INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

2023, Vol. 18(1), 205-220
e-ISSN: 2956-7971, License CC-BY 4.0

DOI: https://doi.org/10.14597/INFRAECO.2023.011

METODA IDENTYFIKACJI POTENCJALNYCH LOKALIZACJI FARM WIATROWYCH NA TERENACH WIEJSKICH

Marlena WIĄCEK[1], Mateusz MALINOWSKI[1]

METHOD OF IDENTIFYING POTENTIAL LOCATIONS FOR WIND FARMS IN RURAL AREAS

STRESZCZENIE

Transformacja energetyczna kraju wymaga zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w strukturze wytwarzania energii. W szczególności dotyczy to zwiększenia udziału energetyki wiatrowej, która już teraz pełni funkcję lidera w produkcji energii elektrycznej z OZE. Rozwój tego obszaru OZE jest nieunikniony, pomimo barier natury społecznej i prawnej. Istniejące opracowania kartograficzne wskazują obszary predysponowane jak i nieprzydatne do lokalizacji farm wiatrowych w ujęciu krajowym. Istotnym jest jednak wskazywanie potencjalnych obszarów na szczeblu lokalnym z uwzględnieniem kryteriów nie tylko przestrzennych, ale także tych, które dotyczą funkcjonalnego charakteru analizowanych obszarów. W pracy przedstawiono autorską metodę wskazywania potencjalnych lokalizacji farm wiatrowych na obszarach wiejskich, przetestowaną na przykładzie gminy Borowa (woj. podkarpackie). Analizy przeprowadzono dla 3 wariantów wysokości

[1] *Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie*

siłowni wiatrowych (do 30 m, do 50 m, do 70 m). W wariancie 1 (wiatraki o wysokości do 30 m) wyznaczono 17 lokalizacji, które łącznie stanowią 19% powierzchni gminy, w wariancie 2 wskazano 7 obszarów (9% powierzchni gminy), a wariancie 3 wyznaczono 3 lokalizacje (5% powierzchni gminy). Największa moc zainstalowaną z siłowni wiatrowych można uzyskać dla wariantu 3 (wiatraki do 70 m), pomimo najmniejszej dostępnej powierzchni.

Keywords: energetyka odnawialna, energetyka wiatrowa, GIS, AHP

ABSTRACT

The energy transformation of the country requires an increase in the share of renewable energy sources (RES) in the energy generation structure. This particularly applies to increasing the share of wind energy, which already serves as a leader in electricity production from RES. The development of this renewable energy sector is inevitable, despite social and legal barriers. Existing cartographic studies indicate areas that are predisposed and unsuitable for locating wind farms at the county level. It is important to identify potential areas at the local level, taking into account not only spatial criteria, but also those related to functional characteristics, such as rural areas. This paper presents an original method for identifying potential locations for wind farms in rural areas, tested using the example of the Borowa Commune (Podkarpackie Voivodeship). Analyses were conducted for three height variants of wind turbines (up to 30m, up to 50m, up to 70m). In Variant 1 (wind turbines up to 30m), 17 locations were identified (19% of the commune surface), in Variant 2, 7 areas were indicated (9% of the commune surface), and in Variant 3, 3 locations were identified (5% of the commune surface). The highest installed power can be achieved in Variant 3 (wind turbines up to 70m), despite the fact that the available space is the smallest.

Keywords: *renewable energy, wind power production plants, GIS, AHP*

WSTĘP

Dynamiczny rozwój rolnictwa, przemysłu i usług powoduje, że sektor energetyczny odczuwa rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną, której produkcja wciąż opiera się głównie na paliwach kopalnych. Polityka energetyczna Unii Europejskiej narzuca zminimalizowanie zużycia paliw kopanych oraz zmniejszenie negatywnego wpływu spalania tych paliw na środowisko (Summerfield-Ryan i Park, 2023; Zaik i Werle, 2023). W związku z tym poszukiwane są alternatywne i „czyste" źródła energii. Zastosowanie odnawialnych źródeł energii (OZE) to rozwiązanie, które umożliwia częściowe zastąpienie paliw kopalnych. Jak podają Łukasik i in. (2016) stosowanie OZE związane jest z osiąganiem różnych korzyści, w tym ekologicznych (zmniej-

szenie zanieczyszczenia środowiska), politycznych (zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego kraju) oraz społecznych (powstawanie nowych miejsc pracy). Zwiększenie efektywności energetycznej, wzrost przedsiębiorczości oraz konkurencyjności gospodarki, zagwarantowanie pewności dostaw energii i paliw, a także zmniejszenie negatywnego wpływu sektora energetyki na środowisko to jednocześnie najważniejsze cele polskiej polityki energetycznej (Ignarska, 2013).

Promocja OZE jest ważnym czynnikiem wzrostu gospodarczego kraju (Hektus, 2017). Ponadto udział energii pozyskanej z OZE w latach 2017-2021 wzrósł z 14,4% do 21,1%, przy czym w 2021 r. energia ta pochodziła głównie z biopaliw stałych i wiatru (Berent-Kowalska i in., 2022). Obecnie energia pozyskana z wiatru pokrywa około 16% zapotrzebowania na energię elektryczną w Europie. Szacuje się, iż do 2027 r. wiatr będzie liderem wśród wszystkich źródeł energii w Europie (Gajowiecki i in., 2022). Wiatr definiowany jest jako poziomy, bądź prawie poziomy ruch powietrza względem ziemi. Ruch ten jest wywołany ukształtowaniem terenu lub różnicą ciśnień, a jego prędkość rośnie wraz z wysokością (Hodana i in., 2012).

