

*Andrzej Batog\*, Maciej Hawrysz\**

## PROJEKTOWANIE GEOTECHNICZNE POSADOWIENIA TURBINY WIATROWEJ

---

### 1. Wstęp

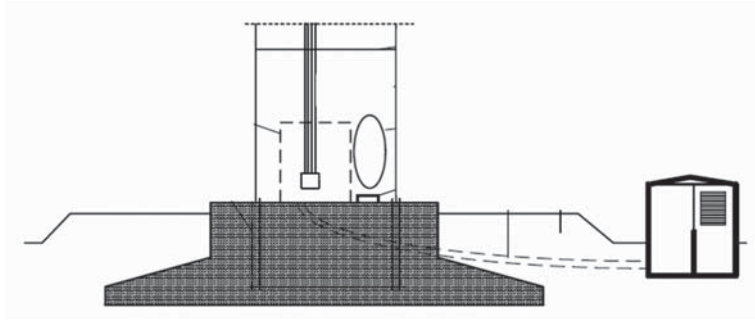
Współczesny świat zmuszony jest do poszukiwania alternatywnych źródeł energii w celu ograniczenia negatywnych skutków rozwoju cywilizacji na środowisko naturalne człowieka. Jednym z takich źródeł są elektrownie wiatrowe, będące zespołem urządzeń produkujących energię elektryczną przy wykorzystaniu turbin wiatrowych. Energia elektryczna uzyskana z wiatru jest uznawana za ekologicznie czystą, gdyż pomijając nakłady energetyczne wytworzenie energii nie pociąga za sobą spalania żadnego paliwa. Z innego punktu widzenia, budowa turbin wiatrowych budzi kontrowersje związane z koniecznością wykorzystania dużych ilości materiałów charakteryzujących się znacznym nakładem energetycznym w procesie wytwarzania, jak również z niekorzystnym wpływem na środowisko naturalne (ginące w zderzeniu z łopatomy ptaki i nietoperze, emisja infradźwięków), podnoszone są problemy techniczne z synchronizacją z siecią ogólnokrajową.

W pracy przedstawiono proces projektowania geotechnicznego związany z realizacją jednej z elektrowni wiatrowych należących do Pyrzyckiej Farmy Wiatrowej zlokalizowanej w województwie zachodniopomorskim. Inwestycja obejmuje zespół elektrowni wiatrowych typu NORDEX N90/2500 o mocy 2,5 MW każda, oddalonych od siebie o 500 m÷600 m. Siłownia ta ma wysokość 100 m, przy długości łopat 45 m i jest ustawiana na sześćcioelementowej wieży rurowej.

Konstrukcja fundamentu elektrowni jest uzależniona od warunków gruntowych w miejscu lokalizacji. Zazwyczaj, dla przypadków określanych jakościowo jako „korzystne warunki gruntowe”, jest to bezpośredni fundament kołowy o średnicy 18 m i wysokości ok. 3 m. Szkic takiego fundamentu pokazano na rysunku 1.

---

\* Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław



Rys. 1. Fundament bezpośredni elektrowni wiatrowej typu Nordex N90–2500

## 2. Rozpoznanie podłoża gruntowego elektrowni wiatrowej

Wymagania techniczne stawiane współczesnym konstrukcjom budowlanym powodują konieczność przeprowadzenia doboru badań i analizy podłoża gruntowego w ściśle określonym zakresie. Istotną rolę w procesie inwestycyjnym odgrywa prawidłowe projektowanie geotechniczne. Nie mniej istotną kwestią dla inwestorów jest aspekt ekonomiczny przy sporządzaniu dokumentacji projektowej, co w efekcie często prowadzi do znacznego ograniczenia ilości badań geotechnicznych.

Pomimo wielu budowy licznych turbin wiatrowych, w Polsce nie opracowano dotychczas specjalistycznych zaleceń i wytycznych projektowania geotechnicznego dla tak specyficznej inwestycji, jakim jest farma wiatrowa i wchodzące w jej skład siłownie wiatrowe, poddawane wielorakim wymuszeniom. W tej sytuacji korzysta się najczęściej z doświadczeń firm zagranicznych, których przykładem jest przedstawiona poniżej specyfikacja zakresu badań zalecanych przez firmę ENERCON *Energy for the World*.

