

Farmy wiatrowe na horyzoncie – zarys morskiej energetyki wiatrowej

Wind farms on the horizon – an outline of offshore wind energy

Małgorzata Kwestarz, Hubert Orysiak^{*)}

Słowa kluczowe: *morska farma wiatrowa, elektrownia wiatrowa offshore, typy fundamentów elektrowni wiatrowej morskiej*

Streszczenie

W artykule przedstawiono zarys technologii morskiej energetyki wiatrowej. Scharakteryzowano podstawowe elementy konstrukcyjne. Zaprezentowano dane ekonomiczne charakteryzujące koszty inwestycyjne i eksploatacyjne typowej farmy wiatrowej typu offshore.

Keywords: *offshore wind farm, types of foundations of an offshore wind farm;*

Summary

The article presents an outline of offshore wind energy technology. Basic construction elements are characterized. Economic data characterizing the investment and operation costs of a typical offshore wind farm are presented.

Wprowadzenie

W dniu 22 stycznia 2021r. Prezydent Polski podpisał tzw. „ustawę offshore” umożliwiającą budowę farm wiatrowych na morzu. Pierwsze wiatraki na Bałtyku mają stanąć już za trzy lata. Inwestycje mogą pochłonąć blisko 106 mld złotych. Według rządowych planów, morskie farmy wiatrowe mają być oddawane do użytku od 2024 do 2033 r. Każdy z wiatraków ma służyć około 25 lat. Docelowo na morzu mają działać instalacje o mocy ponad 10 GW. Przyjęcie regulacji dotyczących inwestycji offshorowych wpisuje się w główne założenia Europejskiego Zielonego Ładu, czyli programu, którego celem jest osiągnięcie przez Unię Europejską neutralności klimatycznej do 2050 r. oraz w założenia, opublikowanej przez Komisję Europejską w listopadzie 2020 r. unijnej strategii na rzecz energii z morskich źródeł odnawialnych. Zakłada ona osiągnięcie neutralności klimatycznej m. in. poprzez zwiększenie mocy morskiej energii wiatrowej z obecnego poziomu 12 GW do przynajmniej 60 GW do 2030 r. i do 300 GW do 2050 r.

Niniejszy artykuł przedstawia wyniki badań przeprowadzonych w pracy dyplomowej inżynierskiej na kierunku Inżynieria Środowiska w Państwowej Uczelni Zawodowej im. I. Mościckiego w Ciechanowie [4].

Rys historyczny – początki elektrowni wiatrowych na morzu

„Pierwsza morska farma wiatrowa Vindeby powstała w 1992 r. niedaleko wybrzeży duńskiej wyspy Lolland. Składała się z jedenastu turbin (o mocy 450kW każda), znajdujących się w odległości ok. 2 kilometrów od brzegu. W okresie 26 lat eksploatacji wyprodukowała w sumie 243 GWh energii elektrycznej. To techniczne osiągnięcie było impulsem, dzięki któremu rozpoczęto inwestycje w morskie farmy wiatrowe. Obecnie posiada je już kilkanaście europejskich krajów, na czele z Wielką Brytanią, Niemcami oraz Danią.” [8] Do „klubu offshore” dołączyły również Szwecja, Holandia. Dania

zachowała rekord wielkości farm wiatrowych pod względem mocy zainstalowanej przez 17 lat. Morska energetyka wiatrowa naprawdę nabrała rozpędu w nowym tysiącleciu i obecnie przechodzi szybką ekspansję. Jej technologia jest zbliżona do technologii farm wiatrowych na lądzie, ale istnieją istotne różnice dotyczące fundamentów, ochrony przed ekstremalnymi warunkami atmosferycznymi oraz okablowania, służącego do przesyłania energii elektrycznej [3].

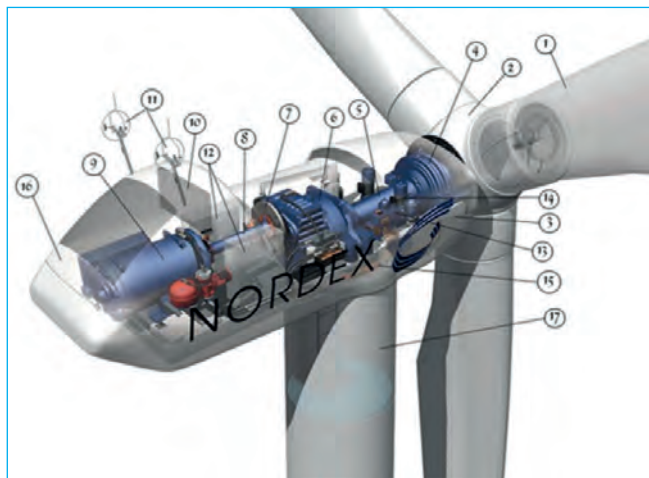
Na podstawie badań Instytutu Morskiego w Gdańsku, określone zostały obszary, które mogą zostać wykorzystane do realizacji celów morskiej energetyki wiatrowej. Odrzucone zostały tereny obejmujące: szlaki morskie, miejsca przeznaczenia na cele militarne oraz obszary pod ochroną. Całkowita powierzchnia terenów wynosi 3590 km², co odpowiada mocy elektrycznej potencjalnie możliwych do zainstalowania turbin wiatrowych na poziomie 35 GW. Mając na względzie uwarunkowania ekonomiczne, wartość ta urealniona plasuje się na poziomie 20 GW [1].

Aspekty techniczne

Farma wiatrowa to zespół turbin wiatrowych w tej samej lokalizacji, które są wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej. Farma wiatrowa może składać się od kilku do kilkudziesięciu pojedynczych turbin wiatrowych, rozmieszczonych na stosunkowo dużym obszarze.[5] Umiejscowienie farmy wiatrowej na morzu, w oddali od wybrzeża, nadaje jej status farmy wiatrowej morskiej tzw. offshore. Jej główną cechą jest to, że położenie jest z dala od zabudowań i strefy stałego przebywania ludzi a oddalenie od brzegu o około 20-25 km powoduje, że nie jest widoczna na horyzoncie. Zatem nie zaburza krajobrazu ani nie powoduje negatywnego oddziaływania na siedliska ludzkie. Instalacje te są tak konstruowane aby efektywnie wykorzystywać występujące o dużo wyższym nasileniu i energii ruchu mas powietrza, charakterystyczne dla akwenów wodnych jakimi są morza i oceany. [5]

^{*)} dr hab. inż. Małgorzata Kwestarz — Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, e-mail: malgorzata.kwestarz@pw.edu.pl

inż. Hubert Orysiak — Wydział Inżynierii i Ekonomii, Państwowa Uczelnia Zawodowa im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie



Rys. 1. Schemat gondoli elektrowni wiatrowej [10]

Fig. 1. Diagram of the nacelle of the wind power plant [10]

- | | |
|--|---|
| 1. skrzydło wirnika, | 11. elementy pomiarowe systemu pomiaru wiatru |
| 2. łopata skrzydła, | 12. układ sterowania, |
| 3. konstrukcja nośna (gondola), | 13. układ hydrauliczny |
| 4. podpora wirnika (łożysko), | 14. układ naprowadzania na wiatr, |
| 5. wał napędowy I, | 15. łożysko nośne gondoli, |
| 6. skrzynia przekładniowa | 16. pokrywa gondoli, |
| 7. tarcza hamulca, | 17. wieża stalowa |
| 8. wał napędowy II, | |
| 9. prądnica, | |
| 10. chłodnica systemu chłodzenia prądu i skrzyni przekładniowej, | |

Wykorzystanie energii wiatru polega na przekształceniu jego energii kinetycznej w inną formę energii ,tj. ruch obrotowy wału a następnie poprzez generator prądu na energię elektryczną.

Konstrukcja elektrowni wiatrowej

Elektrownie wiatrowe to autonomiczne jednostki, składające się z następujących elementów konstrukcyjnych:

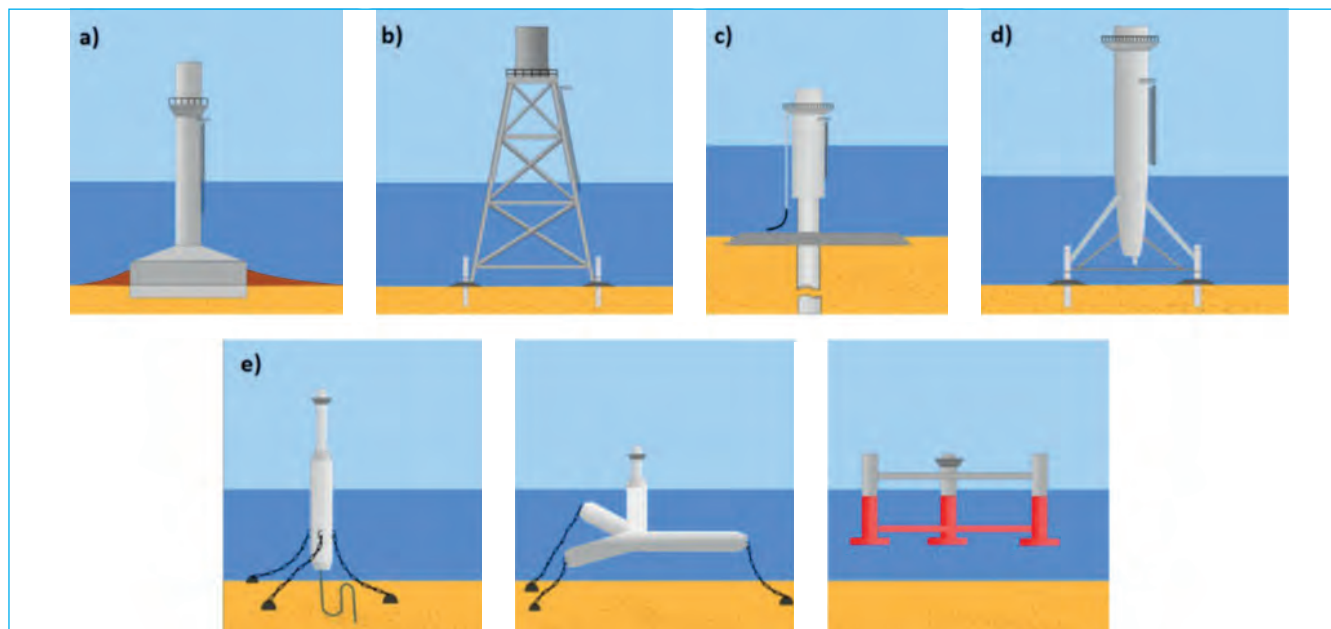
- wieży nośnej z fundamentem;
- gondoli zawierającej generator, przekładnię, łożyska, przekształtnik energoelektroniczny, transformator blokowy;

- układu sterowania, układu smarowania, układu hamowania, układu położeniem gondoli względem wiatru, układu chłodzenia;
- kabli wyprowadzających energię elektryczną;
- turbiny wiatrowej składającej się z wirnika turbiny, łopat i układu sterowania położeniem łopat względem kierunku wiatru.

Turbina wiatrowa jest to urządzenie, które wykorzystuje energię kinetyczną masy powietrza do napędu generatora energii elektrycznej. Charakterystycznym elementem są łopaty turbiny i ich kształt. [2] Na rys. 1 zamieszczono schemat gondoli elektrowni wiatrowej.

Gondola stanowi podstawowy elementem morskiej elektrowni wiatrowej, odpowiadający za proces technologiczny, tj. zamianę energii kinetycznej wiatru w energię elektryczną, poprzez ruch rotora elektrowni wiatrowej i przeniesienie napędu na generator elektryczny. Systemy produkcji energii elektrycznej wykorzystywany w morskich farmach wiatrowych (MFW) najczęściej składają się z rotora z trzema łopatami, które obracają się na piaście połączonej z generatorem prądu elektrycznego lub bezpośrednio wałem albo pośrednio za pomocą przekładni, regulującej prędkość obrotową rotora do prędkości wymaganej dla stabilnej pracy generatora. Po przekształceniu energii kinetycznej w energię elektryczną, napięcie jest dopasowywane dzięki wykorzystaniu transformatora do napięcia w wewnętrznej elektroenergetycznej sieci zbiorczej morskiej farmy wiatrowej. Całość oprzyrządowania systemu generacji energii elektrycznej poza rotorem jest umieszczona w gondoli zamocowanej na wieży. Gondola z rotorem umieszczona jest na konstrukcji wieży różnego typu, zależnych od wysokości, które sięgają do 175 m nad poziomem morza. Najczęściej spotykane budowle konstrukcyjne jakie są stosowane to stalowe i żelbetowe, prefabrykowane, które łączone są na lądzie lub bezpośrednio na morzu.[6] Aktualnie najczęściej stosowane moce generatorów elektrowni morskich wahają się od 5 MW do 9,5 MW.

