

## PORÓWNANIE PROJEKTÓW BUDOWY FARM WIATROWYCH Z WYKORZYSTANIEM METODY AHP

Alicja STOLTMANN

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

**Streszczenie:** W referacie opisano porównanie projektów budowy farm wiatrowych będących w różnych stadiach realizacji przygotowania inwestycji. Metodą, którą wykorzystano do porównania projektów jest metodą analizy wielokryterialnej AHP (Analytic Hierarchy Process). Referat przedstawia opis metody oraz kryteriów, pod względem których porównano projekty. Wykazano, dla którego z rozpatrywanych projektów czas zdobycia wszystkich niezbędnych decyzji i pozwoleń do uzyskania decyzji o pozwoleniu na budowę jest najkrótszy.

**Słowa kluczowe:** Analytic Hierarchy Process, proces inwestycyjny w energetyce, projekt budowy farmy wiatrowej.

### 1. WPROWADZENIE

Referat przedstawia analizę porównawczą trzech projektów budowy farm wiatrowych.

Częścią referatu jest opis kryteriów, które muszą zostać uwzględnione w trakcie analizy porównawczej projektów budowy farm wiatrowych. Tego typu analiza znajduje zastosowanie w przypadku zakupu projektów inwestycyjnych będących w fazie przygotowania lub wczesnej realizacji i jest zagadnieniem wielowątkowym oraz wielowymiarowym.

Realizacja poszczególnych etapów procesów inwestycyjnych weryfikuje stan zaawansowania projektu. Jednak nie wszystkie etapy realizacji inwestycji są równie ważne w globalnym ujęciu problemu. Ponadto każdy etap realizacji inwestycji dzieli się na kilka pomniejszych zadań, które trzeba wykonać, aby zakończyć dany etap. Zadania te również nie są sobie równoważne, ponieważ wymagają różnych długości czasu lub różnych nakładów finansowych związanych z ich realizacją.

Aby zweryfikować, na jaki etap należy zwrócić szczególną uwagę posłużono się analizą kryteriów opisujących poszczególne etapy i zadania realizowane w poszczególnych etapach. Jest to zagadnienie natury wielokryterialnej, które może być rozwiązane za pomocą metod zaliczanych do grupy metod wielokryterialnych z ang. multiple-criteria decision analysis (MCDA). Powszechnie stosowane są metody ELECTRE (ang. Elimination and Choice Translating Reality) I, II, III, IV, PROMETHEE (z ang. Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) I i II, oraz AHP (z ang. Analytic Hierarchy Process)[1][2]. Każda z wymienionych metod posiada wady i ograniczenia. Zdecydowano się przeprowadzić analizę porównawczą projektów z wykorzystaniem metody AHP, ponieważ pozwala na ilościowe i jakościowe uporządkowanie kryteriów, zarówno

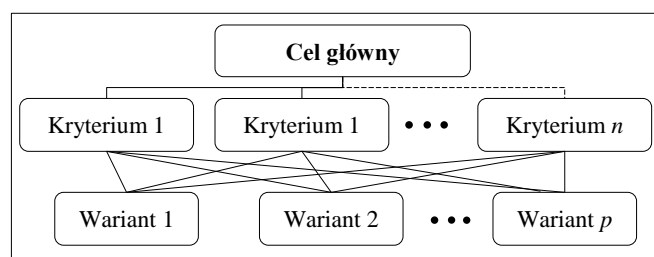
globalnych wpływających bezpośrednio na realizację inwestycji jak i lokalnych, wpływających bezpośrednio tylko na realizację poszczególnych etapów procesów inwestycyjnych. Wybór metody wydaje się właściwy ze względu na wykluczenie sytuacji nieporównywalności wariantów decyzyjnych, a także ze względu na złożoność analizowanego zagadnienia. Jest to także metoda powszechnie stosowana w wspomaganiu problemów decyzyjnych w USA, Japonii, Chinach i niektórych krajach Europy Zachodniej.