W przywołanej specyfikacji postuluje się wykonanie następujących badań terenowych dla pojedynczej siłowni wiatrowej:

- jeden odwiert geotechniczny zlokalizowany w środku fundamentu bezpośredniego o średnicy do 20 m, wykonany do głębokości równej co najmniej średnicy fundamentu, a w przypadku projektowanego posadowienia pośredniego na palach, odwiert powinien zagłębić się na 3 m poniżej stopy pala; przy średnicy fundamentu do 30 m zaleca się wykonanie dwu odwiertów, przy czym jeden z nich powinien zostać wykonany na krawędzi fundamentu od strony placu dźwigowego, a drugi naprzeciwko.
- sondowanie sondą statyczną CPT/CPTU dla posadowienia płytkiego przy średnicy fundamentu do 15 m powinno zostać wykonane minimum w dwu, a przy średnicy fundamentu powyżej 15 m w minimum trzech miejscach do głębokości wynoszącej min. półtorę średnicy fundamentu, w sytuacjach uzasadnionych do maksymalnie możliwej głębokości; w przypadku posadowienia na palach miejsce sondowań należy przyjąć 1 m od krawędzi fundamentu, a ich głębokość powinna sięgać nie płycej niż minimum trzy średnice pala lub 1,5 m poniżej stopy pala.
- sondowanie dynamiczne sondą ciężką DPH należy wykonać w uzasadnionych przypadkach w zakresie występowania w podłożu budowlanym gruntów gruboziarnistych,
- pomiar położenia zwierciadła wód podziemnych oraz ich wahań.

Badania laboratoryjne prób gruntu należy wykonać dla wszystkich wyróżnionych ważniejszych warstw w zakresie odnoszącym się zasadniczo do wskaźników identyfikacyjnych i klasyfikacyjnych obejmujących: oznaczenia składu granulometrycznego, wilgotności naturalnej, granic Atterberga oraz badania wód gruntowych pod kątem ich agresywności w stosunku do betonu.

Wynika stąd, iż niezbędne do projektowania parametry geotechniczne gruntów występujących w podłożu budowlanym, określające właściwości mechaniczne, muszą zostać wyznaczone na podstawie interpretacji wyników sondowań statycznych i dynamicznych.

Standardowa ekspertyza dotycząca rozpoznania warunków posadowienia elektrowni wiatrowej sporządzana jest w formie opinii geotechnicznej dla obiektu drugiej kategorii geotechnicznej. W szczególności powinna zawierać:

- opis metod badawczych, wyniki badań i ich dokumentację,
- warunki przygotowania wykopu budowlanego, w tym określenie nachylenia skarp wykopu, sposób przygotowania podłoża przed położeniem warstwy chudego betonu oraz warunki obniżenia czasowego poziomu wód gruntowych,
- zalecenia dotyczące sposobu posadowienia siłowni wiatrowej (posadowienie płytkie w warunkach bez wyporu hydrostatycznego, posadowienie płytkie w warunkach działania wyporu hydrostatycznego na fundament lub posadowienie głębokie — pośrednie na palach),
- zalecenia dodatkowe dotyczące budowy dojazdów i placu dźwigowego w sytuacji występowania bezpośrednio pod powierzchnią terenu warstw gruntów słabonośnych,
- ocenę nośności (obciążenia dopuszczalnego) podłoża i spodziewanych osiadań oraz wychylenia z pionu wieży dla okresu 20 lat w przypadku posadowienia płytkiego,
- dobór typu, średnicy i długości pali oraz wartości dopuszczalnego ich obciążenia w przypadku posadowienia pośredniego.

Jeśli fundament elektrowni położony będzie powyżej skarpy lub w rejonie jej oddziaływania, taki obiekt będzie zaliczony do trzeciej kategorii geotechnicznej, dla którego należy przeprowadzić stosowne analizy stateczności oraz podać dopuszczalne nachylenie skarpy lub zbocza, a w razie zagrożenia osuwiskiem — przedstawić sposób zabezpieczenia.