Łopaty mają kształt płata, który kieruje siły wiatru na wał wolnoobrotowy turbiny. Typowa jest trójłopatkowa turbina wiatrowa o poziomej osi obrotu. Stosowane są również turbiny z dwoma łopatami. Płat zmienia przepływ powietrza powodując różnice ciśnienia nad płatem i pod nim. Różnica ciśnienia wytwarza siłę nośną, która jest siłą napędową poruszającą wirnik turbiny wiatrowej. Gdy kąt natarcia wiatru na płat (na jego krawędź tzw. ostrze) wynosi zero, wówczas siła nośna nie występuje a wirnik pozostaje w spoczynku.



Rys.2. Schemat konstrukcji wsporczych [6]

Fig. 2. Scheme of supporting structures [6]

Budowla turbiny wiatrowej (gondola, wieża) jest dostosowana do ekstremalnych warunków pogodowych występujących na morzu, tj. naporu silnego wiatru i wysokich fal w trakcie pogody sztormowej. Kształt opływowy gondoli i możliwość zmiany jej położenia względem kierunku wiatru są niezbędne w tak ekstremalnych warunkach pogodowych. W celu utrzymania całej stabilnie konstrukcji nad powierzchnią wody, stosuje się różne rozwiązania konstrukcyjne fundamentów.

Fundamenty stanowią najważniejszy element projektu i często określają rentowność finansową. Zazwyczaj koszty fundamentów wynoszą 25–34% całego kosztu projektu.

Rozwiązanie konstrukcyjne fundamentu musi uwzględniać [2]:

- łatwość instalacji w większości warunków pogodowych,
- zmienne warunki dna morskiego,
- aspekty instalacji, (np. instalacja za pomocą statków),
- wymagany sprzęt oraz lokalne przepisy dotyczące środowiska.

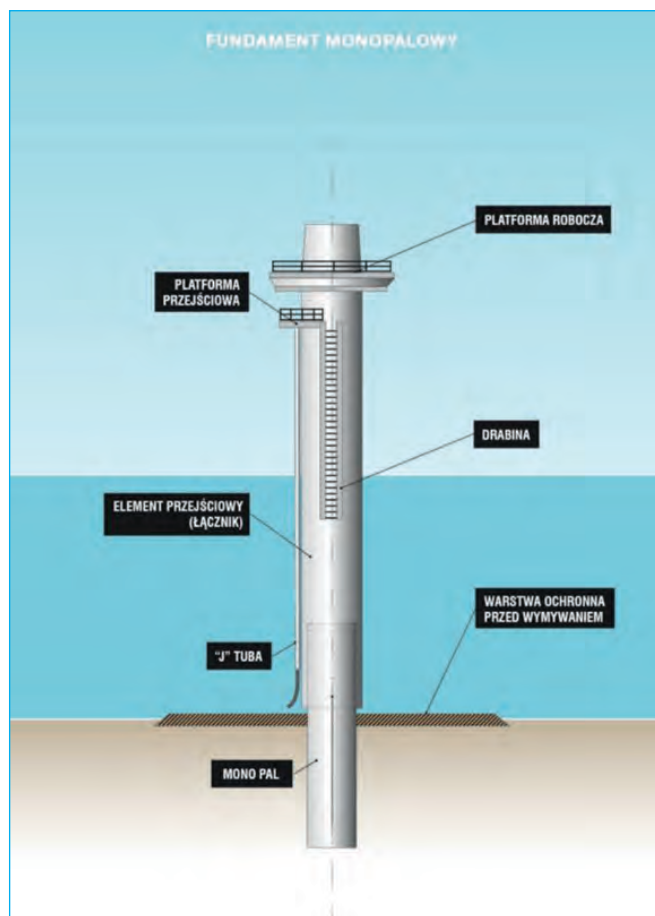
Na płytkich obszarach morza preferowanym rodzajem fundamentu są monopale. Stalowy pał jest wbijany w dno morskie, podtrzymuje on wieżę i gondolę.

W morskich farmach wiatrowych stosowane są następujące konstrukcje (rys.2) [6]:

- a) ciężka konstrukcja grawitacyjna (gravity based structure),
- b) konstrukcja kratownicowa (jacket),
- c) pał wielkośrednicowy (monopile),
- d) konstrukcja trójnożna (tripod),
- e) konstrukcje pływające.

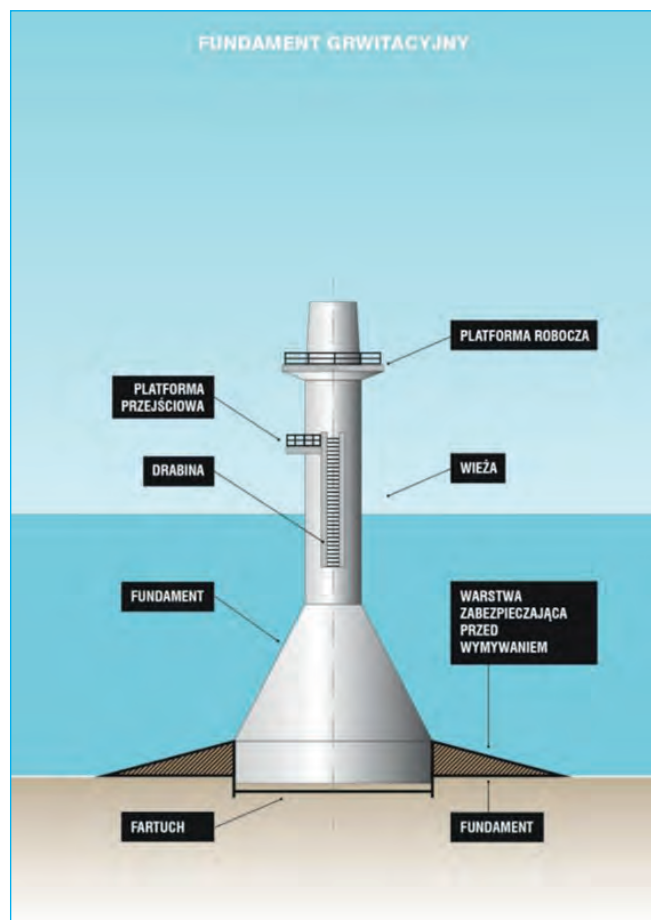
Do najczęściej stosowanych zalicza się:

- Fundament monopalowy (rys. 3) – stalowa, prefabrykowana kolumna o masie własnej liczącej do 1000 Mg, zakotwiczona maksymalnie do połowy swojej długości w dnie



Rys. 3. Fundament typu monopale [7]

Fig. 3. Monopile (single stake) foundation [7]



