

Morskie farmy wiatrowe: Posadowienie turbin wiatrowych

Prof. dr hab. inż. Wiesław Tarełko
Akademia Morska w Gdyni, Wydział Mechaniczny

W ostatnim okresie nastąpił znaczny rozwój morskiej energetyki wiatrowej, o czym może świadczyć liczba oraz moc eksploatowanych morskich farm wiatrowych. Wzrost mocy farm nastąpił głównie dzięki zwiększeniu mocy turbin wiatrowych. Stały się one większe i wyższe oraz coraz bardziej oddalone od brzegu. Taka ich lokalizacja jest uwarunkowana różnymi ograniczeniami, wynikającymi między innymi z obowiązujących

regulacji prawnych oraz głębokości morza w miejscu ich posadowienia.

W artykule zaprezentowano zasady rozmieszczania oraz sposoby posadowienia morskich turbin wiatrowych w zależności od głębokości morza. W szczególności zaś omówiono w nim prawne, środowiskowe i estetyczne uwarunkowania lokalizacji przestrzennej farm wiatrowych, zasady rozmieszczenia turbin

w obrębie morskiej farmy wiatrowej. Ponadto, w artykule przedstawiono sposoby posadowienia stałego oraz wypornościowego konstrukcji nośnych morskich turbin wiatrowych.

ZASADY LOKALIZACJI FARM WIATROWYCH NA MORZU

Lokalizacja przestrzenna farm wiatrowych jest uwarunkowana trzema najważniejszymi aspektami:

- prawnymi,
- ochrony środowiska,
- estetycznymi.

Regulacje prawne dotyczące budowy, obsługi i użytkowania instalacji w wyłącznych strefach ekonomicznych państw nadmorskich są zawarte w Konwencji Narodów Zjednoczonych o Prawie Morskim z 1982 roku [10]. Konwencja ta wprowadziła nowe regulacje obejmujące sposoby eksploatacji, badania i ochrony poszczególnych obszarów morskich. Zgodnie z jej zapisami państwa nadmorskie mają suwerenną władzę nad swoim morzem terytorialnym w odległości do 12 mil morskich oraz mają suwerenne prawa w 200-milowej wyłącznej strefie ekonomicznej względem zasobów naturalnych. Artykuł 56, który bezpośrednio odnosi się do zagadnienia usytuowania farm wiatrowych, stanowi, że państwo nadbrzeżne w swojej strefie ekonomicznej ma prawo między innymi do:

- przeprowadzania badań, eksploatacji w odniesieniu do przedsięwzięć takich jak np. wytwarzanie energii poprzez wykorzystanie wody, prądów i wiatrów,
- budowania i wykorzystywania sztucznych wysp, instalacji i konstrukcji.

Artykuł 60 dotyczący bezpieczeństwa żeglugi w odniesieniu do farm wiatrowych stanowi między innymi o możliwości ustanowienia i określania szerokości strefy bezpieczeństwa wokół farm wiatrowych (nie więcej niż 500 m mierzonych od każdego punktu zewnętrznych krańców farmy), w obrębie których państwo nadmorskie może stosować odpowiednie środki w celu zapewnienia bezpieczeństwa zarówno żeglugi, jak i bezpieczeństwa farm wiatrowych.

W odniesieniu do ewentualnej budowy przybrzeżnych farm wiatrowych w polskiej strefie ekonomicznej głównym prawem umożliwiającym ich budowę na morzu jest „Ustawa o obszarach morskich” [25]. Określa ona obszarowo wyłączną strefę ekonomiczną Rzeczypospolitej Polskiej obejmującą wody, dno morza i znajdujące się pod nim wnętrza ziemi.

Artykuł 17 stanowi, że w tej strefie Polska ma między innymi prawo „budowania i użytkowania sztucznych wysp, konstrukcji i innych urządzeń”, co oznacza również budowę farm wiatrowych.

Zakres obowiązku ochrony środowiska morskiego na morzu nakłada Część XII Konwencji Narodów Zjednoczonych o Prawie Morskim z 1982 roku [16], zatytułowana „Ochrona i zachowanie środowiska morskiego”. Według zawartych tam zapisów państwa nadbrzeżne powinny podejmować wszelkie działania niezbędne do zapobiegania, redukcji i kontroli zanieczyszczenia środowiska morskiego, pochodzącego z wszelkich źródeł, w tym oczywiście z farm wiatrowych. Ponadto, podjęte środki

powinny obejmować działania niezbędne do ochrony i zachowania rzadkich lub delikatnych ekosystemów, a także środowiska gatunków uszczuplonych i zagrożonych oraz innych form życia morskiego.

W odniesieniu do ewentualnej budowy przybrzeżnych farm wiatrowych w polskiej strefie ekonomicznej zasady ochrony środowiska reguluje „Ustawa o dostępie do informacji o środowisku i jego ochronie oraz o ocenach oddziaływania na środowisko” [26]. Artykuł 96 stanowi o tym, że pozwolenie na realizację przedsięwzięcia takiego jak np. budowa farmy wiatrowej jest wydawane na podstawie ustawy z dnia 21 marca 1991 roku o obszarach morskich Rzeczypospolitej Polskiej i administracji morskiej [25]. Zgodę co do lokalizacji farmy wiatrowej wydaje minister właściwy dla gospodarki morskiej. W przypadku, gdy istnieje plan zagospodarowania przestrzennego obszarów morskich, zgodę taką wydaje dyrektor właściwego Urzędu Morskiego.

Jak dotychczas nie opracowano regulacji prawnych mających charakter międzynarodowy a dotyczących zasad budowy, instalacji i przeprowadzania przeglądów morskich turbin wiatrowych. Tym niemniej w 2014 roku amerykańskie towarzystwo klasyfikacyjne ABS wydało dwa poradniki dotyczące posadowienia stałego oraz wypornościowego morskich turbin wiatrowych. W pierwszym z nich [5] zawarto kryteria projektowe oraz zasady budowy, instalacji i przeprowadzania przeglądów morskich turbin wiatrowych, które są stale osadzone lub przymocowane do dna morskiego. W drugim [6] zawarto kryteria projektowe oraz zasady budowy, instalacji i przeprowadzania przeglądów morskich turbin wiatrowych, których pływające konstrukcje nośne są stale zakotwiczone do dna morskiego. Ponadto towarzystwo klasyfikacyjne ABS [4] wydało zalecenia zawierające metodyki przeprowadzania analiz wykonawczych, zasad modelowania oraz symulacji numerycznych dotyczących posadowienia wypornościowego morskich turbin wiatrowych.

Zgodnie z unijnymi i krajowymi regulacjami środowiskowymi morskie farmy wiatrowe są zaliczane do inwestycji, które mogą zawsze znacząco oddziaływać na środowisko. Dlatego też obligatoryjnym warunkiem uzyskania pozwolenia na budowę morskiej farmy wiatrowej jest przeprowadzenie procedury oceny oddziaływania planowanej inwestycji na środowisko. Na ile jest to istotne, świadczy historia budowy London Array – jednej z największych morskich farm wiatrowych na świecie [21]. Plany zlokalizowanej u ujścia Tamizy farmy przewidywały dwa etapy jej rozbudowy. W pierwszym z nich zainstalowano 177 turbin o mocy 3,6 MW każda (łącznie 630 MW). W drugim etapie moc farmy miała być zwiększona do 870 MW. Drugi etap wstrzymano jednak ze względu na ‘uwarunkowania środowiskowe’, czyli potencjalny wpływ turbin wiatrowych na zimowe siedliska nura rdzawoszyjego¹. Z tego powodu inwestorzy postanowili wystąpić o anulowanie umowy dzierżawy obszaru, na którym miały stanąć nowe turbiny [28]. Poinformowali przy tym, że powrót do planów rozbudowy farmy London Array będzie możliwy najwcześniej na początku 2017 roku.

