

## ZASTOSOWANIE METODY AHP DO PORÓWNIANIA KRYTERIÓW WYBORU LOKALIZACJI BUDOWY FARMY WIATROWEJ

Alicja STOLTMANN

Politechnika Gdańska Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
e-mail: a.stoltmann@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono opis oraz porównanie kryteriów wyboru lokalizacji farmy wiatrowej. Kryteria te uwzględniają pomiary wietrzności na rozpatrywanym terenie, lokalizację turbin wiatrowych, lokalizację linii elektroenergetycznej służącej do przesyłu wyprodukowanej energii elektrycznej od farmy wiatrowej do stacji elektroenergetycznej (GPZ), infrastrukturę towarzyszącą, warunki techniczne przyłączenia do sieci elektroenergetycznej oraz otoczenie projektu.

Do porównania kryteriów zastosowano metodę AHP (Analytic Hierarchy Process) przyporządkowując skalę ocen preferencji od 1 do 9. Ustalony ranking kryteriów, biorący pod uwagę wpływ kryteriów na powodzenie projektu budowy farmy wiatrowej wskazał, że najważniejszym kryterium głównym jest kryterium związane z uzyskaniem decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach dla obszaru farmy wiatrowej.

**Słowa kluczowe:** Analytic Hierarchy Process, proces inwestycyjny w energetyce

### 1. WPROWADZENIE

Krajowy System Elektroenergetyczny wymaga modernizacji ze względu na wyeksploatowane bloki elektrowni węglowych oraz konieczność realizacji postanowień Dyrektywy UE [1] nakładającej na państwa członkowskie obowiązek rozwoju energetyki odnawialnej. Do odnawialnych źródeł energii należy zaliczyć m.in. energię wiatru, która przekształcona w energię elektryczną za pomocą turbin wiatrowych pozwala na produkcję energii bez emisji zanieczyszczeń do atmosfery. Dynamiczny rozwój energetyki wiatrowej może przyczynić się do wypełnienia zobowiązań wynikających z pakietu energetyczno-klimatycznego UE.

W niniejszym opracowaniu proces inwestycyjny farmy wiatrowej obejmuje czas od momentu prac przygotowawczych inwestycji budowy farmy wiatrowej do uzyskania pozwolenia na budowę. Proces inwestycyjny podzielono na 9 głównych zagadnień uwzględniając: pomiary wietrzności, dokumenty planistyczne, decyzję środowiskową oraz prawo do terenu dla wyprowadzenia mocy oraz dla obszaru farmy wiatrowej, warunki techniczne przyłączenia do sieci, a także otoczenie projektu. Mnogość wymienionych zagadnień świadczy o dużym stopniu komplikacji procesu inwestycyjnego i powoduje, że trwa on kilka lat.

### 2. OPIS METODY AHP

Metoda AHP (ang. *Analytic Hierarchy Process*) jest metodą opracowaną przez T.L. Saaty'ego [2]. Jest to metoda wielokryterialnej analizy problemów decyzyjnych. Metoda ta pomimo swojego zaawansowania matematycznego i czasochłonności obliczeń jest stosowana w wielu dziedzi-

nach, np. politologii, zarządzaniu do ocen różnego rodzaju przedsięwzięć a także w złożonych zagadnieniach techniczno-gospodarczych. Jest to także jedna z najszybciej rozwijających się i najbardziej znanych na świecie metod, ponieważ łączy ze sobą koncepcje z dziedziny matematyki i psychologii. Dużą zaletą metody jest porównywanie wybranych elementów parami i nadawanie im preferencji względnej określonej słownie np. jednakowe znaczenie, słaba przewaga. Poszczególne preferencje odpowiadają konkretnym liczbom, w skali porównań T.L. Saaty'ego [2] (tablica 1). Nadawanie preferencji względnej jest ogromną zaletą metody, gdyż oceny są subiektywne i podlegają ocenie eksperckiej, co dodatkowo zwiększa poprawność merytoryczną wyników. Porównanie kryteriów parami pozwala na jednoczesne uporządkowanie ich pod względem jakościowym (dotyczącym porządku przewagi jednego kryterium nad drugim) i ilościowym (wskazuje o ile jedno kryterium jest ważniejsze od drugiego).

