



**dr hab. inż.
Paweł Flaszynski**

Kierownik Zakładu Aerodynamiki w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN. Od 25 lat zajmuje się modelowaniem przepływu w napędach lotniczych i maszynach energetycznych, ze szczególnym naciskiem na sterowanie przepływem. Laureat zespołowej Nagrody Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne osiągnięcia naukowo-techniczne w 2019 roku.
pflaszyn@imp.gda.pl

ENERGETYKA WIATROWA NA BAŁTYKU

Czyli o energetyce i przyszłości polskich farm wiatrowych na morzu.

Paweł Flaszynski

Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szewalskiego
Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku

**Karol Mitraszewski
Joanna Markowska Cerić**

PGE Baltica sp. z o.o., Warszawa

Ruch powietrza względem powierzchni Ziemi jest efektem nierównomiernego nagrzewania dużych obszarów Ziemi przez Słońce, zróżnicowanej absorpcji promieniowania słonecznego przez ląd i morze oraz rotacji kuli ziemskiej. Istniejące

obszary o różnej temperaturze i ciśnieniu powodują przepływ powietrza wzdłuż powierzchni Ziemi, który nazywamy wiatrem. Wiatr jest nośnikiem energii kinetycznej, którą ludzkość wykorzystuje do napędu urządzeń już od kilku tysięcy lat (np. łodzi żaglowych). Pierwsze informacje o wiatrakach pojawiły się w XVIII wieku p.n.e. w Kodeksie Hammurabiego, gdzie pojawiają się jako urządzenia do pompowania wody i melioracji pól.

Obecnie energia kinetyczna wiatru jest wykorzystywana jako odnawialne źródło do wytwarzania energii elektrycznej przez turbiny wiatrowe (wiatraki), które są tak projektowane, by jak najlepiej wykorzystać to naturalne źródło energii.

Zasadniczym elementem turbiny wiatrowej są łopaty, na które działa siła aerodynamiczna będąca efektem opływającego powietrza. Zasada działania jest taka sama jak w przypadku skrzydeł samolotu, łopaty wirnika helikoptera czy wspomnianych żagli jachtów. Opływające powietrze powoduje powstanie różnicy



NICOLA PULHAM/SHUTTERSTOCK.COM

ciśnien na powierzchni łopaty, co generuje siłę nośną i siłę oporu. Odpowiednie ustawienie łopaty względem kierunku wiatru generuje obrót wirnika, który przez połączenie z generatorem (bezpośrednio lub za pośrednictwem przekładni) umożliwia konwersję energii wiatru w energię elektryczną. Zespół turbin wiatrowych tworzy farmy wiatrowe, wykorzystujących zarówno wiatr na lądzie, jak i na morzu.

Dlaczego morska energetyka wiatrowa?

Powszechnie uznaje się, że zmiana klimatu jest głównym czynnikiem powodującym utratę różnorodności biologicznej. Rosnące globalne temperatury powodują degradację ekosystemów na lądzie i w morzu. Energetyka wiatrowa, w tym morska, jest przez wielu uznawana za filar niskoemisyjnego systemu elektroenergetycznego przyszłości w Europie, gdyż może pomóc w ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych związanych z działalnością człowieka i zachowaniu różnorodności biologicznej na Ziemi.

W 2009 roku przyjęto dyrektywę w sprawie odnawialnych źródeł energii, które miały stać się do 2020 roku źródłem 20 proc. całkowitej zużywanej energii. W 2018 roku Parlament Europejski przyjął zmienioną wersję dyrektywy w sprawie odnawialnych źródeł energii, ustanawiającą cel Unii Europejskiej na poziomie co najmniej 32 proc. do 2030 roku. Innym kluczowym celem jest redukcja emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 40 proc. w odniesieniu do poziomu z 1990 roku.

Największy udział w produkcji energii ze źródeł odnawialnych (niskoemisyjnych) w UE stanowi energetyka wiatrowa i prognozy wskazują, że tak pozostanie w nadchodzących dziesięcioleciach. W 2018 roku, przy mocy zainstalowanej 170 GW na lądzie i 19 GW na morzu, energetyka wiatrowa stanowiła 18,4 proc. całkowitego potencjału wytwarzania energii elektrycznej w UE. Przy założeniu, że produkcja energii ze źródeł odnawialnych może stanowić 50 proc.

całkowitej produkcji energii elektrycznej w UE do 2030 roku, energia wiatrowa (zarówno na lądzie, jak i na morzu) może stanowić 21 proc. całkowitej produkcji energii.