Energia elektryczna pozyskana z wiatru stanowi jeden z filarów krajowej transformacji energetycznej. Przy odpowiednich warunkach, pozyskanie energii w ten sposób może w całości pokryć zapotrzebowanie na energię elektryczną w Polsce. Instalacje wykorzystujące energię wiatru cechują się dynamicznym wzrostem mocy zainstalowanej, która w 2020 r. wynosiła ok. 6,35 GW. W grudniu 2021 r. dla lądowych farm wiatrowych moc ta była równa 7 GW, a w marcu 2023 r. wzrosła do 8,57 GW. Wartość ta stanowi 36% całkowitej mocy zainstalowanej OZE, która w marcu 2023 r. wynosiła 23,8 GW dla całego kraju (www.rynekelektryczny.pl). Roczna produkcja energii elektrycznej z wiatru w 2021 r. wynosiła ponad 16 tys. GWh i stanowiła ponad 50% energii elektrycznej wytworzonej ze źródeł OZE. Istotny wpływ na rozwój energetyki wiatrowej ma redukcja kosztów budowy instalacji (Olczak i Surma, 2023) i w związku z tym w ostatnich latach to właśnie energia z wiatru stanowi jedno z najtańszych źródeł energii elektrycznej (Olczak i Surma, 2023).

Przedsiębiorstwa planujące inwestycje w zakresie lądowych farm wiatrowych zmagają się z coraz większą liczbą barier (Sunak i in. 2015), wśród których należy wymienić: problemy lokalizacyjno-infrastrukturalne, prawne, techniczno-ekonomiczne, energetyczno-sieciowe, społeczne, finansowe, administracyjne, edukacyjno-informacyjne oraz przestrzenne (Gielnik i Rosicki, 2013). Szczególnie poważnymi wyzwaniami dla energetyki wiatrowej są: regulacje prawne, problemy lokalizacyjne, bariery administracyjno-proceduralne, konflikty społeczne i ekologiczne, a także problemy ze wsparciem finansowym.

W celu ograniczenia konfliktów natury społecznej i ekologicznej budowa farm wiatrowych objęta jest obowiązkiem uzyskania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach (Dz.U. 2008, nr 199, poz. 1227 z późn. zm.). Każda elektrownia wiatrowa (nawet pojedynczy maszt) o wysokości powyżej 30 metrów oraz każda farma wiatrowa o mocy ponad 100 MW na mocy Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 26 września 2019 roku w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko jest zobowiązana przejść stosowną procedurę oceny środowiskowej, odpowiednio dla pierwszego przypadku z Kartą Informacyjną o Przedsięwzięciu oraz w drugim przypadku z pełnym raportem oceny oddziaływania przedsięwzięcia na środowisko (Dz.U. 2019 poz. 1839).

W dniu 9 marca 2023 r. została opublikowana nowa regulacja dotycząca inwestycji w zakresie elektrowni wiatrowych (Dz.U. 2023, poz. 553). W przypadku lokalizowania, budowy lub przebudowy elektrowni wiatrowej odległość tej elektrowni od budynku mieszkalnego albo budynku o funkcji mieszanej jest równa lub większa od dziesięciokrotności całkowitej wysokości elektrowni wiatrowej (tzw. zasada lub regulacja 10H), chyba że plan miejscowy określa inną odległość, wyrażoną w metrach, jednak nie mniejszą niż 700 metrów (Dz.U. 2023 poz. 553). Jak podają Czyżak i in. (2021) w 2021 r. regulacja 10H wykluczała, aż 99,7% terenu Polski z możliwości zainwestowania w siłownie wiatrowe, blokując tym samym rozwój nowych projektów.

Kolejną istotną barierą dla rozwoju energetyki wiatrowej jest skala organizowanych protestów przez lokalne społeczności. Z wyników badań przeprowadzanych przez Kalbarczyk i Kalbarczyk (2018) wynika, iż konflikty te są spowodowane istnieniem tzw. „syndromu NIMBY" (Not In My Back Yard). Efekt NIMBY to powszechnie występujące nastawienie społeczeństwa, polegające na akceptacji inwestycji, lecz nie w najbliższym sąsiedztwie (Kalbarczyk i Kalbarczyk, 2018). Sprzeciw może być spowodowany obawą społeczności lokalnych związaną ze szkodliwą dla zdrowia emisją pola elektromagnetycznego lub potencjalną emisją hałasu i infradźwięków w czasie budowy oraz pracy turbin (Badora, 2011).

W celu likwidacji omówionych barier priorytetowe jest uproszczenie oraz doprecyzowanie przepisów dotyczących lokalizacji elektrowni wiatrowych. Ponadto istotnym aspektem jest edukacja i powiększanie świadomości społeczeństwa na temat pozyskiwania energii z OZE, a także odpowiednie lokalizowanie farm wiatrowych, biorąc pod uwagę minimalizowanie negatywnego wpływu na człowieka, faunę oraz krajobraz.