Rozważając ewentualne oddziaływania turbin i instalacji morskich farm wiatrowych na środowisko naturalne, należy

¹ Nur rdzawoszyi (*Gavia stellata*) - gatunek dużego, wędrownego ptaka wodnego z rodziny nurów. Cechą charakterystyczną jest sposób zdobywania pokarmu poprzez eksplorację dużych głębokości w celu chwywania ryb.

mieć na względzie, co jest ważniejsze: wytworzenie czystej ekologicznie energii czy też potencjalne zagrożenia dla środowiska związane z ich instalacją i eksploatacją. Wyniki prac badawczych prowadzonych na eksploatowanych morskich farmach wiatrowych, które znajdują się w różnych raportach środowiskowych [1, 2, 13, 29], potwierdzają niską skalę negatywnych oddziaływań środowiskowych. Nie zmienia to jednak faktu, że podczas projektowania jest niezbędne oszacowanie potencjalnego ryzyka środowiskowego związanego z budową i eksploatacją morskich farm wiatrowych oraz zastosowanie ewentualnych działań minimalizujących skutki negatywnych oddziaływań.

W przypadku budowy farmy oddziaływania te mogą być związane między innymi z zanieczyszczeniem wody i powietrza; emisją hałasu i pola elektromagnetycznego; zniszczeniem miejsc przebywania, schronisk, żerowisk i tras migracji fauny oraz zakłóceniem funkcjonowania ich populacji; zniszczeniem flory oraz siedlisk przyrodniczych, ewentualnym zniszczeniem podwodnych stanowiskach archeologicznych. Z reguły oddziaływania te nie są zbyt długotrwałe. Ich skutki mogą być nieodwracalne (np. zniszczenie podwodnych stanowiskach archeologicznych) lub odwracalne po ustąpieniu oddziaływań (np. odbudowa siedlisk przyrodniczych).

W przypadku eksploatacji farmy w celach komercyjnych oddziaływania te są z reguły długotrwałe i mogą zmienić całkowicie warunki funkcjonowania morskiego środowiska naturalnego. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć:

- oddziaływanie na ptaki oraz nietoperze,
- oddziaływanie na faunę i florę podwodną.

Negatywne oddziaływania morskich farm wiatrowych na ptaki oraz nietoperze mogą dotyczyć możliwości śmiertelnych zderzeń z elementami turbin, utratę siedlisk oraz ewentualne ich przekształcenie.

Najistotniejszym zagrożeniem jest ryzyko zderzenia ptaków z turbiną lub jej wirnikiem. Z przeprowadzonych badań, między innymi zaprezentowanych w [13], wynika, że:

- ptaki niektórych gatunków potrafią dostosować swoje trasy przelotów do farm wiatrowych i jeśli na drodze ich przelotu pojawiają się nowe farmy, omijają je one szerokim łukiem, wykluczając możliwość kolizji lub znacznie zmniejszając możliwość jej wystąpienia,
- prędkości obrotowe wirników morskich turbin wiatrowych nie są zbyt duże, co powoduje, że ruch wirnika nie jest 'rozmyty' - ptaki zauważając ten ruch unikają ewentualnego zderzenia z wirnikiem,
- zmiana populacji ptaków w obszarze farmy wiatrowej jest minimalna.

Wysokie zagrożenie dla nietoperzy mogą stwarzać farmy wiatrowe zlokalizowane wzdłuż wybrzeży morskich. W Szwecji śmiertelność nietoperzy była pięciokrotnie wyższa przy turbinach zlokalizowanych na wybrzeżach niż w głębi lądu [1]. Negatywne oddziaływanie morskich farm wiatrowych na nietoperze może dodatkowo polegać na tzw. urazie ciśnieniowym (barotrauma), to jest na uszkodzeniu fizycznym tkanek ciała spowodowane różnicą ciśnień panującym przy ciele lub tkance a ciśnieniem nowego otoczenia. W badaniach zaprezentowanych w [15] stwierdzono, że ulokowanie morskich farm w odległości powyżej 10 km od wybrzeża zmniejsza w znacznym

stopniu ryzyko śmiertelnych zderzeń ptaków i nietoperzy z elementami turbin.

W [13] przedstawiono również oddziaływanie morskich farm wiatrowych na faunę i florę. W konkluzji stwierdzono, że usytuowanie nowych budowli na dnie morza oddziałuje w taki sam sposób jak tworzenie raf sztucznych. Stają się one nowym korzystnym siedliskiem podmorskiej flory i fauny. Poza tym nie stwierdzono zależności między wytwarzanym polem elektromagnetycznym a migracją np. ryb czy też fok.

Jak już wspomniano lokalizacja przestrzenna morskich farm wiatrowych jest uwarunkowana również aspektami estetycznymi, to jest ich oddziaływaniem na krajobraz. Oczywiście jest, że takie oddziaływanie maleje wraz z wzrostem odległości farmy od wybrzeża. W [14] przedstawiono uproszczony schemat podziału na strefy tzw. 'wizualnego oddziaływania' lądowych elektrowni wiatrowych:

- strefa I (w odległości do 2 km od farmy wiatrowej) – farma wiatrowa jest elementem dominującym w krajobrazie, zaś obrotowy ruch wirnika jest wyraźnie widoczny i dostrzegany przez człowieka,
- strefa II (w odległości od 2 do 4,5 km od farmy wiatrowej) – farma wiatrowa wyróżnia się w krajobrazie i łatwo ją dostrzec, zaś obrotowy ruch wirnika jest w dalszym ciągu widoczny i przyciąga wzrok człowieka,
- strefa III (w odległości od 4,5 do 7 km od farmy wiatrowej) – farma wiatrowa jest widoczna i w warunkach dobrej widoczności można dostrzec obracający się wirnik,
- strefa IV (w odległości powyżej 7 km od farmy wiatrowej) – farma wiatrowa wydają się być niewielkich rozmiarów i nie wyróżniają się znacząco w otaczającym je krajobrazie, zaś obrotowy ruch wirnika z takiej odległości jest właściwie niedostrzegalny.

