = 1,044$ Współczynniki bezwymiarowe nachylenia podstawy fundamentu: $b_q = b_c = b_\gamma = 1,00$ Współczynniki bezwymiarowe kształtu fundamentu: $s_q = 1,225$; $s_c = 0,70$; $s_\gamma = 1,044$ Współczynniki bezwymiarowe nachylenia obciążenia: $m_x = 1,50$; $i_q = 0,712$; $i_c = 0,672$; $i_\gamma = 0,0848$ Naprężenie efektywne od nakładu w poziomie posadowienia: $q' = 34,2$ kPa Nośność fundamentu: $R/A' = 1771$ kPa Charakterystyczna nośność fundamentu: $R = 22403$ kN Współczynnik bezpieczeństwa: $\gamma_{R,v} = 1,4$ Obliczeniowa nośność fundamentu: $R_d = 16002$ kN Warunek nośności: $F_x = 2162$ kN $\leq R_d = 16002$ kN Stopień wykorzystania nośności: 13,5% NOŚNOŚĆ W WARUNKACH BEZ ODPLYWU: Współczynnik bezwymiarowe nachylenia podstawy fundamentu: $b_q = b_c = b_\gamma = 1,00$ Współczynniki bezwymiarowe kształtu fundamentu: $s_c = 1,20$ Współczynniki bezwymiarowe nachylenia obciążenia: $i_c = 0,955$ Naprężenie efektywne od nakładu w poziomie posadowienia: $q' = 34,2$ kPa Nośność fundamentu: $R/A' = 469$ kPa Charakterystyczna nośność fundamentu: $R = 5933$ kN Współczynnik bezpieczeństwa: $\gamma_{R,v} = 1,4$ Obliczeniowa nośność fundamentu: $R_d = 4238$ kN Warunek nośności: $F_x = 2162$ kN $\leq R_d = 4238$ kN Stopień wykorzystania nośności: 51,0%</p>	
<p>Nośność na siłę poziomą:</p> <p>Współczynnik tarcia fundamentu po gruncie: $f = 0,207$ Obliczeniowy współczynnik tarcia fundamentu po gruncie: $f^{(r)} = 0,186$ Opór graniczny podstawy przy poślizgu fundamentu po gruncie: $T_1 = 359$ kN Opór graniczny podstawy na skutek ścięcia gruntu pod podstawą: $T_2 = 2191$ kN Pozioma składowa oporu granicznego podłoża: $Q_f = 359$ kN Warunek nośności: $Q_f = 146$ kN $\leq mQ_f = 291$ kN Stopień wykorzystania nośności: 50,2%</p>	
<p>Minimalne naprężenie pod podstawą fundamentu: $q_{min} = -90$ kPa Maksymalne naprężenie pod podstawą fundamentu: $q_{max} = 220$ kPa Efektywne obliczeniowe pole podstawy fundamentu: $A_c = 25,18$ m² Współczynnik bezpieczeństwa: $\gamma_{R,\gamma} = 1,1$ Wartość obliczeniowa oporu granicznego na ścięcie w poziomie posadowienia: $R_d = 1689$ kN Wartość obliczeniowa maksymalnego oporu granicznego na ścięcie w poziomie posadowienia: $R_{d,max} = 865$ kN Warunek nośności: $F_{zd} = 159,3$ kN $\leq R_d = 865$ kN Stopień wykorzystania nośności: 18,4%</p>	

Stosowanie standardowych norm służących do analizy obciążenia budowli wiatrem wydaje się nie być odpowiednie w stosunku do takich specyficznych obiektów, jakimi są elektrownie wiatrowe. Wyniki obliczeń są w nich silnie uzależnione od lokalnych uwarunkowań terenu, podczas gdy turbina wiatrowa jest wynoszona na taką wysokość ponad poziom terenu, na którym przepływ mas powietrza jest w miarę możliwości niezależny od lokalnego ukształtowania i chropowatości terenu. Rodzaj i wartość obciążenia wiatrem turbiny powinien zatem być zależny od klasy elektrowni, czyli np. od jej mocy, masy, wymiarów, jak ma to miejsce na przykład w normie [1].

Pomimo różnego podejścia do zadanego problemu, jakim jest projekt konstrukcji elektrowni wiatrowej, zaczynając od zebrania obciążenia, poprzez kombinatorykę tych obciążeń, aż do zaprojektowania posadowienia, okazuje się, że będąc w zgodzie z jednym zestawem norm, otrzymuje się zdumiewająco zbliżone rozwiązanie w stosunku do ścieżki obliczeniowej proponowanej przez drugi zestaw norm (przynajmniej w przypadku wymiarów fundamentu). Nie zmienia tego fakt, że „po drodze” obserwuje się dosyć odmienne wartości pośrednie, takie jak wypadkowe siły od obciążeń zmiennych czy obliczeniowe siły w poziomie posadowienia. Taka sytuacja ma swoje uzasadnienie w różniących się od siebie częściowych współczynnikach bezpieczeństwa stosowanych na poszczególnych etapach obliczeń. Należy pamiętać, że analiza jednego szczegółowego przypadku nie może potwierdzić reguły dotyczącej stosowania wszystkich norm, a wspomniany przykład należałoby rozpatrzyć w szerszym zakresie, co będzie tematem kolejnych analiz.

Uogólniając stwierdzono, że podczas wykonywania obliczeń statyczno-wytrzymałościowych należy konsekwentnie stosować zalecenia jednej grupy norm. W sytuacji, gdy któraś z norm z danego zestawu nie precyzuje sposobu obliczeń danego problemu i do projektowania wykorzystano inną metodę, to zastosowane częściowe współczynniki bezpieczeństwa powinny być zgodne z przyjętym do obliczeń konkretnym zestawem norm.

1. BS-EN 61400-2:2005 Wind turbines. Design requirements.
2. PN-77/B-02011 Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem.
3. PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli.
4. PN-82/B-02000 Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości.
5. PN-EN 1990:2004 Eurokod 0: Podstawy projektowania konstrukcji.
6. PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1 ÷ 4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.
7. PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
8. Ćwirko M., Piotrowicz B.: Analiza systemu OZE i sposobu jego posadowienia na terenie Sośniej Góry w Mikołowie. Magisterska praca dyplomowa pod kierunkiem M. Jastrzębskiej, Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
9. Elektrownia wiatrowa Zefir D21-P70-T18. Wytyczne producenta do projektu budowlanego. Ząber Z. (red.), DR ZĄBER Sp. z o.o., Nowy Sącz 2012.
10. Materiały informacyjne Gminy Mikołów: Bilans aktualnego zużycia mediów (prąd, woda i paliwo płynne) dla budynku Centrum Edukacji Przyrodniczej i Ekologii. Śląskiego Ogródu Botanicznego, październik 2013.
11. Materiały informacyjne Gminy Mikołów: Dokumentacja Geotechniczna MIKOŁÓW, ul. Sosnowa – Centrum Edukacji Przyrodniczej i Ekologicznej Śląskiego Ogródu Botanicznego – obiekt wolnostojący, 2010 i 2013.
12. Materiały informacyjne ze stacji meteorologicznej Śląskiego Ogródu Botanicznego w Mikołowie, 2013.
13. Materiały informacyjne ze stacji meteorologicznej Uniwersytetu Śląskiego, Wydział Nauk o Ziemi, mgr Tomasz Budzik.

PODZIĘKOWANIE: Praca powstała dzięki współpracy Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej z Gminą Mikołów i Śląskim Ogrodem Botanicznym.