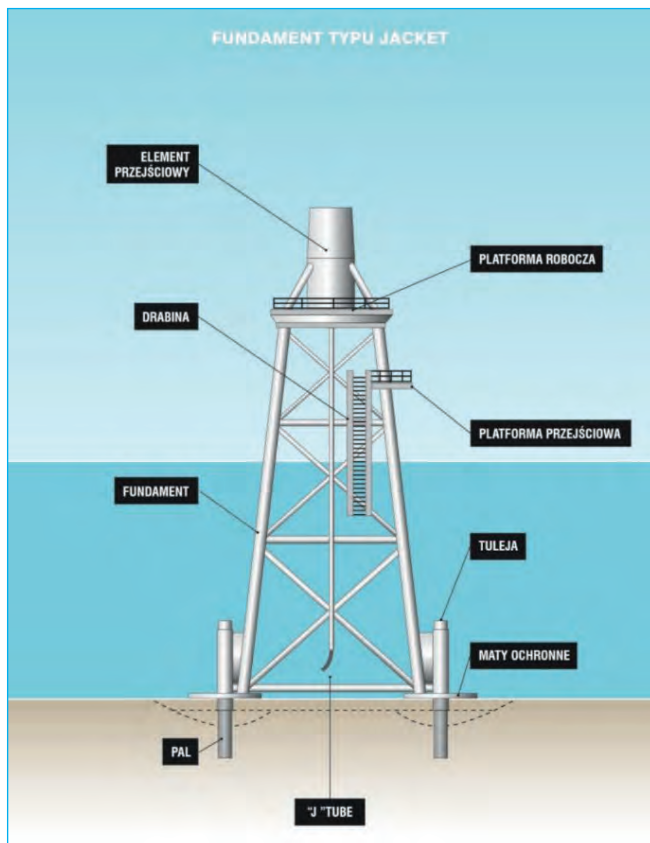
Rys. 4. Fundament typu grawitacyjnego [7]

Fig. 4. Gravity-type foundation [7]

morskie przy pomocy wytrzymałego kafara na głębokość 10–40 m. Rozwiązanie typu monopale jest uważane za najprostsze i najtańsze z rodzajów fundamentów na płytkich wodach mórz i oceanów.[6] Wnętrze konstrukcyjne na etapie montażu jest puste, a podstawa oraz głowica pozostają otwarte. „Wymiary pała wielkośrednicowego determinowane są przez wielkości: obciążeń poziomych, pionowych oraz generowanego przez nie momentu zginającego. Wpływ obciążeń poziomych i pionowych przekłada się bezpośrednio na całkowitą długość pały, która w obecnie realizowanych konstrukcjach może wynosić nawet 80 m. Bezpieczne przekazywanie bardzo dużych obciążeń na podłoże gruntowe wymaga wygenerowania odpowiedniej sztywności konstrukcji. Aby ją uzyskać, stosuje się pale o średnicach powyżej 6 m oraz grubości ścianek przekraczającej w niektórych segmentach 100 mm” [6].

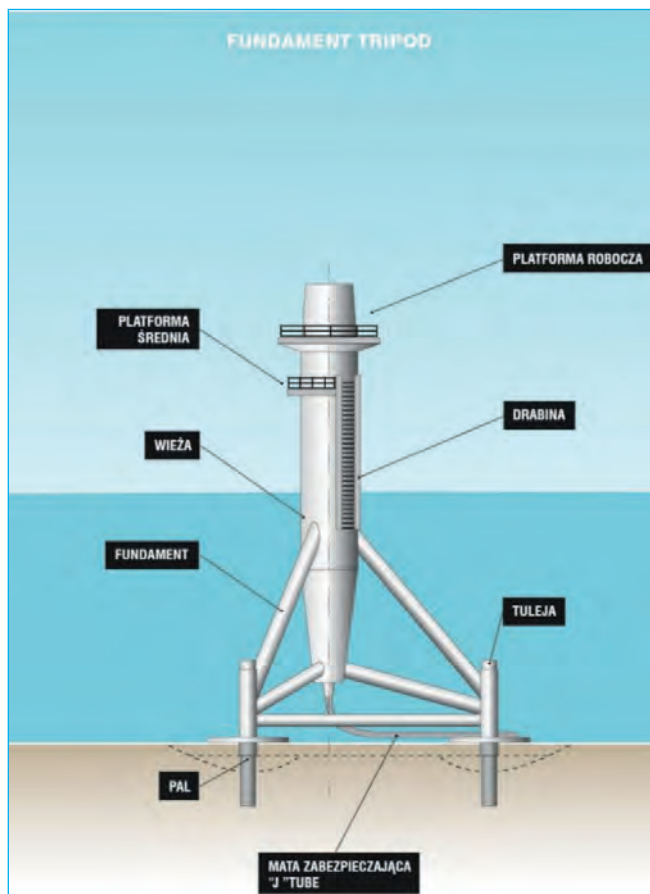
- Fundament grawitacyjny (rys. 4) jest zaprojektowany tak, aby uniknąć podnoszenia lub przewracania się konstrukcji wsporczej na dno morza. Osiąga się to przez zapewnienie odpowiedniego obciążenia własnego, aby zapewnić stabilność konstrukcji pod działaniem sił wywieranych w miejscu posadowienia [2]. Fundament grawitacyjny wykorzystuje nisko położony środek ciężkości oraz ciężar własny konstrukcji. Konstrukcja jest posadowiona bezpośrednio na dnie morskim. Wymaga wyrównania dna z przystosowaniem gruntu. Wiąże się to z wykonywaniem prac pogłębiarskich. Fundament grawitacyjny opiera się na własnym ciężarze. Wymaga on dużej powierzchni podstawy, aby nie zostać wywróconym. Fundament grawitacyjny dla dużej turbiny może ważyć ponad 1000 ton wraz z balastem i jest zwykle wykonywany ze zbrojonego betonu [7].