Obszary wiejskie są predysponowane do lokalizacji farm wiatrowych, szczególnie tam gdzie zanika typowa funkcja rolnicza tych obszarów, a rozproszenie zabudowy jest duże (Hektus, 2020). Dlatego też istotnym jest opracowanie metody identyfikacji potencjalnych i wskazywanie optymalnej lokalizacji farm wiatrowych na terenach gmin wiejskich (położonych w obszarach

o korzystnych warunkach wietrznych). Istotnym z poznawczego punktu widzenia, jest także odpowiedź na pytanie: jaki udział powierzchni gminy mógłby zostać przeznaczony pod budowę elektrowni wiatrowych oraz ile siłowni wiatrowych danego typu mogłoby zostać zlokalizowanych w gminie i jaką sumaryczną moc zainstalowaną można by uzyskać?

Celem pracy jest przedstawienie autorskiej metody identyfikacji potencjalnych lokalizacji farm wiatrowych na obszarach wiejskich oraz jej weryfikacji na przykładzie gminy Borowa położonej w województwie podkarpackim. Analizę przeprowadzono dla elektrowni wiatrowych zestawionych w 3 różnych wariantach wysokościowych (do 30, 50 i 70 metrów).

METODYKA

Podjęcie decyzji o realizacji nowego projektu inwestycyjnego z zakresu energetyki wiatrowej wymaga zawsze przeprowadzenia wnikliwej analizy przestrzennej. W analizie tej uwzględnia się maksymalnie dużo czynników (kryteriów), aby zminimalizować ryzyko niepowodzenia inwestycji (Stolińska, 2014). Pod uwagę brane są zazwyczaj aspekty środowiskowe oraz przestrzenne, czyli między innymi: odległość od zabudowy mieszkaniowej, rzek oraz korytarzy ekologicznych, a także inne kryteria (np. techniczne) takie jak: dostępność do obiektów infrastruktury (np. linii elektroenergetycznych) i strefy ochronne analizowanych obszarów (tzw. bufory). Nowością przedstawioną w tej pracy jest wykorzystanie połączonych metod analizy przestrzennej (GIS) oraz analizy wielokryterialnej (AHP) w celu wskazania potencjalnych i optymalnych lokalizacji farm wiatrowych na obszarach wiejskich.

Metoda składa się z trzech etapów i rozpatrywana jest w 3 wariantach wysokości siłowni wiatrowych. Pierwszy etap jest to analiza przestrzenna w kierunku wskazania potencjalnych lokalizacji spełniających dobrane kryteria przestrzenne. W drugim etapie, w celu dokonania hierarchizacji wytypowanych obszarów wykorzystuje się metodę AHP i kolejny zestaw kryteriów o charakterze prawnym oraz społecznym. W analizie AHP uczestniczą jedynie te obszary, których powierzchnia spełnia kryterium dostępności. W trzecim etapie obliczana jest liczba i moc siłowni wiatrowych możliwych do zainstalowania na wyznaczonych obszarach. Tak przygotowane wytyczne poddano weryfikacji na przykładzie gminy Borowa (woj. podkarpackie).

Etap I – analiza przestrzenna

W celu wyznaczenia potencjalnych lokalizacji farm wiatrowych (na podstawie przeglądu literatury oraz analizy istniejących farm) wytypowano kilkanaście warstw tematycznych, które istotnie wpływają na lokalizację siłowni wiatrowych (tab. 1). Wszystkie wybrane warstwy stanowią obszary

wykluczone z możliwości lokalizowania tam tego typu inwestycji. Dodatkowo warstwy tematyczne związane z wodami płynącymi i stojącymi objęte są 50 metrową strefą ochronną (Malinowski i in., 2018, 2021), obszary chronione nie posiadające ustawowo wyznaczonej otuliny powiększa się o strefę ochronną o szerokości 150 m. Tereny zajęte pod zabudowę mieszkalną i kompleksy zagospodarowania terenu poszerza się o 3 różne szerokości stref ochronnych (tj. 300, 500 i 700 m), które bezpośrednio wynikają z maksymalnych wysokości siłowni wiatrowych (tj. 30, 50 i 70 m). Wszystkie tereny wykluczone należy zsumować. Tereny pozostałe stanowią potencjalne lokalizacje farm wiatrowych.

Tabela 1. Wybrane warstwy wpływające na lokalizację farm wiatrowych (kryteria lokalizacyjne)

Table 1. Selected layers influencing the location of wind farms (locational criteria)

Nazwa warstwy / Layers	**Kategoria / Category**
Budynki	Budynki, budowle i urządzenia
Budowla sportowa	
Kompleks usług hotelarskich	Kompleksy zagospodarowania terenu
Kompleks handlowo -usługowy	
Kompleks komunikacyjny	
Kompleks mieszkaniowy	
Kompleks oświatowy	
Kompleks ochrony zdrowia i opieki społecznej	
Kompleks przemysłowo-gospodarczy	
Kompleks sakralny i cmentarz	
Kompleks sportowy i rekreacyjny	
Kompleks zabytkowo-historyczny	
Obiekt związany z komunikacją	Obiekty inne
Teren pod drogami kołowymi, szynowymi i lotniskowymi	Pokrycie terenu
Tereny leśne i zadrzewione	
Pozostały teren niezabudowany	
Plac	
Roślinność krzewiasta	
Roślinność trawiasta i uprawa rolna	
Uprawa trwała	
Wody powierzchniowe	
Odcinki dróg	Sieć komunikacyjna
Rzeki i strumienie, osie odcinków rzek i strumieni	Sieć wodna
Obszary Natura 2000	Tereny chronione
Rezerwat	
Korytarz ekologiczny	

