

Łukasz KOLENDO

REGIONALNA ANALIZA PRZYDATNOŚCI TERENÓW DO ROZWOJU ENERGETYKI WIATROWEJ W ŚWIETLE WYBRANYCH UWARUNKOWAŃ

Łukasz Kolendo, mgr inż. – Politechnika Białostocka

adres korespondencyjny:

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Katedra Geoinformacji i Gospodarki Przestrzennej

ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok

e-mail: l.kolendo@pb.edu.pl

THE REGIONAL-SCALE SUITABILITY ANALYSIS FOR WIND ENERGY DEVELOPMENT IN LIGHT OF SELECTED CONDITIONS

SUMMARY: The localization of wind energy objects in different parts of Poland has seen a significant increase in interest from foreign and local investors. Among these areas, the Podlaskie province is characterised by advantageous wind conditions and a noticeable reservoir of areas predisposed to wind energy development. Predisposed areas may be considered as useful, nevertheless in the context of several conditions, some of these areas could be characterised by higher suitability for performing a certain role in space. The paper proposes an approach for regional-scale assessment of wind energy development potential considering wide range of conditions.

KEYWORDS: GIS, wind energy, multi-criteria decision support

Wstęp

Zarówno globalna produkcja, jak również zużycie energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych, wykazuje tendencję rosnącą wynikającą z obecności silnych bodźców o charakterze polityczno-ekonomicznym¹. Po wstąpieniu Polski do struktur Unii Europejskiej można zaobserwować zwyżkujący poziom zainwestowania krajowego i zagranicznego kapitału w sektorze energetyki wiatrowej². Niemniej jednak kolizyjny charakter z otoczeniem powoduje, iż turbiny wiatrowe nie mogą być posadowione w lokalizacjach przypadkowych³, co generuje potrzebę prowadzenia ciągłych badań w tym zakresie.

Jednym z powszechnie stosowanych rozwiązań w tym obszarze jest implementacja nowoczesnych narzędzi informatycznych w ramach dynamicznie rozwijającej się dziedziny, określanej współcześnie mianem Teorii i Technologii Informacji Geograficznej (ang. *Geographic Information Science and Technology, GIS&T*)⁴. Z uwagi na interdyscyplinarny charakter omawianej tematyki częstą praktyką jest sprzężenie technologii GIS z metodami wielokryterialnego wspomaganie decyzji. O popularności tego typu rozwiązań świadczą liczne publikacje krajowe⁵ i zagraniczne⁶ związane z tematyką optymalnej lokalizacji obiektów energetyki wiatrowej.

W ramach niniejszej pracy zaproponowano podejście metodyczne pozwalające na ocenę stopnia przydatności terenów predysponowanych do rozwoju energetyki wiatrowej w świetle szerokiego spektrum uwarunkowań. Co ważne, uzyskane wyniki skonfrontowano z obecnymi lokalizacjami turbin wiatrowych.

¹ B. Bożętka, *Pozyskiwanie energii wietrznej a zmiany krajobrazu. Konsekwencje dla funkcji rekreacyjnej*, „Krajobrazy rekreacyjne – kształtowanie, wykorzystanie, transformacja. Problemy Ekologii Krajobrazu” 2010 t. XXVII, s. 49.

² M. Kistowski, *Propozycja metodyczna oceny środowiskowych uwarunkowań lokalizacji farm wiatrowych w skali regionalnej*, „Przegląd Geograficzny” 2012 nr 84(1), s. 5.

³ J. Swofford, M. Slattery, *Public attitudes of wind energy in Texas: Local communities in close proximity to wind farms and their effect on decision-making*, “Energy Policy” 2010 t. 38, s. 2508-2519.

⁴ J. Kozak, Jerzy Bański: *Jaka geografia? – uwarunkowania i spojrzenie w przyszłość: głos w dyskusji*, „Przegląd Geograficzny” 2013 nr 85(3), s. 456.

⁵ W. Synowiec, M. Luc, *Wielokryterialna ocena przydatności terenu do rozwoju energetyki wiatrowej na przykładzie gminy Rymanów*, „Przegląd Geograficzny” 2013 nr 85(3), s. 323-352; M. Szurek, J. Błachowski, A. Nowacka, *GIS-based method for wind farm location multi-criteria analysis*, “Mining Science” 2014 nr 21, s. 65-81.

⁶ J.R. Janke, *Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado*, “Renewable Energy” 2010 t. 35, s. 2228-2234.

Obszar opracowania

Prezentowane w pracy studium przypadku dotyczy terenów województwa podlaskiego, położonego w północno-wschodniej części Polski. Wczesniejsze badania autora⁷ wskazują, iż województwo podlaskie cechuje się znaczącym rezerwuarem terenów, które potencjalnie mogą stanowić zaplecze funkcjonowania obiektów energetyki wiatrowej. Na podstawie przyjętego zestawu kryteriów wykluczających uwzględniających uwarunkowania infrastrukturalne, środowiskowe, społeczno-kulturowe i hydrogeologiczne, wyznaczono zasięgi terenów predysponowanych do rozwoju energetyki wiatrowej, stanowiących około 30% badanego terenu. Największą w skali województwa dostępność terenów predysponowanych (ponad 40% powierzchni całkowitej) stwierdzono w powiatach: suwalskim, wysokomazowieckim, bielskim oraz kolneńskim.

