

Artykuł naukowy

Zastosowanie wielokryterialnych analiz przestrzennych w celu poszukiwania potencjalnej lokalizacji farm fotowoltaicznych w gminie Torzym

Multi-criteria spatial analysis in search of the potential location of
solar farms in Torzym commune

Anna Foks¹, Beata Calka², Elżbieta Bielecka²

¹ Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa

² Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii lądowej i Geodezji

Abstract

The article presents the method and results of multi-criteria spatial analysis of the potential location of photovoltaic farms for the Torzym commune, located in the western part of the country, sunniest part of Poland. Based on the available literature, environmental and economic criteria determining the location of solar farms and their boundary values were determined. AHP analysis allowed to determine that the most important location factors, in the study area, were the terrain topography, namely sun exposure and slope. Land use, in particular 62% of forest cover and legally protected areas triggered that almost 90% of the commune's area was excluded from investment activities. Finally, the adopted criteria allowed the designation of 111 areas larger than 2 ha, whose total area is only 1.6% of the Torzym commune.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, analizy wielokryterialne, AHP, WLC, analizy przestrzenne
Keywords: photovoltaics, multi-criteria analysis, AHP, WLC, spatial analysis

Wprowadzenie

Wykorzystanie nieodnawialnych źródeł do produkcji energii elektrycznej prowadzi do stopniowego zmniejszania się dostępności zasobów naturalnych, a także wpływa

w negatywny sposób na środowisko naturalne. Najlepszym rozwiązaniem tego problemu jest sukcesywne dążenie do zastąpienia dotychczasowych metod pozyskiwania energii przyjaznymi dla środowiska źródłami odnawialnymi. Zgodnie z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii źródeł odnawialnych kraje członkowskie Unii Europejskiej powinny zapewnić 20% udziału energii odnawialnej w całkowitym zużyciu energii Wspólnoty (Dyrektywa 2009/28/WE). Docelowo Polska ma osiągnąć 15% udziału energii odnawialnej do 2020 roku, co oznacza konieczność inwestowania w nowe instalacje wykorzystujące do produkcji energii źródła odnawialne. Jednym z rozwiązań jest wykorzystanie energii słonecznej. Energia słoneczna jest darmowa, łatwo dostępna i niewyczerpalna, a produkowanie jej w farmach słonecznych jest przyjazne dla środowiska. Dla przykładu, farma solarna o mocy 1MW może wyprodukować przeciętnie ok. 9000MWh energii w skali roku. Wyprodukowanie takiej ilości energii w elektrowni węglowej niesie ze sobą wytworzenie ok. 0,8 tony CO₂. Oznacza to, że funkcjonowanie farmy solarnej o takiej mocy przez 25 lat pomoże zaoszczędzić emisję CO₂ wynoszącą 20 ton. Ponadto, zakładając moc farmy na 1MW, produkowana energia pozwoli na zaspokojenie potrzeb na prąd około 250 średniej wielkości gospodarstw domowych (Pająk, 2013).

Pozyskiwanie energii solarnej jako energii czystej i o niewielkim oddziaływaniu na środowisko jest od lat blisko dekady dynamicznie rozwijane w wielu krajach. Do zalet energii słonecznej należy powszechna dostępność, małe koszty eksploatacji oraz pozytywny wpływ na zmniejszenie uzależnienia od dostawców energii. Według raportu Global Market Outlook for Photovoltaics przygotowanego przez Europejskie Stowarzyszenie Przemysłu Fotowoltaicznego (EPIA) do 2016 r. największym producentem energii słonecznej były Niemcy, pozyskujące aż 36% energii z tego źródła i Włochy – 18% (EPIA, 2016). Wybór właściwej lokalizacji farm fotowoltaicznych nie jest jednak prosty, albowiem determinuje ją wiele czynników. Są to czynniki środowiskowe, w tym pokrycie i ukształtowanie terenu, warunki klimatyczne (głównie nasłonecznienie), obecność terenów chronionych, osadnictwo, a także czynniki ekonomiczne, takie jak odległość od linii energetycznych, sieci drogowej lub innej infrastruktury (Sonal et al., 2017; Uyan, 2013; Bober et al. 2016). Przestrzenny charakter problemu, tj. wyznaczenie potencjalnej lokalizacji oraz wielość kryteriów, najczęściej o różnym stopniu ważności, sprzyja wykorzystaniu metod wielokryterialnych i narzędzi GIS. Do najczęściej stosowanych analiz wielokryterialnych należą AHP (ang. Analytic Hierarchy Process) i TOPSIS (ang. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (Sonal et al., 2017; Abbas et al. 2017, Bober et al. 206)). Metody te w połączeniu z narzędziami