W grudniu 2019 roku Komisja Europejska przedstawiła komunikat w sprawie Europejskiego Zielonego Ładu. Określa on jasną wizję osiągnięcia neutralności klimatycznej i drogę dekarbonizacji systemu energetycznego do 2050 roku, podkreślając zasadniczą rolę odnawialnych źródeł energii, a w szczególności udziału morskiej energetyki wiatrowej w realizacji tych celów. Neutralność klimatyczna (zwana także neutralnością emisyjną czy węglową) oznacza zerową emisję gazów cieplarnianych netto (w tym CO₂), czyli równowagę między emisjami gazów cieplarnianych a pochłanianiem ich z atmosfery.

Żeby sprostać powyższym wymaganiom, wskaźniki instalacji w sektorze wiatrowym będą musiały znacznie wzrosnąć. Zgodnie z długoterminową strategią, będącą częścią Europejskiego Zielonego Ładu, przy założeniu najbardziej optymistycznego scenariusza, łączna moc zainstalowana na obszarach morskich Europy wzrośnie do 450 GW, z czego 85 proc. zostanie zlokalizowanych na akwenach północnych: na Atlantyku u wybrzeży Francji, Irlandii i Wielkiej Brytanii (85 GW), na Morzu Północnym (212 GW) i Morzu Bałtyckim (83 GW). Całkowita powierzchnia przeznaczona na farmy wiatrowe, by wygenerować moc 380 GW, wyniosłaby 76 tys. km² (zakładając 5 MW/km²), czyli około 2,8 proc. powierzchni akwenów północnych.

Istotnym elementem planowanej inwestycji jest lokalizacja farmy wiatrowej. Obecnie morskie farmy wiatrowe są budowane na płytkich wodach (do 60 m głębokości) z dala od wybrzeża i morskich szlaków komunikacyjnych. Według raportu WindEurope, opublikowanego w lutym 2019 roku, europejskie farmy wiatrowe są położone w średniej odległości 33 km od wybrzeża (41 km w raporcie z 2017 roku), na średniej głębokości 27,1 m. Pierwsza morska farma wiatrowa została zainstalowana w Vindeby w Danii w 1991 roku, ale krajem o największej zainstalowanej



Karol Mitraszewski

Absolwent Politechniki Warszawskiej i Duńskiego Uniwersytetu Technicznego, od 10 lat związany zawodowo i sercem z energetyką wiatrową. Specjalizuje się w pomiarach wiatru i szacowaniu produktywności farm wiatrowych. Obecnie w PGE Baltica projektuje pierwsze polskie morskie farmy wiatrowe.

karol.mitraszewski@gkpgge.pl



dr Joanna Markowska Cerić

Jest geomorfologiem. Pracuje w sektorze energetyki odnawialnej od 2009 roku, zajmuje się kwestiami związanymi z ochroną środowiska i pozyskiwaniem pozwoleń środowiskowych dla inwestycji. Od kilku lat pracuje przy projekcie morskich farm wiatrowych.

joanna.markowska-ceric@gkpgge.pl

mocy w Europie jest Wielka Brytania posiadająca łącznie 45 proc. wszystkich morskich instalacji wiatrowych (w MW). Kolejne miejsca zajmują Niemcy (34 proc.), Dania (8 proc.), Belgia (7 proc.) i Holandia (5 proc.).