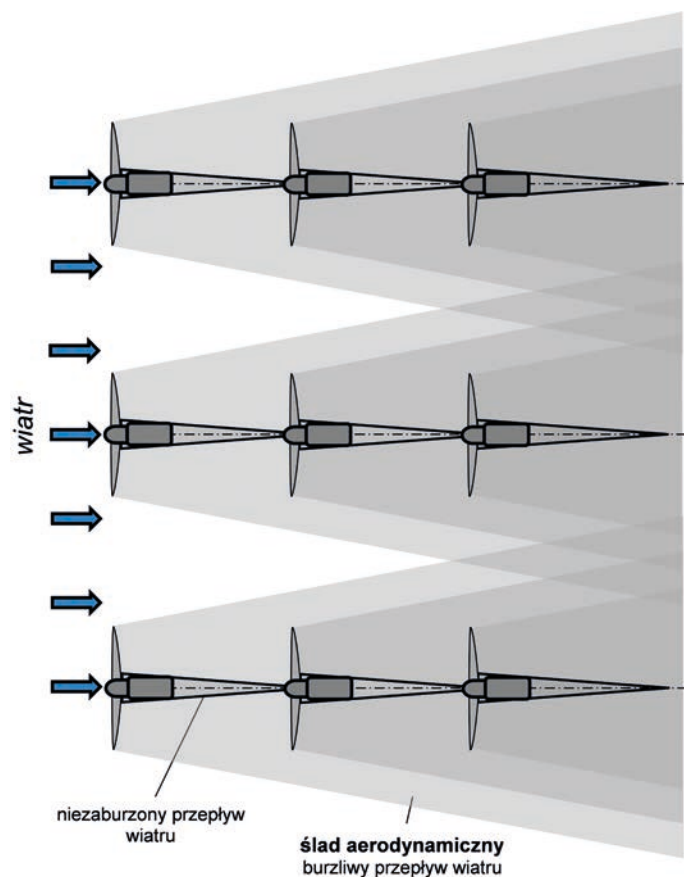
Można zatem na tej podstawie wnioskować, że jeżeli morska farma wiatrowa będzie w znacznej odległości od wybrzeża, to jej oddziaływanie na krajobraz będzie znikome. Potwierdzają to wyniki przeprowadzonych badań. W [13] ponad 80% respondentów reprezentujących lokalną społeczność w pobliżu usytuowania duńskich farm Horns Rev i Nysted miała do nich 'pozytywny' lub 'bardzo pozytywny' stosunek. Natomiast 40% respondentów stwierdziło, że przyszłe farmy wiatrowe powinny być tak usytuowane, aby nie były widoczne z lądu.

ZASADY ROZMIESZCZENIA TURBIN W OBRĘBIE MORSKIEJ FARMY WIATROWEJ

Morskie farmy wiatrowe stanowią złożony układ różnorodnych elementów składowych. Do najważniejszych należy zaliczyć przede wszystkim zespół turbin wiatrowych o różnej liczbie rozmieszczonych na danym akwenie. Turbiny te są rozmieszczone według określonego schematu, tworzącego uporządkowaną siatkę i są funkcją średnicy wirnika turbiny. Odległości pomiędzy rzędami i kolumnami regularnie oddalonych od siebie turbin wiatrowych wynoszą od 4 do 8 razy wielkości średnicy ich wirnika. Takie ich rozmieszczenie zmniejsza ryzyko pojawienia się tzw. cienia aerodynamicznego, nazywanego również efektem wzbudzenia (ang. *wake effect*). Wirnik turbiny

pobierając energię z wiatru, zmniejsza jego prędkość. Po stronie zawietrznej wirnika, na odległość wielu jego średnic, rozciąga się obszar, w którym średnia prędkość wiatru jest mniejsza niż w przepływie niezaburzonym. Obszar ten, zwany śladem lub cieniem aerodynamicznym, rozciąga się na odległość wielu średnic wirnika, z czasem „rozmywa się” na skutek procesów wymiany masy i energii w przepływie (rys. 1).

W określonych warunkach meteorologicznych może być to bardzo widowiskowe zjawisko (rys. 2) wyrażające się pojawieniem swoistego rodzaju regularnych stożkowatych chmur poziomych układających się równolegle w każdym rzędzie turbin.



Rys. 1. Schemat powstawania cienia aerodynamicznego



Rys. 2. Cienie aerodynamiczne morskich turbin wiatrowych [9]

Turbina wiatrowa, która znajdzie się w śladzie aerodynamicznym wytwarza mniej energii niż turbina usytuowana do niej nawietrznie. A zatem możliwość powstania efektu cienia aerodynamicznego powoduje konieczność zachowania znacznych odstępów między poszczególnymi turbinami danej farmy.

POSADOWIENIE MORSKICH TURBIN WIATROWYCH

Czynniki wpływające na posadowienie morskich turbin wiatrowych

Turbiny morskich farm wiatrowych są usytuowane na szczycie (topie) konstrukcji nośnej, która najczęściej ma postać wieży. Elementy składowe turbin, konstrukcję wieży oraz infrastrukturę przesyłania energii przedstawiono w [20].

Konstrukcja nośna turbiny może być posadowiona stale na dnie morskim lub na platformie pływającej zakotwiczonej do dna morskiego. Dobór postaci konstrukcyjnej struktury nośnej oraz sposób jej posadowienia jest związany między innymi z:

- obciążeniami wywołanymi działaniem czynników środowiskowych,
- głębokością morza w miejscu posadowienia,
- geologią dna morskiego.

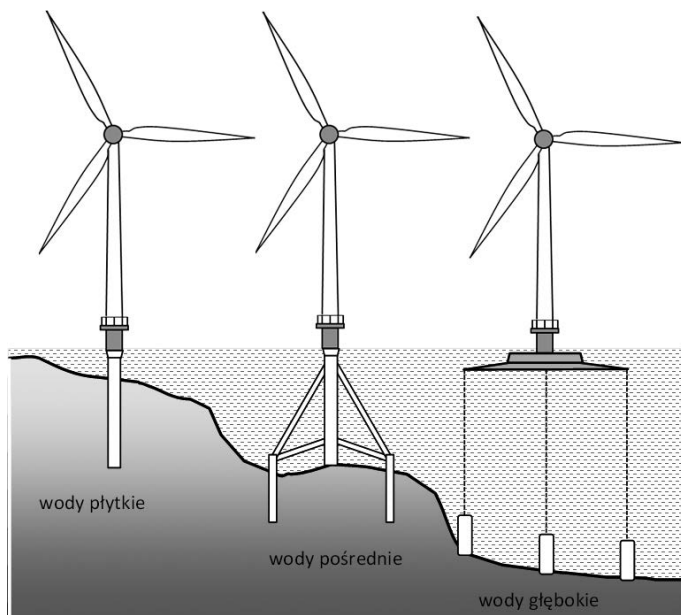
Obciążenia konstrukcji nośnej turbiny wywołane działaniem czynników środowiskowych zależą od warunków klimatycznych w miejscu ich posadowienia. Do najistotniejszych należy zaliczyć obciążenia wywołane działaniem wiatru, opadów atmosferycznych (śniegu lub gradu), fali morskiej, pływów morskich oraz ewentualnego pojawienia się pokrywy lodowej i wstrząsów podziemnych w rejonach sejsmologicznie aktywnych. Mogą one oddziaływać współbieżnie, powodując złożony układ obciążeń konstrukcji nośnej turbiny w postaci:

- sił działających prostopadle do jej powierzchni,
- momentów zginających i skręcających działających wzdłuż i poprzecznie do jej osi,
- sił ścinających u jej podstawy.

Obciążenia te mogą być krótkotrwałe (dola sekundy) lub długotrwałe (wiele godzin, a nawet dni).