dostępny w pakietach GIS stanowią bazę narzędziową wykorzystywaną przez wielu badaczy (Całka i Mierzwiak, 2017).

Celem niniejszej pracy jest wyznaczenie obszarów potencjalnej lokalizacji farm fotowoltaicznych, bazując na ogólnie dostępnych danych gromadzonych w państwowym zasobie geodezyjnym i kartograficznym. Tym samym proponowane rozwiązanie wykazuje szerokie możliwości wykorzystania publicznych danych przestrzennych do rozwijania potencjału gospodarczego samorządowych jednostek terytorialnych. W dalszej części artykułu zostaną przedstawione: obszar badawczy i wykorzystane dane, ogólna charakterystyka zastosowanych metod oraz opis uzyskanych wyników.

Obszar i metoda badań

Obszar analiz i wykorzystane dane

Analizowany obszar to gmina miejsko-wiejska Torzym, usytuowana w północno-zachodniej części województwa lubuskiego, w powiecie sulęcińskim. Gmina zajmuje powierzchnię 374,87 km². Obszar ziemi lubuskiej jest zaliczany do najcieplejszych regionów kraju i charakteryzuje się klimatem przejściowy pomiędzy chłodnym i wilgotnym regionem pomorskim a cieplejszym i suchszym regionem lubusko-dolnośląskim. Powierzchnia gminy pokryta lasami wynosi 23 379,5 ha, co oznacza 62,3% lesistości (WIOŚ, 2019; US, 2019). Wysokości poszczególnych części terenu wahają się w granicach 50 – 144 m n. p. m. Według danych GUS średnia gęstość zaludnienia wynosi 18,4 osób na km², co jest wartością dużo niższą niż średnia krajowa wynosząca 123 osoby na km². Na terenie gminy Torzym istnieją 4 obszary objęte ochroną przyrody w ramach sieci Natura 2000.

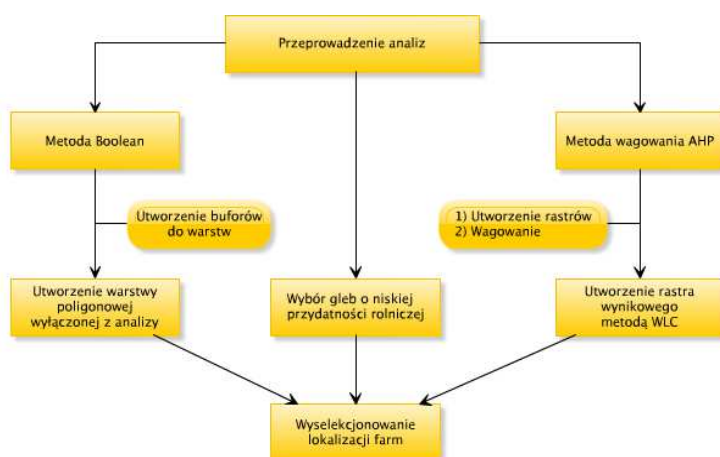
Podczas analiz wykorzystano dane z Bazy Danych Obiektów Topograficznych o szczegółowości 1:10 000 (BDOT10k), numeryczny model terenu (NMT) i dane dotyczące bonitacji gleb gromadzone w ewidencji gruntów i budynków. Warstwy BDOT10k wybrane do analizy lokalizacji farm fotowoltaicznych zawierają dane dotyczące sieci dróg, rzek, uzbrojenia terenu i pokrycia terenu. W badaniach uwzględniono odległości do sieci rzecznej i zbiorników wodnych. Ze względu na ograniczenia ekologiczno-prawne i techniczne zamontowania instalacji wzięto pod uwagę dane zawierające informacje na temat położenia obszarów chronionych i zadrzewionych. W analizach przestrzennych uwzględniono również aspekt ekonomiczny, wykorzystując w tym celu warstwy sieci uzbrojenia terenu, sieci dróg oraz obszarów zabudowanych. Na podstawie NMT opracowano mapę ekspozycji, która w dalszej części posłużyła do określenia nasłonecznienia. Analiza wielokryterialna wyznaczenia obszarów potencjalnej lokalizacji