### 2. OPIS METODY AHP

Metoda AHP (Analytic Hierarchy Process) jest metodą wielokryterialnej analizy problemów decyzyjnych, opracowaną przez T.L. Saaty'ego [3]. Podstawą metody AHP jest porównywanie parami kryteriów mających wpływ na realizację celu głównego i nadanie im preferencji względnej określonej według dziewięciostopniowej skali porównań, której postać liczbową odpowiada postaci lingwistycznej czyniąc ją łatwiejszą do zastosowania dla użytkownika. Skala ważności pozwala na jednoczesne uporządkowanie kryteriów pod względem jakościowym i ilościowym. Dzięki takiej analizie kryteriów można wytypować kryteria przeważające oraz wskazać o ile jedno kryterium jest ważniejsze od drugiego.

Analiza porównania projektów budowy farm wiatrowych składa się z czterech etapów:

1. Zdefiniowanie celu głównego oraz określenie kryteriów wpływających na jego realizację.
2. Określenie preferencji względnej przez porównanie parami kryteriów, następnie obliczenie względnej dominacji czynników.
3. Porównanie projektów pod względem każdego kryterium.
4. Wskazanie najkorzystniejszego rozwiązania.



Rys. 1. Struktura hierarchiczna stosowana w metodzie AHP, według [3]

Cel główny, kryteria oraz warianty decyzyjne (w tym przypadku poszczególne projekty) przedstawione są za pomocą uproszczonej struktury hierarchicznej na rysunku 1. W metodzie AHP istnieje możliwość określenia kryteriów wpływających na realizację kryteriów głównych, tzw. kryteriów cząstkowych, opisanych w [4]. W niniejszej analizie zdecydowano, że określenie jedynie kryteriów głównych jest wystarczające, aby porównać projekty budowy farm wiatrowych.

Metoda AHP jest metodą matematyczną o dużym stopniu zaawansowania i czasochłonności. Jest to spowodowane koniecznością stworzenia macierzy porównań parami (wzór 1), typu  $(n \times n)$ , gdzie  $n$  oznacza ilość kryteriów. Na przekątnej macierzy wszystkie wyrazy  $a_{ii}=1$ , nad przekątną  $a_{ij}$  – wycenom określonym przez ekspertów, poniżej przekątnej odwrotności tych wycen.

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

Wektor priorytetów kryteriów ze względu na cel główny ( $w$ ) składa się ze składowych wektora własnego:

$$w = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij} \quad (2)$$

Miarą odzwierciedlającą proporcjonalność preferencji jest największa wartość własna macierzy, którą wyznacza się ze wzoru:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{w_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad (3)$$

Porównania parami są konsekwentne, jeśli  $\lambda_{\max}$  jest zbliżone do  $n$  [5]. Indeks zgodności CI wykorzystuje powyższą zależność i reprezentuje odchylenie od zgodności, zgodnie ze wzorem:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

Spójność porównań parami wyznacza również współczynnik niezgodności CR wskazujący stopień niezgodności porównania charakterystyk:

$$CR = \frac{CI}{RI} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

gdzie:

$RI$  (Random Indeks) – losowy indeks niezgodności. Wielkości  $RI$  oszacowane przez T. L. Saaty'ego przedstawiono m.in. w [6].

Zastosowanie skali do porównania ważności kryteriów pozwala na uszeregowanie ich pod względem jakościowym oraz ilościowym, co jest dużą zaletą metody AHP. Ponadto hierarchiczna struktura problemu pozwala na szczegółową analizę problemu. Pomimo skomplikowania matematycznego, problem może być rozwiązany metodą AHP z wykorzystaniem arkusza kalkulacyjnego. Opisane powyżej wskaźniki są mierzalne i wskazują na spójność procedury.

Do wad metody AHP należy zaliczyć dużą ilość porównań parami, powodującą czasochłonność metody oraz możliwość popełnienia błędu przy wielokrotnym

wykonywaniu tych samych procedur obliczeniowych. Ze względu na agregacje wyników może nastąpić wyrównanie pomiędzy dobrymi wynikami niektórych kryteriów i złymi wynikami innych kryteriów [7].