Głębokość morza w miejscu posadowienia konstrukcji nośnej turbiny jest ograniczona uwarunkowaniami ekonomicznymi. W odniesieniu do morskich farm wiatrowych w [11] wyróżniono wody płytkie (do 30 m), pośrednie (powyżej 30 do 60 m) i głębokie (powyżej 60 m). Aktualnie głębokość posadowienia stałego turbin morskich farm wiatrowych nie przekracza 45 m [22], natomiast w przypadku posadowienia na platformie pływającej zakotwiczonej do dna morskiego głębokość może osiągnąć nawet kilkaset metrów (rys. 3).

Geologię dna morskiego stanowią różnorodne czynniki. W pracy [12] do czynników, które mogą oddziaływać na sposób posadowienia konstrukcji nośnej turbin morskich farm wiatrowych, zaliczono, między innymi: środowisko sedymentacyjne, stopień zwięzłości, ruchliwość oraz strukturę osadów, ukształtowanie oraz strukturę dna (warstwy geologiczne), parametry osadu (uziarnienie, geochemia), parametry fal i pływów przy różnych warunkach pogodowych na różnych głębokościach wody.



Rys. 3. Rodzaje wód a głębokość posadowienia turbin morskich farm wiatrowych

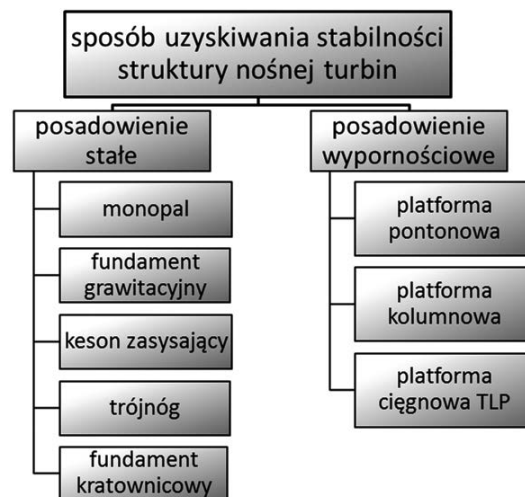
Sposób posadowienia konstrukcji nośnej turbiny może wywoływać między innymi procesy wymywania, zmianę kierunków prądów wodnych, pływów i procesów sedymentacyjnych oraz kierunków i energii fal, ruchliwość i związane z tym przemieszczanie osadów dennych.

Wszystkie zaprezentowane czynniki, to jest: obciążenia konstrukcji nośnej turbiny, głębokość morza oraz geologia dna morskiego, powinny być brane pod uwagę podczas wyboru sposobu posadowienia konstrukcji nośnej turbin morskich farm wiatrowych, przy czym powinny one spełniać dwa podstawowe wymagania:

- zapewnić stateczność, tzn. pionową orientację konstrukcji nośnej niezależnie od wielkości i charakteru obciążeń wywołanych działaniem czynników środowiskowych,
- umożliwić dostęp oraz zapewnić bezpieczeństwo prac personelu obsługującego podczas wykonywania prac eksploatacyjnych związanych z działaniem turbiny.

Analiza istniejących i planowanych rozwiązań konstrukcyjnych pozwala na wyróżnienie podstawowych rodzajów konstrukcji nośnych turbin morskich farm wiatrowych według dwóch kryteriów, a mianowicie głębokości morza i sposobu uzyskiwania stateczności.

Postać konstrukcyjna posadowienia morskich turbin wiatrowych jest związana z głębokością morza. Morskie farmy wiatrowe eksploatowane w skali komercyjnej mają posadowienie stałe na wodach płytkich i pośrednich. Natomiast na wodach głębokich konstrukcje nośne turbin są posadowione na platformach pływających zakotwiczonych do dna morskiego. Aktualnie takie rozwiązania są na etapie przeprowadzania badań mających za zadanie potwierdzenie ich celowości stosowania. Wykorzystywane są przy tym rozwiązania konstrukcyjne stosowane w wypornościowych morskich platformach wiertniczych.



Rys. 4. Klasyfikacja sposobów uzyskiwania stateczności konstrukcji nośnej turbin morskich farm wiatrowych

W zależności od sposobu uzyskiwania stateczności konstrukcji nośnej turbin wyróżnia się:

- posadowienie stałe,
- posadowienie wypornościowe.

Klasyfikację sposobów uzyskiwania stateczności konstrukcji nośnej turbin morskich farm wiatrowych przedstawiono na rys. 4.

Zgodnie z danymi przedstawionymi przez Europejskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej EWEA [22] do końca 2013 roku w Europie zainstalowano 2 474 morskie turbiny wiatrowe. Udział poszczególnych rodzajów posadowienia stałego przedstawiał się następująco: monopale – 1866 (76%); fundament grawitacyjny – 303 (12%); trójnóg – 171 (7%); fundament kratownicowy – 130 (5%). Natomiast posadowienie wypornościowe odnosiło się tylko do dwóch instalacji przyłączonych do sieci energetycznej oraz dwóch projektów eksperymentalnych.

Posadowienie stałe morskich turbin wiatrowych

W celu uzyskania stateczności w posadowieniu stałym morskich turbin wiatrowych wykorzystuje się następujące rodzaje sił wiążących:

- siły grawitacyjne wynikające z dużej masy całej konstrukcji, które wywołują docisk pomiędzy równoległymi powierzchniami dolnej podstawy konstrukcji oraz dna morskiego,
- siły tarcia pojawiające się pomiędzy ścianami specjalnie ukształtowanego elementu konstrukcji wbijanego prostopadle do powierzchni dna morskiego a odkształconymi wskutek wbijania ścianami dna morskiego,
- siły wynikające z różnicy ciśnień hydrostatycznych pojawiającej się pomiędzy zatopionym kesonem (z którego usunięto powietrze oraz wodę) a dnem morskim.

Stosowane obecnie w skali komercyjnej rodzaje posadowienia stałego morskich turbin wiatrowych przedstawiono na rys. 5.

W chwili obecnej najbardziej rozpowszechnionym rodzajem posadowienia stałego morskich turbin wiatrowych na wodach płytkich są tzw. monopale (ang. *monopiles*). Monopale (rys. 5a) wykonuje się z zespalanych stalowych segmentów o przekroju kołowym, które są wbijane bezpośrednio w dno morskie. Istnieją też rozwiązania na bazie cementu. Stateczność konstrukcji uzyskuje się za pomocą tarcia pojawiającego się pomiędzy ścianami monopalu a odkształconym dnem morskim. Konstrukcja taka podtrzymuje wieżę wraz z umiejscowioną na niej turbiną wiatrową. Powszechność stosowania monopali wynika ze stosunkowo niskich kosztów wykonania, prostoty budowy, a także z możliwości ich wykorzystywania na wodach płytkich. Ponadto, instalacja monopali nie wymaga wcześniejszego przygotowania dna morskiego. Nie można ich jednak stosować w przypadku skalistego podłoża dna morskiego.

Rozmiary monopalu zależą od wielkości turbiny (zatem i jej mocy), oddziałujących sił hydrodynamicznych oraz geologii dna morskiego w miejscu jego posadowienia.