farm fotowoltaicznych została poprzedzona pracami wstępnymi, polegającymi na analizie literatury, wyborze kryteriów, pozyskaniu i wstępnym przetworzeniu danych.

Do analiz wykorzystano program ArcGIS firmy Esri oraz wtyczkę Easy AHP programu Quantum GIS.

Metoda badań

Bazując na analizie literatury (Sonal et al., 2017; Uyan, 2013; Bober et al. 2016; Sanchez-Lozano et al., 2013; Całka i Mierzwiak, 2017) w poszukiwaniach potencjalnej lokalizacji farm solarnych wykorzystano zarówno czynniki środowiskowe, jak i ekonomiczne. Do czynników środowiskowych zaliczono: nasłonecznienie, ekspozycję terenu, odległość od obszarów chronionych, odległość od terenów zadrzewionych i zakrzewionych, odległość od wód powierzchniowych, klasę bonitacyjną gruntu. Wśród czynników ekonomicznych uwzględniono: odległości od dróg, zabudowań, linii energetycznych oraz minimalną powierzchnię wyznaczonego obszaru. W badaniach nie uwzględniono natomiast kryteriów społecznych.



Rys.1. Ogólny schemat prac badawczych

Etapy pracy ściśle związane z wykonaniem analiz przeprowadzono równolegle w trzech krokach, pokazanych na rysunku 1. Jednym z nich była analiza wagowania kryteriów metodą AHP, w wyniku której uzyskano obraz rastrowy przedstawiający przydatność gruntów pod lokalizację farmy. W kolejnym kroku wyłączono z analizy tereny na których nie może znajdować się farma, czyli obszary chronione, lasy, wody. Użyto do tego metody nakładkowej (boolean), która pokazuje w sposób zerojedynkowy tereny przydatne i nieprzydatne pod inwestycję. Ostatnim elementem była selekcja gleb o niskiej

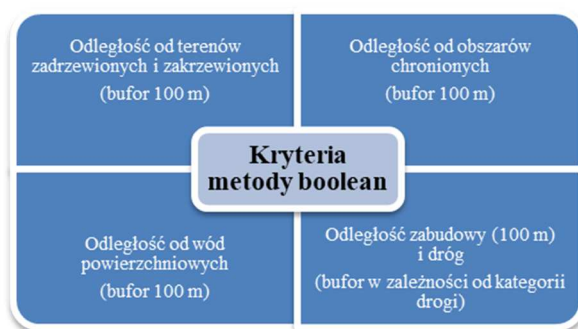
przydatności, które zgodnie z obowiązującymi regulacjami prawnymi można wyłączyć z produkcji rolnej. AHP, czyli hierarchiczna metoda analizy problemów decyzyjnych, jest jedną z metod rozwiązywania zadań decyzyjnych (Siejka, 2015; Malczewski i Jaroszewicz, 2018). Główną zaletą metody AHP jest złożony wielokryterialny i wielozakresowy model przedstawiony w ujęciu hierarchicznym. Rozwiązanie problemu ma charakter wieloetapowy, w wyniku którego, w uproszczeniu, oblicza się wagi poszczególnych kryteriów. Wagi te są następnie wykorzystywane do analizy metodą liniowego wagowania (ang. WLC Weighted Linear Combination). Zastosowane kryteria wraz z ich priorytetem pokazano w tabeli 1. Przyjęto, że 1 oznacza najniższą przydatność, 2 - średnią, a 3 - wysoką przydatności. Odległości i wielkości buforów ustalono na podstawie opisywanych w literaturze kryteriów ekonomicznych oraz uwarunkowań prawnych.