Obszary predysponowane do posadowienia obiektów energetyki wiatrowej można uznać za przydatne, niemniej jednak niektóre z nich w świetle dodatkowych czynników mogą reprezentować korzystniejsze uwarunkowania do pełnienia tej funkcji. W dalszej części niniejszej pracy dokonano obszernej analizy uwarunkowań determinujących walory terenów predysponowanych w kontekście możliwości ich przyszłego zainwestowania na cele związane z wykorzystaniem energii wiatru.

Materiały i metody

Przestrzenny charakter podjętej w pracy problematyki badawczej, a ponadto konieczność uwzględnienia szeregu różnych uwarunkowań, stanowią przesłanki wykorzystania analiz przestrzennych GIS zintegrowanych z technikami wieloatrybutowego wspomaganie decyzji.

Rozpatrywane w pracy kryteria o charakterze miękkim, stanowiące parametry lub czynniki⁸, mogą w różnym zakresie warunkować przydatność terenów predysponowanych województwa podlaskiego do założonej funkcji, stąd zachodzi potrzeba wyznaczenia ich ważności. Do określenia preferencji poszczególnych kryteriów i subkryteriów wykorzystano jedną z metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji – metodę AHP (ang. *Analythic Hierarchy Process*), której podstawy teoretyczne zostały opracowane przez amery-

⁷ Ł. Kolendo, *Przestrzenno-środowiskowe determinanty rozwoju energetyki wiatrowej w województwie podlaskim*, „Ekonomia i Środowisko” 2015 nr 3(54), s. 42-55.

⁸ B. Hejmanowska, E. Hnat, *Wielokryterialna analiza lokalizacji zabudowy na przykładzie gminy Podegrodzie*, „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji” 2009 t. 20, s. 109-121.

kańskiego matematyka T.L. Saaty'ego⁹. Metoda AHP jest popularnym narzędziem rozwiązywania interdyscyplinarnych problemów badawczych, czego potwierdzeniem są liczne prace poświęcone zarówno teoretycznym, jak i praktycznym aspektom tej metody¹⁰.

Punktem wyjścia w stosowanej metodzie było opracowanie struktury hierarchicznej rozważanego problemu, uwzględniającej cel nadrzędny, kryteria główne oraz subkryteria. Liczba poziomów w danym modelu hierarchicznym jest pochodną stopnia złożoności oraz charakteru rozpatrywanego problemu. Jako cel nadrzędny w opracowanej strukturze przyjęto analizę stopnia przydatności terenów predysponowanych województwa podlaskiego do rozwoju energetyki wiatrowej (PI).

Kolejny poziom modelu hierarchicznego (PII) tworzą kryteria główne reprezentujące uwarunkowania anemometryczne, geomorfologiczne, środowiskowe, społeczne i infrastrukturalne. W procesie dekompozycji założonego problemu decyzyjnego wyodrębniono łącznie 17 subkryteriów oceny (PIII) przyporządkowanych kryteriom głównym z poziomu II. Z kolei na poziomie IV (PIV), w ramach poszczególnych subkryteriów, zdefiniowano dodatkowe przedziały zmienności. Z uwagi na specyfikę celu nadrzędnego, czyli globalną ocenę przydatności, nie było konieczności nakreślenia ostatniego poziomu struktury (PV), przeznaczonego wariantom decyzyjnym (hipotetycznym lokalizacjom farm wiatrowych).

Następnie dokonano określenia preferencji globalnych oraz lokalnych w drodze serii porównań parami poszczególnych kryteriów i subkryteriów na każdym zdefiniowanym wcześniej poziomie modelu struktury hierarchicznej. Analizę porównawczą prowadzono z wykorzystaniem fundamentalnej 9-stopniowej skali porównań Saaty'ego (gdzie 1 oznacza jednakowy priorytet, natomiast 9 – absolutną przewagę). Oceny spójności porównań dokonano na podstawie wartości wyznaczonego współczynnika niezgodności. Niezbędne obliczenia związane z implementacją metody AHP w ramach podjętego problemu badawczego prowadzono w odpowiednio przygotowanych arkuszach pakietu MS Excel.

Druga część proponowanej procedury obejmuje zastosowanie analiz przestrzennych prowadzonych w środowisku tzw. „wolnego oprogramowania GIS”¹¹. Wymagało to zgromadzenia odpowiednich danych przestrzennych, które zestawiono w tabeli 1.

⁹ T.L. Saaty, *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*, „European Journal of Operational Research” 1990 nr 48, s. 9-26.

¹⁰ M. Dytczak, *Wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych w budownictwie*, Opole 2010, s. 63-65.

¹¹ P. Netzel, *Analizy przestrzenne z wykorzystaniem GRASS*, „Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego Uniwersytetu Wrocławskiego” 2011 nr 15, s. 7.

W pierwszej kolejności technologię GIS wykorzystano do budowy bazy danych składającej się z warstw stanowiących przestrzenną reprezentację 17 przyjętych subkryteriów oceny (PIII). Poszczególne warstwy, generowano głównie z wykorzystaniem operacji buforowania. Przyjęto zróżnicowane wielkości stref buforowych, kierując się przy tym charakterem rozpatrywanej warstwy przestrzennej, wielkościami proponowanymi przez innych autorów, a w pozostałych przypadkach rozmiary ekwidystant ustalono arbitralnie jako propozycja własna autora.