### 3. OPIS CELU GŁÓWNEGO I KRYTERIÓW

Zgodnie z założeniami metody AHP w celu porównania projektów budowy farm wiatrowych wyróżniono cel główny oraz dwanaście kryteriów mających wpływ na jego realizację.

Celem głównym analizy jest wskazanie projektu, w którym czas zdobycia wszystkich niezbędnych decyzji i pozwoleń do uzyskania decyzji o pozwoleniu na budowę jest najkrótszy. Jest to istotne dla inwestora, który zamierza nabyć projekt będący w pewnym stopniu zaawansowania. Dla właściciela kilku projektów analiza pozwala oszacować, który z projektów ma największe szanse powodzenia i w konsekwencji pozwala efektywniej rozdzielić zadania w zespołach projektowych.

Kryteria wpływające na realizację celu głównego podzielono na kryteria związane z obszarem farmy wiatrowej, z wyprowadzeniem mocy oraz z pomiarem wietrzności. Dobór kryteriów oparto na konieczności spełnienia wielu wymogów określonych w prawie polskim dotyczących własności terenu, uwarunkowań środowiskowych, umieszczenia w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego farmy wiatrowej wraz z infrastrukturą towarzyszącą oraz uwzględnieniu wymogów dotyczących prawa do terenu, uwarunkowań środowiskowych, umieszczenia w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego lub uzyskaniu decyzji o lokalizacji inwestycji celu publicznego dla wyprowadzenia wyprodukowanej energii elektrycznej do sieci elektroenergetycznej. W analizie uwzględniono także problematykę zawarcia umowy przyłączeniowej z operatorem systemu przesyłowego lub dystrybucyjnego. Spis kryteriów wraz z symbolami przedstawiono poniżej:

- A - Dokumenty planistyczne - wyprowadzenie mocy
- B - Decyzja środowiskowa - wyprowadzenie mocy
- C - Prawo do terenu - wyprowadzenie mocy
- D - Decyzja o pozwoleniu na budowę - wyprowadzenie mocy
- E - Decyzja o pozwoleniu na budowę - zasilanie rezerwowe potrzeb własnych
- F - Decyzja o pozwoleniu na budowę - rozbudowa stacji GPZ
- G - Umowa przyłączeniowa
- H - Pomiary wietrzności
- I - Dokumenty planistyczne - farma wiatrowa
- J - Decyzja środowiskowa - farma wiatrowa
- K - Prawo do terenu - farma wiatrowa
- L - Decyzja o pozwoleniu na budowę - farma wiatrowa

Każde kryterium charakteryzuje się różnym czasem realizacji oraz czasochłonności.

Energia elektryczna produkowana przez farmę wiatrową wyprowadzona jest do sieci elektroenergetycznej linią niskiego lub średniego napięcia (wyprowadzenie mocy). Aby wybudować linię elektroenergetyczną należy uzyskać prawo do terenu pod inwestycję. W przypadku długich linii elektroenergetycznych istnieje ryzyko konieczności zmiany trasy linii w przypadku skrzyżowania np. z obszarami chronionymi przyrodniczo. Decyzja o środowiskowych uwarunkowaniach zgody na realizację przedsięwzięcia (w skr. decyzja środowiskowa) kształtuje planowane przedsięwzięcie, aby w jak najniższym stopniu pogarszało stan środowiska. Aby ją uzyskać należy wykonać

monitoringi środowiska, które zwiększają koszty i czasochłonność przedsięwzięcia. Jeśli budowa wyprowadzenia mocy nie jest uwzględniona w miejscowym planie zagospodarowania przestrzeni, należy plan zmienić lub w przypadku jego braku, podjąć kroki niezbędne do jego uchwalenia. Jest to proces długi i również wpływa na wydłużenie czasu realizacji inwestycji.