- Fundament o konstrukcji kratownicowej typu (jacket) (rys. 5) zbudowany jest z szeregu elementów stalowych, rurowych połączonych ze sobą krzyżowo. Najbardziej obciążonymi głównymi



Rys. 5 Fundament typu jacket [7]

Fig. 5 Jacket type foundation [7]



Rys. 6 Fundament typu tripod [7]

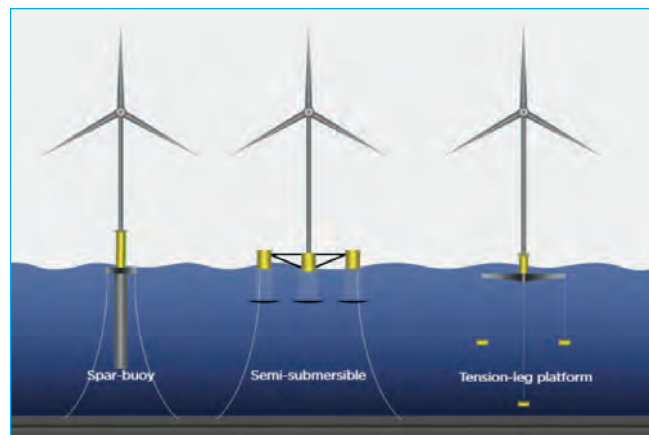
Fig. 6 Tripod type foundation [7]

elementami nośnymi kratownicy są słupy, odchylone od pionu o kilka stopni. Takie rozwiązanie umożliwia lepsze przenoszenie sił poziomych, oddziałujących na maszt wraz z gondolą i wirnikiem. Całość konstrukcji jest połączona elementami rurowymi, których średnice wynoszą około 1 m, a sama kratownica posadowiona jest w sposób pośredni na dnie akwenu morskiego. Często stosowane są również specjalne maty na dnie zapobiegające osiadaniu konstrukcji [7].

- Fundament konstrukcji trójnoga (tripod) (rys. 6) dzięki swojej budowie – podporom uzyskuje bardzo dobrą charakterystykę pracy a układ taki jest stabilny i mniej podatny na działanie momentu wywracającego, generowanego przez siły poziome [6].

Turbiny, gondole i wieże są zwykle pomalowane na kolor jasnoszary lub biały, aby wtopić się w tło nieba oraz panujący krajobraz. Dolna część wież wsporczych również pomalowana jest na jasne kolory, ale aby zwiększyć bezpieczeństwo nawigacyjne przepływających statków [5].

Obecny wzrost zainteresowania morską energią wiatrową stymuluje projektowanie i rozwój coraz większych turbin, ponad 10 MW. Korzyści skali zawsze będą wyższe w dużych elektrowniach [5], jednak wyzwania te wymagają nowych rozwiązań konstrukcyjnych. Przykładem mogą być fundamenty zaadoptowane z przemysłu wydobywczego ropy naftowej i gazu (rys. 7) [7].



Rys. 7. Rodzaje pływających fundamentów dla morskiej farmy wiatrowej [11]

Fig. 7. Types of floating foundations for an offshore wind farm [11]

- Boje typu Spar (Spar buoy)- konstrukcja o dużej stabilności zapewnionej dzięki nisko położonemu środkowi ciężkości w stosunku do środka wyporu. Praktycznie cała konstrukcja znajduje się pod powierzchnią wody (ok 90%). Platformy tego typu zakotwiczone są do dna morskiego konwencjonalnymi linami kotwicznymi. Stosowane przy głębokości powyżej 120 m [7];

- konstrukcje półzanurzone (semi-submersible) – dzięki zastosowaniu statyczności, która wynika z zastosowania zanurzonego kadłuba połączonego kratownicą z pokładem właściwym – wieżą. Zazwyczaj konstrukcje tego typu zakotwiczone są konwencjonalnym układem cumowniczym. Stosowane przy głębokości powyżej 70–80 m [7];

- platformy pionowego kotwiczenia (tension leg platform) – w skład wchodzi pływający kadłub, który jest zakotwiczony linami bądź rurami bezpośrednio do dna w zależności od projektu. Zastosowane w tej konstrukcji liny są poddawane działaniom na siły rozciągające, co powoduje dodatkową wyporność kadłuba. W przypadku wychylenia kadłuba z położenia podstawowego, wskutek działania sił hydrodynamicznych i aerodynamicznych, składowa pozioma rozciągania lin kotwicznych dąży do przemieszczenia platformy w położenie pierwotne. Stosowane przy głębokości powyżej 50 m [7].

Turbiny wiatrowe są rozmieszczone w sposób, zapewniający efektywne wykorzystanie warunków panujących na terenie instalacji. Rozmieszczenie turbin jest zaprojektowane tak, aby zminimalizować występowanie cienia aerodynamicznego pomiędzy kolejnymi rzędami wirników.

W samej farmie energia elektryczna prądu przemiennego, wytwarzana przez poszczególne turbiny, przesyłana jest za pomocą kabli podmorskich do jednej lub kilku podstacji, w celu dalszego przesłania na ląd. [3] Morskie stacje elektroenergetyczne przemiennego napięcia (AC) mają za zadanie przyłączenie kabli elektroenergetycznych przesyłających energię elektryczną, odebranie mocy wyprodukowanej przez turbiny wiatrowe na poziomie napięcia 33 lub 66 kV, zwiększenie poziomu napięcia i przesłanie jej bezpośrednio na ląd lub do kolejnej morskiej stacji elektroenergetycznej (AC lub AC/DC).

Stacja elektroenergetyczna może również pełnić również rolę centrum operacyjnego, używanego w okresie eksploatacji elektrowni. Typowa moc stacji to 150 do 350 MW. Maksymalna moc stacji jest ograniczona, zwłaszcza ze względu na masę. Standardowe wymiary stacji o mocy do 350 MW to powierzchnia 30 x 30 m oraz 15 – 20 m wysokości, waga 1000 – 1500 Mg. (rys. 8) [5].

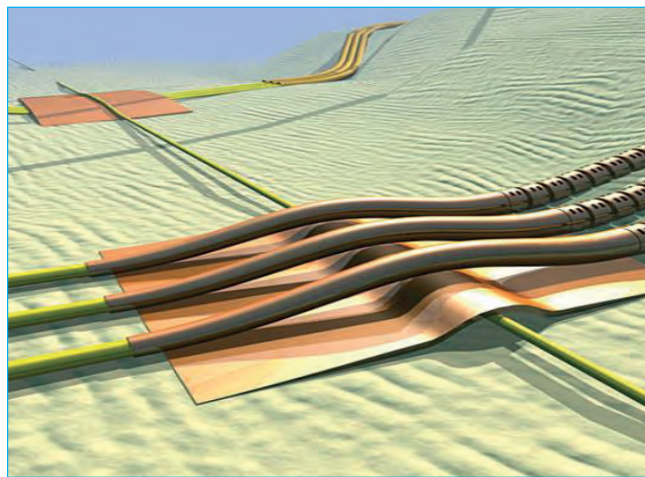
Typowe wyposażenie MSE AC składa się z następujących elementów: [5]

- centrala instalacji wewnętrznych,
- dławiki i kondensatory do kompensacji mocy biernej,
- lądowisko dla helikopterów,
- łódzie ratunkowe,
- magazyn materiałowy,
- miejsca zakwaterowania załóg serwisowych,
- oświetlenie awaryjne,
- pomieszczenia do odpoczynku i pomieszczenia socjalne,
- przystań dla łodzi,
- rozdzielnice SN i WN,
- system uziemienia,
- transformatory lub agregaty prądotwórcze do zapewnienia zasilania rezerwowego,
- transformatory mocy,
- urządzenia dystrybucji niskiego napięcia do wyposażenia pomocniczego i ochrony systemu,
- urządzenia systemu SCADA,
- warsztat.