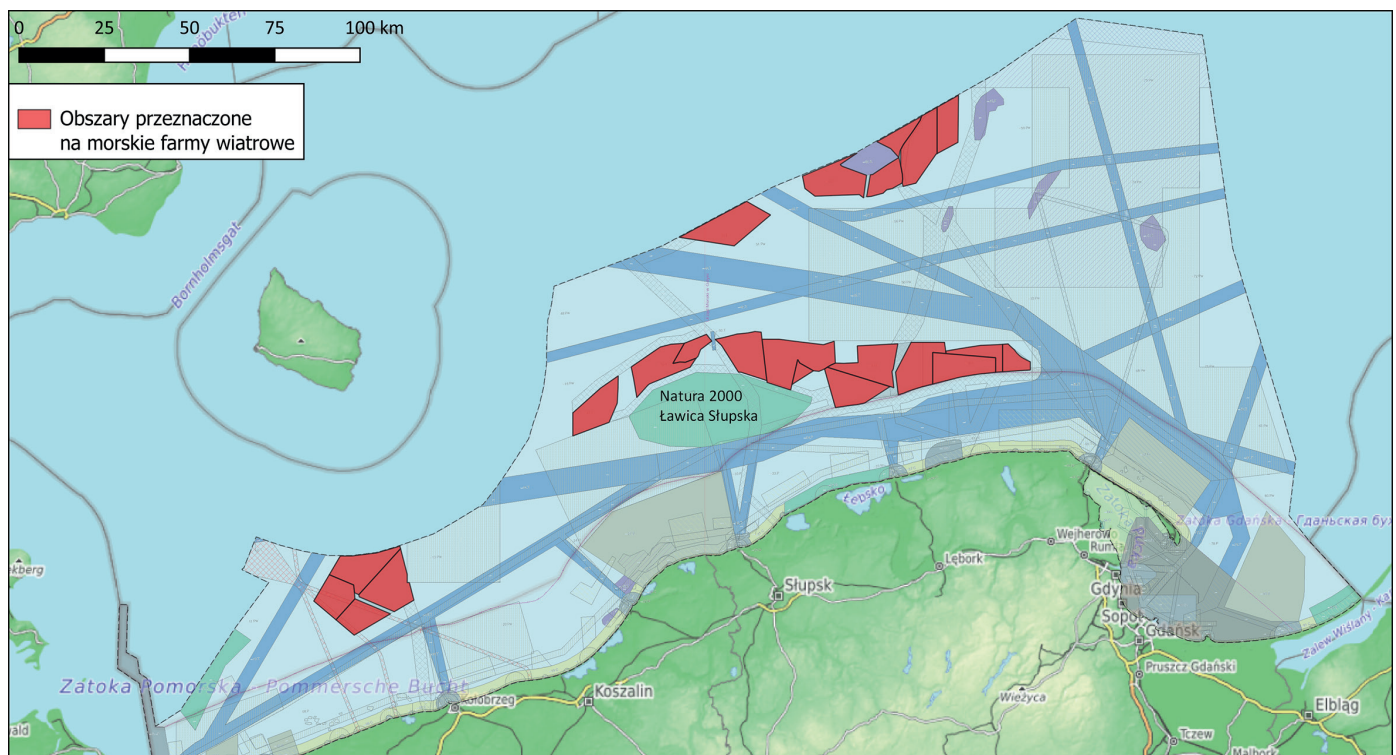
Farmy wiatrowe na polskich obszarach morskich