### **3. Przykład projektowania geotechnicznego w Polsce**

Dobierając odpowiednią metodę posadowienia obiektów inżynierskich uwzględniać należy występujące uwarunkowania geotechniczne jak również rodzaj konstrukcji i charakter jej obciążenia, reakcje zachodzące zarówno w podłożu, jaki i w projektowanej konstrukcji.

W artykule porównano wyniki oceny nośności fundamentu wieży siłowni wiatrowej uzyskane dwoma metodami obliczeniowymi i przy przyjęciu dwu odmiennych sposobów ustalenia gruntowych warunków posadowienia:

- metoda oceny nośności fundamentu oparta na normie [6], wartości parametrów geotechnicznych ustalone na podstawie wyników badań polowych i laboratoryjnych prób gruntu pobranych z otworów badawczych, przy zastosowaniu interpretacji zawartej w normie PN-81/B-03020,

- metoda obliczeniowa oparta na podstawie wyników sondowania statycznego CPTU, oparta na zależnościach podanych w publikacji [1] oraz [5], wykorzystująca uzyskane w tym badaniu wartości parametrów geotechnicznych.

### 3.1. Obciążenia

Wiatrowe zespoły prądotwórcze są konstrukcjami podlegającymi mocnym obciążeniom dynamicznym. Właściwości systemu dynamicznego, tzn. w szczególności częstotliwości własne układu jako całości obejmującego fundament, wieżę, mechanizmy i wirnik, mają zatem szczególne znaczenie dla określenia obciążenia.

Głównymi obciążeniami działającymi na konstrukcję są:

- ciężar fundamentu  $G$ ,
- obciążenie gruntem na odsadzkach fundamentu,
- obciążenie wieży, siły  $F_x, F_y, F_z$  i momenty  $M_x, M_y, M_z$ ,
- siła pionowa  $N$ ,
- naprężenia pod fundamentem  $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ .

Do obliczeń przyjęto wartości obciążeń określone przez producenta turbin [3], które uwzględniają m. in. specyfikę strefy wiatrowej, w której zlokalizowana jest inwestycja.

### 3.2. Parametry obliczeniowe

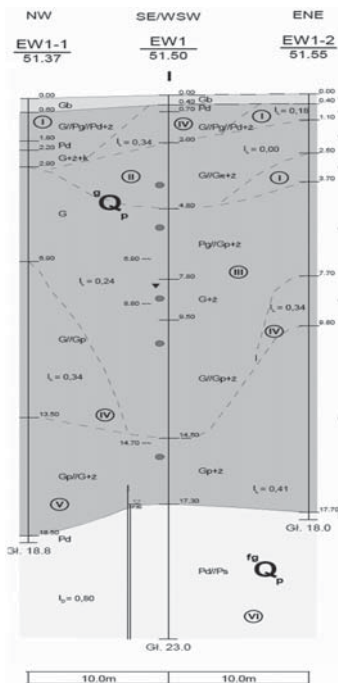
Dla pierwszej metody obliczeniowej, opartej na normie PN-81/B-03020 [6], wartości parametrów wytrzymałościowo–odkształceniowych podłoża gruntowego zostały wyznaczone metodą „B”, na podstawie zależności korelacyjnych, wykorzystujących wyniki przeprowadzonych badań prób gruntów. Sporządzony na tej podstawie przekrój geotechniczny podłoża fundamentu przedstawiono na rysunku 2.

W przypadku drugiej metody obliczeniowej, opartej na wynikach sondowania statycznego CPTU wartości parametrów *in situ* wyznaczone zostały w wyniku interpretacji parametrów mierzonych w trakcie badania. Dokumentację badań dla jednego z punktów badawczych podano na rysunku 3.

