

■ Dr inż. Andrzej Węgrzyn,
Stowarzyszenie Dolnośląska Dolina Wodorowa

Analityczno-Hierarchiczny Proces Decyzyjny (AHP-AI)

w wyborze modelu biznesowego Klastra Energii

W artykule przedstawiono zastosowanie metody AHP wspieranej AI (AHP-AI) do wyboru modelu biznesowego Klastra Energii. Case Study obejmuje proces definiowania funkcji celu, ocenę pięciu wariantów inwestycyjnych według trzech kryteriów (tania energia, bezpieczeństwo ekonomiczne, szybkie efekty) i ranking alternatyw. Najlepszym wariantem według metodyki AHP-AI w jednym z wiodących Klastrów Energii w Polsce okazało się lokalne Centrum Dystrybucji Energii.

Proces decyzyjny AHP-AI

W celu wyboru optymalnych wariantów inwestycyjnych w ramach Ogólnego Planu Inwestycyjnego (OPI) Klastra Energii, realizowanego w ramach konkursu *Spółeczności Energetyczne* (KPO), zastosowano wielokryterialną metodę podejmowania decyzji AHP (Analytic Hierarchy Proces) wspartą sztuczną inteligencją (AI). Metoda AHP opracowana przez Thomasa Saaty¹ pozwala na hierarchizację i ocenę złożonych wariantów w oparciu o zestaw ważonych kryteriów.

Analityczno-Hierarchiczny Proces Decyzyjny (AHP-AI) wspiera wybór modelu biznesowego Klastra Energii, łącząc metodę AHP (Saaty) z narzędziami AI. Proces decyzyjny został zaprogramowany w języku **Python** przy użyciu biblioteki **ahpy**, która umożliwia budowę

macierzy porównań, wyznaczanie wag kryteriów i ocenę spójności decyzji. Platforma GPT-4o (AI) poprzez odpowiednie zapytanie wygenerowała kod, wspierając w tworzeniu hierarchii decyzyjnej i automatyzując przygotowanie modeli. Jednak same obliczenia były realizowane w środowisku programistycznym Python. Dzięki temu podejściu możliwe było szybkie tworzenie przejrzystych, spójnych modeli decyzyjnych, które uwzględniają wiele kryteriów, wariantów i opinii ekspertów.

AHP-AI pozwala na strukturalne, transparentne i efektywne podejmowanie decyzji w złożonych projektach energetycznych.