Tablica 1. Skala porównań parami wg. [2]

Skala ważności	Definicja	Opis
1	równe znaczenie	oba działania przyczyniają się w równym stopniu do osiągnięcia celu
3	słaba przewaga	słaba przewaga jednego elementu w stosunku do drugiego
5	duża przewaga	duża przewaga jednego elementu w stosunku do drugiego
7	bardzo duża przewaga	bardzo duża przewaga jednego elementu w stosunku do drugiego
9	absolutna przewaga	przewaga jednego elementu w stosunku do drugiego jest na najwyższym możliwym poziomie
2, 4, 6, 8	wartości pośrednie	wartości środkowe skali do wyrażenia opinii kompromisowych
Odwrotność skal (1/3, ..., 1/9)		jeżeli element $i$ otrzyma ocenę z powyższej skali, będącą porównaniem z elementem $j$ , to $j$ ma odwrotną wartość

Analiza kryteriów wyboru lokalizacji farmy wiatrowej metodą AHP składa się z dwóch etapów:

1. Zdefiniowanie celu głównego problemu decyzyjnego oraz kryteriów przyczyniających się do osiągnięcia celu i umieszczenie ich w modelu hierarchicznym. Na poziomie pośrednim znajdują się kryteria cząstkowe wpływające na stopień realizacji celu nadrzędnego.

2. Określenie preferencji względnej przez porównanie parami kryteriów głównych oraz kryteriów cząstkowych, następnie obliczenie względnej dominacji czynników. Wybór najistotniejszego kryterium mającego największy wpływ na realizację celu nadrzędnego.

Aby dokonać porównania parami poszczególnych kryteriów należy umieścić je w kwadratowej macierzy porównań parami typu  $(n \times n)$ . Macierz porównań parami składa się z  $n$  jedynek umieszczonych na głównej diagonalnej. Porównania dokonuje się poprzez wskazanie wpływu elementów z lewej strony macierzy na elementy znajdujące się na górze macierzy. Poniżej głównej diagonalnej znajdują się odwrotności porównań parami, wzór macierzy  $A$  zamieszczono poniżej:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ze względu na odwrotności porównań parami,  $i$ -ty wiersz jest odwrotnością  $i$ -tej kolumny, a więc zachodzi równość:

$$Aw = nw \quad (2)$$

gdzie:  $w$  – wektor kolumnowy o składowych  $w_1, w_2, \dots, w_n$

Składowe wektora własnego w stanowią wektor priorytetów poszczególnych kryteriów ze względu na cel główny analizy. Aby go wyznaczyć należy zastosować wzór

$$w = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij} \quad (3)$$

Jedną z najważniejszych wielkości wyznaczanych w metodzie AHP jest największa wartość własna macierzy i jest jedną z miar zgodności porównań odzwierciedlających proporcjonalność preferencji. Wartość własną macierzy wyznacza się ze wzoru:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{w_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad (4)$$

Porównania parami są konsekwentne, jeśli  $\lambda_{\max}$  jest zbliżone do  $n$  [3].

Drugą wielkością konieczną do uzyskania w metodzie AHP jest współczynnik niespójności  $CI$  (ang. *Consistency Index*), który wyznacza odchylenie od zgodności. Wyznacza się go ze wzoru:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

Ostatnim wskaźnikiem spójności porównań parami jest współczynnik niezgodności  $CR$  (ang. *Consistency Ratio*), określający stopień, w jakim porównania ważności charakterystyk są niezgodne ze sobą. Wskaźnik ten wyznacza się ze wzoru:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

gdzie  $RI$  (ang. *Random Indeks*) to losowy indeks niezgodności.

