

POLITECHNIKA POZNAŃSKA  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**Analiza wyboru lokalizacji elektrowni wiatrowych w aspekcie  
współpracy z sieciami gazowymi**

Autor: mgr inż. Rafał Goraj

Promotor: dr hab. inż. Rafał Ślefarski, prof. PP

Promotor pomocniczy: dr inż. Radosław Jankowski

POZNAŃ 2024

## Spis treści

<b>Wprowadzenie</b> .....	3
<b>1 Cel i teza pracy</b> .....	4
<b>1.1 Cel pracy</b> .....	4
<b>1.2 Teza pracy</b> .....	5
<b>2 Metodyka badań</b> .....	6
<b>2.1 Wprowadzenie</b> .....	6
<b>2.2 Algorytm postępowania</b> .....	8
<b>2.3 System informacji geograficznej (GIS)</b> .....	11
<b>2.4 Metoda hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych (AHP)</b> .....	11
<b>2.5 Integracja narzędzi GIS – AHP</b> .....	15
<b>3 Wyniki badań</b> .....	16
<b>4 Wnioski</b> .....	19
<b>5 Wykaz publikacji:</b> .....	21
<b>6 Literatura</b> .....	21

## Wprowadzenie

Aktualnie gospodarki światowe są zasilane przede wszystkim paliwami kopalnymi. Stan ten w nadchodzących latach ma ulec zmianie. Odnawialne źródła energii mają docelowo stać się jedynym źródłem zasilania gospodarek. Obszar energetyki związany z produkcją i transportem energii elektrycznej i gazu stanowi i stanowić będzie ważny czynnik w procesie transformacji. Przedmiotowa praca przedstawia propozycję sposobu wyboru lokalizacji farm wiatrowych we współpracy z sieciami elektroenergetycznymi i gazowymi. Jest to rodzaj współpracy odnoszący się do tzw. technologii Power to gas (P2G). P2G daje możliwość integracji sektorów energii elektrycznej i gazu ziemnego.

Odnawialne źródło energii działa w sposób nieregularny. Ich praca silnie jest uzależniona od warunków pogodowych. Ta cecha oznacza, że transformacja energetyczna będzie wymagała ogromnych nakładów finansowych i technicznych. W nadchodzących latach konieczne będzie stworzenie nowego systemu opartego na odnawialnych źródłach wytwórczych, istniejących i nowych systemach przesyłu energii oraz nowych systemach zarządzania tą energią. Ich użyteczność będzie zależeć w dużej mierze od zdolności magazynowania energii. Magazynowanie energii elektrycznej w dużych ilościach jest bardzo trudne. Technologia P2G stanie się ważnym rozwiązaniem. P2G przekształca niewykorzystaną energię elektryczną w wodór. Wodór może być bezpośrednio wykorzystywany lub przekształcany w metan. Rozwiązanie to zapewnia ciągłość dostaw energii do gospodarki opartej na odnawialnych źródłach energii. Nadchodząca transformacja będzie wymagała ogromnych inwestycji finansowych i technicznych. Konieczne będzie dokonywanie wyborów w zakresie lokalizacji, transportu i odpowiedzialności społecznej. Duża skala działań oznaczać będzie konieczność precyzyjnego podejmowania decyzji dotyczących realizacji poszczególnych projektów. Źle zaplanowane projekty będą działać nieefektywnie zarówno kosztowo, jak i technicznie.

Praca ma na celu opracowanie modelu decyzyjnego, który przedstawi najlepsze możliwe warianty współpracy sieci gazowej z systemami wytwarzania energii elektrycznej z farm wiatrowych oraz współpracy z infrastrukturą przesyłu energii elektrycznej i gazu. Zaproponowany model obejmuje wielokryterialne podejście do zagadnienia.

# 1 Cel i teza pracy

## 1.1 Cel pracy

Transformacja energetyczna, której efektem ma być gospodarka zeroemisyjna wymaga nowego podejścia do budowy systemów energetycznych. Odejście od systemów zcentralizowanych, opartych na paliwach kopalnych, do układów rozproszonych produkcji energii elektrycznej bazujących na odnawialnych źródłach energii, takich jak słońce i wiatr, musi uwzględniać wiele nowych wyzwań, na przykład magazynowanie energii czy przebudowa sieci elektroenergetycznych. W tym obszarze interesująca wydaje się technologia Power to X, która umożliwi magazynowanie energii elektrycznej w stanach zwiększonej podaży w postaci np. związków chemicznych (wodór, amoniak, metanol) lub paliw odnawialnych np. gazu ziemnego (Power to Gas). Rozwój łańcucha technologii magazynowania energii w postaci gazu ziemnego będzie wymagał znalezienia lokalizacji, w których możliwe będzie optymalne połączenie trzech sektorów energetyki tj. sektora elektroenergetycznego, sektora transportu gazu ziemnego i sektora produkcji energii elektrycznej bazujących na odnawialnych źródłach energii takich jak energia słońca czy energia wiatru. Ważnym aspektem jest również uwzględnienie oddziaływania technologii Power to Gas na środowisko naturalne i jej odbiór społeczny. W chwili obecnej nie są wykorzystywane narzędzia oraz modele decyzyjne pozwalające na wielokryterialne analizy wyboru potencjalnych lokalizacji technologii magazynowania energii w postaci paliwa gazowego i jego wprowadzania do sieci przesyłowej.

Stąd głównym celem pracy było opracowanie modelu decyzyjnego pozwalającego na wybór miejsca lokalizacji elektrowni wiatrowych dla systemów technologii Power to Gas bazując na energii pochodzącej z lądowych farm wiatrowych, przy uwzględnieniu szerokiej gamy parametrów decyzyjnych. Główny cel naukowy pracy został osiągnięty poprzez realizację celów pośrednich takich jak:

- 1) określenie grupy kluczowych czynników wpływających na wybór lokalizacji elektrowni wiatrowych dla systemów magazynowania energii w ciągu łańcucha technologii Power to Gas z uwzględnieniem aspektów technicznych, prawno-społecznych, środowiskowych i ekonomicznych,
- 2) przeprowadzenie badań dotyczących określenia istoty wag poszczególnych kryteriów decyzyjnych z wykorzystaniem metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji,
- 3) analizę wyboru lokalizacji elektrowni wiatrowych dla układu magazynowania energii elektrycznej w sieciach transportu gazu ziemnego wykorzystując opracowany model decyzyjny wspierany systemem informacji geograficznej.

Aby osiągnąć cel główny oraz cele pośrednie wykonano studium literaturowe, które pozwoliło wytypować najważniejsze kryteria wpływające na realizację projektów energetycznych z zakresu Power to Gas. Następnie przeprowadzono badania wstępne, gdzie wytypowano pięć kryteriów głównych oraz przeprowadzono badanie eksperckie ważności każdego z nich. W kolejnym kroku, w czasie realizacji badań zasadniczych, otrzymane wyniki badań poddano dalszej analizie z wykorzystaniem połączonych metod analizy danych geograficznych i metody hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych (AHP). Połączenie metody GIS i AHP stanowi nowe podejście w ocenie możliwości realizacji projektów w zakresie współpracy systemów elektroenergetyki oraz energetyki gazowej, bowiem umożliwia w procesie decyzyjnym połączenie wielu obszarów takich jak: technika, zasoby naturalne, ochrona środowiska, akceptacja społeczna, aspekty prawne oraz ekonomia przedsięwzięcia jak również wykorzystanie różnych narzędzi.

## 1.2 Teza pracy

W obliczu konieczności zmian przebudowy systemów energetycznych wymuszonych transformacją energetyczną istnieje konieczność przeprowadzenia analizy możliwości jak najlepszego rozwiązania współpracy odnawialnych źródeł produkcji energii elektrycznej z systemami jej transportu sieciami elektroenergetycznymi oraz gazowymi. W efekcie rozwiązanie takie pozwoli stabilizować nieregularność produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. Stanowi to olbrzymie wyzwanie zwłaszcza w obliczu stawianych celów klimatycznych do 2050 r. W związku z powyższym autor postawił następującą tezę:

- 1) Przedstawiona metoda umożliwi ustalenie hierarchii lokalizacji elektrowni wiatrowych we wzajemnej współpracy z sieciami elektroenergetycznymi oraz sieciami gazu ziemnego, przy uwzględnieniu różnorodnych kryteriów: technicznych, ekonomicznych, środowiskowych, prawnych i społecznych. Uzupełnieniem tezy głównej jest
- 2) Poprzez analizę wielokryterialną oraz środowisko GIS, jest możliwe wybranie lokalizacji dla źródła produkcji energii elektrycznej.