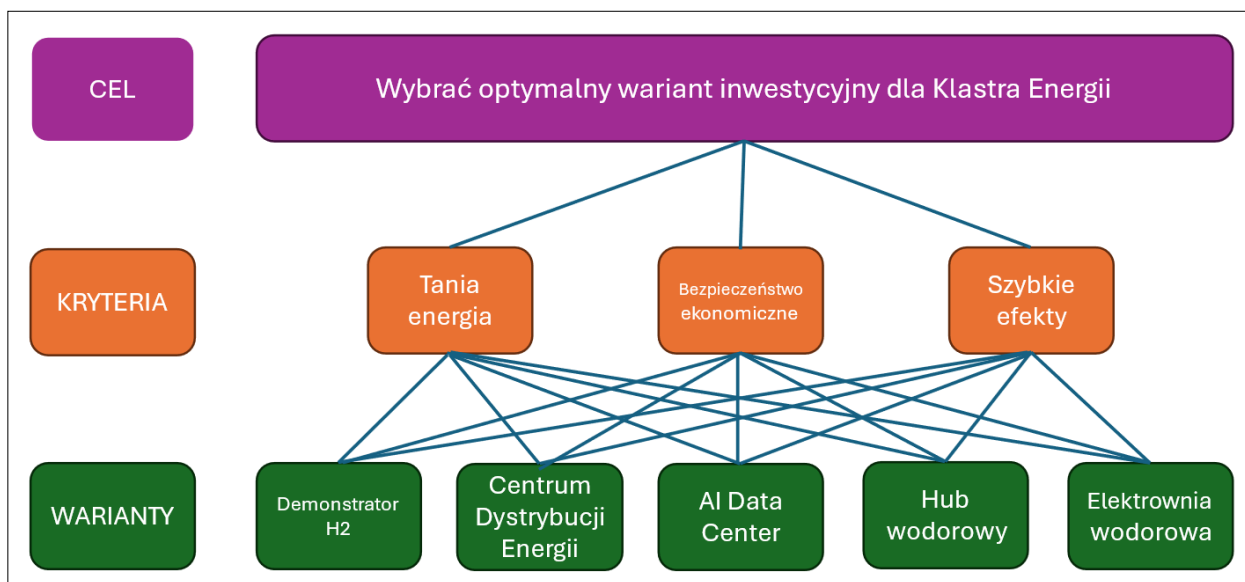
Założenia modelowania

W analizie uwzględniono pięć strategicznych wariantów inwestycyjnych:

- Demonstrator H2 - niewielka skala inwestycji, możliwość barier technologicznych,

Kroki procesu decyzyjnego AHP-AI

1. Definicja celu, wariantów i kryteriów,
2. Budowa macierzy porównań kryteriów (skala Saaty'ego),
3. Wyznaczenie wag kryteriów (wektor priorytetów),
4. Budowa macierzy porównań wariantów względem każdego kryterium,
5. Obliczenie wag wariantów dla każdego kryterium,
6. Agregacja ocen końcowych (ważone sumowanie),
7. Ranking wariantów i wybór najlepszego.



Rys. 1. Diagram przedstawia elementy procesu AHP-AI

- Centrum Dystrybucji Energii (CDE) - największy potencjał w zakresie taniej energii i bezpieczeństwa energetycznego,
- AI Data Center - centrum obliczeniowe zasilane zieloną energią, gwarantujące wysokie bezpieczeństwo energetyczne i ekonomiczne,
- Hub wodorowy - inwestycja z potencjałem dla przemysłu (blendowanie H_2 z gazem ziemnym), ale z możliwymi trudnościami realizacyjnymi,
- Elektrownia wodorowa - długoterminowa inwestycja zapewniająca stabilność energetyczną w przyszłości.

Na podstawie celów strategicznych klastra zdefiniowano trzy najważniejsze kryteria:

- Tania energia dla Klastra Energii (waga: 5) - dostępność niedrogiej energii z lokalnych źródeł OZE,
- Bezpieczeństwo ekonomiczne (waga: 3) - odporność na kryzysy cenowe i stabilność dostaw energii,
- Szybkie efekty (waga: 1) - tempo osiągnięcia efektów wdrożeniowych i uruchomienia funkcji energetycznych.

Wagi przypisane kryteriom zostały przeliczone na macierz porównań i przekształcone w wektor priorytetów, który służył do agregacji ocen wariantów.

Krok 1: Zdefiniowanie celu, wariantów i kryteriów

Patrz Rys. 1.

Krok 2: Zbudowanie macierzy porównań kryteriów

Tworzymy **macierz parowych porównań** kryteriów na podstawie ich relatywnych wag (tab. 1).

	Tania energia	Bezpieczeństwo ekonomiczne	Szybkie efekty
Tania energia	1	$5/3 \approx 1.67$	5
Bezpieczeństwo ekonomiczne	$3/5 \approx 0.6$	1	3
Szybkie efekty	$1/5$	$1/3$	1

Tab. 1. Macierz parowych porównań kryteriów

Znormalizowana macierz jest bazą do obliczenia **wektor priorytetów (wag)** przez uśrednienie wierszy macierzy znormalizowanej. Daje to wynik: Tania energia ~ 0.589 ; Bezpieczeństwo ekonomiczne ~ 0.312 ; Szybkie efekty ~ 0.099 .

Krok 3: Ocena wariantów względem każdego kryterium

Dla każdego kryterium, tworzymy **macierz parowych porównań alternatyw**, opartą na eksperckiej ocenie i charakterystyce wariantów:

Tworzymy macierz porównań i obliczamy **wektor wag (priorytetów)** dla tego kryterium. Tania energia dla DKE (im wyżej, tym lepiej - tab. 2).