Wielkości  $RI$  oszacowane przez T.L. Saaty'ego przedstawiono w opracowaniach [4, 5]

### 3. OPIS KRYTERIÓW

W celu porównania kryteriów oceny lokalizacji budowy farmy wiatrowej wyróżniono kryteria główne, które następnie podzielono na kryteria cząstkowe.

Oceniając daną lokalizację budowy farmy wiatrowej należy ocenić obszar pod względem możliwości wykorzystania energii wiatru. W tym celu należy przeprowadzić pomiary wiatru umieszczając urządzenia pomiarowe potencjału energetycznego wiatru na masztach pomiarowych. Pomiary siły wiatru przeprowadza się zwykle przez okres 1 roku. W przypadku chęci uzyskania bardziej miarodajnych danych zaleca się wykonywanie pomiarów przez dłuższy okres czasu (zazwyczaj do 5 lat).

Energia elektryczna produkowana przez farmę wiatrową jest wyprowadzona linią elektroenergetyczną połączoną z siecią elektroenergetyczną. Należy, zatem uwzględnić uwarunkowania planistyczne, terenowe i środowiskowe dla budowy wytworzenia mocy. W przypadku, gdy linia elektroenergetyczna nie jest uwzględniona w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego (MPZP) należy złożyć wnioski o zmianę bądź sporządzenie MPZP lub uzyskać decyzję o lokalizacji inwestycji celu publicznego. Istotny wpływ na czas uzyskania wymienionych dokumentów ma technologia wykonania, napięcie linii elektroenergetycznej oraz jej długość.

Obszar farmy wiatrowej również musi być uwzględniony w MPZP, w przeciwnym wypadku plan należy zmienić lub, w przypadku braku MPZP lub studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego, uchwalić plan lub studium.

Uzyskanie ostatecznej decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach dla farmy wiatrowej również jest procesem długotrwałym i wielowątkowym z uwagi na ilość opracowań, jakie należy wykonać, aby decyzję uzyskać. Dokładna analiza otoczenia lokalizacji budowy farmy wiatrowej, określająca czy w jej pobliżu nie znajdują się obszary lub formy ochrony przyrody oraz tereny chronione akustycznie, pozwala zminimalizować ryzyko uzyskania negatywnej decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach.

Ważnym opracowaniem na drodze uzyskania decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach jest wykonanie raportu środowiskowego, który następnie jest uzgadniany z Regionalnym Dyrektorem Ochrony Środowiska oraz jest opiniowany przez odpowiedniego Inspektora Sanitarnego. W celu wykonania raportu środowiskowego należy przeprowadzić analizy przyrodnicze, które często muszą być realizowane w określonych porach roku (np. okresy migracji ptaków) i w efekcie mogą doprowadzić do uzyskania negatywnej decyzji o środowiskowych oddziaływaniach dla farmy wiatrowej, lub uzyskania pozwolenia na pracę farmy wiatrowej w określonych porach roku, co zmniejsza opłacalność inwestycji.

Na etapie planowania budowy farmy wiatrowej inwestor zabezpiecza nieruchomości gruntowe tak, aby po uzyskaniu wszystkich niezbędnych pozwoleń i decyzji móc rozpocząć budowę farmy wiatrowej oraz infrastruktury towarzyszącej.

Aby produkowana przez farmę wiatrową energia elektryczna dotarła do odbiorcy niezbędne jest zawarcie umowy przyłączeniowej z operatorem sieci przesyłowej lub dystrybucyjnej. Pierwszym krokiem do zawarcia umowy jest uzyskanie warunków przyłączeniowych. Aby je uzyskać inwestor musi wykazać, że posiada wszystkie niezbędne dokumenty, aby móc uzyskać warunki przyłączenia.