Tabela 1. Zestawienie wykorzystanych danych przestrzennych

| Nazwa | Format | Źródło |
|---|-----------|---|
| Baza Danych Obiektów Ogólnogeograficznych (BD00) | *.gml | Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Warszawie |
| Państwowy Rejestr Granic | *.shp | |
| Wektorowa mapa glebowo-rolnicza w skali 1:25 000 | *.shp | Wojewódzki Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Białymstoku |
| Prawne formy ochrony przyrody | *.shp | Regionalna Dyrekcja Ochrony Środowiska w Białymstoku |
| Ostoje ptaków IBA (ang. Important Bird Areas) | *.shp | www.birdlife.org |
| Model terenu SRTM o rozdzielczości 1 sekundy (ok. 30 m) | *.GeoTIFF | www.earthexplorer.usgs.gov/ |

Zastosowano również zasadę, iż generowane strefy buforowe powinny pokrywać cały badany obszar (tereny predysponowane do rozwoju energetyki wiatrowej w województwie podlaskim). Przedmiotem analiz bliskości były między innymi: sieć obszarów chronionych, wody powierzchniowe i lasy, liniowe obiekty infrastruktury (linie elektroenergetyczne, drogi), jak również zabudowa i istniejące turbiny wiatrowe.

Uwarunkowania geomorfologiczne uwzględniono na podstawie podstawowych atrybutów topograficznych¹² (ang. *primary topographic attributes*) w postaci map spadków i ekspozycji zboczy, wyznaczonych bezpośrednio z modelu terenu. Do oceny przydatności włączono ponadto strefy wietrzności¹³ oraz uwarunkowania związane z cennością rolniczej przestrzeni produkcyjnej waloryzowanej na podstawie klas bonitacyjnych gleb. Zestawienie przyjętych subkryteriów oceny (PIII) i odpowiadających im przedziałów zmienności (PIV) zaprezentowano w tabeli 2 i 3.

¹² J. Urbański, *GIS w badaniach przyrodniczych*, Gdańsk 2008, s. 158.

¹³ H. Lorenc, *Atlas klimatu Polski*, Warszawa 2005.

Końcową przydatność terenów predysponowanych do pełnienia założonej funkcji wyznaczono w postaci sumy preferencji globalnych na najniższym poziomie (PIV) struktury hierarchicznej, a wyniki prezentowano w przyjętym polu podstawowym o rozmiarze 10 x 10 m. Następnie na podstawie rozkładu przestrzennego wyników wyznaczono 6 umownych klas przydatności. W ostatniej fazie proponowanego procesu analitycznego dokonano konfrontacji uzyskanych wyników przydatności terenu z istniejącym zagospodarowaniem województwa obiektami energetyki wiatrowej.

Struktura hierarchiczna złożonego problemu badawczego

W rezultacie dekompozycji podjętego problemu decyzyjnego do postaci modelu struktury hierarchicznej i stopniowej realizacji procedury AHP dokonano ustalenia preferencji globalnych (WG) i lokalnych (WL) na poszczególnych poziomach modelu (tabela 2 i 3).

Wśród pięciu rozpatrywanych w niniejszej pracy głównych grup kryteriów (PII), najwyższą rangę przypisano uwarunkowaniom związanym ze środowiskiem naturalnym. Kluczowe znaczenie czynników przyrodniczych jest głównie podyktowane ich znaczną liczebnością (10 z 17 rozpatrywanych subkryteriów na poziomie PIII struktury). Wśród subkryteriów poziomu PIII w ramach grupy czynników środowiskowych największą siłę wpływu na cel nadrzędny analizy reprezentują parametry odległości od terenów chronionych, w szczególności obszarów występowania cennych gatunków awifauny. Jeden z wyżej ocenionych parametrów środowiska stanowi rolnicza przestrzeń produkcyjna, wśród której do posadowienia obiektów energetyki wiatrowej najbardziej preferowane są przestrzenie o słabej klasie bonitacji i nieużytki.

Na podstawie dalszej analizy zawartości tabeli 2 i 3 można stwierdzić, iż oprócz czynników środowiskowych, wysokim priorytetem odznaczają się parametry społeczne i infrastrukturalne. W ramach uwarunkowań społecznych rozwoju energetyki wiatrowej na badanym terenie, kluczowe znaczenie ma odległość hipotetycznych inwestycji od terenów zabudowanych. W tej grupie mniejszy priorytet nadano odległości hipotetycznych obiektów energetyki wiatrowej od turbin już istniejących, przyjmując kierunek ustalenia niższych preferencji terenom gdzie w przyszłości mogłoby dojść do występowania efektu skumulowanego (kumulacja planowanych i istniejących urządzeń energetyki wiatrowej).

W ramach elementów infrastruktury na badanym terenie, większe znaczenie w kontekście realizacji celu nadrzędnego odnotowano w przypadku kryterium odległości od linii elektroenergetycznych. Dostępność do sieci

Tabela 2. Wagi globalne (WG) i lokalne (WL) poszczególnych poziomów struktury hierarchicznej w świetle uwarunkowań anemometrycznych, geomorfologicznych i środowiskowych