Teza ta opiera się na założeniu, że dzięki wykorzystaniu wielokryterialnych analiz podejmowania decyzji oraz wykorzystaniu analiz geoprzestrzennych możliwe jest wytypowanie lokalizacji źródeł generacji energii odnawialnej (farm wiatrowych). Takie podejście prowadzi do lepszego wykorzystania czasu i środków finansowych na przygotowanie projektów inwestycyjnych. Wdrożenie tych narzędzi w fazie przygotowania projektów, pozwala na zmniejszenie kosztów ich realizacji oraz późniejszej eksploatacji.

## 2 Metodyka badań

### 2.1 Wprowadzenie

Transformacja energetyczna spowoduje że, obecny model gazownictwa ulegnie przekształceniu. Przyszłość będzie polegała na wzajemnej współpracy wielu systemów połączonych i współdziałających ze sobą. Różne nośniki energii jak: energia elektryczna, gaz zdekarbonizowany czy wodór powinny tworzyć jeden spójny system energetyczny. Polska, jak i cały świat nie ma obecnie doświadczenia w tym obszarze. Od niespełna trzech lat trwają intensywne prace nad poszukiwaniu rozwiązań, które umożliwią osiągnięcie celów klimatycznych do 2050 r. Trzeba jednak zaznaczyć, że aktualne działania w Unii Europejskiej skupione są wokół tzw. Pakietu „Gotowi na 55”, który zawiera m.in. propozycję nowelizacji dyrektywy o odnawialnych źródłach energii zmierzających do zwiększenie ich udziału w ogólnym koszyku energetycznym do 2030 r. [1].

Przedmiotowa praca ma na celu opracowanie modelu postępowania, który ułatwi wybór najlepszych rozwiązań integracji systemu gazowego z systemem elektroenergetycznym. Ponieważ zagadnienia P2G są bardzo szerokie, w pracy ograniczono się do poszukiwania najlepszych lokalizacji projektów uwzględniając współpracę systemów takich, jak:

- źródła wytwórcze energii elektrycznej z wiatru,
- infrastruktura elektroenergetyczna,
- infrastruktura gazowa.

W tak szerokich zagadnieniach zastosowanie metod klasycznych do oceny projektów technologicznych jest niewystarczające. Metody te badają głównie czynnik ekonomiczny i jego opłacalność. Analiza polega na obliczaniu przepływów pieniężnych w zakładanym okresie. Podejście czysto ekonomiczne pomija szereg innych równie ważnych zagadnień biznesowych. Konieczne jest zatem szersze spojrzenie na analizowany problem i przeprowadzenie dodatkowych analiz. W pracy użyto połączenie metod analizy wielokryterialnej AHP z analizą geoprzestrzenną GIS (Geographic Information System). Projekty energetyczne oraz infrastrukturalne doskonale się wpisują w ten sposób postępowania. Połączenie czynników: ekonomicznych, technicznych, środowiskowych, prawnych, społecznych z analizami geoprzestrzennymi umożliwia wykonanie bardziej kompletnych analiz. Stanowi to rodzaj synergii pomiędzy wielokryterialnymi metodami wspierania decyzji (MCDA - Multi-Criteria Decision Analysis) a analizami geoprzestrzennymi GIS. Razem tworzy to system wsparcia decyzji przestrzennych (SDSS – Spatial Decision Support System) [2]. W efekcie otrzymuje się zbiór rozwiązań, z których można wytypować te najlepsze.

Jedną z najbardziej preferowanych przez użytkowników technik wielokryterialnych w projektach planowania energetycznego jest analityczny proces hierarchiczny (AHP). AHP jest prosty w zrozumieniu i ma zastosowanie do złożonych zagadnień gdzie w procesie oceny wprowadza się porównanie kryteriów, wykazując najbardziej wiarygodne rozwiązanie celu decyzyjnego. Główne czynniki wpływające na wybór metody AHP są następujące:

- jest ona bardzo szeroko stosowana i dobrze opisana w literaturze [3][4][5].
- jest wykorzystywana w energetyce oraz inwestycjach infrastrukturalnych [3][5].
- metoda ta pozwala na uwzględnienie aspektu jakościowego. Procedura przeprowadzana jest w skali jakościowej, a następnie przekształcana do podejścia ilościowego. Takie podejście ułatwia porównywanie poszczególnych kryteriów i wariantów bez konieczności szczegółowej znajomości metodyki.
- wielkość zbioru kryteriów można odpowiednio dostosowywać do sytuacji tworząc subkryteria co ułatwia prowadzenie analizy (w zaproponowanym modelu określono pięć kryteriów co

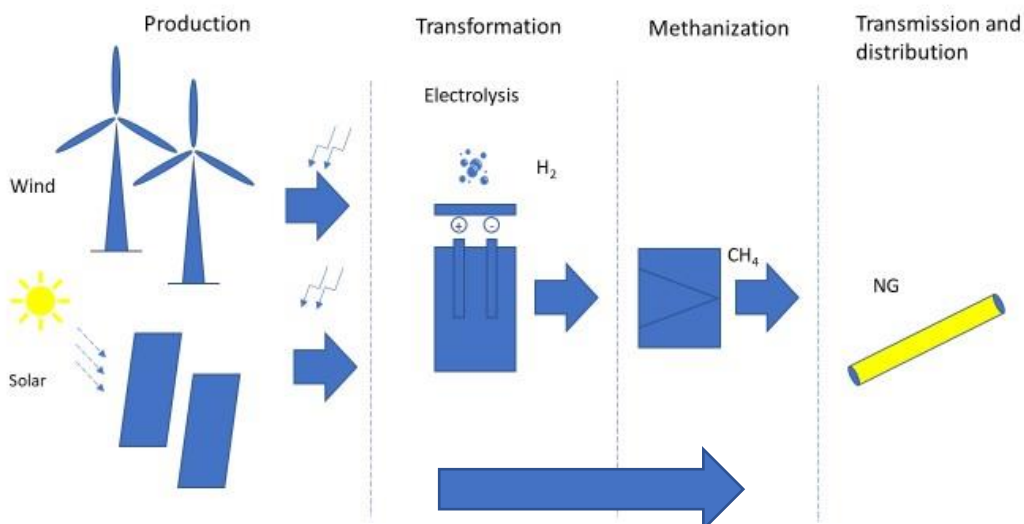
mieści się w granicach zalecanych wartości  $7\pm 2$ , co jest istotne z punktu widzenia percepcji człowieka [6]).

W przypadku metod analizy geoprzestrzennej duże znaczenie ma co raz to większa dostępność danych GIS. Daje to nowe możliwości prowadzenia analiz przedinwestycyjnych. Bazy GIS dostarczają informacje z różnych obszarów jak: informacje o rozkładzie dróg, infrastrukturze energetycznej, lokalizacji zabudowań, występowania obszarów ochrony przyrody, terenów zamkniętych, stopnia zadrzewienia, itp. Bazy te cały czas się dynamicznie rozwijają o kolejne dane z różnych dziedzin. W ten sposób bez potrzeby prowadzenia kosztownych badań terenowych możemy przeprowadzić analizy geoprzestrzenne, które dostarczą nam szeregu danych do oceny realizacji projektu. W pracy wykorzystano analizę GIS przy wykorzystaniu oprogramowania QGIS oraz analizę wielokryterialną AHP przy wykorzystaniu narzędzi przygotowanych przez autora. Połączenie tych metod daje pełen model wyboru potencjalnych lokalizacji technologii Power to Gas. Szczegóły postępowania oraz wyniki zostały opisane w kolejnych częściach pracy.