Źródło / Source: Opracowanie własne / Own study

Ponieważ wśród wyznaczonych terenów mogą znajdować się obszary o zbyt małej powierzchni, z dalszej analizy usuwane są te, których areał wynosi mniej niż 2,45 ha, 3,47 ha oraz 4,91 ha odpowiednio dla wariantów z siłowniami o wysokości 30, 50 i 70 m. Minimalne powierzchnie wynikają z dwóch składowych, gdzie pierwsza to obszar, który zajmowany jest bezpośrednio pod wiatrak i jego obracające się śmigła. Druga składowa została ustalona na podstawie istniejących farm wiatrowych i jest związana z minimalnymi odległościami pomiędzy kolejnymi dwoma wiatrakami.

Etap II – hierarchizacja wyznaczonych lokalizacji

Wskazanie optymalnych lokalizacji farm wiatrowych spośród obszarów wyznaczonych w analizie przestrzennej jest złożonym problemem decyzyjnym. Do rozwiązywania problemów decyzyjnych, a także ich analiz służą techniki podejmowania decyzji w ujęciu wielokryterialnym (MCDM), spośród których najpopularniejszą jest analityczny proces hierarchiczny (AHP) (Islam i in., 2022). Metoda AHP umożliwia dekompozycję złożonego problemu decyzyjnego, a także opracowanie finalnego rankingu, który uwzględnia rozpatrywane warianty decyzyjne (Parlińska i Pietrych, 2016) wskazując rozwiązanie optymalne dla każdego z przyjętych wariantów wysokości wiatraków.

Procedura polega na przeprowadzeniu trzech iteracji, zarówno dla kryteriów, jak i wariantów decyzyjnych, czyli potencjalnych lokalizacji. Pierwsza iteracja polega na zdefiniowaniu jasnego celu problemu i określeniu hierarchii kryteriów, które na niego oddziaływają. W drugim kroku należy porównać parami wszystkie kryteria wpływające na decyzje, a w trzecim obliczyć wektor priorytetów, który wskazuje względne znaczenie danych kryteriów (Sunak i in. 2015). Na etapie porównań parami stosowana jest dziewięciostopniowa skala Saaty'ego (Becker, 2012). Porównania w skali od 1 do 9 umieszcza się w tzw. kwadratowej macierzy porównań parami (n×n) $A = [a_{ji}]$. W macierzy tej wykonuje się $n(n–1)/2$ porównań parami. Do najważniejszych wielkości pozwalających zweryfikować poprawność dokonanych ocen, za pomocą macierzy porównań, należą: lambda – λ_{max}, (wektor własny macierzy, który jest miarą zgodności porównań) oraz „C"– indeks zgodności reprezentujący konsekwentność w porównywaniu cech (Malinowski i in., 2021; Malinowski i Kidoń, 2022).

Kryteria optymalizacyjne wskazało i oceniło dziesięciu niezależnych ekspertów z branży OZE i energetyki konwencjonalnej. 16 wskazanych przez ekspertów kryteriów zgrupowano w 5 głównych, wyróżniając: społeczne, prawne, przyrodnicze, ekonomiczne oraz przestrzenne. Spośród wskazanych kryteriów wykluczono te, które pojawiły się w analizie przestrzennej (etap I). W tabeli 2 zestawiono ostateczne 5 kryteriów optymalizacyjnych, które wyko-

rzystano w analizie AHP w celu wskazania optymalnego obszaru pod lokalizację siłowni wiatrowych dla każdego z wariantów.

Eksperci porównali parami ostateczne 5 kryteriów, a następnie na podstawie wystawionych ocen przeprowadzono analizę AHP i wskazano, iż największy wpływ na wybór optymalnej lokalizacji mają odległość od sieci energetycznej oraz przeznaczenie terenu w studium lub MPZP. Największą wagę posiada kryterium główne numer 5 (37,2%) oraz kryterium główne numer 1 (35,6%). Te dwa kryteria w głównej mierze będą decydowały o ostatecznym wyborze najlepszej lokalizacji w każdym z wariantów. Udział pozostałych kryteriów w ocenie końcowej wynosił dla K2 – 16%, dla K3 - 7,2%, a dla kryterium nr 4 zaledwie 4%.

Tabela 2. Kryteria optymalizacyjne wybrane do analizy AHP w rozpatrywanym przypadku

Table 2. Optimization criteria selected for the AHP analysis in the considered case

Kryterium / Criterion	**Opis / Description**
K1	Odległość do sieci elektroenergetycznej
K2	Powierzchnia działki
K3	Odległość działki do drogi
K4	Koszty uzbrojenia działki
K5	Zgodność z zapisami studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gminy lub miejscowym planem zagospodarowania przestrzennego (MPZP)

Źródło / Source: Opracowanie własne / Own study

Etap III – liczba i moc siłowni wiatrowych

Przy planowaniu rozkładu pojedynczych turbin wiatrowych na całej farmie, ważne jest to, aby znajdowały się w odpowiedniej odległości względem siebie, tak aby wzajemnie nie zakłócać swojej pracy. Na podstawie istniejących farm wiatrowych przyjęto, że dla każdego następnego wiatraka potrzebne jest 10 ha powierzchni. Moc zainstalowana zależy od wysokości masztu. Dla wariantu 1 przyjęto, że będzie to 0,3 MW, dla wariantu 2 – 0,75 MW, a dla wariantu 3 – 1,5 MW.