| PI | PII | WG | PIII | WL | WG | PIV | WL | WG |
|---|--|---|---------------------------------|-----------|-------------|--------------|--------|--------|
| ANALIZA PRZYDATNOŚCI TERENU DO ROZWOJU ENERGETYKI WIATROWEJ | Warunki wiatrowe | 0,0612 | strefa wietrzności | 1,0000 | 0,0612 | strefa I | 0,4673 | 0,0286 |
| | | | | | | strefa II | 0,2772 | 0,0170 |
| | | | | | | strefa III | 0,1601 | 0,0098 |
| | | | | | | strefa IV | 0,0954 | 0,0058 |
| | Geomorfologia | 0,0670 | spadki terenu [stopnie] | 0,5000 | 0,0335 | 0-7 | 0,5462 | 0,0183 |
| | | | | | | 7-12 | 0,2323 | 0,0078 |
| | | | | | | 12-15 | 0,1377 | 0,0046 |
| | | | | | | > 15 | 0,0838 | 0,0028 |
| | | 0,0335 | ekspozycja terenu [stopnie] | 0,5000 | 0,0335 | N, NW, flat | 0,5396 | 0,0181 |
| | | | | | | N, NE, S, SW | 0,2970 | 0,0100 |
| | | | | | | E, SE | 0,1634 | 0,0055 |
| | | | | | | | | |
| | Środowisko naturalne | 0,4586 | rolnicza przestrzeń produkcyjna | 0,1095 | 0,0502 | klasy I-III | 0,0551 | 0,0028 |
| | | | | | | klasa IV | 0,1301 | 0,0065 |
| | | | | | | klasy V-VI | 0,2640 | 0,0133 |
| | | | | | | nieużytki | 0,5508 | 0,0277 |
| | | 0,0355 | odległość od granicy lasu [m] | 0,0775 | 0,0355 | 0-200 | 0,0652 | 0,0023 |
| | | | | | | 200-1000 | 0,1128 | 0,0040 |
| | | | | | | 1000-3000 | 0,2257 | 0,0080 |
| | | | | | | > 3000 | 0,5963 | 0,0212 |
| 0,0534 | | odległość od granicy parku krajobrazowego [m] | 0,1165 | 0,0534 | w granicach | 0,0416 | 0,0022 | |
| | | | | | 0-500 | 0,1414 | 0,0076 | |
| | | | | | 500-1000 | 0,3122 | 0,0167 | |
| | | | | | > 1000 | 0,5047 | 0,0270 | |
| 0,0188 | | odległość od granicy obszaru chronionego krajobrazu [m] | 0,0411 | 0,0188 | w granicach | 0,0954 | 0,0018 | |
| | | | | | 0-500 | 0,1601 | 0,0030 | |
| | | | | | 500-1000 | 0,2772 | 0,0052 | |
| | | | | | > 1000 | 0,4673 | 0,0088 | |
| 0,0638 | odległość od granicy obszaru Natura 2000 (OSO) [m] | 0,1390 | 0,0638 | 0-500 | 0,0613 | 0,0039 | | |
| | | | | 500-1000 | 0,0948 | 0,0060 | | |
| | | | | 1000-5000 | 0,2589 | 0,0165 | | |
| | | | | > 5000 | 0,5850 | 0,0373 | | |

| ANALIZA PRZYDATNOŚCI TERENU DO ROZWOJU ENERGETYKI WIATROWEJ | | Środowisko naturalne | | Środowisko naturalne | | |
|---|--|----------------------|--------|--|--------|--------|
| | | | | odległość od granicy obszaru Natura 2000 (SOO) [m] | | |
| | odległość od granicy obszaru Natura 2000 (SOO) [m] | 0,0715 | 0,0328 | 0-500 | 0,1047 | 0,0034 |
| | | | | 500-1000 | 0,2583 | 0,0085 |
| | | | | > 1000 | 0,6370 | 0,0209 |
| | odległość od granicy obszaru IBA [m] | 0,1443 | 0,0662 | w granicach | 0,0783 | 0,0052 |
| | | | | 0-500 | 0,1517 | 0,0100 |
| | | | | 500-1000 | 0,2628 | 0,0174 |
| | | | | > 1000 | 0,5073 | 0,0336 |
| | odległość od granicy parku narodowego i rezerwatu przyrody [m] | 0,2013 | 0,0923 | 0-500 | 0,1047 | 0,0097 |
| | | | | 500-1000 | 0,2583 | 0,0238 |
| | | | | > 1000 | 0,6370 | 0,0588 |
| | odległość od granicy pozostałych obszarów chronionych* [m] | 0,0538 | 0,0247 | 0-500 | 0,1634 | 0,0040 |
| | | | | 500-1000 | 0,2970 | 0,0073 |
| | | | | > 1000 | 0,5396 | 0,0133 |
| | odległość od cieków wodnych i wód powierzchniowych [m] | 0,0456 | 0,0209 | 0-500 | 0,1634 | 0,0034 |
| | | | | 500-1000 | 0,2970 | 0,0062 |
| > 1000 | | | | 0,5396 | 0,0113 | |

* w grupie pozostałych obszarów chronionych uwzględniono: użytki ekologiczne, zespoły przyrodniczo-krajobrazowe i stanowiska dokumentacyjne

elektroenergetycznej pozostaje w ścisłej zależności z opłacalnością inwestycji z zakresu energetyki wiatrowej.