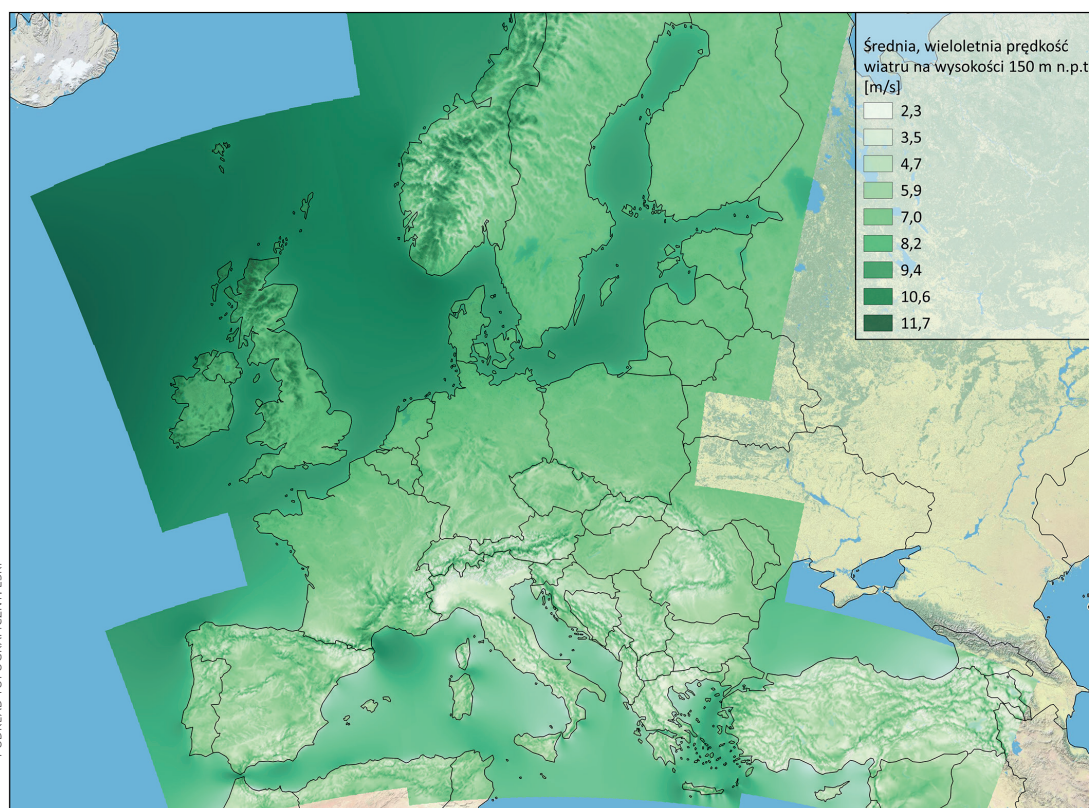
Lokalizację morskich farm wiatrowych w polskiej wyłącznej strefie ekonomicznej, na tle projektu planu zagospodarowania przestrzennego polskich obszarów morskich (PZPPOM), przedstawiono na rys. 1. Farmy są planowane na stosunkowo płytkich obszarach (20–50 m) w bezpiecznym oddaleniu od tras żeglugowych (min. 2 Mm), bez kolizji z obszarami najcenniejszymi przyrodniczo i tymi przeznaczonymi np. na cele związane z obronnością czy wydobyciem kruszyw lub węglowodorów. Powierzchnia przedstawionych poniżej obszarów to około 2245 km², co – zakładając gęstość posadowienia morskich turbin planowaną w pierwszych polskich projektach (około 8 MW/km²) – skutkuje teoretycznym potencjałem na poziomie około 18 GW. Rzeczywisty potencjał tych obszarów może być jednak mniejszy ze względu na ograniczenia wynikające z uwarunkowań środowiskowych, panujących na obszarze danej farmy i w jej sąsiedztwie. Przykładem może być konieczność wytyczenia korytarzy migracyjnych dla ptaków na obszarze farmy lub rezygnacja z zabudowy jego części w związku z wy-

stępowaniem niekorzystnych warunków geologicznych. Dlatego też według dostępnych dziś rządowych dokumentów planistycznych w polskich obszarach morskich jest planowana budowa farm wiatrowych o łącznej mocy 8–11 GW do 2040 roku. Tymczasem stowarzyszenie branżowe WindEurope we wskazanym wcześniej raporcie szacuje (w scenariuszu optymistycznym) techniczny potencjał polskiej strefy Bałtyku na 28 GW. To wymagałoby jednak wytyczenia kolejnych nowych obszarów pod rozwój morskich farm, np. we wschodniej części polskiej strefy ekonomicznej. Ze względu na większą głębokość tych obszarów ich zagospodarowanie będzie wymagać najpewniej zastosowania technologii pływających morskich turbin wiatrowych.

Na rys. 2 zamieszczono mapę przedstawiającą średnie wieloletnie prędkości wiatru w Europie na wysokości 150 m n.p.t. Brak przeszkód i rozległa, płaska powierzchnia o niskiej szorstkości nad obszarami morskimi powodują, że na ustalonej wysokości są dostępne wyższe (o mniej więcej 1,5–2,5 m/s) prędkości wiatru niż nad pobliskim lądem. To właśnie m.in. dlatego korzystne jest lokowanie farm wiatrowych na morzu. Lepsze zasoby energii wiatru czynią inwestycję racjonalną mimo bardziej skomplikowanej i droższej budowy oraz eksploatacji. Warunki wiatrowe w polskiej strefie Bałtyku, choć nie tak dobre jak na Morzu Północnym czy Irlandzkim, gdzie powstawały pierwsze morskie farmy wiatrowe, można sklasyfikować jako dobre i gwarantujące produkcję energii elektrycznej przy racjonalnych kosztach.

Rys. 1
Lokalizacja morskich farm wiatrowych w polskiej wyłącznej strefie ekonomicznej





Rys. 2
Średnie prędkości wiatru w Europie i Turcji na wysokości 150 m n.p.t.