#### 4. MODEL HIERARCHICZNY I ANALIZA ZAGADNIENIA

Problem decyzyjny w metodzie AHP przedstawia się w postaci hierarchicznej ilustrującej podział wszystkich kryteriów na kryteria główne oraz kryteria cząstkowe. Kryteria cząstkowe są porównywalne parami w odniesieniu do kryteriów głównych. Kryteria te mają wpływ na cel główny problemu decyzyjnego, znajdującego się na czele hierarchii i obejmują wszystkie elementy wskazane przez grupę ekspertów.

Tablica 2. Zestawienie kryteriów głównych i kryteriów cząstkowych

<b>A</b>	<b>Pomiary wietrzności</b>
A1	Kompletność pomiarów
A2	W jakim okresie wykonano pomiary
A3	Odległość pomiędzy urządzeniem pomiarowym a wysokością wieży
<b>B</b>	<b>Dokumenty planistyczne – wyprowadzenie mocy</b>
B1	Technologia wykonania linii
B2	Przewidywana długość linii
B3	Wysokość napięcia linii
B4	Ilość dokumentów do uzyskania
B5	Konieczność zmiany przeznaczenia gruntów rolnych i leśnych
<b>C</b>	<b>Decyzja środowiskowa – wyprowadzenie mocy</b>
C1	Linia zlokalizowana na terenach chronionych przyrodniczo
C2	Wykonanie raportu środowiskowego
C3	Wykonanie opracowań przyrodniczych
C4	Uzgodnienia raportu środowiskowego z RDOŚ i PIS
C5	Protesty społeczne w zakresie budowy linii
<b>D</b>	<b>Prawo do terenu – wyprowadzenie mocy</b>
D1	Długość linii
D2	Napięcie linii
D3	Technologia wykonania linii
D4	Koszt uzyskania prawa do terenu
D5	Lasy na trasie linii
D6	Ilość działek ewidencyjnych znajdujących się na trasie linii
D7	Przeprowadzenie rozmów z właścicielami terenów na temat możliwości lokalizacji linii
D8	Wstępne zgody właścicieli terenów na lokalizację linii
<b>E</b>	<b>Warunki techniczne przyłączenia do sieci elektroenergetycznej</b>
E1	Dokumenty planistyczne potwierdzające dopuszczalność lokalizacji FW
E2	Tytuł prawny do terenu
E3	Sieć el. en. operatora umożliwiająca przyłączenie FW o planowanej mocy elektrycznej
E4	Inne podmioty ubiegające się o wydanie warunków przyłączenia w wybranym punkcie przyłączenia

Poprawność merytoryczna wyników analizy jest uzależniona od wiedzy i doświadczenia ekspertów dokonujących oceny kryteriów i stanów zaawansowania rozważanych projektów. Na potrzeby niniejszej analizy współpracowano ze specjalistami realizującymi projekty budowy farm wiatrowych po stronie inwestora.

Zgodnie z metodą AHP kryteria zostały umieszczone w tabeli i następnie porównane parami uwzględniając kryterium ważności jednego elementu względem drugiego. Porównania dokonano według skali opisanej w tablicy 1. uzyskując macierz, której następnie wyznaczono wartości własne, wektor własny oraz wartość własną. Wyznaczono także wskaźniki niespójności, spójności oraz niezgodności (odpowiednio *CI*, *CR*, *RI*).

Dla omawianego przykładu struktura hierarchiczna składa się z:

- celu głównego: wpływ czynników na czas uzyskania pozwolenia na budowę farmy wiatrowej,
- kryteriów głównych (A, B,...,I),
- kryteriów cząstkowych (A1, A2,..., B1, B2,..., I4).