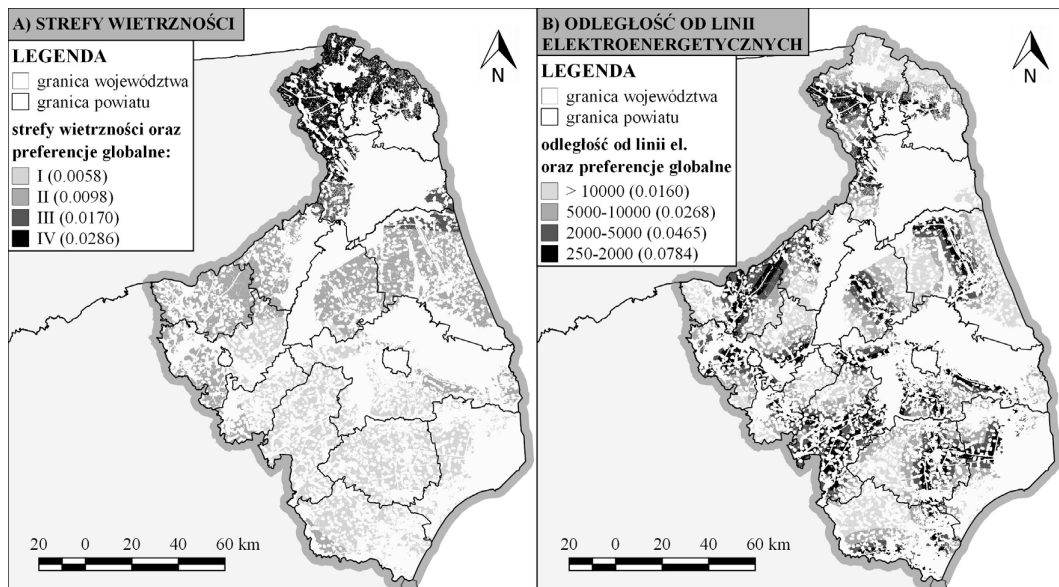
Na poziomie kryteriów głównych oceny (PII) najniższe preferencje względem poziomu PI reprezentują uwarunkowania anemometryczne i geomorfologiczne, z wyznaczoną wagą globalną wynoszącą kolejno 0,0612 i 0,0670. Warunki związane z wietrznością stanowią jeden z kluczowych elementów opłacalności tego typu inwestycji. Niemniej jednak z racji braku szczegółowych danych anemometrycznych wykorzystano jedynie zgeneralizowaną regionalizację badanego terenu na cztery strefy wietrzności. Ze względu na znaczny stopień niepewności tych danych zdecydowano się na wyznaczenie mniejszej rangi grupie warunków wiatrowych w porównaniu z pozostałymi grupami poziomu II.

Tabela 3. Wagi globalne (WG) i lokalne (WL) poszczególnych poziomów struktury hierarchicznej w świetle uwarunkowań społecznych i infrastrukturalnych

| PI | PII | WG | PIII | WL | WG | PIV | WL | WG |
|---|---------------------------------|--------|---|--------|--------|------------|--------|--------|
| ANALIZA PRZYDATNOŚCI TERENU DO ROZWOJU ENERGETYKI WIATROWEJ | Uwarunkowania społeczne | 0,1896 | odległość od zabudowy [m] | 0,8000 | 0,1517 | 500-1000 | 0,0524 | 0,0079 |
| | | | | | | 1000-2000 | 0,1157 | 0,0176 |
| | | | | | | 2000-3000 | 0,2586 | 0,0392 |
| | | | | | | > 3000 | 0,5733 | 0,0870 |
| | | | odległość od istniejących turbin wiatrowych [m] | 0,2000 | 0,0379 | < 1000 | 0,1634 | 0,0062 |
| | | | | | | 1000-5000 | 0,2970 | 0,0113 |
| | | | | | | > 5000 | 0,5396 | 0,0205 |
| | | | | | | | | |
| | Uwarunkowania infrastrukturalne | 0,2236 | odległość od linii elektroenergetycznych [m] | 0,7500 | 0,1677 | 250-2000 | 0,4673 | 0,0784 |
| | | | | | | 2000-5000 | 0,2772 | 0,0465 |
| | | | | | | 5000-10000 | 0,1601 | 0,0268 |
| | | | | | | > 10000 | 0,0954 | 0,0160 |
| | | | odległość od dróg [m] | 0,2500 | 0,0559 | < 500 | 0,0688 | 0,0038 |
| | | | | | | 500-1000 | 0,5447 | 0,0304 |
| | | | 1000-2000 | 0,2286 | 0,0128 | | | |
| | | | > 2000 | 0,1579 | 0,0088 | | | |

Zastosowanie Systemów Informacji Geograficznej

Kluczowym elementem w kontekście rozwiązania podjętego problemu badawczego było zastosowanie Systemów Informacji Geograficznej. Wyznaczone w rezultacie implementacji metody AHP preferencje globalne z poziomu IV struktury hierarchicznej wykorzystano do polaryzacji badanego obszaru w kontekście 17 rozpatrywanych subkryteriów oceny (PIII). Przykładowe warstwy przestrzenne, utworzone z wykorzystaniem reklasyfikacji obrazów rastrowych, reprezentujące wybrane kryteria oceny przydatności terenów predysponowanych województwa podlaskiego zestawiono na rysunku 1.