Decyzje przestrzenne, takie jak poszukiwanie najlepszego terenu pod inwestycje, określanie ograniczeń przyrodniczych, technicznych czy też społecznych wymagają informacji i narzędzi pomagających w zrozumieniu problemów towarzyszących podjęciu decyzji w poszukiwaniu najlepszego rozwiązania. Wymagają także przeprowadzenia analiz, które umożliwią ocenę i pogodzenie interesów różnych grup interesariuszy oraz decydentów. Wielokryterialna analiza podejmowania decyzji (MCDA) w połączeniu z systemami informacji geograficznej jest techniką, która ułatwia uporządkowanie wieloaspektowych decyzji przy ocenie projektu.

W pracy wykorzystano połączenie metody AHP z metodą analizy GIS do wyboru najbardziej pożądanej lokalizacji farmy wiatrowej mającej współpracować z systemami P2G. Oznacza to, że muszą zostać spełnione warunki, które dopuszczają możliwość realizacji projektu integrującego system elektroenergetyczny z systemem gazowym.

Biorąc pod uwagę spotykane w literaturze [7][8][9] łańcuchy produkcyjne P2G, można wyróżnić kilka rozwiązań jak produkcja samego wodoru czy też jednoczesna produkcja wodoru z produkcją biogazu. Jednak najbardziej wskazywany jest model produkcji biometanu gdzie wytwarzanie energii elektrycznej odbywa się w farmach wiatrowych i/lub słonecznych, a nadwyżka energii elektrycznej jest wykorzystywana do produkcji wodoru, który jest dalej wykorzystywany w procesie metanizacji. W tym modelu metan jest wtłaczany do sieci gazu ziemnego. Schemat takiego rozwiązania przedstawiono na Rys. 1. Ogólna sprawność magazynowania energii jest obniżona przez proces produkcji metanu (około 80 % sprawności energetycznej) oraz proces pozyskania  $\text{CO}_2$  (2 % – 5 %). Sprawność w obie strony wynosi około 55 % [10]. Źródła dwutlenku węgla mogą pochodzić z elektrowni kopalnych, spalania biomasy, procesów przemysłowych lub separacji  $\text{CO}_2$  z powietrza [11].



Rys. 1 Model współpracy P2G

Analiza źródeł literaturowych wykazała, że istnieją inne modele (np. CO<sub>2</sub> ze zgazowania czy Power to NH<sub>3</sub>), ale najczęściej wymienianym rozwiązaniem P2G jest model II [7][8][9]. Jest to spowodowane tym, że wprowadzany sieci gazowej metan stanowi z punktu widzenia chemicznego ten sam związek chemiczny co główny składnik gazu ziemnego. Ułatwia to zarządzanie siecią oraz jej eksploatację. Wiedza w krajach UE o transformacji energetycznej i wykorzystaniu technologii P2G jest obecnie w fazie rozwoju. Poszczególne kraje realizują prace nad wprowadzeniem zmian w swoich systemach energetycznych w celu uwzględnienia różnych rodzajów magazynów energii [12]. Stan wykorzystania technologii P2G w procesach magazynowania energii jest niski, co związane jest głównie z początkowym rozwojem komercyjnego wytwarzania wodoru ze źródeł odnawialnych. Jest to kluczowy element w dalszym łańcuchu integracji elektryczno-gazowej.

## 2.2 Algorytm postępowania

Po przeprowadzeniu analizy literaturowej, doświadczenia autora, zaproponowano schemat postępowania wyboru lokalizacji farm wiatrowych w korelacji z sieciami gazowymi i elektroenergetycznymi Rys. 2.



Rys. 2 Schemat postępowania przy realizacji prac związanych z wyborem projektów P2G

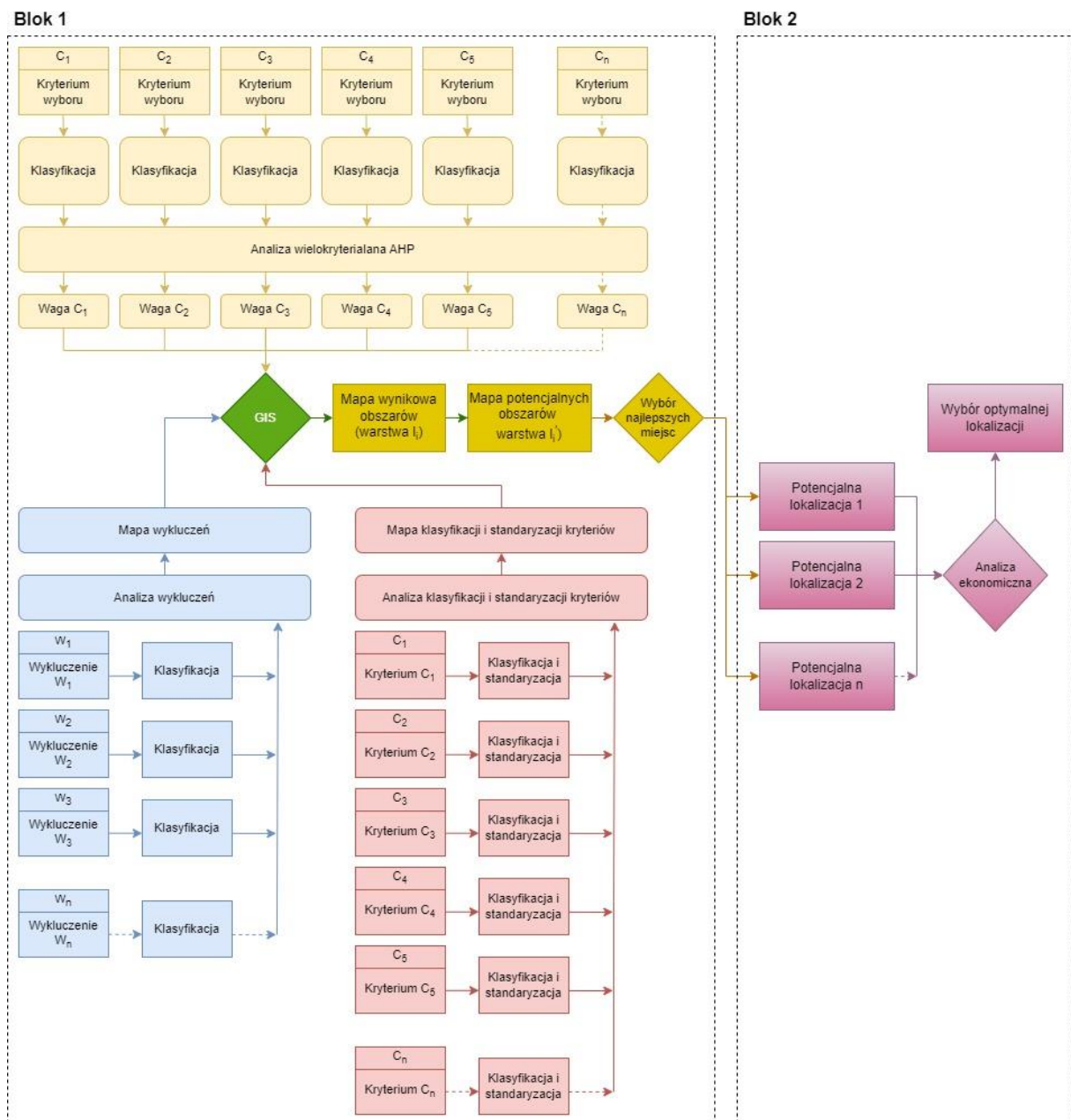
Jak można zauważyć, jest on podzielony na dwie główne części (Bloki). Pierwsza z nich obejmuje zagadnienia poruszane w ramach niniejszej dysertacji, które uwzględniają:

- wybór kryteriów oceny rozwiązań P2G, w którym w pierwszej kolejności definiuje się ich skończony zbiór, a następnie implementuje się je w podejściu wielokryterialnym opartym o analizę AHP,
- analizę przestrzenną GIS, w której dokonuje się identyfikacji możliwych lokalizacji rozwiązań P2G na danym obszarze. W tej części przeprowadzana jest analiza wykluczenia terenów, które ze względu na swój charakter nie mogą być ujęte do rozpatrywania.