Algorytm AI jest realizowany w następujących sposób: macierz $\rightarrow$ normalizacja $\rightarrow$ średnia wierszowa = wektor wag. Ponownie: macierz porównań $\rightarrow$ wektor wag.

Krok 4: Agregacja ocen końcowych

Dla każdego wariantu inwestycyjnego liczymy ocenę końcową:

Kryterium: Tania energia	Ocena (1-9)
Demonstrator H ₂	3
Centrum Dystrybucji Energii	9
AI Data Center	5
Hub wodorowy	4
Elektrownia wodorowa	6
Kryterium: Bezpieczeństwo ekonomiczne	Ocena
Demonstrator H ₂	4
Centrum Dystrybucji Energii	9
AI Data Center	8
Hub wodorowy	5
Elektrownia wodorowa	7
Kryterium: Szybkie efekty	Ocena
Demonstrator H ₂	4
Centrum Dystrybucji Energii	9
AI Data Center	6
Hub wodorowy	3
Elektrownia wodorowa	1

Tab. 2. Macierz porównań

$$\text{Ocena końcowa}_i = \sum_{k=1} \text{Waga}_k \times \text{Priorytet}_{i,k}$$

gdzie:

- Waga_k - waga kryterium
- Priorytet_{i,k} - ocena wariantu i względem kryterium k

Krok 5: Ranking i wybór najlepszego wariantu

Każdy z wariantów oceniono względem powyższych kryteriów, posługując

się skalą preferencji od 1 (bardzo słabo) do 9 (bardzo dobrze), a następnie skonstruowano macierze porównań parowych. Na tej podstawie wyliczono wagę każdego wariantu względem każdego kryterium, a następnie dokonano agregacji ważonej. Na podstawie ocen końcowych utworzony został ranking (od najwyższej do najniższej wartości). Najwyżej oceniony wariant stanowi **rekomendację inwestycyjną** dla Klastra Energii. Wyniki końcowe przedstawiono w tab. 3.

Wariant inwestycyjny	Ocena końcowa	Ranking
Centrum Dystrybucji Energii	0.3195725369638413	1
AI Data Center	0.2126742464906716	2
Elektrownia wodorowa	0.19899477870492363	3
Hub wodorowy	0.14730233087721012	4
Demonstrator H ₂	0.12145610696335338	5

Tab. 3. Wyniki końcowe

Wnioski

Zastosowanie metody AHP wspieranej sztuczną inteligencją (AHP-AI) umożliwiło strukturalną, przejrzystą i wielokryterialną ocenę wariantów inwestycyjnych dla Klastra Energii. Proces decyzyjny pozwolił na uwzględnienie zarówno aspektów ekonomicznych, jak i operacyjnych - przy zachowaniu spójności ocen i przejrzystości wyników.

W wyniku przeprowadzonej analizy jako optymalny wariant inwestycyjny wybrano budowę Centrum Dystrybucji Energii, które najlepiej spełnia kryteria taniej energii, bezpieczeństwa ekonomicznego oraz szybkości osiągania efektów.

Metoda AHP-AI okazała się skutecznym narzędziem wspomagającym wybór strategicznych decyzji inwestycyjnych w sektorze energetyki lokalnej, z potencjałem do dalszego wykorzystania w innych obszarach planowania energetycznego i rozwoju klastrów energii.

Podsumowanie

Zastosowanie metody AHP-AI umożliwiło sprawne przeprowadzenie wielokryterialnej analizy wariantów inwestycyjnych dla Klastra Energii. Dzięki wsparciu sztucznej inteligencji proces budowy modeli decyzyjnych został znacząco przyspieszony i uporządkowany. Przeprowadzona ocena pokazała, że zastosowanie hierarchicznego podejścia pozwala na kompleksowe i transparentne podejmowanie decyzji w złożonych projektach energetycznych, zwiększając ich trafność i efektywność. □