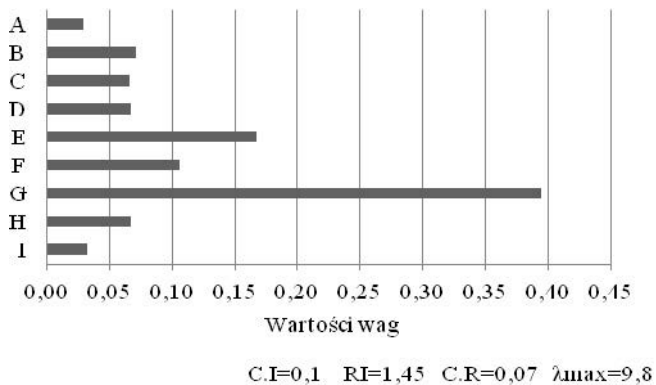
Metoda AHP pozwala na analizę rozbudowanych struktur hierarchicznych procesów decyzyjnych. W omawianym przykładzie wytypowano 9 kryteriów głównych oraz 46 kryteriów cząstkowych, co przedstawiono w tablicy 2.

<b>F</b>	<b>Dokumenty planistyczne – farma wiatrowa</b>
F1	Komplet dokumentów planistycznych umożliwiających lokalizację FW
F2	Stan planistyczny obszaru lokalizacji FW
F3	Konieczność zmiany przeznaczenia gruntów rolnych i leśnych
<b>G</b>	<b>Decyzja środowiskowa – farma wiatrowa</b>
G1	Obszar FW zlokalizowany na terenie chronionym przyrodniczo
G2	Obszary ochrony przyrody w sąsiedztwie FW
G3	Uzgodnienie raportu środowiskowego z RDOŚ i PIS
G4	Wykonanie opracowań przyrodniczych
G5	Istnienie zagrożeń wynikających z uwarunkowań środowiskowych np. migracja ptaków, lokalizacje w pobliżu gniazd gatunków chronionych
G6	Obszar FW zlokalizowany w odległości pow. 200 m od terenów leśnych, zadrzewień, oczek wodnych
G7	Tereny chronione akustycznie znajdujące się w bezpiecznej odległości (700–800 m)
G8	Protesty społeczne w zakresie budowy FW
<b>H</b>	<b>Prawo do terenu – farma wiatrowa</b>
H1	Posiadane prawo do terenu obejmujące lokalizacje infrastruktury towarzyszącej
H2	Koszt uzyskania terenu na cele budowlane
H3	Roczny koszt korzystania z gruntu po wybudowaniu FW
H4	Przeprowadzenie rozmów z właścicielami terenów na temat możliwości lokalizacji FW
H5	Wstępne zgody właścicieli terenów na lokalizację turbin wiatrowych
H6	Ilość turbin przypadająca na 1 działkę ewidencyjną
<b>I</b>	<b>Otoczenie projektu</b>
I1	Poparcie projektu budowy przez wójta/burmistrza/prezydenta miasta
I2	Poparcie projektu budowy przez radę gminy/miasta
I3	Akceptowalność projektu budowy przez lokalną społeczność
I4	Przeprowadzenie działań promocyjnych w ramach projektu

Następnie powtórzono schemat czynności analizując wpływ poszczególnych kryteriów cząstkowych na kryteria główne oraz na cel nadrzędny, co omówiono w części artykułu opisującej wyniki analizy.

#### 5. WYNIKI ANALIZY

Całość analizy metodą AHP przeprowadzono w arkuszu MS Excel. W procesie analizy eksperckiej wytypowano 9 kryteriów głównych następnie dokonano porównania parami poszczególnych kryteriów zgodnie ze skalą opracowaną przez T.L. Saaty'ego [2] (przedstawioną w tab. 1) oraz wyznaczono wektor preferencji, co przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wyniki porównania parami kryteriów głównych