Drugim równie istotnym i korzystnym czynnikiem jest możliwość przygotowania w ramach jednego procesu inwestycyjnego farmy wiatrowej o bardzo dużej mocy. Na morzu są realizowane instalacje o mocy rzędu 1–1,5 GW, tymczasem na lądzie to maksymalnie 100–200 MW w warunkach gęsto zaludnionego terenu.

Głównym ograniczeniem morskiej energetyki wiatrowej jest trudność w budowaniu stałych konstrukcji na głębokościach większych niż 60 m. Jednak rozwój konstrukcji w postaci pływających platform może znacznie rozszerzyć wykorzystanie zasobów wiatru na obszarach morskich. Przykładem są projekty Hywind u wybrzeży Szkocji i Windfloat u wybrzeży Portugalii. Ważnym elementem rozwoju technologii w ramach energetyki odnawialnej jest łączenie morskiej energetyki wiatrowej z innymi procesami, takimi jak produkcja wodoru lub magazynowanie energii. Dzięki czemu energetyka wiatrowa może wnieść większy wkład w systemy energetyczne.

Turbiny wiatrowe a produkcja energii

Zarówno sektor rozwoju energetyki wiatrowej na lądzie, jak i na morzu jest zdominowany przez turbiny wiatrowe o osi poziomej (HAWT – *horizontal axis wind turbine*). Chociaż istnieją także konfiguracje turbin o osi pionowej (VAWT – *vertical axis wind turbine*), to rozwój technologii materiałowych, metod projektowania i wytwarzania przyczynił się do wyraźnego wzrostu efektywności i mocy genero-

wanych przez turbiny o osi poziomej. Moc turbiny jest zależna od średnicy wirnika, czyli bezpośrednio od powierzchni, na jakiej wirnik jest w stanie przejąć energię kinetyczną wiatru i przekazać ją do generatora. Zwiększenie średnicy wirnika i wysokości turbiny umożliwia uzyskanie wyższej mocy ze względu na wyższe prędkości wiatru na większej wysokości względem poziomu morza. Efekt ten jest cechą rozkładu prędkości w atmosferycznej warstwie przyściennej. Dodatkową zaletą lokalizacji morskich farm wiatrowych jest brak zmiennych form terenu (przeszkody terenowe, obszary leśne, zabudowania) i niższy poziom fluktuacji prędkości (turbulencja) przed turbiną, dzięki czemu warunki napływu są bardziej ustabilizowane.

Obecnie największe zainstalowane turbiny morskie potrafią generować moc 9,5 MW (MHI Vestas), a średnica ich wirnika sięga 164 m, podczas gdy wierzchołek łopaty wirnika w górnym położeniu osiąga wysokość 187 m nad powierzchnią wody. Łopaty takiej turbiny są dłuższe niż rozpiętość skrzydeł samolotu Airbus A380, a wysokość całej konstrukcji razem z częścią podwodną większa niż wysokość Pałacu Kultury i Nauki w Warszawie (237 m). Wraz ze wzrostem wymiarów tych urządzeń rośnie ich średnia moc znamionowa, która w 2019 roku dla wszystkich zainstalowanych turbin wyniosła 7,8 MW, czyli o blisko 1 MW więcej niż w 2018 roku. W efekcie nieustającego rozwoju metod projektowania i wytwarzania turbin wiatrowych w 2020 roku General Electric i Siemens Gamesa przedstawiły ofertę kolejnych rozwiązań, które będą dostępne w najbliższych latach. Obie turbiny, Haliade-X (General Electric) i SG 14-222 DD



SIEMENS GAMESA

Forma 75 m łopaty Siemens B75 – fabryka w Hull

(Siemens Gamesa), wykorzystując wirniki o średnicy około 220 m, mają generować moc do 14 MW.

Produktywność morskich farm wiatrowych jest funkcją warunków wiatrowych, zastosowanej technologii turbin i ich wzajemnego ustawienia w obszarze farmy. Istotny wpływ na osiągnięte poziomy produkcji energii ma tzw. efekt śladu (cienia) aerodynamicznego (ang. *wake losses*). Turbina będąca w śladzie innej turbiny (rys. 3) stojącej od strony nawietrznej będzie produkowała wyraźnie mniej energii – w niektórych warunkach nawet o 40 proc. Ograniczenie efektów cienia (śladu) aerodynamicznego można redukować przez dobór odpowiednich odległości między turbinami w dominującym kierunku wiatru na etapie planowania inwestycji lub w oparciu o nowatorskie rozwiązania z dziedziny sterowania w trakcie eksploatacji. W związku z tym, że ślady aerodynamiczne ciągną się kilometrami za morskimi farmami efekty te powinny być wzięte pod uwagę także w trakcie strategiczne-

go planowania rozwoju sektora morskiej energetyki wiatrowej w Polsce. W przeciwnym razie założenia polityki energetycznej państwa dotyczące uzyskiwanej energii z tego źródła mogą być zbyt optymistyczne, jak to stało się w Niemczech.