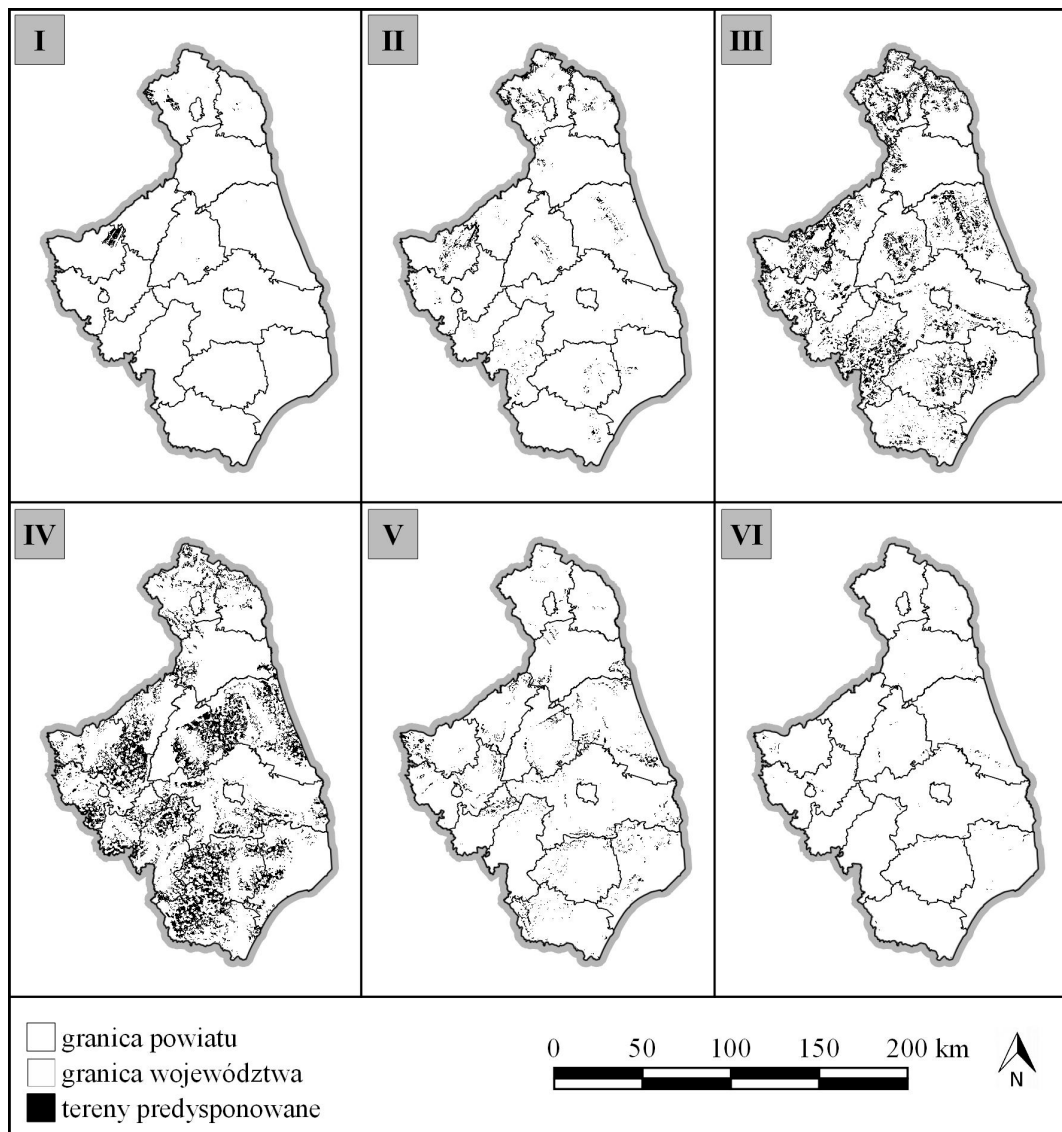


Rysunek 1. Strefy wietrzności (A) wraz z preferencjami globalnymi oraz przedziały odległości od linii elektroenergetycznych (B) z odpowiadającymi im wagami globalnymi

Końcowa przydatność terenów predysponowanych może teoretycznie wykazywać zmienność od 0,0869, w przypadku uzyskania w danej lokalizacji (pole 10×10 m) najniższych ocen w świetle stosowanych kryteriów oceny, do 0,5410 przy założeniu sytuacji odwrotnej. W rzeczywistości nie odnotowano wskazanych wcześniej skrajnych wartości przydatności terenu.

Na podstawie analizy statystycznej wynikowej mapy przydatności wyznaczonej jako suma preferencji globalnych na najniższym poziomie struktury hierarchicznej można wskazać faktyczny zakres zmienności badanej cechy, który wynosi od 0,1611 do 0,5188. Mając powyższe na uwadze, wyznaczono 6 umownych stref przydatności: klasa I (> 0,46), klasa II (0,41-0,45), klasa III (0,36-0,40), klasa IV (0,31-0,35), klasa V (0,26-0,30), klasa VI (< 0,25) (rysunek 2).

Wśród terenów predysponowanych do rozwoju energetyki wiatrowej w województwie podlaskim, największą przestrzeń zajmują tereny przynależne do klasy IV przydatności (tabela 4). Stanowią one 51,71% powierzchni terenów predysponowanych i 15,42% powierzchni całkowitej województwa. Najcenniejsza I klasa przydatności to zaledwie 1,50% terenów predysponowanych (0,45% całkowitej powierzchni województwa). Na badanym terenie, areale klas przydatności I-III zajmują blisko 2 400 km², co odpowiada 11,86% powierzchni całkowitej województwa.



Rysunek 2. Przestrzenna dystrybucja terenów predysponowanych reprezentujących poszczególne klasy przydatności do rozwoju energetyki wiatrowej w województwie podlaskim

Analizując treści prezentowane na rysunku 2 można stwierdzić poważne dysproporcje w odniesieniu do równomierności rozmieszczenia terenów reprezentujących wyznaczone klasy przydatności w poszczególnych powiatach badanego terenu. Obszary zaklasyfikowane w toku prowadzonych ana-

liz jako najbardziej odpowiednie do rozwoju energetyki wiatrowej (klasy I-III przydatności) najliczniej występują na terenie powiatów, gdzie obecnie zlokalizowane są tego typu inwestycji¹⁴ (tabela 5). Są to tereny powiatów suwalskiego (dominująca pozycja w zakresie inwestycji w energetykę wiatrową), wysokomazowieckiego i grajewskiego, gdzie sumaryczny udział klas I-III przydatności stanowi od 12,22% do 34,76% powierzchni całkowitej powiatu.