Metoda nakładkowa jest metodą zero-jedynkową, przypisującą każdemu obszarowi atrybut o wartości 0 informujący o jego bezwzględny wykluczeniu lub 1 – jeśli jest on uwzględniany w dalszych analizach. Wynikiem analizy jest zatem obszar, w którym nie może znajdować się farma solarna, czyli powierzchnie, które zostaną całkowicie wyłączone z badań. Kryteria o charakterze boolean zestawiono na rysunku 2.

Ważnym elementem była także powierzchnia wyznaczonych obszarów. Szacuje się, że dla średniej wielkości gospodarstwa, o mocy 1 MW potrzebna jest powierzchnia około 2ha (Pająk, 2013) i taką wartość przyjęto do analiz jako kryterium minimalnej powierzchni. Wyniki wyselekcjonowanych obszarów pokazano na mapie tematycznej.

Tabela 1. Zestawienie kryteriów, wartości granicznych oraz wag wyznaczanych metodą AHP

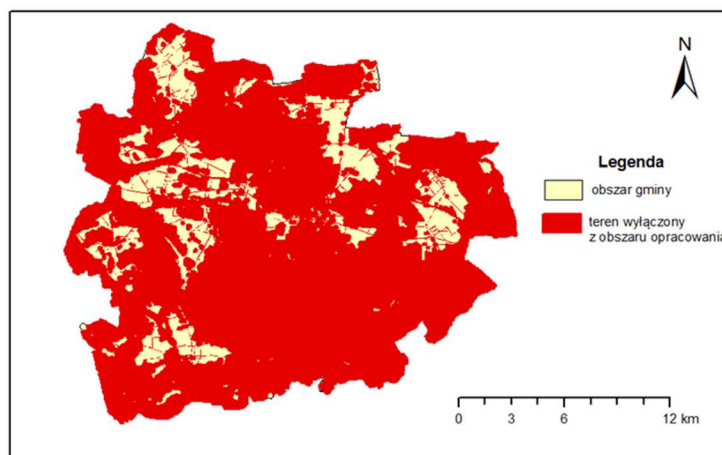
Kryterium	Wartości graniczne	Priorytet
Odległość od drogi	< 200 m	3
	200 m – 500 m	2
	> 500 m	1
Odległość od zabudowań	100 m – 1000 m	3
	1000 m – 3000 m	2
	< 100 m i > 3000 m	1
Odległość od linii energetycznych	< 200 m	3
	200 m – 500 m	2
	> 500 m	1
Nasłonecznienie	< 900 kWh/m ²	3
	850 kWh/m ² – 900 kWh/m ²	2
	> 850 kWh/m ²	1
Ekspozycja	SE, S SW	3
	E, W, teren płaski	2
	NE, N, NW	1



Rys.2. Kryteria wykorzystane w metodzie nakładkowej

Wyniki badań

Łączna powierzchnia terenów wyłączonych z opracowania wynosi 33 501,5 ha (rys.3), co stanowi 89% powierzchni gminy. Największą powierzchnię wyłączoną stanowią obszary zadrzewione i zakrzewione, w obrębie których położone są tereny chronione.