- analizę wielokryterialną połączoną z analizą geoprzestrzenną gdzie określa się potencjalne lokalizacje.

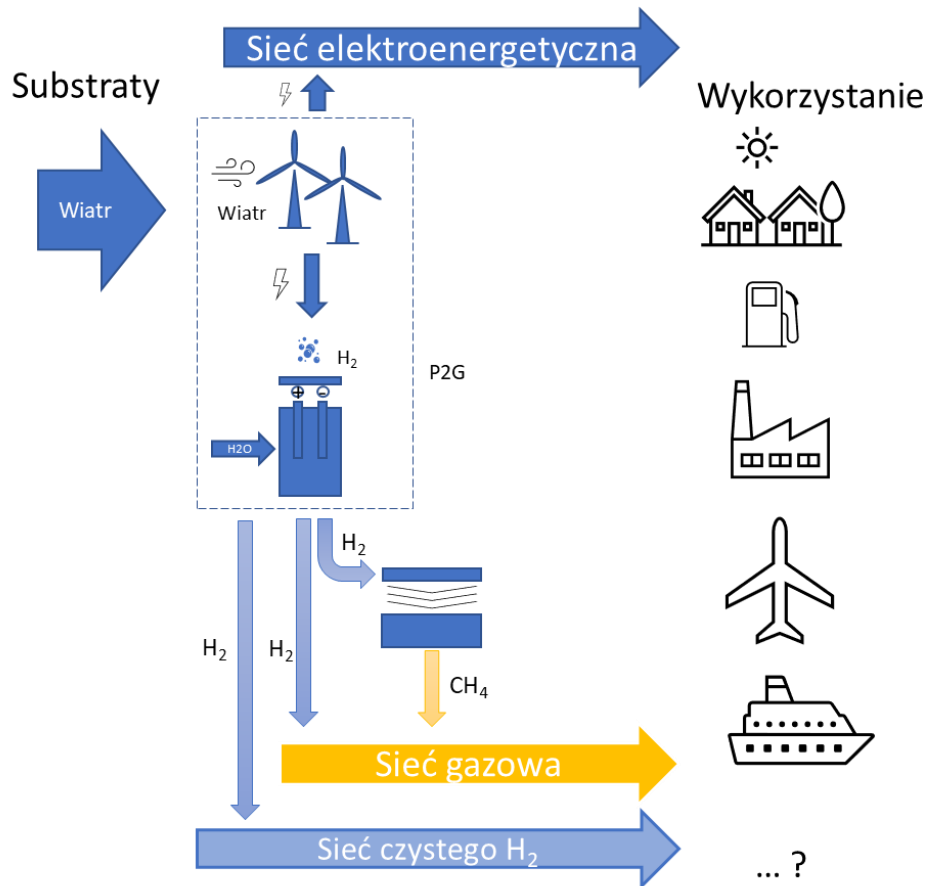
Blok pierwszy związany z wyborem potencjalnych lokalizacji jest najbardziej pracochłonny i kosztowny gdyż wymaga prowadzenia badań obszarów wraz z prowadzeniem rozpoznania terenowego. Niniejsza praca ma wspomóc aktualne podejście poprzez wprowadzenie narzędzi i modeli analitycznych, które wspierać będą typowanie najbardziej korzystnych lokalizacji bez konieczności prowadzenia kosztownych badań terenowych. Szczegółowy opis postępowania dla określenia potencjalnych lokalizacji zaprezentowano na Rys. 3.



Rys. 3 Model ogólny wyboru obszaru lokalizacji projektów P2G

Drugi blok stanowi rozwinięcie pierwszego i polega na przeprowadzeniu analizy efektywności ekonomicznej z określonych w pierwszym etapie lokalizacji. Zagadnienia w ramach tego bloku nie są przedmiotem pracy.

Z uwagi na złożoność zagadnienia P2G, w ramach którego energia może być pozyskiwana z różnych źródeł w pracy ograniczono się jedynie do wariantu, w którym źródło produkcji energii elektrycznej pochodzi z elektrowni wiatrowych. Jest to wariant, który dla zwiększenia efektywności produkcji energii elektrycznej będzie potrzebował magazynów energii. W takim przypadku magazynem (buforem) podczas wstrzymania produkcji energii elektrycznej do sieci elektroenergetycznej może być sieć gazowa. Model taki zaprezentowany został na Rys. 4. Przyjęta procedura badawcza nie wyklucza przeprowadzania analizy dla zastosowania innych wariantów P2G. Etapy postępowania będą wówczas takie same jednak poszczególne kroki wymagać będą skorygowania lub rozszerzenia.



Rys. 4 Schemat współpracy sieci zaprezentowany w pracy

## 2.3 System informacji geograficznej (GIS)

System Informacji Geograficznej (Geographic Information System – GIS) jest to system, który umożliwia wykonywanie analiz w powiązaniu z lokalizacją. Wykorzystanie narzędzi opierających się o GIS bardzo rozszerza możliwości analitycznego rozwiązywania zadań związanych z przedmiotem niniejszej pracy. Dane GIS stanowią bardzo szerokie spektrum informacji począwszy od informacji o różnych obiektach jak: drogi, zabudowania, obszary przyrodnicze, informacje społeczne, biznesowe itp. Całość tych informacji tworzy zbiór danych, które w kolejnych krokach są przetwarzane w warstwy wynikowe. Warstwy wynikowe mogą podlegać kolejnym analizom lub stanowić np. podstawy do podejmowania decyzji. W ramach badań przy pisaniu pracy korzystano z systemu QGIS. Jest to darmowy, otwarty (open source: GNU GPL) program GIS. Powstał on w 2002 r., a od 2007 rozwijany jest jako projekt Open Source Geospatial Foundation. Jest to oprogramowanie do przeglądania, edytowania i analizowania danych przestrzennych oraz tworzenia map [13].

Na bazie analizy GIS można ocenić akceptowalność terenu do jego wykorzystania pod realizację inwestycji. Jest to czynnik kluczowy gdyż decyduje o tym czy dana inwestycja otrzyma pozwolenie na budowę. W GIS tworzy się warstwy, które w kolejnych krokach są poddawane analizie. Analizujemy miejsca, które z punktu widzenia projektu nie mogą być brane pod uwagę. Dla przykładu tereny takie jak NATURA2000, Parki Krajobrazowe, Parki Narodowe, Lasy, wykluczają postawienie farm wiatrowych wraz z instalacjami P2G. W pracy przeprowadzono także analizę prawną, uwarunkowań ekologicznych oraz ograniczeń technicznych. Elektrownie wiatrowe (turbiny wiatrowe) nie mogą być lokalizowane w dużych odległościach od dróg dojazdowych. W przypadku systemów P2G konieczne jest także zapewnienie dostępu do infrastruktury energetycznej zdolnej do odbioru wyprodukowanej energii co oznacza sąsiedztwo sieci elektroenergetyczne. W przypadku systemów P2G wymagania jakie należy spełnić nie występują często wspólnie. Dlatego też GIS jest narzędziem, które może wspomóc w wyborze potencjalnych lokalizacji. Narzędzia GIS wykazują bardzo wysoką przydatność przy opracowywaniu analiz przed przystąpieniem do realizacji inwestycji. Wykorzystanie narzędzi systemu GIS rozszerza możliwości przeprowadzania analiz na niespotykaną jeszcze parę lat temu skalę. Dynamicznie rozwijane są źródła geoinformacyjne co umożliwia dokonywanie skomplikowanych obliczeń analitycznych, które wiążą różne obszary. Efektem tych analiz jest wskazanie potencjalnych lokalizacji farm wiatrowych. Znajomość wymagań jak i ograniczeń umożliwia określenie potencjalnych miejsc styku systemów, a w dalszych krokach wybór najlepszego projektu.