W warunkach wiatrowych panujących w polskiej strefie Bałtyku współczesne turbiny wiatrowe klasy 12–14 MW będą produkować energię ze współczynnikiem wykorzystania mocy w przedziale 40–45 proc. (część teoretycznej maksymalnej mocy przy pracy non stop). Produkcja energii będzie zależeć od liczby wiatraków, jaką na danym obszarze posadowi inwestor, geometrii tego obszaru i obecności innych morskich farm w sąsiedztwie. Zakładając bardziej optymistyczny wariant (45 proc.), 11 GW mocy w morskich farmach planowanych w projekcie polityki energetycznej państwa, które mają powstać do 2040 roku u wybrzeży Polski, zaspokołyby około 25 proc. rocznego zapotrzebowania kraju w 2020 roku. Wartość ta odpowiada rocznemu zapotrzebowaniu około 17 mln polskich gospodarstw domowych. Jednak gdy te farmy powstaną w 2040 roku, zarówno średnie zużycie energii, jak i sposób funkcjonowania rynku energii ulegną bardzo istotnym zmianom spowodowanych np.: poprawą efektywności energetycznej, ruchem prosumenckim, energetyką rozproszoną, powstaniem licznych magazynów energii, cyfryzacją i związanymi z nią zmianami zachowań uczestników rynku. Dlatego powyższe szacunki mają charakter poglądowy.

Oddziaływanie na środowisko

W przypadku lokalizacji farm wiatrowych na morzu wpływ na krajobraz i oddziaływania akustyczne na etapie eksploatacji są zdecydowanie mniejsze niż na lądzie. Zgodnie z ustawą o obszarach morskich

Rys. 3
Wizualizacja śladów za turbinami na skutek kondensacji w wilgotnym powietrzu. Farma Horns Rev



CHRISTIAN STEINNESS/VATTENFALL

wznoszenie sztucznych wysp, konstrukcji i urządzeń na potrzeby wykorzystania wody, prądów morskich i wiatru w celach energetycznych jest dopuszczone jedynie w wyłącznej strefie ekonomicznej (rys. 1). Przez większość dni w roku farma będzie praktycznie niewidoczna z brzegu, jedynie przy dobrej widoczności, szczególnie w nocy (migające światła ostrzegawcze na gondolach) możliwe będzie dostrzeżenie pojedynczych turbin lub ich grupy.

W polskich obszarach morskich nie powstały dotychczas farmy wiatrowe, jednak już od kilku lat są prowadzone prace badawcze i pomiarowe w celu inwentaryzacji zasobów przyrodniczych i antropogenicznych na obszarach przeznaczonych pod morskie farmy wiatrowe wraz z infrastrukturą towarzyszącą. Będą one potrzebne do sporządzania raportów o oddziaływaniu inwestycji na środowisko i uzyskania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach.