Tabela 4. Zestawienie powierzchni poszczególnych klas przydatności oraz ich procentowy udział w powierzchni terenów predysponowanych i całkowitej powierzchni województwa

| Klasa | Powierzchnia [km ²]* | Procentowy udział w terenach predysponowanych | Procentowy udział w powierzchni województwa |
|-------|----------------------------------|---|---|
| I | 90,55 | 1,50 | 0,45 |
| II | 361,55 | 6,00 | 1,79 |
| III | 1942,72 | 32,25 | 9,62 |
| IV | 3114,32 | 51,71 | 15,42 |
| V | 477,40 | 7,93 | 2,36 |
| VI | 36,51 | 0,61 | 0,18 |
| Suma: | | 100,00 | 29,83 |

* powierzchnia wyznaczona jako iloczyn liczby komórek rastrowych w danej klasie przydatności oraz powierzchni pola podstawowego obliczeń (10×10 m)

Ponadto można zaobserwować również odmienne uwarunkowania dowodzące o istnieniu pewnego potencjału w kontekście rozważanego problemu, niemniej jednak nie znajduje to odzwierciedlenia w faktycznym jego wykorzystaniu w drodze posadowienia obiektów energetyki wiatrowej. Jako przykłady można wymienić powiaty kolneński i sejneński charakteryzujące się stosunkowo dużym potencjałem zagospodarowania energii wiatru i jednocześnie brakiem inwestycji w tym zakresie.

¹⁴ Mapa odnawialnych źródeł energii na podstawie udzielanych przez Prezesa URE koncesji oraz wpisów do rejestru prowadzonego przez Prezesa ARR, www.ure.gov.pl [06-01-2016].

Tabela 5. Zestawienie procentowego udziału klas przydatności w powierzchni całkowitej poszczególnych powiatów oraz zainstalowanej mocy elektrowni wiatrowych

| Powiat | Moc elektrowni wiatrowych [mw] | Procentowy udział klasy w powierzchni powiatu | | | | | |
|------------------|--------------------------------|---|-------|-------|-------|------|------|
| | | I | II | III | IV | V | VI |
| Sejneński | 0,00 | 0,22 | 4,07 | 11,17 | 6,44 | 0,47 | 0,04 |
| Wysokomazowiecki | 5,60 | 0,00 | 1,38 | 19,46 | 19,35 | 0,76 | 0,15 |
| Łomżyński | 2,00 | 0,00 | 0,60 | 10,34 | 24,02 | 2,99 | 0,29 |
| Augustowski | 0,00 | 0,00 | 0,54 | 3,52 | 5,41 | 2,18 | 0,08 |
| Białostocki | 0,60 | 0,00 | 0,08 | 5,53 | 8,59 | 1,57 | 0,08 |
| Moniecki | 0,00 | 0,05 | 1,12 | 8,58 | 19,05 | 2,89 | 0,45 |
| M. Suwałki | 0,00 | 0,00 | 0,89 | 9,08 | 3,59 | 0,07 | 0,00 |
| Sokółski | 4,10 | 0,00 | 1,28 | 10,23 | 22,16 | 4,09 | 0,36 |
| Zambrowski | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 5,33 | 17,09 | 3,78 | 0,01 |
| M. Białystok | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,42 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| Bielski | 28,50 | 0,00 | 0,75 | 10,81 | 27,51 | 1,60 | 0,08 |
| M. Łomża | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,81 | 0,15 | 0,02 | 0,07 |
| Grajewski | 25,30 | 0,05 | 1,17 | 11,00 | 15,61 | 3,28 | 0,18 |
| Suwałski | 114,71 | 2,87 | 10,88 | 21,01 | 10,59 | 0,70 | 0,03 |
| Hajnowski | 0,60 | 0,00 | 0,41 | 4,41 | 9,28 | 2,47 | 0,22 |
| Siemiatycki | 0,00 | 0,01 | 0,55 | 4,78 | 23,10 | 2,58 | 0,11 |
| Kolneński | 0,00 | 5,29 | 7,12 | 19,78 | 14,23 | 5,05 | 0,50 |

Lokalizacja obiektów energetyki wiatrowej w kontekście uzyskanych wyników

Powołując się na aktualne dane Urzędu Regulacji Energetyki 15 województwo podlaskie odznacza się znaczącym w skali kraju stopniem wykorzystania energii wiatru. Łączna moc elektrowni wiatrowych w województwie podlaskim wynosi 181,41 MW i skupiona jest łącznie w 27 instalacjach. Informacje te wykorzystano do weryfikacji skuteczności proponowanej procedury analitycznej. Przyjęto założenie traktujące, iż powstałe do tej pory inwestycje z zakresu energetyki wiatrowej zrealizowano zgodnie z literą prawa, przy jednoczesnej maksymalizacji zysków z inwestycji. W związku z tym obecne lokalizacje turbin wiatrowych powinny być umiejscowione

¹⁵ Ibidem.

w granicach wyznaczonych terenów predysponowanych reprezentujących duże walory w zakresie ich przydatności.

W analizie uwzględniono 1-hektarowe¹⁶ powierzchnie wyznaczone wokół istniejących turbin wiatrowych, których wysokość przekraczała 30 m. Dane na temat ich lokalizacji zaczerpnięto z Bazy Danych Obiektów Ogólnogeograficznych. Wyznaczone w odniesieniu do każdego obiektu powierzchniowego statystyki strefowe pozwalają stwierdzić dużą zgodność lokalizacji turbin w zakresie położenia w granicach terenów predysponowanych i jednocześnie charakteryzujących się dużą przydatnością. Ponad 91% badanych obiektów wykazuje zgodność położenia w granicach terenów predysponowanych. Obecne lokalizacje obiektów energetyki wiatrowej zlokalizowane są w obrębie terenów reprezentujących przydatność na średnim poziomie 0,38, co odpowiada klasie III przydatności. W tej klasie przydatności znalazło się łącznie 48,44% rozpatrywanych obserwacji. Klasę IV reprezentuje 17,18% wszystkich obserwacji, natomiast w granicach klasy II odnotowano występowanie 29,69% przypadków, a w najcenniejszej klasie I znalazło się 4,69% badanych lokalizacji turbin.