Typowym przykładem posadowienia stałego za pomocą monopali jest aktualnie największa na świecie farma wiatrowa London Array (I etap) [17]. Jej 3,6-megawatowe turbiny wiatrowe są usytuowane na 175 monopalach o średnicach 4,2 lub 4,7 m, których długość waha się od 45 do 50 m. Głębokość ich posadowienia waha się od 5 do 23 m.

Posadowienie na bazie fundamentu grawitacyjnego (ang. *gravity foundation, gravity base*) pojawiło się jako alternatywa dla monopali. Na wodach płytkich, duża powierzchnia oraz masa własna zapewnia bardzo dużą stateczność całej konstrukcji, szczególnie w przypadku występowania trudnych warunków pogodowych. Fundament grawitacyjny (rys. 5b) jest układany na dnie morza i z tego względu możliwość jego zastosowania zależy w głównej mierze od podłoża dna morskiego w miejscu jego posadowienia. Kluczową rolę odegrało opracowanie nowoczesnej technologii bagrowania (urabiania) dna morskiego, która polega na wyrównaniu podwodnych wydm piaskowych specjalnymi urządzeniami. Fundament grawitacyjny wykonuje

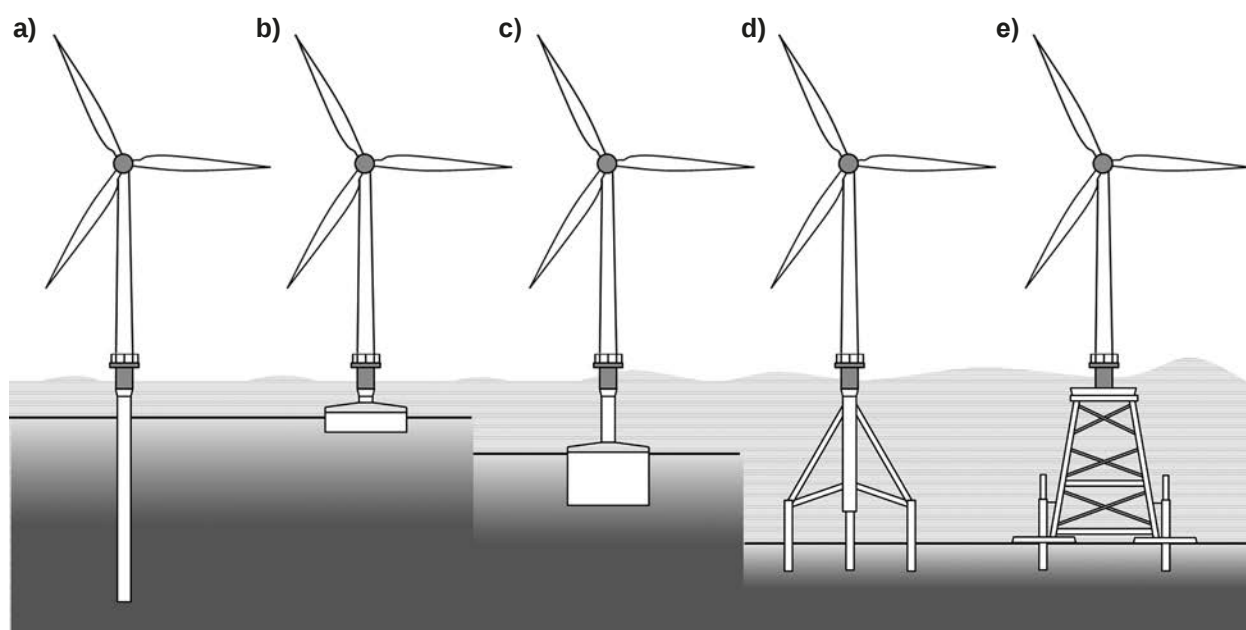
się na łądzie z betonu lub stali. Konstrukcja stalowa jest lżejsza od betonu i z tego względu jej wnętrze jest wypełniane materiałem balastowym. Koszt wykonania samych konstrukcji jest relatywnie niski, ale koszty ich transportu i instalacji wciąż są bardzo duże ze względu na skomplikowaną technologię bagrowania dna morskiego oraz konieczności wykorzystania specjalistycznych statków. Współcześnie posadowienie fundamentów grawitacyjnych odbywa się na coraz większych głębokościach wynoszących nawet około 30 m.

Posadowienie stałe na bazie fundamentu grawitacyjnego zastosowano na farmie wiatrowej Thornton Bank – etap I [23]. Jej 5-megawatowe turbiny wiatrowe zainstalowano na 60 cementowych fundamentach grawitacyjnych o masie od 2700 do 3000 t. Ich wysokość wynosi od 38,5 do 44 m, zaś średnica podstawy 23,5 m. Głębokość ich posadowienia waha się od 20 do 30 m.

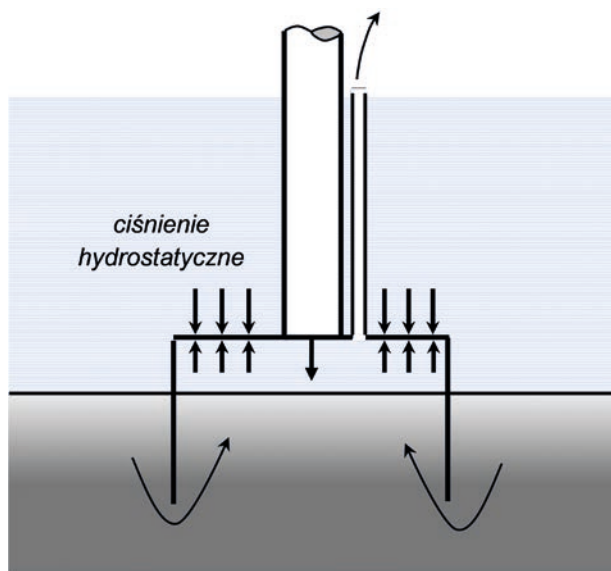
Istota kesonu zasysającego (ang. *suction caisson, suction bucket*) (rys. 5c) polega na całkowitym zatopieniu stalowego walcowego zbiornika otwartym jego spodem do powierzchni dna morskiego. Następnie z wnętrza zbiornika usuwa się wodę za pomocą sprężonego powietrza. Pojawiająca się różnica ciśnień hydrostatycznych w powiązaniu z ciężarem własnym kesonu powoduje jego wgłębienie się w dno morskie (rys. 6), zapewniając bardzo dużą stateczność całej konstrukcji. Keson zasysający jest stosowany na wodach płytkich, przy czym głębokość jego posadowienia jest nieco większa niż w przypadku monopalu i fundamentu grawitacyjnego.

W Europie posadowienie na bazie kesonu zasysającego jest dopiero w stadium planowania. Natomiast idea ta znalazła swoje zastosowanie w farmie wiatrowej usytuowanej w pobliżu Hong Kongu [7]. Na 67 kesonach zasysających o średnicy 30 m zamontowano 3-megawatowe turbiny wiatrowe o łącznej mocy 201 MW. Głębokość ich posadowienia wynosi od 26 do 28 m.