Rys. 8. Podstacja morska dla dużej farmy wiatrowej [3]

Fig. 8. Offshore substation for a large wind farm [3]



Rys. 9. Maty zabezpieczające z tworzyw sztucznych [7]

Fig. 9. Plastic protective mats [7]

Stacja elektroenergetyczna może być wykorzystana również jako miejsce instalacji urządzeń do pomiarów i monitoringu środowiska, np. danych meteorologicznych czy informacji o falowaniu. [5]

Kable elektroenergetyczne, stosowane do podłączenia elektrowni wiatrowych na morzu, są zwykle układane na dnie morskim, gdzie są zabezpieczone przed uszkodzeniami spowodowanymi przez kotwice lub narzędzia połowowe. Do typowych systemów zabezpieczeń zalicza się [7]:

- maty zabezpieczające z tworzyw sztucznych (rys.9),
- prefabrykowane obudowy stalowe,
- prefabrykowane, betonowe obudowy lub materace, przykrywające struktury liniowe (rys. 10,11),
- przykrywanie istniejących struktur warstwą kamieni lub kamieni w workach,
- specjalne profile z tworzyw sztucznych, zapinane wokół nowo układanych kabli (rys. 12).

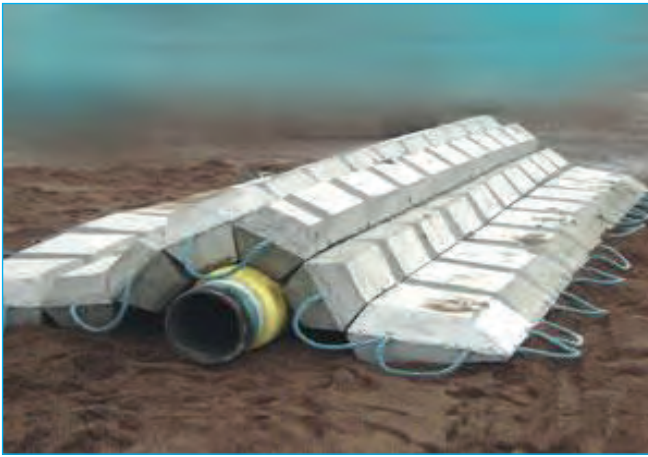
Czynniki atmosferyczne

Fale powierzchniowe na oceanach i morzach są wywoływane przez wiatr. W istocie energia fal jest kolejnym odnawialny zasobem o wielkim potencjale. Niestety fale są niepożądane w kontekście morskich turbin wiatrowych z dwóch głównych powodów: mają duży wpływ na chropowatość powierzchni i uskok wiatru oraz wywierają siły niepożądane na konstrukcje wsporcze turbin, powodując naprężenia i wibracje. [3] Morskie turbiny wiatrowe i konstrukcje



Rys. 10. Prefabrykowane obudowy do ochrony istniejących struktur liniowych [7]

Fig. 10. Prefabricated casings to protect the existing line structures [7]



Rys. 11. Elastyczny materac betonowy ułożony nad istniejącym rurociągiem [7]
 Fig. 11. Flexible concrete mattress placed over the existing pipeline [7]

wspocze są generalnie narażone na trudniejsze warunki niż ich odpowiedniki na lądzie. Wiatry są silniejsze, fale narzucają niepożądane obciążenia dynamiczne jak również intensyfikują stężenie korozyjnej mgły morskiej [5].

Rodzaje fal

- Regularne fale – o kształcie sinusoidalny lub zbliżonym do sinusoidy, są typowe dla długodystansowych fal oceanicznych.
- Nieregularne fale – niejednorodny kształt i brak im jednej dobrze określonej wysokości lub długości fali. Mogą powstawać w wyniku oddziaływania regularnych fal docierających z różnych kierunków.
- Losowe fale – typowe dla wzburzonych mórz wytwarzane przez silne i zmienne lokalne wiatry. Przypadkowe fale charakteryzują się szerokim i nieprzewidywalnym zakresem wysokości i długości fal.

W procesie projektowania należy uwzględnić siły dynamiczne wywierane przez fale oraz to, czy mogą spowodować drgania własne wieży i konstrukcji wsporczych. Rodzaj fali ma znaczenie podczas wyboru fundamentów elektrowni wiatrowej. Na wodach o głębokości powyżej 50 metrów, rozmiar i koszt sztywnych konstrukcji podwodnych wydaje się być nieuzasadniony. Obecnie stosuje się konstrukcje pływające, mobilne. Wieża wraz z gondolą i coraz częściej także wirnikiem, jest montowana blisko brzegu, odholowana w morze i zakotwiczona na dnie morskim. W razie potrzeby można skorygować położenie turbiny, a ostatecznie po wycofaniu z eksploatacji, może zostać zdemontowana praktycznie bez śladu [3].



Rys. 12. Profile z tworzyw sztucznych zapinane wokół kabli [7]
 Fig. 12. Plastic profiles fastened around the cables [7]

Faza eksploatacji morskiej elektrowni wiatrowej charakteryzuje się nieustannym ruchem statków, zapewniającym bezpośrednią obsługę serwisową urządzeń. Zadania tego typu mogą być realizowane w następujący sposób [7]:

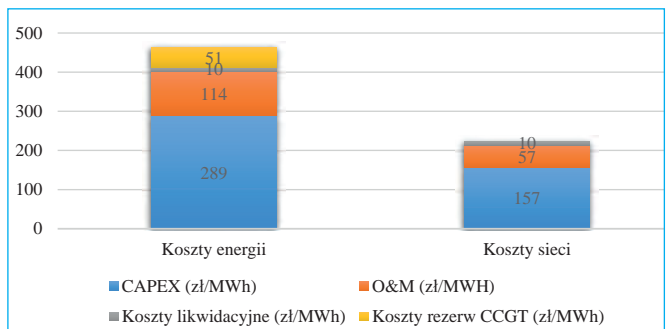
- wykorzystując morskie stacje mieszkalno-serwisowe – ruch statków małych w obrębie farmy będzie się odbywał pomiędzy stacją a poszczególnymi elektrowniami wiatrowymi. Dla zabezpieczenia funkcjonowania stacji mieszkalno-serwisowej niezbędny będzie cykliczny transport zaopatrzeniowy oraz cykliczna wymiana załogi stacji i personelu serwisowego,
- wykorzystując średniej wielkości statki jako bazy serwisowe, które pełnić będą okresowe dyżury serwisowe w obszarze MFW i odbywać cykliczne podróże do portów serwisowych, celem uzupełnienia zaopatrzenia, wymiany personelu serwisowego lub załogi,
- wykorzystując małe jednostki odbywające podróże pomiędzy portami serwisowym a obszarem MFW w dobowym cyklu pracy.