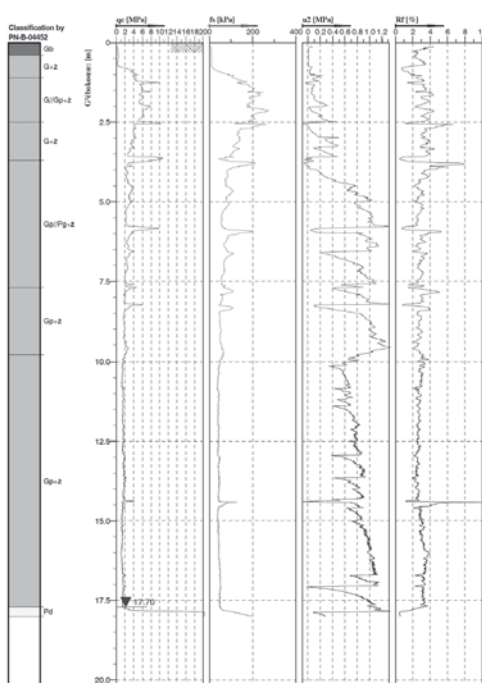
Zastosowane formuły interpretacji wyników i sposoby ustalania wartości parametrów wyprowadzonych opierały się na zależnościach zestawionych w normie PN-B-04452:2002 [7] oraz danych literaturowych. W przypadku określenia rodzaju gruntu występującego w podłożu korzystano z nomogramu Robertsona (1986) zaadaptowanego do warunków gruntowych w Polsce, zamieszczonego w normie [7].

Wartości parametrów wytrzymałościowych określono na podstawie wytycznych zawartych w opracowaniu [2], a parametrów odkształceniowych na podstawie opracowania [4].

Przyjęte do obliczeń wartości parametrów geotechnicznych dla obu metod zestawiono w tabeli 1.



Rys. 2. Przekrój geologiczno–inżynierski podłoża fundamentu turbiny wiatrowej



Rys. 3. Wyniki sondowania statycznego na stanowisku EW1–2

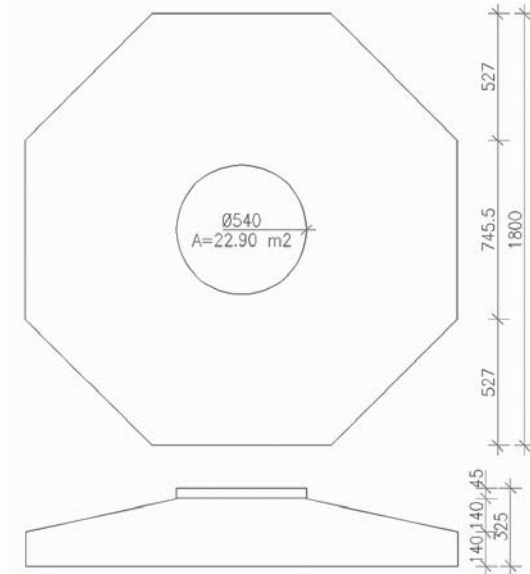
TABELA 1

Zestawienia wartości parametrów geotechnicznych dla warstwy w poziomie posadowienia ~ 3,0 m p.p.t.

Parametr		Metoda określenia parametrów	
		wartości określone na podstawie PN-81/B-03020	wartości na podstawie badań CPTU
Kąt tarcia wewnętrznego $\varphi'$	°	20	—
Spójność $c'$	kPa	36	—
Wytrzymałość gruntów na ścinanie bez drenażu $S_u$	kPa	—	341–391
Edometryczny moduł ścisłości pierwotnej $M_0$	MPa	65	49–53
Ciężar objętościowy $\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	22	18

### 3.3. Ocena nośności i osiadań w oparciu o PN-81/B-03020

Kształt i wymiary ośmiobocznego fundamentu siłowni wiatrowej pokazano na rysunku 4. Aby zastosować normową metodę oceny nośności fundamentu posadowionego na



**Rys. 4.** Kształt i wymiary fundamentu siłowni wiatrowej, typ GE 2.5xl, ENERCON

jednorodnym podłożu podaną w załączniku 1. normy [6], przyjęto zastępczy kwadratowy fundament o wymiarach  $B = L = 16,35$  m. Przyjmując z normy [6] wartości współczynników nośności (dla parametrów podanych w kolumnie 3 w tabeli 1) sprawdzono warunek obliczeniowy I stanu granicznego:

$$N_r \leq mQ_{fNB} \quad (1)$$

Powyższy warunek został spełniony:  $N_r = 26815 \text{ kN} < mQ_{fNB} = 0,81 \cdot 288581 = 233750 \text{ kN}$ .