Trójnóg (ang. *tripod*) (rys. 5d) to konstrukcja, która opiera się na trzech podporach, przez co może ona być posadowiona na wodach pośrednich nawet do 50 m głębokości. W celu zapewnienia dużej stateczności, jej podpory są osadzone grawitacyjnie



Rys. 5. Rodzaje posadowienia stałego morskich turbin wiatrowych
a) pojedynczy pał (monopale); b) fundament grawitacyjny; c) keson zasysający; d) trójnóg; e) fundament kratownicowy



Rys. 6. Schemat istoty działania kesonu zasysającego

na dnie z zastosowaniem dużej masy obciążającej za pomocą pali wbijanych w dno morskie lub zastosowaniem kesonów zasysających.

Podpory trójnoga mogą być rozmieszczone symetrycznie (rys. 7a) lub asymetrycznie (rys. 7b). Istnieją również rozwiązania posadowienia konstrukcji turbiny wiatrowej na czterech podporach (rys. 7c).

Trójnogi są relatywnie bardziej skomplikowanym i pracochłonnym rodzajem posadowienia w porównaniu z poprzednimi rozwiązaniami.

Posadowienie na bazie trójnogów znalazło zastosowania w morskiej farmie wiatrowej Trianel Windpark Borkum [24]. Na nich w pierwszej fazie projektu zainstalowano 40 turbin wiatrowych o mocy 5 megawatów każda. Całkowita wysokość trójnogów o masie 700 t wynosi 45 m, zaś długości ich nóg waha się od 35 do 45 m. Głębokość ich posadowienia wynosi od 28 do 33 m.

Fundament kratownicowy (ang. *jacket*) (rys. 5e) to stalowa konstrukcja w postaci wieży kratownicowej najczęściej o przekroju kwadratowym (rzadziej o przekroju trójkąta równobocznego) oparta na kratownicy przestrzennej rozszerzanej ku dołowi. Podobnie jak w przypadku trójnoga, tego rodzaju konstrukcja jest stosowana na wodach pośrednich, osiągając podobną głębokość posadowienia. Rozległa podstawa takiej struktury

zapewnia dużą stateczność konstrukcji przy jednoczesnej znacznej oszczędności materiałów.

Posadowienie na bazie fundamentu kratowniczowego znalazło zastosowania w morskiej farmie wiatrowej Thornton Bank – etap II i III [23]. W tych etapach budowy tej farmy na fundamentach kratownicowych o masie 400 t zainstalowano 49 turbin wiatrowych o mocy 6,12 MW każda. Ich wysokość wynosi od 40 do 50 m, zaś głębokość posadowienia waha się od 12 do 28 m.

We wszystkich rozpatrywanych przypadkach pomiędzy konstrukcje posadowienia a wieżę nośną turbiny zainstalowano segment pośredni. Umożliwia on dostęp do wnętrza wieży oraz zacumowanie statków obsługujących morskie farmy wiatrowe. W niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych górna część konstrukcji posadowienia oraz podstawa wieży mają kołnierze umożliwiające ich bezpośrednie połączenie za pomocą śrub mocujących.

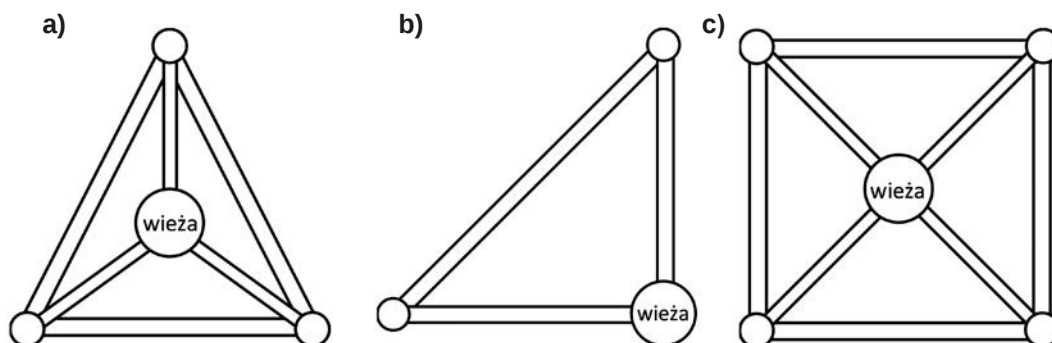
Instalacji konstrukcji na miejscu posadowienia dokonuje się za pomocą specjalnych dźwigów zainstalowanych na statkach przeznaczonych do instalacji morskich farm wiatrowych [18].

Posadowienie wypornościowe morskich turbin wiatrowych

W morskim przemyśle wydobywczym ropy naftowej i gazu platformy wiertnicze mogą być posadowione na głębokości dochodzącej do 550 m. Przykładem może być platforma *Petronius* zainstalowana w Zatoce Meksykańskiej, którą posadowiono na głębokości 535 m [19]. Natomiast posadowienie stałe morskich turbin wiatrowych ze względów ekonomicznych jest ograniczone tylko do głębokości wód pośrednich, tzn. nie przekraczających 50 m. Powyżej tej głębokości istnieje tylko możliwość posadowienia wypornościowego. Aktualnie są opracowywane projekty oraz przeprowadzane badania prototypów posadowienia wypornościowego. Większość zrealizowanych dotychczas wdrożeń ma charakter eksperymentalny i nie są one rozpowszechnione.

Ten rodzaj posadowienia morskich turbin wiatrowych na dużych głębokościach, a zatem i większej odległości od brzegu, ma swoje zalety, ale też i wady. Do najistotniejszych zalet należy zaliczyć między innymi:

- możliwość pozyskania więcej energii (większe prędkości wiatru oraz dłuższy czas jego oddziaływania),



Rys. 7. Sposoby rozmieszczania podpór posadowienia stałego morskich turbin wiatrowych

- zmniejszenie tzw. „wizualnego oddziaływania” farm wiatrowych na krajobraz,
- zmniejszenie oddziaływania na ruch statków oraz tras migracji ptaków.

Natomiast najistotniejszymi wadami tego rodzaju posadowienia są:

- bardziej kosztowne elementy składowe turbin wiatrowych,
- zwiększone koszty ich instalacji oraz eksploatacji,
- bardziej nieprzyjemne warunki pracy personelu obsługującego.

W ogólnym przypadku konstrukcja posadowienia turbiny wiatrowej składa się platformy wypornościowej oraz systemu jej zakotwiczenia do dna morskiego. Istnieje szereg alternatywnych rozwiązań konstrukcyjnych różniących się między sobą głównie kształtem oraz proporcjami wymiarów platformy wypornościowej, przy czym ich koncepcje zaczerpnięto z morskiego przemysłu wydobywczego ropy naftowej i gazu. Wyróżnia się trzy podstawowe konfiguracje geometryczne platformy wypornościowej, a mianowicie: w postaci prostopadłościanu o małej wysokości, kolumny o przekroju kołowym oraz prostopadłościanu lub walca o małej wysokości z rozmieszczonymi gwiazdździście ramionami.

Konstrukcje wypornościowe o przedstawionej konfiguracji mogą być zakotwiczone do dna morskiego za pomocą zestawu lin (łańcuchów) ze zwisem (ang. *catenary mooring system*) lub lin (łańcuchów) napiętych wstępnie (ang. *taut mooring system*).