Podsumowanie

Zaproponowane w pracy podejście metodyczne stanowiące integrację technik GIS i wybranej metody wieloatrybutowego wspomaganie decyzji pozwoliło na kompleksową ocenę przydatności terenów predysponowanych województwa podlaskiego do rozwoju energetyki wiatrowej. Wykorzystanie danych przestrzennych dostępnych w pokryciu dla całego obszaru Polski pozwala stwierdzić, iż niniejsze podejście może być z powodzeniem implementowane w odniesieniu do innych regionów.

W kontekście uzyskanych wyników należy wskazać, iż województwo podlaskie reprezentuje znaczną polaryzację przestrzenną w zakresie stopnia przydatności do rozwoju energetyki wiatrowej. Przy czym obserwowane są przejawy wykorzystania zidentyfikowanego potencjału poprzez inwestycje w energetykę wiatrową, jak również istnieją obszary stwarzające teoretyczne warunki do realizacji tego typu działań.

Pomimo znaczących korzyści stosowania tego typu rozwiązań w zakresie tematyki OZE, należy mieć na względzie pewne ograniczenia proponowanej metody, które związane są między innymi z regionalną skalą prowadzonych analiz. Rozległa przestrzeń geograficzna poddana analizom zdeterminowała konieczność wykorzystania zgeneralizowanych zbiorów danych, jak również uproszczone rozważanie pewnych zjawisk i zagadnień. Wśród nich należy

¹⁶ M.J. Banak, *Lokalizacja elektrowni wiatrowych – uwarunkowania środowiskowe i prawne*, „Człowiek i Środowisko” 2010 nr 34(3-4), s. 120.

niewątpliwie nadmienić warunki wiatrowe badanego terenu, jak również założenie, że obecne inwestycje z zakresu energetyki wiatrowej zrealizowano w lokalizacjach zapewniających maksymalizację zysków ekonomicznych i przy pełnym zachowaniu uwarunkowań prawnych. Mając na uwadze zalety i pewne ograniczenia proponowanego podejścia należy podkreślić, jego duże walory aplikacyjne w zakresie poruszanej tematyki w skali regionalnej. Metoda ta może z powodzeniem stanowić wsparcie w dziedzinie planowania przestrzennego poszczególnych regionów w kwestiach optymalizacji kierunków rozwoju sektora energetyki odnawialnej.

Badania zostały zrealizowane z w ramach pracy statutowej Politechniki Białostockiej nr S/WBiIS/4/2016 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW

Literatura

- Banak M.J., *Lokalizacja elektrowni wiatrowych – uwarunkowania środowiskowe i prawne*, „Człowiek i Środowisko” 2010 nr 34(3-4), s. 117-128
- Bożętka B., *Pozyskiwanie energii wietrznej a zmiany krajobrazu. Konsekwencje dla funkcji rekreacyjnej*, „Krajobrazy rekreacyjne – kształtowanie, wykorzystanie, transformacja. Problemy Ekologii Krajobrazu” 2010 t. XXVII
- Dytczak M., *Wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych w budownictwie*, Opole 2010
- Hejmanowska B., Hnat E., *Wielokryterialna analiza lokalizacji zabudowy na przykładzie gminy Podegrodzie*, „Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji” 2009 t. 20, s. 109-121
- Janke J.R., *Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado*, “Renewable Energy” 2010 t. 35, s. 2114-2122
- Kistowski M., *Propozycja metodyczna oceny środowiskowych uwarunkowań lokalizacji farm wiatrowych w skali regionalnej*, „Przegląd Geograficzny” 2012 nr 84(1), s. 5-22
- Kolendo Ł., *Przestrzenno-środowiskowe determinanty rozwoju energetyki wiatrowej w województwie podlaskim*, „Ekonomia i Środowisko” 2015 nr 3(54), s. 42-55
- Kozak J., *Jerzy Bański: Jaka geografia? – uwarunkowania i spojrzenie w przyszłość: głos w dyskusji*, „Przegląd Geograficzny” 2013 nr 85(3), s. 455-461
- Lorenc H., *Atlas klimatu Polski*, Warszawa 2005
- Netzel P., *Analizy przestrzenne z wykorzystaniem GRASS*, „Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego Uniwersytetu Wrocławskiego” 2011 nr 15
- Saaty T.L., *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*, “European Journal of Operational Research” 1990 nr 48, s. 9-26
- Swofford J., Slattery M., *Public attitudes of wind energy in Texas: Local communities in close proximity to wind farms and their effect on decision-making*, “Energy Policy” 2010 t. 38, s. 2508-2519
- Synowiec W., Luc M., *Wielokryterialna ocena przydatności terenu do rozwoju energetyki wiatrowej na przykładzie gminy Rymanów*, „Przegląd Geograficzny” 2013 nr 85(3), s. 323-352
- Szurek M., Blachowski J., Nowacka A., *GIS-based method for wind farm location multi-criteria analysis*, „Mining Science” 2014 nr 21, s. 65-81
- Urbański J., *GIS w badaniach przyrodniczych*, Gdańsk 2008
- www.ure.gov.pl