Weryfikacja metody

Z bazy danych geodezyjnych Urzędu Marszałkowskiego Województwa Podkarpackiego, a także z portalu: geoportal.gov.pl pozyskano dane cyfrowe (podkłady z warstwami tematycznymi zapisanymi w formacie *.shp) do wy-

konania analizy przestrzennej obszaru gminy Borowa (etap 1) w oprogramowaniu ArcView GIS 10.2. Dla każdego z 3 wariantów wysokości wiatraków wyznaczono obszary spełniające kryteria lokalizacyjne oraz ustalono ich powierzchnię. Spośród wyznaczonych działek usunięto te, których powierzchnia była za mała do zainstalowania farmy wiatrowej.

Następnie określono przeznaczenie wyznaczonych obszarów w studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gminy, odległości od sieci elektroenergetycznej (do której realnie mogą zostać podpięte farmy wiatrowe ze względu na jej aktualne obciążenie) oraz oszacowano koszty uzbrojenia działki w niezbędną infrastrukturę. Zgodnie z zasadami postępowania AHP porównano wszystkie potencjalne lokalizacje parami i na tej podstawie opracowano listę lokalizacji rozpoczynając od optymalnej do najmniej przydatnej pod budowę farmy wiatrowej. Dla każdego z wariantów wskazano liczbę i moce zainstalowane wiatraków możliwych do zbudowania na wyznaczonych obszarach.

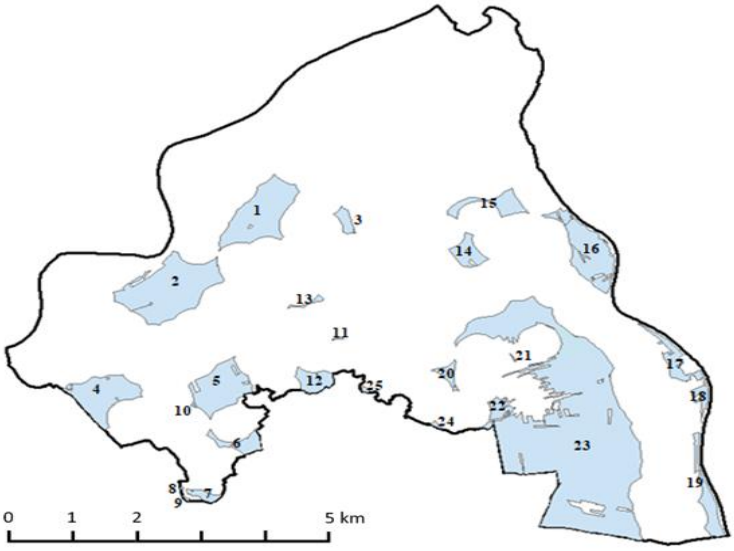
Gmina Borowa (pow. mielecki) charakteryzuje się dobrze rozwiniętą infrastrukturą techniczną, która korzystnie wpływa na rozwój społeczno-gospodarczy analizowanego terenu. Na jej terenie znajduje się oczyszczalnia ścieków, gęsta sieć wodociągowa i kanalizacyjna oraz sieć telefoniczna. Ponadto cechuje się ona korzystnymi warunkami wietrznymi (średnia roczna prędkość wiatru > 4 $m \cdot s^{-1}$, maksymalna prędkość wiatru 16 $m \cdot s^{-1}$).

WYNIKI

Na rysunkach 1, 2 i 3 przedstawiono obszary spełniające kryteria przestrzenne po przeprowadzeniu analizy w programie ArcView GIS (etap I). Dla wariantu 1, w którym przyjęto wiatraki o wysokości do 30 m wyznaczono 25 obszarów predysponowanych do powstania nowych farm wiatrowych (rys 1). Kryterium minimalnej powierzchni (2,45 ha) spowodowało, że do analizy z wykorzystaniem metody AHP pozostało tylko 17 lokalizacji. Powierzchnia największego obszaru o numerze identyfikacyjnym 23 wynosi 529,8 ha. Na takiej powierzchni może powstać farma wiatrowa składająca się z 53 wiatraków o łącznej mocy zainstalowanej 15,9 MW. Na terenie całej gminy Borowa może powstać 109 wiatraków o łącznej mocy zainstalowanej wynoszącej 32,7 MW. Całkowita powierzchnia, która może być przeznaczona pod budowę siłowni wiatrowych w gminie dla wariantu 1 wynosi 1 046,69 ha, co stanowi 18,92% powierzchni gminy.