Aspekty ekonomiczne

Elektrownie lądowe charakteryzują się czasem użytkowania mocy od 500 do 1500 godzin rocznie, w porównaniu z elektrowniami na wybrzeżach jest to od 2000 do 3000 godzin rocznie. Liczba godzin pracy elektrowni wiatrowych na morzach i oceanach wynosi około 3500 godzin.[1] Morskie elektrownie wiatrowe, zlokalizowane na morzu, uzyskują do 40% energii więcej niż elektrownie wiatrowe umieszczone na lądzie. Koszt inwestycji farm wiatrowych na morzu jest większy o około 50–100% niż elektrowni umiejscowionych na lądzie. Wyższe koszty wynikają z zwiększonych nakładów na transport oraz montaż jak i koszty obsługi podczas eksploatacji [1].

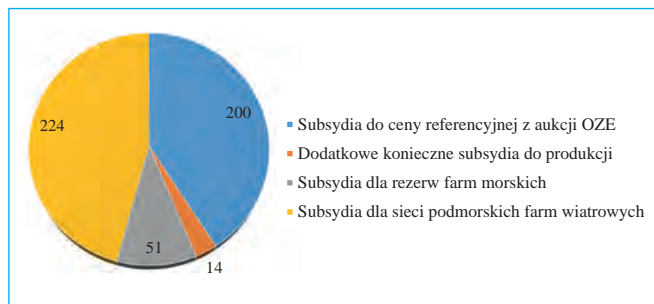
Cele krajowej energetyki wiatrowej na morzu rysują się następująco. W pierwszej fazie tj. do 2030 r. ma powstać 5900 MW. Budowa farm będzie kosztowała około 76 mld zł, tj. około 13 mld zł na każdą farmę o mocy 1 GW. Koszt budowy sieci podmorskiej jest niższy i w pierwszym etapie nie powinien przekroczyć 41 mld zł, po 7 mld zł na każdą 1 GW farmy [9].

„Koszt produkcji energii elektrycznej w wiatrowych farmach morski wynosi około 450 zł/MWh i taka jest też cena referencyjna dla tej energii na aukcjach OZE. Cenę 450 zł/MWh otrzymano przy założeniu, że właściciel farmy morskiej będzie pokrywał koszty rezerwowania jej produkcji. Jeżeli jednak koszty rezerwowania zostaną przeniesione na operatora sieci i odbiorców poprzez opłatę przesyłową, to koszt produkcji energii elektrycznej z farmy morskiej plasuje się na poziomie 400 zł/MWh.” [9]. Koszty przesyłania energii szacuje się na około 220 zł/MWh. Koszty związane z budową sieci morskiej, jak i dostarczeniem energii, ponosi operator sieci przesyłowej bezpośrednio lub pośrednio przez firmę zależną, która z kolei przeniesie opłaty na odbiorców końcowych energii elektrycznej [9]. Powyższe dane przedstawiono na rys. 13, w formie wykresu.



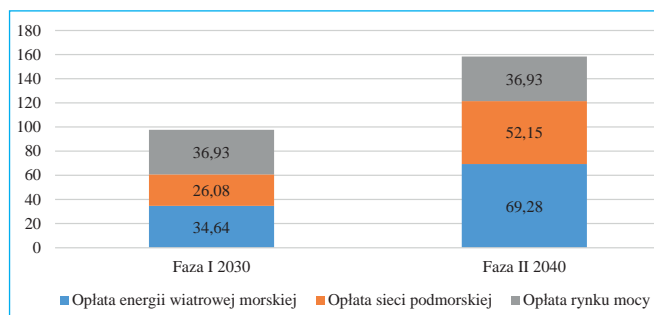
Rys. 13. Koszty energii z farm morskich i przesyłu na ląd [9]
 Fig. 13. Energy costs from offshore farms and transmission to land [9]

Należy wziąć pod uwagę, iż „farmy wiatrowe dostarczają energię elektryczną, która w innym przypadku musiałaby być kupiona na rynku konkurencyjnym za cenę około 50 euro/MWh czyli około 250 zł/MWh. Za taką cenę będzie mógł również na rynku energię sprzedąć właściciel farmy wiatrowej, a w związku z tym koszt subsydiów (dopłata do ceny referencyjnej) jest mniejsza, ponieważ do kosztów subsydiów nie liczy się ceny zakupu rynkowej energii elektrycznej. Koszty subsydiów są pokazane na rys. 14 i sięgają one niecałe 500 zł/MWh.” [9]



Rys. 14. Subsydia dla energetyki wiatrowej morskiej [9]
Fig. 14. Subsidies for offshore wind energy [9]

Wszystkie subsydia dla MFW będą przekierowane poprzez opłaty przesyłowe na odbiorców. Opłaty będą wynosić około 100 zł/MWh w pierwszym etapie do 2030 r., a następnie mogą wzrosnąć do 160 zł/MWh w kolejnym etapie (rys. 15).



Rys. 15. Dodatkowe składniki opłat dystrybucyjnej [9]
Fig. 15. Additional components of the distribution fees [9]

Składniki w opłacie przesyłowej, przenoszone na odbiorcę energii elektrycznej, to koszty: rynku mocy, budowy farm wiatrowych morskich w etapie I oraz budowa sieci przekazującej energię elektryczną z farm morskich na wybrzeże.

W tab. 1 i 2 przedstawiono dane, dotyczące kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych wiatrowych farm morskich.