Kolejną grupę kryteriów stanowią kryteria związane z obszarem, na którym docelowo powstaną turbiny wiatrowe (tzw. obszar farmy wiatrowej). Posadzenie turbin wiatrowych powinno być uwzględnione w dokumentach planistycznych danego obszaru, w przeciwnym wypadku należy zmienić istniejące dokumenty. Aby budowa farmy wiatrowej była możliwa, należy nabyć prawo do terenu. Często praktyką jest dzierżawienie terenu od właścicieli od momentu pomysłu na inwestycję, gdy inwestor nie posiada jeszcze żadnych decyzji i pozwoleń, ale właściciel działki jest przychylny inwestycji. W przypadku, gdy zmienia się właściciel projektu należy zwrócić uwagę, czy umowy dzierżawy terenu nie kończą się np. w fazie budowy farmy wiatrowej. Wstępna przychylność właściciela terenu jest korzystna w procesie wykonywania niezbędnych monitoringów przyrodniczych, niezbędnych w procesie uzyskiwania decyzji środowiskowej. Aby zminimalizować ryzyko nieuzyskania decyzji środowiskowej, we wstępnej fazie projektu inwestycji bada się obszar zarówno farmy jak i jej otoczenia pod względem jej negatywnego wpływu na okolicę. Określa się także odległość planowanych turbin od zadrzewień, lasów oraz domów mieszkalnych.

Proces inwestycyjny budowy farmy wiatrowej należy rozpocząć od pomiarów wietrzności wybranego obszaru. Aby tego dokonać należy uzyskać decyzję o pozwoleniu na budowę masztów pomiarowych i dokonać pomiarów siły i kierunku wiatru. Uzyskane wyniki pomiarów służą do wykonania analizy opłacalności finansowej inwestycji.

#### 4. CHARAKTERYSTYKA PROJEKTÓW

Analizie porównawczej metodą AHP poddano trzy projekty budowy farm wiatrowych o symbolach P1, P2 oraz P3. Szczegółowy opis wykonanych działań w poszczególnych projektach, względem kryteriów, przedstawiono w tabelcy 1.

Tablica 1. Określenie stanu zaawansowania prac względem poszczególnych kryteriów

	P1	P2	P3
A	Komplet dokumentów	Komplet dokumentów	Uchwalone SUiKZP
B	Brak podjętych działań	Posiada ostateczną DŚU	Posiada ostateczną DŚU
C	Komplet dokumentów	Komplet dokumentów	Podpisano wstępne umowy z właścicielami DE
D	Złożenie wniosku o wydanie decyzji	Brak podjętych działań	Wykonano projekt budowlany
E	Brak podjętych działań	Brak podjętych działań	Decyzja jest ostateczna
F	Brak podjętych działań	Brak podjętych działań	Decyzja jest ostateczna
G	Negocjacje umowy	Uzyskano prawo do terenu	Uzyskano prawo do terenu
H	Wyniki pomiarów z okresu do 1 roku	Wyniki pomiarów z okresu powyżej 2 lat	Wyniki pomiarów z okresu 1,5 roku
I	Komplet dokumentów	Uchwalone SUiKZP	Uzgodnienie projektu SUiKZP
J	Wykonano raport środowiskowy	Posiada ostateczną DŚU	Wniosek oczekuje na uzgodnienie RDOŚ oraz opinię PIS

K	Przeprowadzono wstępne rozmowy z częścią właścicieli DE	Posiada ostateczną DŚU	Przeprowadzono wstępne rozmowy ze wszystkimi właścicielami DE
L	Brak podjętych działań	Wybrano projektanta	Brak podjętych działań

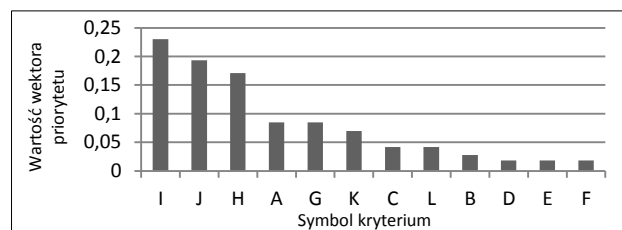
Objaśnienie skrótów: SUiKZP – Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego, DUŚ – Decyzja o środowiskowych uwarunkowaniach zgody na realizację przedsięwzięcia, DE – Działka ewidencyjna, RDOŚ – Regionalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, PIS – Państwowa Inspekcja Sanitarna

#### 5. PORÓWNANIE PROJEKTÓW

Analizę porównawczą projektów rozpoczęto od sporządzenia macierzy porównań parami kryteriów, które opisano w rozdziale trzecim.