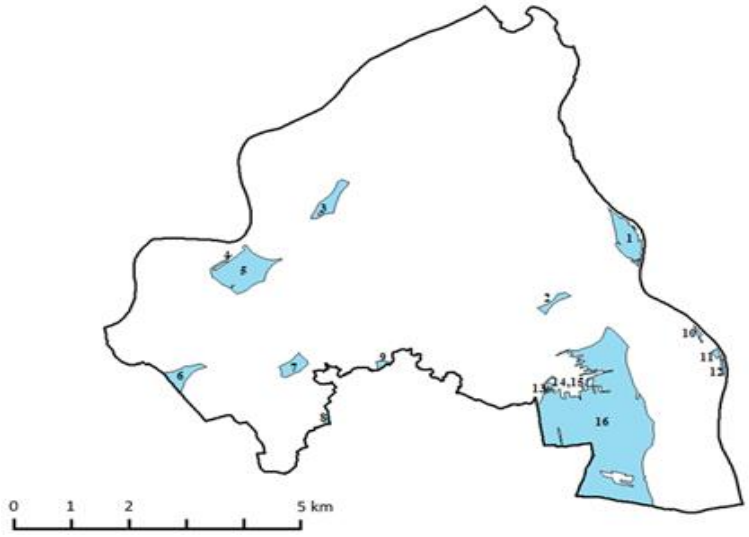
Przeprowadzenie analizy AHP w następnym kroku pozwoliło na wskazanie najkorzystniejszego (optymalnego) obszaru spośród potencjalnych lokalizacji otrzymanych z przeprowadzenia analizy przestrzennej (etap II). Najkorzystniejszą działką inwestycyjną pod powstanie nowej farmy wiatrowej, jest obszar oznaczony numerem 23. Finalna ocena tej działki wynosi 13,2%. Na

tak wysoką ocenę wpłynęła duża powierzchnia (kryterium K2) wynosząca blisko 530 ha, a także dobra dostępność do sieci elektroenergetycznej oraz niskie koszty uzbrojenia działki. Wysoką ocenę uzyskały także obszary o numerach: 1 (8,88%), 6 (7,89%), 3 (7,79%), 13 (7,71%) oraz 11 (7,68%).



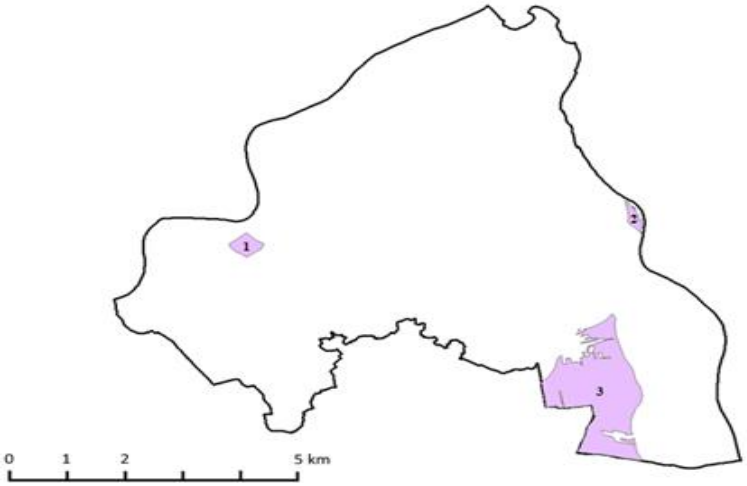
Rysunek 1. Potencjalne lokalizacje farm wiatrowych – wariant 1
Figure 1. Potential locations of wind farms - variant 1
Źródło / Source: Opracowanie własne / Own study

Dla wariantu 2, w którym planowana wysokość wiatraków wynosi 50 m, wyznaczono 16 potencjalnych obszarów pod budowę farm wiatrowych (rys. 2). Lokalizacji o powierzchni większej niż 3,47 ha jest siedem, a największa z nich zajmuje 366,91 ha (nr 16 na rys. 2), natomiast najmniejsza 5,67 ha (nr 2 na rys. 2). W wariancie tym turbiny wiatrowe cechują się mocą zainstalowaną na poziomie 0,75 MW. Na terenie gminy Borowa mogą powstać 52 takie turbiny, których moc zainstalowana będzie wynosiła 39 MW. Całkowita powierzchnia, która może być przeznaczona pod budowę siłowni wiatrowych w gminie dla wariantu 2 wynosi 496,85 ha, co stanowi 8,98% powierzchni gminy. Najkorzystniejszą działką pod farmę wiatrową jest działka nr 16. Podobnie jak w przypadku wariantu 1, na korzystność działki znacząco wpływa powierzchnia (zdecydowanie większa od pozostałych). Drugą równie korzystną działką jest lokalizacja nr 3 (23,42%).



Rysunek 2. Potencjalne lokalizacje farm wiatrowych – wariant 2
Figure 2. Potential locations of wind farms - variant 2
Źródło / Source: Opracowanie własne / Own study

Dla wariantu 3, w którym przyjęto wiatraki o wysokości do 70 m wskazano jedynie 3 potencjalne obszary do powstania farm wiatrowych (rys. 3). W wariancie tym wymagana powierzchnia dla pierwszego wiatraka wynosi min. 4,91 ha. Wszystkie otrzymane obszary spełniają ten warunek, ponieważ powierzchnia najmniejszego obszaru wynosi 8,73 ha (nr 2 na rys 3), a największego 271,03 ha (nr 3 na rys. 3). Na największej powierzchni może powstać farma, w której skład wchodzi 27 turbin wiatrowych o wysokości do 70 m. Łącznie na terenie gminy Borowa w tym wariancie może powstać 30 wiatraków. Pomimo najmniejszej ilości dostępnych obszarów otrzymano największą łączną moc zainstalowaną (45 MW). Całkowita powierzchnia, która może zostać przeznaczona pod budowę siłowni wiatrowych w gminie Borowa dla wariantu 3 wynosi 296,90 ha, co stanowi 5,37% powierzchni gminy.