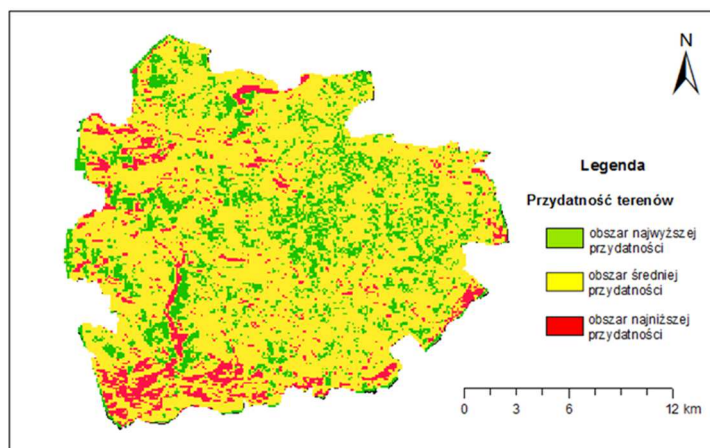
Rys. 3. Tereny niespełniające kryterium zero-jedynkowego, wyłączone z dalszych analiz

Pozostałe kryteria zostały wagowane metodą AHP (tabela 2), a wyznaczone wagi umożliwiły waloryzację terenu pod kątem przydatności do lokalizacji farm solarnych metodą WLC, na tereny bardzo przydatne, średnio przydatne i mało przydatne do lokalizacji farm solarnych (rys. 4).

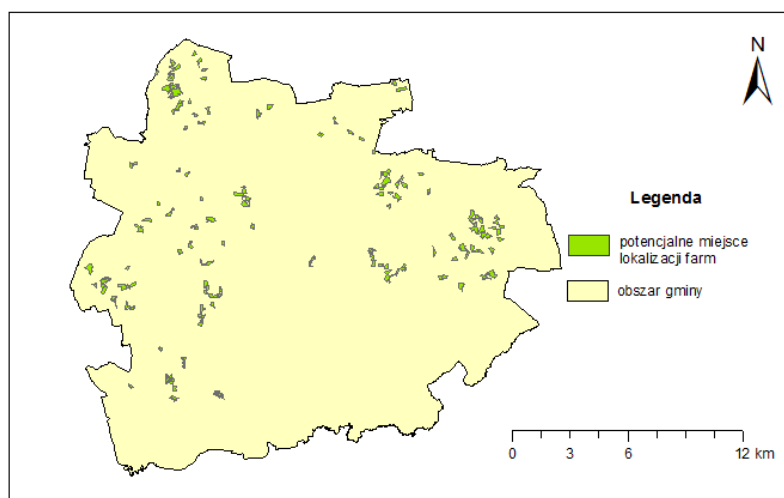
Tabela 2. Porównanie kryteriów parami

Kryteria	Nasłonecznienie	Ekspozycja	Odległość od zabudowy	Odległość od linii energetycznej	Odległość od dróg	Wagi
Nasłonecznienie	1	1,0	9,0	7,0	7,0	0,407
Ekspozycja	1,0	1	7,0	7,0	9,0	0,402
Odległość od zabudowy	0,111	0,143	1	1,0	3,0	0,069
Odległość od linii energetycznej	0,143	0,143	1,0	1	5,0	0,087
Odległość od dróg	0,143	0,111	0,33	0,2	1	0,035

Największy wpływ na lokalizację farm fotowoltaicznych ma nasłonecznienie z wagą równą 40,7% oraz ekspozycja terenu – waga równa 30,2%. Najmniejszy, zaledwie 3,5% - odległość od dróg.