Jak wynika z analizy metodą AHP przeważający wpływ na czas uzyskania pozwolenia na budowę farmy wiatrowej ma uzyskanie decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach (0,395). Spowodowane jest to skomplikowaniem procedury mającej na celu uzyskanie decyzji i wysokim ryzykiem nieuzyskania decyzji z przyczyn lokalnych (często trudnych do wstępnego oszacowania) uwarunkowań środowiskowych. W drugiej kolejności na realizację celu nadrzędnego wpływa uzyskanie warunków technicznych przyłączenia do sieci elektroenergetycznej (0,168). Jest to spowodowane ilością dokumentów (i długością procedur ich uzyskania), jakie należy uzyskać, aby móc ubiegać się o wydanie warunków przyłączeniowych (m.in. uwzględnienie lokalizacji farmy wiatrowej w dokumentach planistycznych na danym terenie). Najmniejszy wpływ na spełnienie celu głównego ma pomiar wietrzności na danym terenie (0,029), ponieważ nawet w przypadku, gdy inwestor nie posiada pomiarów wietrzności, może prowadzić je równoległe wraz z procedurami uzyskiwania pozostałych pozwoleń oraz skorzystać z danych meteorologicznych lub statystycznych.

## 6. PODSUMOWANIE

Metoda AHP, choć czasochłonna, przy dużej liczbie kryteriów głównych oraz kryteriów cząstkowych jest dosko-

nałym narzędziem do analizowania zagadnień związanych z analizą lokalizacji inwestycji w energetyce. Jak pokazano na przykładzie porównania kryteriów mających na celu skrócenie czasu potrzebnego na uzyskanie pozwolenia na budowę farmy wiatrowej metoda AHP pozwala na analizę problemów realnie występujących.

W wyniku analizy wskazano, iż najważniejszymi kryteriami głównymi są uzyskanie decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach dla obszaru farmy wiatrowej oraz uzyskanie warunków technicznych przyłączenia do sieci elektroenergetycznej.

Jak wspomniano, metoda AHP jest czasochłonna dla dużej liczby kryteriów głównych i cząstkowych. Jest także tematem wielu prac naukowych i badawczych, dzieląc tym samym naukowców na zwolenników i przeciwników metody. Pomimo krytycznych głosów popartych różnymi dowodami, proces podejmowania decyzji metodą AHP znajduje zastosowanie w praktyce, ze względu na udział ekspertów w trakcie dokonywania analizy. Zarówno odpowiedni dobór grupy ekspertów, poprawne wykonanie obliczeń matematycznych oraz krytyczna analiza wyników warunkują sens stosowania metody AHP w analizach inwestycji w energetyce.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych z dnia 23 kwietnia 2009 r.
2. Saaty T. L.: How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process, Eur. J. Oper. Res., 1990.
3. Plazibat N., Babic Z.: Ranking of enterprises based on multicriterial analysis, Int. J. Prod. Econ., Nr 97, 1998, s. 29–35.
4. Downarowicz O., Krause J., Sikorski M., Stachowski W.: Zastosowanie metody ahp do oceny i sterowania poziomem bezpieczeństwa złożonego obiektu technicznego, P. Gdań. Wydz. Zarz. i Ekon. Zakł. Erg. i Eksp. Syst. Tech., 2000, s. 7–42.
5. Adamus W., Gręda A.: Wspomaganie decyzji wielokryterialnych w rozwiązywaniu wybranych problemów organizacyjnych i menedżerskich, Badania operacyjne i Decyz., 2005 s. 5–36.

## APPLICATION OF AHP METHOD FOR COMPARING THE CRITERIA USED IN LOCATING WIND FARMS

The article presents description and comparison of criteria used for choosing the localization of a wind farm. The criteria include measurements of wind kinetic energy on a given location, location of wind turbines, location of transmission line which is used for power transfer from wind farm to substation, location of local infrastructure and grid connection related with technical requirements and project's environment.

In order to compare the above mentioned criteria AHP (Analytic Hierarchy Process) method was used, with 1 to 9 point scale. As far as matching preferences with criteria is concerned it embraces issues of obtaining decisions and permissions. The aim of the article is to create a ranking of criteria in their correlation to probability of project success.

After analysis indicated that the dominant influence on the time to obtain a permit for the construction of a wind farm is to obtain the environmental conditions for the wind farm area and obtaining issue terms of connection to the transmission grid.

**Keywords:** Analytic Hierarchy Process (AHP), investment process