Rysunek 3. Potencjalne lokalizacje farm wiatrowych – wariant 3
Figure 3. Potential locations of wind farms - variant 3
Źródło / Source: Opracowanie własne / Own study

Wykorzystanie wielokryterialnej metody AHP ponownie pozwoliło na wskazanie najkorzystniejszej działki pod budowę elektrowni wiatrowej. Znaczącą przewagą cechuje się obszar numer 3, dla której ocena finalna wynosi 65,14%. Na wynik pozytywnie wpłynęła duża powierzchnia obszaru, bliskość do dróg dojazdowych, dostępność do sieci elektroenergetycznych oraz niskie koszty uzbrojenia. Działka numer 1 również uzyskała wysoki wynik (32,62%).

Badania przeprowadzone za pomocą oprogramowania ArcView GIS 10.2 oraz wielokryterialnej metody AHP udowodniły, iż na terenie gminy Borowa występują lokalizacje predysponowane pod powstanie nowych farm wiatrowych. Tym samym wykazano przydatność przyjętego narzędzia w planowaniu tego typu inwestycji. Obie te metody uzupełniają się wzajemnie. Jak podają Malinowski i Religa (2016) oprogramowanie GIS umożliwia wskazanie potencjalnych lokalizacji również dla innych obiektów np. z zakresu gospodarowania odpadami. Zastosowanie systemów informacji geograficznej oraz procesu analizy wielokryterialnej ujawniono także w pracy Rekik i El Alimi (2023), w której wskazano istnienie potencjalnie dużych obszarów pod inwestycje z zakresu OZE w Tunezji. Badania przeprowadzone przez Islam i in. (2022) pozwoliło na wskazanie potencjalnych obszarów (3718,76 km^2) pod budowę nowych farm wiatrowych w Bangladeszu. W tym celu autorzy posłużyli się opracowaną przez siebie metodą łączącą GIS oraz AHP. Praca Sunak i in. (2015) stanowi kolejny przykład, w którym z wykorzystaniem wieloetapowego procesu decyzyjnego dla regionu Städteregion Aachen ustalono optymalne obszary dla rozwoju energetyki wiatrowej. Zaproponowana w artyku-

le metoda może być z powodzeniem stosowana przy poszukiwaniu nowych obszarów pod budowę obiektów energetyki wiatrowej na obszarach wiejskich.

WNIOSKI

Celem niniejszej pracy było przedstawienie i zweryfikowanie metody wyznaczania potencjalnych lokalizacji farm wiatrowych na terenach wiejskich. Po przeprowadzeniu analiz zgodnie z przyjętą metodyką (na terenie gminy Borowa) stwierdzono, że:

- Zaproponowana metoda pozwala na wskazanie powierzchni predysponowanych do zlokalizowania farm wiatrowych, niezależnie od przyjętego wariantu wysokości wiatraków.
- Powierzchnia predysponowanych terenów pod lokalizację farm wiatrowych dla wariantu 1 (z wiatrakami o wysokości do 30 m) stanowi blisko 19% całej powierzchni gminy Borowa (17 obszarów). W wariancie 2 (w którym siłownie wiatrowe mają wysokość do 50 m) łączna powierzchnia predysponowanych obszarów do budowy farm wiatrowych stanowi blisko 9% całej powierzchni analizowanej gminy (7 obszarów). W wariancie 3 wyznaczono jedynie 3 obszary spełniające kryteria lokalizacyjne. Obszar, który mógłby zostać przeznaczony pod budowę farm stanowi około 5% powierzchni gminy Borowa.
- Zgodnie z wykonanymi obliczeniami w wariancie 1 na terenie gminy łącznie może powstać 109 turbin wiatrowych o wysokości do 30 m i łącznej mocy zainstalowanej 32,7 MW. W przypadku wariantu 2 byłyby to 52 turbiny o wysokości 50 m o łącznej mocy 39 MW, natomiast w wariancie 3 byłoby to 30 siłowni o wysokości do 70 m, ale o największej łącznej mocy zainstalowanej (45 MW).
- Lokalizacja działek optymalnych wyznaczonych dla każdego z wariantów na podstawie przyjętych do analizy kryteriów (metoda AHP) za każdym razem wskazywała na podobny obszar położony w południowo-wschodniej części gminy Borowa.

LITERATURA

1. Badora, K. (2011). *Ocena wpływu farm wiatrowych na krajobraz- aspekty metodyczne i praktyczne.* Problemy Ekologii Krajobrazu, T. XXXI, 6-1: 23-32.
2. Becker, A. (2012). *Zastosowanie metody AHP do uszeregowania województw Polski pod względem wykorzystania technologii ICT w przedsiębiorstwach.* Folia Pomeranae Universitatis Technologiae Stetinensis. Oeconomica, 68: 17-26.