Tabela 1. Koszty farm wiatrowych w okresie 25 lat eksploatacji w mln zł. [9]
Table 1. Costs of wind farms during 25 years of operation in PLN billion [9]

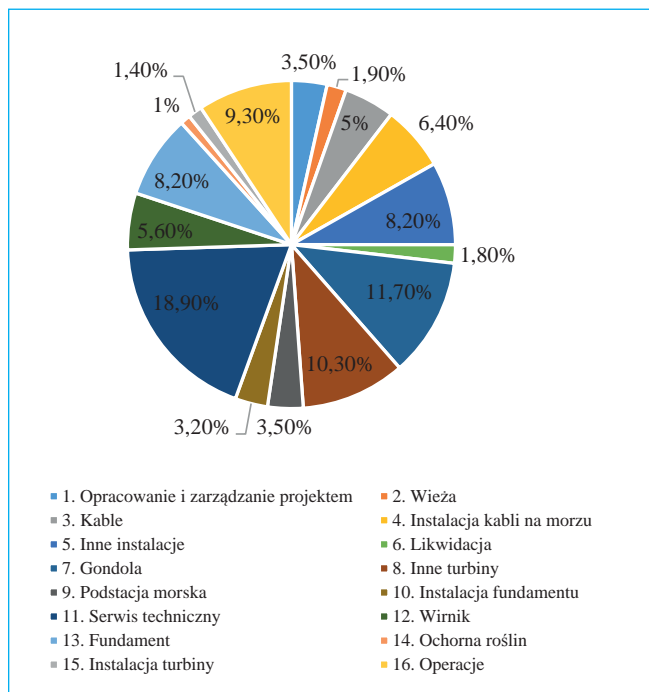
Koszt farm wiatrowych w mln zł	Faza 1 - 5900MW	Faza 2 - 11000MW
Koszt budowy farm	149168	289336
Koszt O&M farm przez 25 lat	58922	117845
Koszty likwidacji farm	5015	10030
Koszt rezerw mocy przez 25 lat	26177	52355
Całkowite koszty farm wiatrowych	239283	478565
Średnio-rocznie	9571	19143

Tabela 2. Koszty sieci przyłączeniowe w okresie 25 lat eksploatacji w mln zł. [9]
Table 2. Costs of connection networks over 25 years of operation in PLN billion [9]

Koszty sieci podmorskiej w mln zł	Faza 1 - 5900MW	Faza 2 - 11000MW
Koszty budowy sieci	68573	137147
Koszty O&M przez 25 lat	24967	49934
Koszty likwidacji sieci	4250	8500
Całkowite koszty sieci	97791	195581
Średnio-rocznie	3912	7823

Szacuje się, że koszt średnioroczny energetyki wiatrowej w: Fazie 1 do 2030 r. – około 13,5 mld zł rocznie, Fazie 2 (2030–2040 r.) – około 27 mld zł rocznie.

Na rys. 16 przedstawiono graficznie procentowy udział poszczególnych składników w koszcie morskiej farmy wiatrowej.



Rys. 16. Koszty morskiej farmy wiatrowej [12]
Fig. 16. Costs of an offshore wind farm [12]

Podsumowanie

Niniejszy artykuł ma na celu przedstawienie aspektów wykorzystywania ekologicznych źródeł energii a w szczególności energii pozyskiwanej z elektrowni wiatrowych na morzu. Stanowi on skrót z badań literaturowych zakończony prezentacją danych ekonomicznych polskiej perspektywy MFW. Technologia morskich farm wiatrowych jest technologią dojrzałą niemniej podlegająca nieustannemu rozwojowi. Perspektywa zielonego ładu, a zatem dążenia do neutralności klimatycznej, sprzyja także tej formie pozyskiwania energii elektrycznej. Zatem znamy technologię, znamy uwarunkowania ekonomiczne ale także mamy świadomość ograniczeń. Energetyka wiatrowa w obszarach tak niedostępnych dla człowieka, obciążona jest wysokim ryzykiem. Jest to m.in.:

- Ryzyko zderzeń ptaków morskich z elementami turbin wiatrowych [5],
- Hałas podwodny związany z procesem kotwiczenia i montażu fundamentów w dnie morskim [5] oddziałujący na faunę morską,
- Potencjalne zakłócenie środowiska morskiego bezpośrednio w otoczeniu farmy jak i dalszym (fauna i flora),
- Wymagana niezwykle wysoka niezawodność urządzeń ze względu na trudności i koszty dostępu, konserwacji i napraw na morzu, [3]

- Odporność materiałów na korozję i zużycie w środowisku morskim [3].

Przeciwczą są niewątpliwe atuty jakie niesie ze sobą morska energetyka wiatrowa w postaci czystej, bezemisyjnej energii, o niewyczerpalnym źródle ale także z perspektywy socjalnej: nowe miejsca pracy, rozwój przemysłowy regionów nadmorskich.

Zatem, spoglądając na horyzont na bałtyckiej plaży pamiętajmy, co się za nim ukrywa...

LITERATURA

- [1] Jastrzębska G.2017.Energia ze źródeł odnawialnych i jej wykorzystanie, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- [2] Letcher T.2017.Wind Energy Engineering A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines, Chennai India.
- [3] Lynn P.2012.Onshore and Offshore Wind Energy An Introduction, Wiley, United Kingdom.
- [4] Orysiak H. praca dyplomowa.2012.Analiza techniczno-ekonomiczna budowy morskiej farmy wiatrowej, PUZ, Ciechanów.
- [5] Rao K.R.2019. Wind Energy for Power Generation, Springer, Cham, Switzerland.
- [6] Raport o oddziaływaniu na środowisko Morskiej Farmy Wiatrowej Baltica, Instytut Morski w Gdańsku (Lider) w konsorcjum z MEWO S.A., Gdańsk listopad 2017 r.
- [7] Raport o oddziaływaniu na środowisko Tom II. Rozdział 3, Morska farma wiatrowa Bałtyk Środkowy III, SMDI Grupa Doradcza, Warszawa kwiecień 2015.
- [8] <https://biznesalert.pl/morskie-farmy-wiatrowe-offshore-onshore-ustawa-odleglosciowa-10h-psew-energetyka-oze/> [dostęp 01.01.2021r.]
- [9] <https://www.cire.pl/item,211421,13,5,20,0,356399,0,mielczarski-koszty-morskich-farm-wiatrowych.html#komentarz> [dostęp 17.02.2021 r.]
- [10] <http://www.uwm.edu.pl/kolektory/silownie/poziome.html> [dostęp 17.02.2021]
- [11] <https://www.agci.org/data/articles/wind> [dostęp 20.02.2021 r.]
- [12] https://guidetoanoffshorewindfarm.com/wind-farm-costs?fbclid=IwAR-1CBpabNO_1uK9L9oJKVYAX1DcDvpIxxgfy8oEP9Vc5-u4j7Rq2lq2xk-Ftk [dostęp 01.01.2021 r.]