## 2.4 Metoda hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych (AHP)

Aktualnie do przeprowadzania analiz przed podjęciem decyzji o realizacji projektów inwestycyjnych powszechnie stosowane są analizy klasyczne oparte na badaniu zdyskontowanych przepływów pieniężnych co w efekcie pozwala wyłonić projekty najbardziej efektywne finansowo. Sprawdza się to przy prowadzeniu dużej ilości analiz (np. na potrzeby obliczania opłacalności przyłączenia do sieci energetycznych) co daje możliwość szybkiej oceny projektu i odpowiedzi do klienta. Fakt ten jest także podyktowany obowiązującym prawem [14], mówiącym o przyłączaniu pod warunkiem uzyskania efektów ekonomicznych i technicznych. Dla projektów dużych, indywidualnych oraz związanych z transformacją energetyczną analizy te nie będą wystarczające. Rosnąca złożoność problemów decyzyjnych, pojawiające się nowe ograniczenia w realizacji projektów oraz konieczność wypowiedzania się szerokiego grona ekspertów powoduje, że niezbędne jest szukanie rozwiązań decyzyjnych innych niż klasyczne. Potrzebne jest szersze podejście, które obejmie również inne dziedziny, na które projekt będzie miał wpływ. Odpowiedzią na te potrzeby mogą być metody wielokryterialne, które pozwalają przeprowadzić analizę decyzyjną w ujęciu o wiele szerszym niż metody klasyczne. Wprowadzanie tych metod może polepszyć jakościowo proces decyzyjny. Metody

wielokryterialne (Multi-Criteria Decision-Making MCDM) pozwalają objąć szerzej zagadnienie projektowe i dokonać uszeregowania alternatyw. Kryteria i alternatywy (warianty projektów) pozwalają wybrać najkorzystniejszy wariant. Zgodnie z tym muszą istnieć co najmniej dwie alternatywy i zbiór kryteriów opisujący proces decyzyjny wyboru alternatywy. Kryterium może być jedno lub wiele. Do podstawowych kryteriów stosowanych w obszarze energetyki zaliczyć można następujące grupy kryteriów [5][15]:

- Kryteria techniczne [5]

Kryteria techniczne najczęściej opisywane są poprzez: odległość od sieci gazowej, odległość od sieci elektroenergetycznej, wielkość terenu niezbędna do realizacji zamierzenia, warunki geologiczne, zużycie paliwa, zużycie wody, zużycie innych materiałów eksploatacyjnych, stopień wykorzystania urządzeń w roku, współczynniki produkcji energii, itp. Kryteria techniczne mają znaczny wpływ na realizację projektu. Przyjmując niewłaściwą lokalizację od np. sieci gazowej lub energetycznej, odległą od źródeł wytwórczych, musimy liczyć się z wysokimi kosztami budowy infrastruktury doprowadzającej energię do punktów odbioru jak również wysokimi kosztami eksploatacji tych obiektów. W przypadku integracji źródeł odnawialnych z siecią gazową niezbędny jest czynnik dostępu do sieci. Ważne jest określenie występowania sieci gazowej i elektroenergetycznej czy jest ona dostępna czy też nie. Następnie niezbędne jest określenie ilości wprowadzania paliwa magazynującego energię do sieci. Oznacza to, że sieć musi posiadać wystarczającą chłonność, która przyjmie wymagane ilości wodoru. Wpływ wielkości takiego przyłączanego źródła do sieci gazowej będzie często ograniczony do określonych granicznych parametrów, które zostaną podane przez operatora systemu gazowego.

Poniżej przedstawiono przykładowe kryteria techniczne:

- Odległość od sieci gazowej (dostępność infrastruktury)
- Odległość od sieci elektroenergetycznej (dostępność infrastruktury)
- Chłonność sieci gazowej
- Chłonność sieci elektroenergetycznej
- Prędkość wiatru
- Inne.

- Kryteria ekonomiczne [5]

Kryteria ekonomiczne obejmują nakłady i koszty związane z realizacją projektu (alternatywą) oraz późniejszą eksploatacją. Do kryteriów tych można zaliczyć także położenie geograficzne jeżeli opisuje trudność w realizacji a później eksploatacji urządzeń (np. teren górski, tereny nizinne, itp.) co wiąże się z konkretnymi nakładami finansowymi na ich eksploatację. Nakłady przypisane są do wartości pieniężnej jaką ponosi się na wytworzenie danego przedsięwzięcia (np. budowę źródła wytwórczego energii elektrycznej oraz wodoru wraz z całą infrastrukturą towarzyszącą).

Na koszty związane są z działalnością bieżącą wpływ w głównej mierze mają: wybór rozwiązania technicznego, usytuowanie projektu, które może wpływać na zwiększone nakłady na budowę infrastruktury np. przyłączeniowej. Lokalizacja poza trudnościami dostępowymi może różnicować opłaty jakie będą ponoszone z tytułu podatków, opłat za umieszczenie infrastruktury np. w drogach. W kryteriach ekonomicznych wskazuje się także na opłacalność ekonomiczną projektu. Mierzy się ją poprzez wskaźniki jak np.: okres zwrotu, NPV, IRR. W analizach klasycznych (nie wielokryterialnych) często ten etap wskazuje na wybór najlepszego rozwiązania i decydent podejmuje decyzję. Do kryterium ekonomicznego zalicza się również nachylenie terenu, które związane jest z koniecznością zwiększenia kosztów na samą inwestycję oraz późniejszą eksploatacją). Poniżej przedstawiono przykładowe kryteria ekonomiczne:

- nakłady na budowę,
- koszty eksploatacji,

- okres zwrotu,
  - nachylenie terenu,
  - wsparcie finansowe,
  - zapotrzebowanie na energię,
  - inne.
- Kryteria środowiskowe[5]
 

Głównym celem projektów transformacyjnych jest zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych. Kryteria środowiskowe obejmują: emisję uniknięta do atmosfery gazów takich jak CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>; wpływ na populację zwierząt, ptaków; uciążliwość związana z występowaniem hałasu; uniknięte zrzuty zanieczyszczeń do środowiska; wpływ przedsięwzięcia na otaczający krajobraz; użycie terenu na potrzeby realizowanego projektu; trudności w recyklingu elementów technicznych bądź też możliwość późniejszego ich wykorzystania.

Poniżej przedstawiono przykładowe kryteria środowiskowe:

    - ochrona przyrody (łączy w sobie szereg obszarów i jest stosowana często łącznie jako kryterium wynikowe dla ochrony obszarów chronionych jak również miejsc i pomników przyrody),
    - uniknięta emisja gazów cieplarnianych,
    - odległość od obszarów chronionych,
    - ingerencja w krajobraz,
    - emisja hałasu,
    - Inne.
  - Kryteria Społeczne [16][17][18][19][5]
 

Kryteria społeczne jest ważnym czynnikiem opisującym projekt. Charakteryzuje ono nastawienie społeczeństwa, które będzie jednym z beneficjentów realizacji przedsięwzięcia. Właściwe nastawienie społeczne może przyspieszyć realizację, a także uniknąć sporów dotyczących jego lokalizacji. W realizacji projektów włącza się przeciwdziałanie negatywnym skutkom oddziaływania społecznego poprzez kampanie informacyjne mające na celu przekonanie społeczności do inwestycji. W przedmiotowej pracy mamy do czynienia z przypadkiem złożonym tj. jednocześnie inwestycji w farmy wiatrowe w połączeniu z sieciami elektroenergetycznymi oraz gazowymi. Z przeprowadzonych w Polsce i Europie badań wynika, że występuje duża akceptacja społeczna dla inwestycji z obszaru OZE [20][21]. Przykładowo w Polsce ok. 78 % ankietowanych uważa, że farmy wiatrowe mogą wpłynąć pozytywnie na rozwój regionu. Podobne wartości wykazano w badaniach przeprowadzonych w Niemczech i Hiszpanii [22]. Mniejsza akceptacja przed realizacją inwestycji w Polsce występuje dla biogazowni. Wynika ona głównie z obawy ludności lokalnej na uciążliwość zapachową biogazowni. Jednak badania przeprowadzone po jej budowie pokazują, że czynnik ten się zmienia na pozytywny i akceptacja społeczna wzrasta [23].

Polityka władz krajowych i lokalnych nakierowana na odnawialne źródła energii powinna wpływać pozytywnie na nastawienie społeczne a w przypadku pojawienia się sporów starać się je łagodzić. Posiadanie dokumentów oraz wyznaczonych terenów pod tego typu inwestycje w Miejscowych Planach Zagospodarowania Przestrzennego ułatwia prowadzenie prac przygotowawczych i skraca okres do osiągnięcia przez projekt gotowości produkcyjnej.