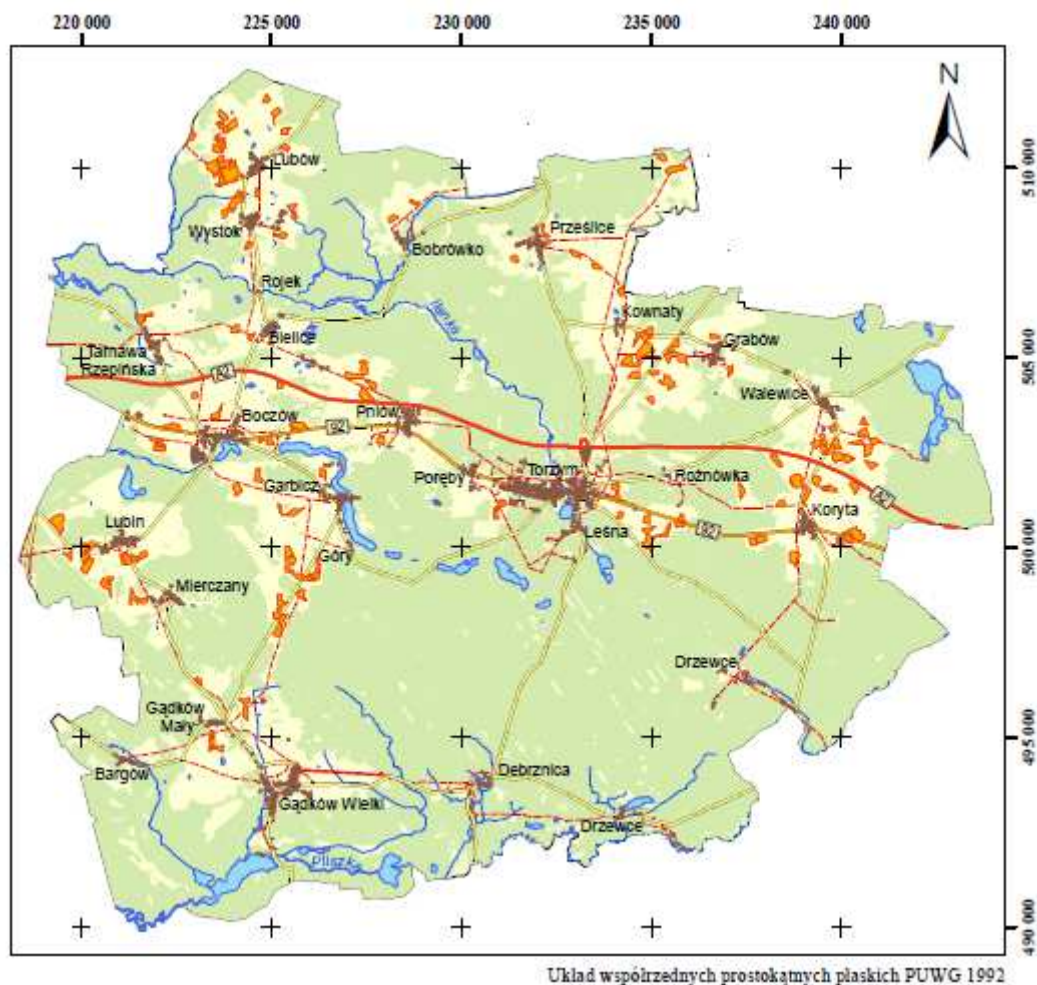
**Rys.4.** Waloryzacja terenu pod inwestycje fotowoltaiczne, wynik analiz metodami AHP i WLC

Po wyeliminowaniu obszarów o powierzchni mniejszej od 2 ha liczba potencjalnych lokalizacji uległa znacznemu ograniczeniu. Geograficzne rozmieszczenie obszarów o największej przydatności do inwestycji fotowoltaicznych przedstawia rysunek 5.



Rys.5. Mapa obszarów o najwyższej przydatności pod względem ekonomicznym, środowiskowym i technicznym

W wyniku analizy AHP-WLC zostało wybranych 1320 lokalizacji o najwyższej przydatności o łącznej powierzchni 7073,8 ha, co stanowi 18,8% powierzchni gminy. Większość z tych miejsc została następnie wyłączonych z analiz w następnym etapie ze względu na obecność na tym terenie obszarów, które uniemożliwiają powstanie farmy (np. Natura 2000, wody, lasy). W wyniku łącznej analizy nakładkowej oraz AHP-WLC zostało 357 obszarów o najwyższej przydatności o łącznej powierzchni 1285,9 ha, co stanowi 3,4% powierzchni gminy. Liczba potencjalnych lokalizacji została następnie zmniejszona na skutek zastosowania kryterium minimalnej powierzchni 2 ha. W czego rezultacie uzyskano 119 obszarów o łącznej powierzchni 1138,6 ha, co stanowi 3,0% powierzchni gminy. Po przeprowadzeniu analizy, z uwzględnieniem ostatniego kryterium – klasy gruntów, wybrano 111 obszarów, spełniających wszystkie kryteria środowiskowe i ekonomiczne. Łączna powierzchnia tych obszarów wynosi 615,5 ha, co stanowi 1,6% powierzchni całej gminy (rys. 6). Najmniejszy wyznaczony obszar ma powierzchnię 2,0 ha, a największy 21,6 ha.