Zgodnie ze wzorami opisanymi w rozdziale 2 wyznaczono indeks zgodności  $CI=0,046$  oraz współczynnik niezgodności  $CR=2,9\%$ . Aby stwierdzić, że współczynnik niezgodności jest akceptowany oraz że porównania są zgodne (zgodnie z opracowaniem Saaty'ego [8]) wartość współczynnika  $CR$  nie może przekraczać  $10\%$ .

Wektor priorytetów pozwala na uszeregowanie kryteriów pod względem ich wpływu na realizację celu głównego. Hierarchę kryteriów przedstawiono na wykresie uporządkowanym, pod względem wektora priorytetów, przedstawionym na rysunku 2.



Rys. 2. Wpływ poszczególnych kryteriów na realizację celu głównego

Jak wynika z rysunku 2, kluczowymi kryteriami są: uzyskanie kompletu dokumentów planistycznych dla obszaru farmy wiatrowej oraz uzyskanie decyzji środowiskowej dla tego samego obszaru.

Dla każdego z kryteriów wykonano macierz porównań parami projektów względem danego kryterium. Dzięki wykorzystaniu jednej z zalet metody AHP, jaką jest wskazywanie przewagi w sposób lingwistyczny (np. „bardzo duża przewaga” przeważająca przewaga”), możliwym było wskazanie przewagi jednego projektu nad drugim pod względem danego kryterium oraz przyporządkowanie porównaniu skali liczbowej. Przykładowo, w tabelcy 2 przedstawiono porównanie projektów pod względem kryterium I wraz z wyznaczonym wektorem priorytetów dla I-tego kryterium. Zgodnie z porównaniem projektu (tab. 1.) projekt P1 jako jedyny posiada komplet dokumentów planistycznych dla obszaru farmy wiatrowej. Dlatego też jego przewagę nad projektem P3 określono, jako „znacznie ważniejsze –silna dominacja”, co odpowiada liczbie 7 w skali Saaty'ego [3].

Następnie obliczono wartość priorytetu każdego z projektów w danym kryterium (tab. 3).

Projekt o najwyższej sumie priorytetów ( $\Sigma$ ) ma największe szanse na realizację celu głównego.

Tablica 2. Porównanie parami projektów P1, P2 i P3 pod względem kryterium I - Dokumenty planistyczne - farma wiatrowa

I	Por. wg. Skali Saaty'ego			P1	P2	P3	w
	P1	P2	P3				
P1	1,00	5,00	7,00	0,74	0,79	0,64	0,72
P2	0,20	1,00	3,00	0,15	0,16	0,27	0,19
P3	0,14	0,33	1,00	0,11	0,05	0,09	0,08
Σ	1,34	6,33	11,0	1,00	1,00	1,00	1,00

Dla analizowanego przypadku projekt P2 ma największe szanse na zdobycie wszystkich niezbędnych

Tablica 3. Wartości wektorów wpływu poszczególnych projektów na kryteria

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Σ
P1	0,038	0,001	0,017	0,011	0,002	0,002	0,061	0,017	0,166	0,035	0,005	0,008	0,364
P2	0,038	0,013	0,017	0,001	0,002	0,002	0,015	0,097	0,044	0,145	0,045	0,025	0,444
P3	0,008	0,013	0,008	0,006	0,015	0,015	0,008	0,057	0,019	0,014	0,020	0,008	0,192

## 6. PODSUMOWANIE

Niniejsza analiza wykazała przydatność i właściwość zastosowania metody AHP do porównania projektów budowy farm wiatrowych będących w różnych etapach przygotowania. Wykonanie powyższej analizy dla dwunastu kryteriów głównych oraz trzech porównywanych projektów pozwoliło stwierdzić, iż metoda AHP jest metodą czasochłonną i zaawansowaną matematycznie. Pomimo tego, metoda AHP jest doskonałym narzędziem mogącym służyć inwestorom do wspierania procesów decyzyjnych dotyczących zakupu poszczególnych projektów, które w dużej mierze opierane są obecnie tylko na analizie opłacalności finansowej inwestycji.