Poniżej przedstawiono przykładowe kryteria społeczne:

    - odległość od zabudowań mieszkalnych,
    - obiekty ogólnego zainteresowania (obiekty turystyczne, miejsca kultu, itp.),
    - zgodność inwestycji z polityką lokalną,
    - gęstość zaludnienia,
    - wpływ na rynek pracy (poziom bezrobocia)
    - Inne.

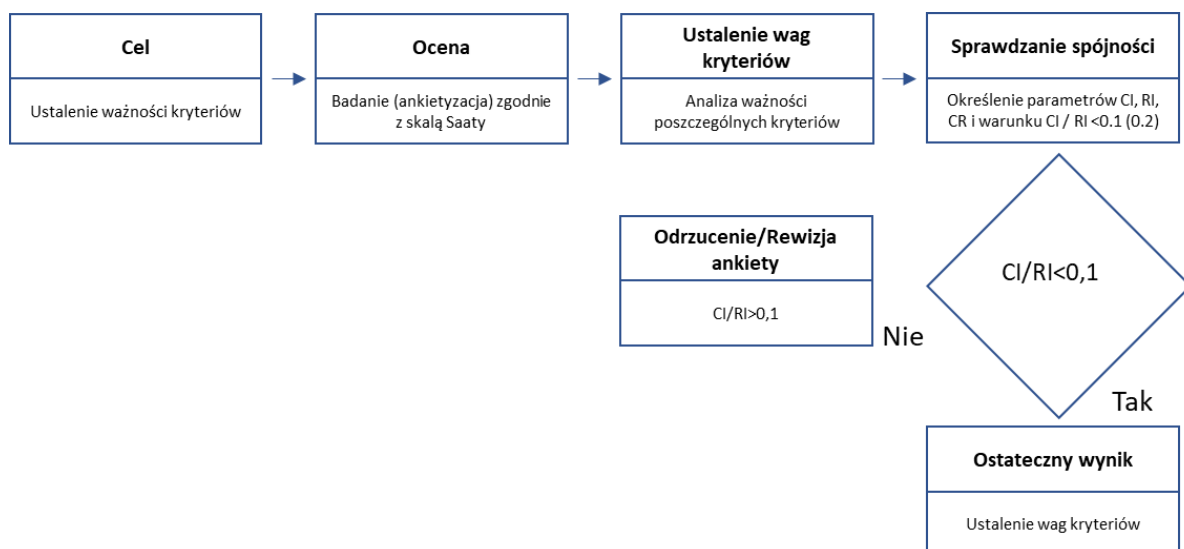
W dalszym kroku prowadzenia analiz wielokryterialnych jest otrzymanie wagi kryterium. Są one wynikiem w większości modeli MCDM. Waga kryterium wpływa wówczas na skutek podejmowania decyzji.

Istnieje szereg metod wielokryterialnych. Najbardziej znana i najczęściej wykorzystywana w zagadnieniach energetycznych jest metoda AHP. Metoda AHP stworzona została przez Thomasa L. Saaty [24][25][26]. Jej popularność wynika głównie ze względu na jej stosunkowo łatwą zrozumiałość, która przekłada się na stosunkowo łatwe wdrożenie do stosowania. Polega ona na porównywaniu parami kryteriów. Cechy te są niezwykle istotne, gdyż do ich przeprowadzania zaangażowani są eksperci. Osoby te bardzo często są specjalistami w danej dziedzinie jednak nie posiadają dużego doświadczenia w stosowaniu metod wielokryterialnych. Metoda ta umożliwiła stosunkowo szybko wdrożyć danego eksperta do analizy oceny rozwiązań. Może być stosowana bardzo szeroko w analizach rozwiązań energetycznych zarówno całych projektów jak i wyboru samych lokalizacji. Metoda AHP należy do grup analiz jakościowych. Procedura oceny jest przeprowadzona w skali jakościowej a następnie transformowana na wartości ilościowe. Takie podejście ułatwia porównywanie poszczególnych kryteriów i wariantów bez konieczności szczegółowej znajomości metodyki. Jest to niezwykle ważna cecha gdyż od ekspertów nie jest wymagana szczegółowa znajomość samej metodyki badania.

Metoda ta bywa najczęściej wybierana jako podstawa do określenia wagi kryteriów. Według opracowania [5] większość z analizowanych autorów stosuje metodę AHP jako podstawę określania wagi kryteriów. Jest to spowodowane głównie następującymi czynnikami:

- łatwością zrozumienia oraz możliwością zastosowania do złożonych procesów,
- możliwością podziału złożonego procesu na mniejsze pod problemy w układzie hierarchicznym,
- wynikiem analizy jest przedstawienie ważności poszczególnych kryteriów co bardziej zrozumiale opisuje cel decyzyjny,
- możliwością zastosowania zarówno do opisu problematyki ilościowej jak i jakościowej.

W niniejszej dysertacji określone zostały wagi kryteriów zgodnie z metodologią AHP. Schemat tego postępowania ilustruje Rys. 5. Kryteria te stanowią dane wejściowe do kolejnego etapu analizy GIS.



Rys. 5 Schemat postępowania do określenia wag kryteriów przy zastosowaniu analizy AHP

Dla pełnej analizy AHP w pierwszym etapie dokonujemy porównań kryteriów głównych i szczegółowych. Efektem tej części są wektory (wagi) poszczególnych kryteriów. Druga część analizy

dokonyje porównań poszczególnych projektów (alternatyw). Projekty są porównywane parami z punktu widzenia każdego kryterium. Szczegółowy opis przyjętych założeń oraz przeprowadzonych badań przedstawiono w Rozdziale Badania i eksperymenty.

Połączenie jej z systemami informacji geograficznej pozwala na rozwiązanie szerokiego zakresu zagadnień decyzyjnych z obszaru energetyki. W dalszej części pracy autor wykorzystuje jej elementy w modelu umożliwiającym wybór najlepszego wariantu lokalizacji projektu związaną z współpracą sieci gazowej w ramach systemów P2G.

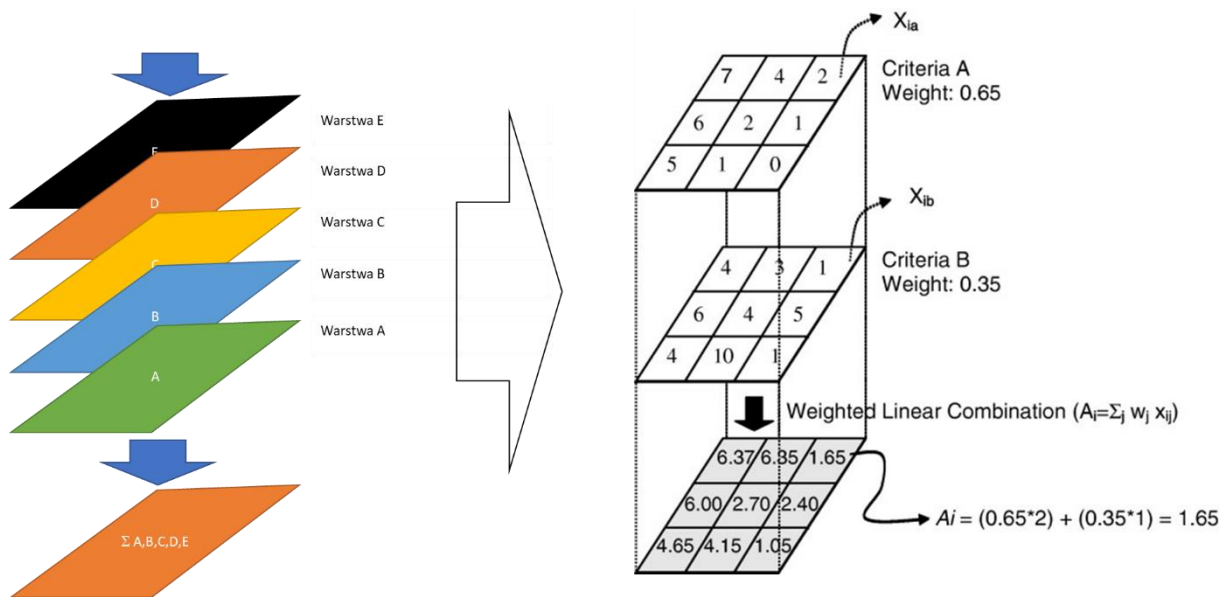
## 2.5 Integracja narzędzi GIS – AHP

Wiele problemów, które analizowane są w energetyce ma charakter związany z położeniem geograficznym. Związane jest to z geograficznym występowaniem infrastruktury. Wybór lokalizacji przy podejmowaniu decyzji wiąże się z dużym zbiorem wykonanych alternatyw oraz kryteriami ich oceny. Analiza GIS-MCDA łączy dane geograficzne z oceną wielokryterialną celem rozwiązania 53 problemów przestrzennych. Przykładów zastosowań GIS-MCDA jest wiele i mogą obejmować wybór lokalizacji systemów energetycznych, wyznaczanie tras pojazdów, przydatność gruntów, planowanie transportu, wybór lokalizacji do różnych sektorów, itp.