Rys.6. Mapa lokalizacji farm wiatrowych w gminie Torzym

Podsumowanie i wnioski

Rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną powoduje coraz większe zainteresowanie źródłami odnawialnymi, co ma swój wyraz m.in. w regulacjach prawnych zarówno na poziomie UE jak i krajowym. Niemniej jednak, warunki środowiskowe, zagospodarowanie terenu oraz uwarunkowania ekonomiczne wpływają na to, że lokalizacja odnawialnych źródeł energii możliwa jest jedynie na wybranych obszarach. Artykuł pokazuje, że zastosowanie analiz wielokryterialnych w środowisku GIS jest niezwykle efektywnym połączeniem umożliwiającym rozwiązanie problemów lokalizacyjnych.

Ważnym etapem analiz lokalizacyjnych jest określenie kryteriów. Analiza aktów prawnych i wytycznych technicznych dotyczących farm fotowoltaicznych umożliwiły wybór kryteriów środowiskowych (między innymi: nasłonecznienie, ekspozycja terenu), technicznych (odległość od dróg, linii elektrycznych i zabudowy) i ekonomicznych (wielkość i kształt obszaru). Warto zauważyć, że nie wszystkie kryteria wpływające na lokalizację farm solarnych są tak samo ważne i w jednakowy sposób wpływają na przydatność terenu. Dlatego też, wyznaczono wagi kryteriów za pomocą metody AHP. Minusem metody AHP jest pewien subiektywizm oceny ważności w parach kryteriów, co wpływa na ostateczne wagi, jednak właściwie przeprowadzona analiza i dyskusja wyników umożliwia ustalenie wag optymalnych.

Obszary o najlepszych warunkach lokalizacyjnych znajdują się w zachodniej i wschodniej części gminy. Jest to zdeterminowane głównie pokryciem terenu, a mianowicie lokalizacją terenów niezalesionych i niezabudowanych, Tereny te posiadają najlepsze nasłonecznienie i nachylenie, czyli cechy o najwyższych wagach. Warto zauważyć, że pomimo iż prawie 90% obszaru jest wyłączona z analizy i wyklucza możliwość lokalizacji farm solarnych, istnieją tereny na których taka lokalizacja jest możliwa, i które posiadają bardzo dobre warunki lokalizacyjne.

Wyznaczenie potencjalnych lokalizacji inwestycji solarnych wymaga uzyskaniu wielu potrzebnych danych. Zalecane źródła to dane zgromadzone w państwowym zasobie geodezyjnym i kartograficznym, w szczególności BDOT10k, dane NMT i EGiB. Jako dane urzędowe cechują się one dużą wiarygodnością i odpowiednią aktualnością. Pewną barierą mogą być koszty ich pozyskania, jednak dla administracji oraz do celów edukacyjnych i naukowych dane te są udostępniane bezpłatnie.

Podziękowania

Wykorzystane w badaniach dane pochodzą z państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego i zostały udostępnione do celów edukacyjno-badawczych.

Artykuł powstał na podstawie pracy inżynierskiej Anny Foks pt „Mapa tematyczna rozmieszczenia farm solarnych na terenie wybranej gminy”, przygotowanej pod kierunkiem dr inż. Beaty Całki i obronionej na Wydziale Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie w 2017 roku.