Produkcja energii elektrycznej z wiatru nie wymaga zużycia wody ani nie wpływa na zanieczyszczenie powietrza, gleby lub wody w trakcie pracy turbiny. Jednak nieodpowiednio zlokalizowane lub zaprojektowane farmy wiatrowe mogą stanowić zagrożenie dla wrażliwych gatunków i siedlisk. Z tego powodu przed wybudowaniem morskiej farmy wiatrowej wraz z kablem eksportowym, którym będzie przesyłana moc z farmy wiatrowej, inwestorzy przeprowadzają różnorodne prace badawczo-pomiarowe w celu inwentaryzacji zasobów abiotycznych i biotycznych w miejscu posadowienia planowanej farmy wiatrowej i na trasie kablowej. W ramach komponentów abiotycznych prace obejmują: rozpoznanie budowy geologicznej obszaru (w tym: badania geofizyczne i geologiczne, pobór płytkich rdzeni i próbek z dna – również by sprawdzić, czy w danym miejscu występują zanieczyszczenia osadu dennego) oraz ukształtowania dna i zmian jego głębokości. Przeprowadzane są także pomiary hydrologiczne, w tym pomiary prędkości i kierunków prądów morskich, badane są parametry fizyczne i chemiczne wody. Ponadto prowadzone są pomiary wiatru i parametrów meteorologicznych (m.in. temperatura i wilgotność) w lokalizacji planowanej morskiej farmy wiatrowej. Jeśli chodzi o komponenty biotyczne badane są ssaki morskie, np. obecność morświnów jest rejestrowana za pomocą urządzeń zanurzonych w wodzie (CPOD). Badaniami są także objęte ryby, ptaki i nietoperze. Osobną grupę stanowią organizmy bentosowe, tj. związane z dnem morskim – fitobentos i zoobentos. Na podstawie badań określa się m.in. stopień wykorzystywania akwenu przez dany gatunek, stan siedliska i działania minimalizujące, które należy podjąć, by go zachować. Na podstawie uzyskanych wyników jest sporządzany raport o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko, a następnie jest dokonywana ocena tego wpływu. Ma ona m.in. wskazać, czy i jakie środki minimalizujące oddziaływanie przedsięwzięcia na poszczególne



WOJCIECH SULARZ

Szarytka morska podczas odpoczynku na plaży w okolicy Dębek

komponenty środowiska należy podjąć w trakcie poszczególnych etapów funkcjonowania farmy. Przykładem może być ograniczenie hałasu podwodnego generowanego podczas palowania (wbijania w dno morskie pali fundamentowych, na których będzie osadzona konstrukcja) przez np. zastosowanie kurtyn bąbelkowych. Warto zaznaczyć, że inwestorzy poza środowiskiem przyrodniczym badają także obiekty pochodzenia antropogenicznego znajdujące się na dnie, w tym obiekty stanowiące dziedzictwo kulturowe, a także sprawdzają, czy na dnie znajdują się niewybuchy pozostałe po wojnie.

Istotnym problemem związanym z planowanymi projektami morskich farm wiatrowych na południowym Bałtyku jest ocena wpływu skumulowanego projektów, tj. nakładania się oddziaływań generowanych przez poszczególne farmy. Problem ten jest istotny zwłaszcza w przypadku ptaków. Jak widać na rys. 1, w środkowej części akwenu znajduje się obszar Natura 2000 Ławica Słupska, stanowiący miejsce zimowania i żerowania ptaków morskich. Ochronie podlegają: kaczka lodówka, nurnik zwyczajny, nur rdzawoszyi i nur czarnoszyi. Zabudowanie farmami wiatrowymi północnego i północno-wschodniego stoku Ławicy Słupskiej spowoduje powstanie bariery dolotu ptaków do tego wypłycenia. Jak wskazano m.in. w prognozie do planu zagospodarowania przestrzennego, ścisła zabudowa elektrowniami wiatrowymi wykluczy część obszaru morskiego z możliwości żerowania i odpoczynku ptaków wodnych, stąd pojawia się konieczność wytyczenia niezabudowanych korytarzy w obszarze farm, które będą zapewniać ptakom bezkolizyjny przełot do obszaru Ławicy Słupskiej. Do innych oddziaływań o największym prawdopodobieństwie kumulacji zaliczono emisje hałasu na etapie budowy.

Powyższa problematyka wskazuje, jak istotną rolę stanowią badania przedrealizacyjne, by wykluczyć ryzyko pogorszenia się jakości siedlisk gatunków wrażliwych i dobrać właściwe środki minimalizujące oddziaływanie inwestycji. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

Making the most of Offshore Wind: Re-evaluating potential of offshore wind in the German North Sea, Agora Energiewende webinar 2020.

Our Energy, our Future. How offshore wind will help Europe go carbon-neutral, WindEurope 2019.

Plan zagospodarowania przestrzennego morskich wód wewnętrznych, morza terytorialnego i wyłącznej strefy ekonomicznej w skali 1:200 000, projekt z 6 listopada 2020 roku.

Polityka energetyczna Polski do 2040 r., 2020.

Prognoza oddziaływania na środowisko projektu planu zagospodarowania przestrzennego morskich wód wewnętrznych, morza terytorialnego i wyłącznej strefy ekonomicznej w skali 1:200 000, red. M. Michałek, M. Mioskowska, L. Kruk-Dowgiało, Gdańsk 2020.

Wind energy in Europe in 2018. Trends and statistics, WindEurope 2019.