Wielokryterialne systemy wspomaganie decyzji przestrzennych (MC-SDSS) łączą ze sobą możliwości GIS oraz metody wielokryterialnej analizy podejmowania decyzji (MCDA). W niniejszej pracy zastosowano metodę integracji AHP z GIS wykorzystując łączenia warstw za pomocą metody WLC (Weighted Linear Combination - metoda liniowej sumy ważonej) [2]. Pozwala ona przypisać wagi poszczególnych kryteriów do poszczególnych warstw reprezentujących kryteria. W pracy do określenia wag kryteriów użyto metody AHP. W procesie scalania metody AHP z GIS oraz przeprowadzenia analizy wyboru lokalizacji jako narzędzia przetwarzania danych geoprzestrzennych wykorzystano systemy analizy GIS. Głównym celem tego podejścia jest ocena wag dla map, które reprezentują różnorodne kryteria. Następnie wagi te są przypisywane do map kryteriów, a mapy są łączone ze sobą. Wynikiem tej analizy są mapy, które przedstawiają rozkład wag w kontekście przestrzennym.

Takie podejście jest uniwersalne i umożliwia wykorzystanie dużej ilości kryteriów oraz subkryteriów w procesie decyzyjnym. Podejmowanie decyzji w kontekście GIS-MCDA obejmuje łączenie odpowiednich danych przestrzennych (warstw mapy z przypisanymi atrybutami) i preferencji decydentów w celu określenia najlepszych rozwiązań. Najczęściej stosowaną metodą GIS-MCDA jest operacja nakładania warstw i wykorzystanie metody WLC [27]. Przypisanie wagi do danej warstwy określa stopień, w jakim dane kryterium oddziałuje nad innym kryterium. Metoda WLC łączy ze sobą mapy kryteriów. Na podstawie preferencji decydentów do każdej mapy kryteriów przypisywana jest waga. W wyniku takiego sumowania otrzymujemy mapę preferencji. Do wyznaczania wag kryteriów zastosowano metodę AHP, która bardzo dobrze sprawdza się w praktyce analitycznej i jest powszechnie stosowana do wyznaczania preferencji decyzyjnych [2]. Po przeprowadzeniu analizy wielokryterialnej i określeniu wag kryteriów w kolejnym kroku wykonujemy analizę poszczególnych map. Analizę prowadzi się na warstwach rastrowych. Czynności te są przetwarzane przy wykorzystaniu środowiska oprogramowania QGIS.

Aby zidentyfikować potencjalne lokalizacje wykonywana jest analiza warstw tematycznych. Wagi każdego kryterium wyboru lokalizacji zostały obliczone na podstawie opinii ekspertów w oparciu o zebrane ankiety. Wykorzystując technikę WLC, każdemu kryterium przypisano ocenę w skali od 1 do 10. Schemat analizy rastrowej przedstawiający nakładanie się poszczególnych warstw opisujących dane kryteria przedstawiono na Rys. 6. Każda warstwa zawiera rastrowy obraz kryteriów. Kryteria te podane są w układzie ustandaryzowanym co pozwala dokonać analizy rastrowej.



Rys. 6 Schemat analizy WLC wykorzystując analizę rastrową GIS [28]

Ogólna procedura analizy WLC dla modelu wyboru lokalizacji przyjętego w niniejszej pracy przebiega w następujący sposób:

- ustalenie kryteriów oceny oraz zdefiniowanie ich na warstwach mapy (analiza rastrowa),
- standaryzowanie poszczególnych kryteriów dla poszczególnych warstw,
- określenie wag metodą AHP i przypisanie ich do poszczególnych warstw (mapy),
- otrzymanie mapy wynikowej

Główną zaletą metody WLC jest to, że może łatwo być zaimplementowana do systemów GIS przy użyciu analizy map [29]. Metoda ta jest również stosunkowo łatwa w interpretacji (m.in. dzięki części wizualnej) co stanowi duży atut szczególnie podczas wdrażania w organizacji oraz wśród decydentów.

### 3 Wyniki badań

Opracowany model umożliwia wskazanie potencjalnych lokalizacji instalacji P2G ze źródłem energii elektrycznej w postaci elektrowni wiatrowych. Było to możliwe dzięki zastosowaniu modelu WLC opartego na analizie GIS oraz AHP. W modelu tym wykorzystano kryteria. Kryteria te określały zarówno ograniczenia jak i oceny, które mogą wpływać na systemy P2G w postaci: energetyki wiatrowej, sieci elektroenergetycznej oraz sieci gazowej. Jako obszar badawczy został wytypowany obszar województwa Wielkopolskiego.

Otrzymane wyniki przedstawiają rozproszony obraz potencjalnych lokalizacji. Zgodnie z obowiązującym prawem minimalna odległość od zabudowań to 700 m. Aktualnie jest to wartość referencyjna, która daje możliwość stawiania turbin wiatrowych. Występujące obiekty mieszkalne poniżej tej wartości dyskwalifikują możliwość postawienia elektrowni wiatrowych. Najbardziej atrakcyjne pod tym względem są gminy: Złotów, Krajenka i Lwówek. Dla tych gmin obszary dostępne  $A_d$  przedstawiają kolejno powierzchnie około: 1890 ha, 1025 ha oraz 632 ha co stanowi 6%, 5% i 3% powierzchni poszczególnych gmin. Szczegółowe zestawienia przedstawiono w Tab. 1 oraz

Gmina	Powierzchnia gminy $A_g$	Powierzchnia wynikowa $A_w$	Udział wynikowy $A_w/A_g$	Powierzchnia wynikowa $A_w$	Udział wynikowy $A_w/A_g$	Powierzchnia wynikowa $A_w$	Udział wynikowy $A_w/A_g$
		od zabudowań 500 m		od zabudowań 700 m		od zabudowań 1000 m	



	[ha]	[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]	[%]
Złotów	29 200	178	0,61%	154	0,53%	20	0,07%
Krajenka	19 139	163	0,85%	147	0,77%	35	0,18%
Lwówek	18 347	170	0,93%	143	0,78%	51	0,28%

Tab. 2.