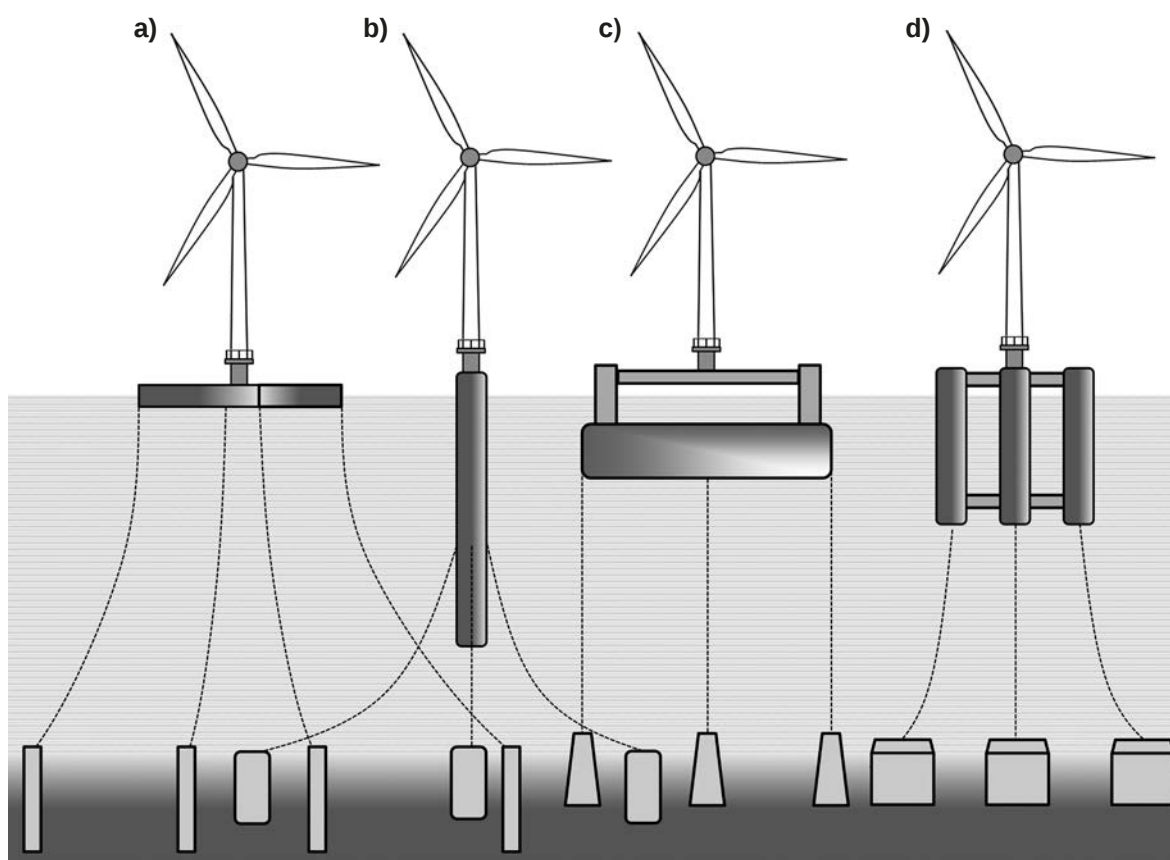
Kombinacja konfiguracji geometrycznej platformy wypornościowej oraz sposobu jej zakotwiczenia do dna morskiego pozwala wyróżnić cztery podstawowe rodzaje posadowienia wypornościowego, a mianowicie:

- platforma pontonowa (rys. 8a) – ang. *barge platform*,
- platforma kolumnowa (rys. 8b) – ang. *SPAR* – nie jest to akronim angielskiej nazwy tylko podobieństwo geometryczne do bomu okrętowego,
- platforma ciągnowa TLP (rys. 8c) – TLP - akronim angielskiej nazwy *Tension Leg Platform*,
- platforma półzanurzeniowa (rys. 8d) – ang. *semi-submersible platform*.

Wszystkie wymienione rodzaje platform osiągają dużą stateczność (a tym samym i orientację pionową) dzięki kombinacji dodatniej pływerności, systemu kotwiczenia oraz systemu balastowania.

Platforma pontonowa ma dużą stateczność wynikającą z dużego stosunku powierzchni wodnicy do objętości, co pozwala osiągać dużą jej pływerność. Wielkie i bardzo długie łańcuchy ze zwisem oraz ogromne kotwice (stalowe lub betonowe) utrzymują platformę w miejscu. Platformy pontonowe są podatne na pionowe i poziome ruchy wody i z tego względu mogą być posadowione na spokojnych akwenach morskich, takich jak zatoki lub laguny.

Platforma kolumnowa to długi walcowy zbiornik, w którym na jego dnie umiejscowiono balast. Jest to konstrukcja półzanu-



Rys. 8. Rodzaje posadowienia wypornościowego morskich turbin wiatrowych
a) platforma pontonowa; b) platforma kolumnowa; c) platforma ciągnowa TLP; d) platforma półzanurzeniowa

rzalna, w której górna część zbiornika wystaje ponad poziom wody. Na niej nadbudowany jest zespół pomostowy. Natomiast środek ciężkości całej konstrukcji (zbiornika i balastu) znajduje się poniżej środka ciężkości zbiornika, co zapewnia jej dużą stateczność pionową. Platformy kolumnowe mogą być zakotwiczone za pomocą zestawu lin ze zwisem lub napiętych wstępnie.

Platforma ciągnowa TLP to płaski zbiornik o dużej pływalności, na końcach którego w płaszczyźnie równoległej do powierzchni wody są rozmieszczone gwiazdźście trzy lub cztery ramiona. Jest to również konstrukcja półzanurzalna. Końce ramion platformy są przymocowane linami stalowymi do betonowych kotwic umieszczonych na dnie morskim, dokładnie pionowo pod platformą. Napięcie wstępne lin zanurza większą część platformy poniżej obszaru dużego oddziaływania fal, co zwiększa jej stateczność pionową.

Platformy półzanurzalne składają się z kilku dużych wypornościowych pływaków w kształcie kolumn połączonych między sobą kolumnami nośnymi. Turbina wiatrowa jest instalowana na jednej z kolumn lub środka geometrycznym płaszczyzny równoległej do powierzchni wody, tak jak to przedstawiono na rys. 7a i b w odniesieniu do posadowienia na bazie trójnogów.

Pionowe kolumny, częściowo wypełnione wodą, są zanurzone poniżej poziomu morza, co zabezpiecza platformę przed martwą falą i zapewnia jej stateczność. Ma ona system kotwiczenia za pomocą lin lub łańcuchów, zapewniający jej prawidłowe pozycjonowanie.

W raporcie Europejskiego Stowarzyszenia Energetyki Wiatrowej EWEA [3] dotyczącego stanu aktualnego i perspektyw rozwoju posadowienia wypornościowego podano, że do końca 2012 roku do sieci energetycznej przyłączono tylko 5 turbin wiatrowych, których konstrukcje miały posadowienie wypornościowe.