Podana wartość  $N_r$  uwzględnia najbardziej niekorzystny układ obciążeń. Stopień wykorzystania nośności jest niewielki, wynosi 11,5%, wynika on ze stosunkowo dużych wymiarów fundamentu w stosunku do obciążeń oraz z wysokich wartości parametrów wytrzymałościowych podłoża, jak również z faktu, iż metoda oparta na normie [6], w przypadku płyt fundamentowych o dużych wymiarach, przynosi zawyżoną ocenę nośności.

Warunek II stanu granicznego — wartość średnich osiadań  $s$  sprawdzono uwzględniając tylko wpływ naprężeń dodatkowych  $\sigma_{zdi}$  (z uwagi na krótki czas budowy fundamentu), za pomocą wzoru:

$$s = \sum_{z=D}^{z=z_{\max}} \frac{\sigma_{zdi}}{M_0} h_i \leq s_{dop} \quad (2)$$

gdzie:

$\sigma_{zdi}$  — naprężenie dodatkowe w  $i$ -tej warstwie obliczeniowej [kPa],

$M_0$  — edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej [kPa],

$h_i$  — miąższość  $i$ -tej warstwy obliczeniowej [m],

$D$  — głębokość posadowienia fundamentu [m],

$s_{dop}$  — dopuszczalna wartość średnich osiadań fundamentu [m].

Głębokość strefy aktywnej podłoża, do której należy przeprowadzić obliczenia nośności, wynosi w tym przypadku  $z_{\max} = 13,0$  m. Z uwagi na zalecenia normowe głębokość tą obniżono do stropu warstwy mniej ściśliwej — Pd/Ps, występującego na głębokości 17,3 m p.p.t. Wartość dopuszczalna osiadań wg [6] dla budowli o wysokości powyżej 100 m wynosi  $s_{dop} = 15$  cm. Rozkład naprężeń w podłożu fundamentu do głębokości strefy aktywnej określono metodą punktu środkowego.

Warunek normowy został spełniony:  $s = 3,4 \text{ cm} < s_{dop} = 15 \text{ cm}$ .

### 3.4. Ocena nośności i osiadań w oparciu o badania CPTU

Ocenę nośności w tym podejściu obliczeniowym przeprowadzono na podstawie wytycznych zawartych w opracowaniu [1].

Warunek I stanu granicznego — nośności podłoża fundamentu opisano wzorem:

$$\sigma_{\max} < 2S_u \quad (3)$$

gdzie:  $\sigma_{\max}$  — maksymalna wartość naprężeń pod fundamentem [kPa],  $S_u$  jak wyżej.

Warunek powyższy jest spełniony,  $\sigma_{\max} = 256,8 \text{ kPa} < 2S_u = 2 \cdot 391 = 782 \text{ kPa}$ . Stopień wykorzystania nośności jest większy niż w przypadku oceny nośności przeprowadzonej wg metody normowej, wynosi 32,8%. Ocena nośności w oparciu o badania CPTU jest zatem w tym przypadku oceną znacząco bezpieczniejszą.

Warunek II stanu granicznego — osiadań sprawdzono stosując wzór:

$$s = \sum_{z=D}^{z=z_{\max}} m_v \sigma_{zqi} h_i \leq s_{dop} \quad (4)$$

gdzie:

$\sigma_{zq}$  — wartości naprężeń od fundamentu w i-tej warstwie [kPa],

$h_i$  — miąższość warstewki obliczeniowej [m],

$m_v$  — współczynnik ściśliwości objętościowej [kPa<sup>-1</sup>] określony wzorem empirycznym:

$$m_v = \frac{1}{\alpha \cdot q_c} \quad (5)$$

gdzie:

$q_c$  — opór stożka sondy CPTU [kPa],

$\alpha$  — współczynnik obliczeniowy zależny od rodzaju gruntu, przyjęto  $\alpha = 6,0$ .