Z opisu porównywanych projektów, dokonanego w rozdziale czwartym, nie jest możliwe jednoznaczne stwierdzenie, dla którego projektu czas zdobycia wszystkich niezbędnych decyzji i pozwoleń do uzyskania decyzji o pozwoleniu na budowę jest najkrótszy. Wykonanie analizy metodą AHP wykazało, że dla projektu P2 ten czas jest najkrótszy.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Wimmer C., Hejazi G.: Multi-Criteria Decision Support Methods for Renewable Energy Systems on Islands, *J. Clean Energy Technol.*, Nr 3, 2015, s. 185–195.

pozwoleń w najkrótszym czasie. Jest to związane ze znacznie przeważającą, spośród wszystkich projektów, wartością wektora priorytetów dla kryterium dotyczącego uzyskania decyzji środowiskowej, które jest drugim pod względem priorytetu realizacji celu głównego.

Drugim projektem, którego przygotowanie do realizacji zajmie najmniej czasu jest projekt P1. Wektor priorytetu tego projektu dla kryterium o najwyższym wpływie na realizację celu głównego jest największy.

2. Pedrycz W, Song M.: Analytic Hierarchy Process (AHP) in Group Decision Making and its Optimization With an Allocation of Information Granularity, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, Nr 3, June 2011, s. 527–539.

3. Saaty T. L.: How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process, *Eur. J. Oper. Res.*, 1990.

4. Stoltmann A.: Zastosowanie metody ahp do porównania kryteriów wyboru lokalizacji budowy farmy wiatrowej, *Zesz. Nauk. Wydz. Elektrotechniki i Autom. Politech. Gdańskiej*, Nr 42, 2015.

5. Plazibat N., Babic Z.: Ranking of enterprises based on multicriterial analysis, *Int. J. Prod. Econ.*, Nr 97, 1998, s. 29–35.

6. 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.

7. Choudhary D., Shankar R.: An STEEP-fuzzy AHP-TOPSIS framework for evaluation and selection of thermal power plant location: A case study from India, *Energy*, Nr 42, June 2012, s. 510–521.

8. Saaty T. L., Vargas L. G., Dellmann K.: The allocation of intangible resources: The analytic hierarchy process and linear programming, *Socioecon. Plann. Sci.*, Nr 37, 2003, s. 169–184.

## THE COMPARISON OF WIND FARMS CONSTRUCTION PROJECT APPLYING AHP METHOD

The article presents the comparison of wind farms construction projects which are in various stages of implementation in the project preparation. The method, which was used to compare projects, constitutes multi-criteria method of AHP analysis (Analytic Hierarchy Process). As well as this, the paper also presents the description of the method along with the description of criteria, regarding projects comparison. AHP method, although it is time-consuming one, when there are large number of the main criteria and subcriteria, is an excellent tool for analysing issues related to the analysis of the location of investment in the energy sector. The problem of decision making in AHP method can be presented in a hierarchical structure of all the main criteria, and these include: measurements of wind kinetic energy, environmental decision, local zoning plans and development rights with the aim to build a transmission line as well as a wind farm, technical requirements for power grid connection and local community in the project environment. In order to compare the above mentioned criteria, AHP method was applied, with 1 to 9 point scale.

It has been shown that for P2 project, the time needed to obtain all the necessary decisions, concerning building permits, is the shortest.

**Keywords:** Analytic Hierarchy Process, locating wind farms, energy investments.