3. Berent-Kowalska, G.; Jurgaś, A.; Kacprowska, J.; Moskal, I.; Kapica, K. (2022). *Energia ze źródeł odnawialnych w 2021r.* Główny Urząd Statystyczny. Warszawa.
4. Czyżak, P.; Sikorski, M.; Wrona, A. (2021). *Wiatr w żagle. Zasada 10H a potencjał lądowej energetyki wiatrowej w Polsce.* Warszawa, Instrat Policy Note 01/2021.
5. Gajowiecki, J.; Sztuba, W.; Lasocki, K. (2022). *Polska energetyka wiatrowa 4.0.* Raport TPA Poland / Baker Tilly TPA, PSEW, DWF.
6. Gielnik, A.; Rosicki, R. (2013). *Energetyka wiatrowa w Polsce – możliwości rozwoju i zagrożenia.* Poznań.
7. Hektus, P. (2017). *Uwarunkowania przestrzenne lokalizacji elektrowni wiatrowych w Wielkopolsce*. Rozwój Regionalny i Polityka Regionalna 40: 203–213.
8. Hektus, P. (2020). *Czynniki lokalizacji elektrowni wiatrowych w Polsc*e. Poznań, Dysertacja rozprawy doktorskiej, UAM. Poznań
9. Hodana, M.; Holtzer, G.; Kalandyk, K.; Szymańska, A.; Szymański, B.; Żymankowska-Kumon, S. (2012). *Odnawialne źródła energii*. Poradnik, WFOŚiGW.
10. Ignarska, M. (2013). *Odnawialne źródła energii w Polsce.* Poliarchia 1(1): 57-72. doi: 10.12797/Poliarchia.01.2013.01.06
11. Islam, M.R.; Islam, M.R.; Imran, H.M. (2022). Assessing Wind Farm Site Suitability in Bangladesh: A GIS-AHP Approach. Sustainability, 14, 14819.
12. Kalbarczyk, E.; Kalbarczyk, R. (2018). *Społeczne bariery lokalizacji farm wiatrowych w Polsce. Studium przypadków.* Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. Nr 504, Gospodarka przestrzenna – stan obecny i wyzwania przyszłości, ISSN 1899-3192.
13. Łukasik, Z.; Kozyra, J.; Kuśmińska-Fijałkowska, A. (2016). Udział *energetyki odnawialnej w wytwarzaniu energii elektrycznej w Polsce.* Bezpieczeństwo i ekologia.
14. Malinowski, M.; Guzdek, S.; Petryk, A.; Tomaszek, K. (2021). *A GIS and AHP-based approach to determine potential locations of municipal solid waste collection points in rural areas.* Journal of Water and Land Development 51, 94-101. DOI: 10.24425/jwld.2021.139019
15. Malinowski M.; Kidoń J. (2022). *Wykorzystanie wielokryterialnej analizy AHP w planowaniu modernizacji infrastruktury drogowej na obszarach wiejskich*. W: Romaniuk W. (red.) Problemy zrównoważonego rolnictwa, odnawialnych źródeł energii, ochrony obszarów wiejskich i zasobów wodnych. Falenty. Wydawnictwo ITP. s. 177 – 184.
16. Malinowski, M.; Petryk, A.; Rybiński, J. (2018). *Wykorzystanie GIS w projektowaniu lokalizacji obiektów zagospodarowania zmieszanych odpadów komunalnych w regionie sądecko-gorlickim.* Biuletyn KPZK PAN, 272: 372-381.

17. Malinowski M.; Religa A. (2016). *Method of setting locations for Municipal Solid Waste Collection Points in protected areas*. Infrastructure and Ecology of Rural Areas. IV/3/2016: 1603-1614. doi: 10.14597/infraeco.2016.4.3.120
18. Olczak, P.; Surma, T. (2023). *Energy Productivity Potential of Offshore Wind in Poland and Cooperation with Onshore* Wind Farm. Applied Sciences, Vol. 13(7), 4258.
19. Parlińska, M.; Pietrych, Ł. (2016). *AHP jako metoda ekonomii eksperymentalnej*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Nr 4 (42): 51-59.
20. Rekik, S.; El Alimi, S. (2023). *Optimal wind-solar site selection using a GIS-AHP based approach: A case of Tunisia*. Energy Conversion and Management: X, Vol. 18.
21. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 września 2019 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz. U. 2019 poz. 1839 z późn. zm.)
22. Stolińska, B. (2014). *Czynniki lokalizacji* elektrowni *wiatrowych*. Świat Nieruchomości, 88: 28-31.
23. Summerfield-Ryan, O.; Park, S. (2023). *The power of wind: The global wind energy industry's successes and failures.* Ecological Economics, Vol. 210.
24. Sunak, Y.; Höfer, T.; Siddique, H.; Madlener, R.; De Doncker, R. W. (2015). *A GIS-based decision support system for the optimal siting of wind farm projects.* E.ON Energy Research Center Series, RWTH Aachen University, Vol. 7(2).
25. 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. 2008 nr 199 poz. 1227 z późn. zm.)
26. Ustawa z dnia 9 marca 2023 r. o zmianie ustawy o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. 2023 poz. 553)
27. www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-farm-wiatrowych-w-polsce/, dostęp on-line: 09.09.2023.
28. Zaik, K.; Werle, S. (2023). *Solar and wind energy in Poland as power sources for electrolysis process - A review of studies and experimental methodology*. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 48 (31): 11628-11639.

Autor korespondencyjny: dr inż. Mateusz Malinowski, prof. URK
e-mail: mateusz.malinowski@urk.edu.pl
ORCID: 0000-0003-1364-1256

mgr inż. Marlena Wiącek
e-mail: marlena.a.wiacek@gmail.com

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki
ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków
tel: +48 (12) 662 46 60

Otrzymano: 19.09.2023 r.
Zwrócono po recenzji: 19.12.2023 r.
Zaakceptowano: 28.12.2023 r.