Literatura (References)

Abbas A., Mohsen S., Mohammad J.S., 2017: A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran. *Solar Energy*, 155, s. 342-353, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.075>

- Bober A., Całka B., Bielecka E., 2016: Application of state survey and mapping resources for selecting sites suitable for solar farms. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016.
- Całka B., Mierzwia M., 2017: Multi-criteria analysis for solar farm location suitability. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 104, s. 20-32, DOI: 10.1515/rgg-2017-001
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009r. w sprawie promowania stosowania energii źródeł odnawialnych (Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on promoting the use of renewable Energy) (Dz.U. UE L 09.140.16).
- EPIA, 2016: European Photovoltaic Industry Association (EPIA), Global Market Outlook for Photovoltaic until 2016, s. 5-42.
- Malczewski J., Jaroszewicz J., 2018: Podstawy analiz wielokryterialnych w systemach informacji przestrzennej (Basis of for multi-criteria analysis in spatial information systems). Oficyna wyd. Politechniki Warszawskiej, ISBN 978-83-7814-762-6, 254 s.
- Pająk P., 2013: Opinia ekspercka dotycząca podstawowych założeń budowy i funkcjonowania farmy fotowoltaicznej (Expert opinion on the basic objectives of the construction and operation of a photovoltaic farm), http://www.szczeczeszyn.pl/wp-content/uploads/2013/06/opinia_farmafoto_2013.pdf
- Saaty TL. Group decision making and the AHP. New York: Springer Verlag; 1989.
- Sanchez-Lozano J. M., Teruel-Solano J., Soto-Elvira P. L. 2013: Garcia Cascales M. S., Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in southeastern Spain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, s. 544–556.
- Siejka M., 2015. Optymalny wybór lokalizacji inwestycji w gospodarce nieruchomościami (Optimal choice of locating investments in real estate management). Polska Akademia Nauk – Oddział w Krakowie. Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi.
- Sonal S., Vijay N., Sunil L., 2017: Investigation of feasibility study of solar farms deployment using hybrid AHP-TOPSIS analysis: Case study of India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, s. 496-511.
- Urząd Statystyczny, Zielona Góra, 2019: <http://zielonagora.stat.gov.pl> (dostęp: 18.08.2019).
- Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych (Act of 21 March 1985 on public roads) (Dz.U. 1985 nr 14 poz. 60).
- Uyan M., 2013: GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, s. 11-17, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.042>
- WIOŚ, 2019: <http://www.zgora.pios.gov.pl> (dostęp: 18.08.2019).

Streszczenie

Celem badań było przedstawienie przestrzennej potencjalnej lokalizacji farm fotowoltaicznych dla gminy Torzym, zlokalizowanej w zachodniej, najbardziej nasłonecznionej części Polski. Bazując na dostępnej literaturze określono kryteria środowiskowe i ekonomiczne warunkujące lokalizację farm solarnych oraz ich wartości brzegowe. Analiza AHP pozwoliła na ustalenie, że najistotniejszymi czynnikami lokalizacyjnymi na badanym terenie było ukształtowanie terenu, a mianowicie nasłonecznienie i ekspozycja. Użytkowanie ziemi, w szczególności bardzo duże zalesienie oraz obecność terenów chronionych spowodowały, że prawie 90% powierzchni gminy musiała zostać wyłączona z działań inwestycyjnych. Ostatecznie przyjęte kryteria pozwoliły na wyznaczenie 111 obszarów większych od 2 ha, których łączna powierzchnia stanowi zaledwie 1,6% obszaru gminy.

Dane autorów / Authors details:

mgr inż. Anna Foks
fox.anna@wp.pl

dr inż. Beata Całka
ORCID: 0000-0002-7147-0849
beata.calka@wat.edu.pl

prof. dr hab. Elżbieta Bielecka
ORCID: 0000-0003-3255-1264
elzbieta.bielecka@wat.edu.pl

Przesłano / Received 22.07.2019
Zaakceptowano / Accepted 18.09.2019
Opublikowano / Published 28.09.2019



© Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).