Dla tak przyjętych danych wyliczono  $m_v = \frac{1}{6,0 \cdot 6700} = 2,49 \cdot 10^{-5} \text{ [kPa}^{-1}\text{]}$ .

Wartość dopuszczalną osiadań przyjęto zgodnie z normą [6]. Dla powyższych danych warunek II stanu granicznego jest spełniony:  $s = 7,2 \text{ cm} < s_{dop} = 15 \text{ cm}$ . Ze względu na przy-

jęcie do obliczeń  $\sigma_{max}$  jako wartości obciążeń w poziomie posadowienia. Jest to górna ocena wielkości osiadań.

### 3.5. Porównanie wyników

Otrzymane wyniki dla obu metod obliczeniowych zestawiono w tabeli 2. Metoda projektowania posadowień oparta na badaniach CPTU bazuje głównie na ocenach empirycznych i uogólnieniach wyników badań doświadczalnych. Z faktu tego wynikają interesujące wnioski po porównaniu wyników obliczeń. Dla metody opartej na badaniach CPTU jednostkowy opór graniczny jest o jedną trzecią mniejszy niż w przypadku tradycyjnej metody opartej o normę [6], również jest dużo wyższy stopień wykorzystania nośności podłoża oraz ponad dwukrotnie wyższa wartość oceny osiadań podłoża. Wyniki te można uznać za poprawne, gdyż jak wskazuje praktyka inżynierska, metoda podana w normie [6] znacznie zawyża nośność dla dużych płyt. Można zatem przyjąć, iż metoda projektowania posadowień na podstawie badań CPTU jest metodą bezpieczną i posiadającą duże zapasy bezpieczeństwa, jak również jest metodą szybką i ekonomiczną pod względem określenia modelu podłoża gruntowego.

TABELA 2  
Porównanie wyników obliczeń

Parametr		Metoda obliczeniowa	
		wg PN-81/B-03020	wg badań CPTU
Jednostkowy opór gruntu, $q_r$	kPa	1110	782
Stopień wykorzystania nośności podłoża	%	11,5	32,8
Osiadanie $s$	cm	3,4	7,2

## 4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono przykład zastosowania wyników sondowania statycznego CPTU w celu zaprojektowania posadowienia elektrowni wiatrowej. Wykorzystano je zarówno do ustalenia wyprowadzonych wartości parametrów geotechnicznych, jak i do oceny nośności podłoża oraz osiadań fundamentu.

Sondowanie CPT pozwala na szybkie określenie właściwości i parametrów podłoża gruntowego, które można bezpośrednio zastosować do oceny I oraz II stanu granicznego fundamentu. Istotną korzyścią przemawiającą za zastosowaniem badań CPT jest możliwość natychmiastowego wyznaczenia wartości parametrów w warunkach *in situ*, w szczególności w porównaniu z tradycyjnymi czasochłonnymi i kosztownymi badaniami laboratoryjnymi.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń porównawczych z tradycyjną metodą projektowania posadowień fundamentów, można stwierdzić, iż zastosowanie metody badań oraz projektowania na podstawie badań CPTU pozwala w szybki i ekonomiczny sposób wyzna-



czyć model podłoża gruntowego oraz ze znacznym zapasem bezpieczeństwa ocenić nośność i osiadania podłoża fundamentu siłowni wiatrowej.

#### LITERATURA

- [1] *Jacobs P.*: Simplified Description of the Use and Design Methods for CPTs in Ground Engineering. FUGRO Engineering Services Limited, Oxfordshire, 2004
- [2] *Larsson R.*: The CPT Test, Equipment — Testing — Evaluation. SGI, Linkoping, Sweden, 1995
- [3] Load Specification for the Foundation of the Wind Turbine Generator System — GE 2.5×1. ENERCON, 2006
- [4] *Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M.*: Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Blackie Academic/Chapman–Hall Publishers, U.K., 1997
- [5] *Meeigh A.C.*: Cone Penetration Testing — Methods and Interpretation. CIRIA, Butterworths. ASTM, 2004
- [6] PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Projektowanie i obliczenia statyczne posadowień bezpośrednich
- [7] PN-B-04452:2002 Geotechnika. Badania polowe