Jedną z nich o nazwie Hywind z prototypową turbiną o mocy 2,3 megawatów posadowiono w 2009 roku na Morzu Północnym u wybrzeży Norwegii. Jest to platforma kolumnowa, którą stanowi stalowy walec zabalastowany wodą oraz kamieniami. Powyżej poziomu wody średnica walca wynosi 6 m, natomiast jego części zanurzonej wynosi 8,3 m. Platforma ta jest zakotwiczona do dna morskiego za pomocą trzech lin ze zwisem na głębokości 200 m, zaś zanurzenie samego walca wynosi 100 m [8]. W 2016 roku planuje się zainstalowanie seryjnych turbin wiatrowych o mocy od 3 do 7 MW [3].

Drugą prototypową turbinę wiatrową Windfloat o mocy 2 MW zakotwiczono w 2011 roku na Oceanie Atlantyckim u wybrzeży Portugalii [27]. Jest to platforma półzanurzalna o trzech pionowych kolumnach zabalastowanych wodą morską. Jest ona zakotwiczona za pomocą 4 lin ze zwisem do dna morskiego na głębokości około 50 m, przy czym kolumny są zanurzone do głębokości 20 m. W 2017 roku planuje się zainstalowanie seryjnych turbin wiatrowych o mocy od 5 do 7 MW.

Pozostałe trzy turbiny wiatrowe tzn. amerykańska DeepCWind oraz japońskie Kabashima Island i Hakata Bay Wind Lens są modelami redukcyjnymi w skali o niewielkiej mocy.

Istnieje natomiast szereg projektów znajdujących się na różnych etapach rozwoju. Ich charakterystykę oraz stan zaawansowania realizacji projektu można znaleźć w [3].

Wzrost efektywności pozyskania energii z wiatru za pomocą morskich farm wiatrowych nastąpił dzięki zwiększeniu mocy turbin, które stały się większe i wyższe oraz coraz bardziej oddalone od brzegu. Lokalizacja farm jest uwarunkowana różnymi ograniczeniami wynikającymi między innymi z obowiązujących regulacji prawnych, środowiskowych i estetycznych oraz głębokości morza w miejscu ich posadowienia. Układ turbin w obrębie farmy tworzy uporządkowaną siatkę i jest funkcją średnicy ich wirników. Natomiast konstrukcje nośne turbin mogą być posadowione stale na dnie morskim lub na platformie pływającej zakotwiczonej do dna morskiego. Postać konstrukcyjna struktury nośnej oraz sposób jej posadowienia jest uwarunkowany obciążeniami wywołanymi działaniem czynników środowiskowych, głębokością morza oraz geologią dna morskiego w miejscu posadowienia.

LITERATURA

1. Ahlén I., Bach L., Baagøe H. J., Pettersson J.: Bats and offshore wind turbines studied in southern Scandinavia. <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-5571-2.pdf>
2. Brief Summary of recent International Research on the Risk to Bats from Wind Turbines. 2013. <http://windfarmaction.wordpress.com/2013/04/08/brief-summary-of-recent-international-research-on-the-risk-to-bats-from-wind-turbines>
3. Deep water. The next step for offshore wind energy. Report by the European Wind Energy Association. EWEA. July 2013. http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Deep_Water.pdf
4. Guidance Notes on Global Performance Analysis for Floating Offshore Wind Turbine Installations. American Bureau of Shipping ABS. February 2014. <http://www.eagle.org/>
5. Guide for Building and Classing Bottom-Founded Offshore Wind Turbine Installations. American Bureau of Shipping ABS. January 2013 – updated July 2014. <http://www.eagle.org/>
6. Guide for Building and Classing Floating Offshore Wind Turbine Installations. American Bureau of Shipping ABS. January 2013 – updated July 2014. <http://www.eagle.org/>
7. Hong Kong Offshore Wind Farm. <http://www.4coffshore.com/wind-farms/hong-kong-offshore-wind-farm-china-hk01.html>
8. Hywind Demo. Statoil. <http://www.statoil.com/en/TechnologyInnovation/NewEnergy/RenewablePowerProduction/Offshore/Hywind/>
9. In the wake of a wind turbine. National Oceanic and Atmospheric Administration. http://www.noaa.gov/stories/2011/20110426_wind-wakes.html
10. Konwencja Narodów Zjednoczonych o prawie morza, sporządzona w Montego Bay dnia 10 grudnia 1982 roku Dz.U. 2002 nr 59 poz. 543. <http://www.abc.com.pl/du-akt/-/akt/dz-u-02-59-543>
11. Musial W., Ram B.: Energetics Large-Scale Offshore Wind Power in the United States. Assessment of Opportunities and Barriers. National Renewable Energy Laboratory. 2010.
12. Oddziaływania wiatraków. Badania środowiskowe. Dno morskie. <http://www.oddziaływaniawiatrakow.pl/>

13. Offshore Wind Farms and the Environment Danish Experiences from Horns Rev and Nysted. Danish Energy Authority. http://193.88.185.141/Graphics/Publikationer/Havvindmoeller/Offshore_wind_farms_nov06/pdf/
14. Onshore Impacts. <http://www.wind-energy-the-facts.org/onshore-impacts.html>
15. Peterson C.: Risks to Birds and Wildlife from Offshore Wind Farms: BOEMRE NC Task Force. 2011. <http://www.boem.gov/Renewable-Energy-Program/State-Activities/RiskBirdsWildlifeOffshore.aspx>
16. Protection and Preservation of the Marine Environment. United Nations Convention on the Law of the Sea - Part XII. http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/part12.htm
17. Supporting offshore wind. London Array Offshore Wind Farm. Ballast Nedam Offshore. <http://www.bnoffshore.com/public/offshore/>
18. Tarelko W.: Installation Vessels of Offshore Wind Farms and their Take-off Systems. Journal of Polish CIMAC. Vol. 7 No 1.
19. Tarelko W.: Power Take-off Systems of Offshore Rig Power Plants. Journal of Polish CIMAC. Vol. 5 No 1.
20. Tarelko W. Morskie farmy wiatrowe: elementy konstrukcyjne turbin wiatrowych. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 4/2015.
21. Tarelko W. Morskie farmy wiatrowe: podstawy energetyki wiatrowej. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/2015.
22. The European offshore wind industry – key trends and statistics 2013. A report by the European Wind Energy Association. January 2014. http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/European_offshore_statistics_2013.pdf
23. Thornton Bank. Project Details. <http://www.4coffshore.com/wind-farms/>
24. Trianel Wind Farm Borkum. Facts and Figures. <http://www.trianel-borkum.de/en/wind-farm/facts-and-figures.html>
25. Ustawa z dnia 21 marca 1991 r. o obszarach morskich Rzeczypospolitej Polskiej i administracji morskiej. Dz.U. 1991 Nr 32 poz. 131. <http://isap.sejm.gov.pl/>
26. Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko. Dz. U. z 2008 r. Nr 199, poz. 1227 z późniejszymi poprawkami <http://isap.sejm.gov.pl/>
27. Windfloat. <http://www.principlepowerinc.com/products/windfloat.html>
28. Wlk. Brytania. Kiepski dzień morskiej energetyki wiatrowej. NetTG. pl. Portal Górniczy. 20 lutego 2014. <http://www.nettg.pl/news/118216/wlk-brytania-kiepski-dzien-morskiej-energetyki-wiatrowej>
29. Wytyczne OOS. Charakterystyka najważniejszych możliwych istotnych oddziaływań farm wiatrowych na środowisko. <http://www.oddziaływania-wiatrakow.pl/>