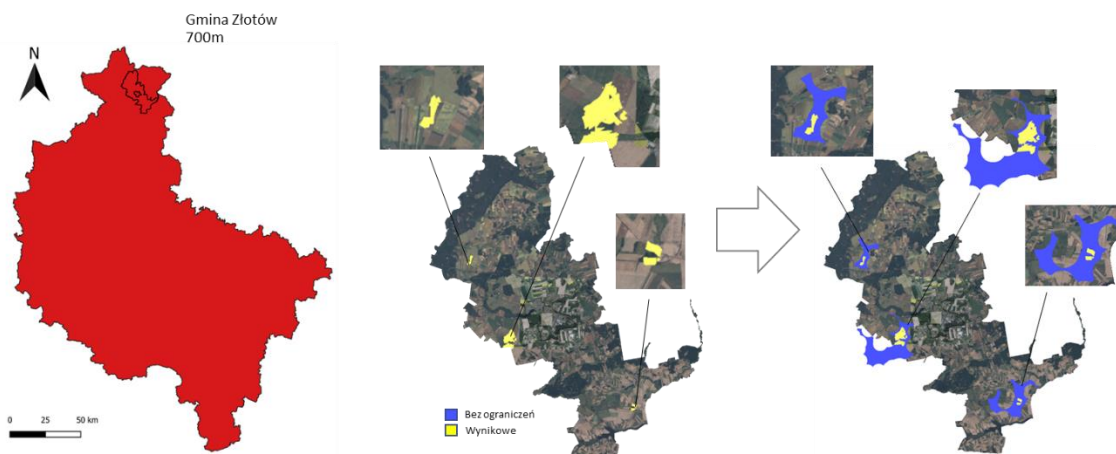
Tab. 1 Zestawienie lokalizacji wynikowych  $A_w$

Gmina	Powierzchnia gminy $A_g$	Powierzchnia wynikowa $A_w$	Udział wynikowy $A_w/A_g$	od zabudowań 500 m		od zabudowań 700 m		od zabudowań 1000 m	
				[ha]	[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]
Złotów	29 200	178	0,61%	154	0,53%	20	0,07%		
Krajenka	19 139	163	0,85%	147	0,77%	35	0,18%		
Lwówek	18 347	170	0,93%	143	0,78%	51	0,28%		

Tab. 2 Zestawienie lokalizacji dostępnych uwzględniających tereny sąsiadujące bez ograniczeń

Gmina	Powierzchnia gminy $A_g$	Powierzchnia dostępna $A_d$	Udział dostępny $A_d/A_g$	od zabudowań 500 m		od zabudowań 700 m		od zabudowań 1000 m	
				[ha]	[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]
Złotów	29 200	3 265	11,18%	1 887	6,46%	667	2,28%		
Krajenka	19 139	1 945	10,16%	1 025	5,36%	478	2,50%		
Lwówek	18 347	962	5,25%	632	3,44%	261	1,42%		

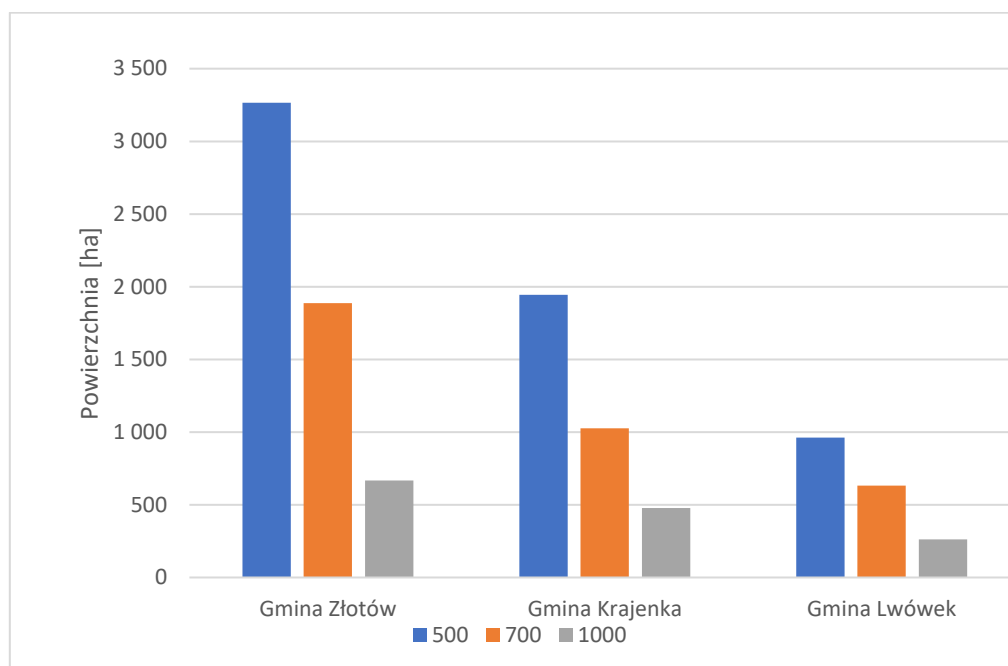
Gmina Złotów posiada największą powierzchnię do lokalizacji elektrowni wiatrowych w układzie P2G. Na Rys. 7 przedstawiono wynikowe zestawienie lokalizacji.



Rys. 7 Lokalizacje wynikowe  $A_w$  oraz dostępne  $A_d$  przy uwzględnieniu 700 m odległości od zabudowań. Lokalizacje w gminie Złotów.

Wyniki analiz przedstawione na Rys. 8 pokazują jak znaczny jest ubytek gruntów dostępnych do realizacji projektów wraz ze zwiększaniem ograniczenia odległości od zabudowań. Przy utrzymaniu takich ograniczeń transformacja energetyczna napotykać będzie duże trudności w pozyskiwaniu gruntów pod wykonanie nowych projektów. Realizowane będą te zlokalizowane na terenach mniej atrakcyjnych oraz droższe w realizacji z uwagi na konieczność ponoszenia większych nakładów na rozbudowę infrastruktury. Wydaje się, że wraz ze wzrostem świadomości społecznej, co do procesów transformacyjnych oraz koniecznych do realizacji przedsięwzięć łatwiej będzie zmieniać te

uwarunkowania przez grupy rządzące. Dlatego też analiza w swoim zakresie uwzględnia również parametr 500 m, który jest obecnie szeroko omawiany jako potencjalnie możliwy do wykorzystania.



Rys. 8 Zestawienie graficzne lokalizacji wyników z uwzględnieniem terenów nie mający ograniczeń dostępności.

Wskazane lokalizacje stanowią na tle całego województwa niewielki odsetek miejsc możliwych do korzystnego zlokalizowania instalacji P2G. Jest to o tyle ważne że przy uruchomieniu projektów transformacji energetycznej instalacje P2G będą miały duże znaczenie z uwagi na ich zdolność do stabilizowania systemów energetycznych. Pomimo niskiego odsetka odpowiednich obszarów, istnieje pewna ilość miejsc na rozwój energetyki wiatrowej P2G.

#### 4 Wnioski

Zaproponowany w pracy model decyzyjny, oraz przeprowadzone na jego podstawie badania umożliwiają dokonanie wyboru potencjalnych lokalizacji systemów Power to Gas ze źródłem zasilania w postaci elektrowni wiatrowych. Wytypowanie lokalizacji może odbyć się bez konieczności prowadzenia badań terenowych co przyspiesza i obniża koszty procesu decyzyjnego. Umożliwia także przeprowadzenie szerszej analizy uwzględniającej większą liczę danych wejściowych. Metoda ta jest stosunkowo łatwa do przeprowadzenia oraz zrozumienia. Zwiększa to jej atrakcyjność w środowisku rzeczywistego wykorzystania w przedsiębiorstwie energetycznym. Kluczowe jest uwzględnienie rzeczywistych potrzeb decydentów. Wyniki procedury pozwalają na analizę różnych perspektyw i przesłanek przy ocenie wyboru lokalizacji farm wiatrowych we współpracy z systemami elektroenergetycznymi i gazowymi co umożliwia adaptację różnorodnych strategii decyzyjnych w zarządzaniu infrastrukturą produkcji oraz transportu energii. Wskazana metoda może stanowić wsparcie decyzyjne w procesie przygotowania i optymalizacji projektów transformacyjnych. Należy przy tym pamiętać, że w rozpatrywanym przypadku analizowano i badano jedynie fragment z całego procesu przygotowania dużych przedsięwzięć energetycznych. W dalszych krokach, na podstawie uzyskanych wyników badań, wykonywane będą studia wykonalności, które ostatecznie uwzględnią kolejne czynniki jak np. parametry ekonomiczne czy techniczne związane z realizacją ostateczną projektu.

Do badań wybrano najbardziej powszechnie stosowaną metodę wielokryterialną AHP. Określenie obszarów ograniczeń zostało oparte na pięciu kryteriach głównych. Odzwierciedlają one główne

kategorii wpływu na wybór lokalizacji farm wiatrowych dla realizacji projektów P2G. Kryteriami, które mają największy wpływ na wybór lokalizacji były: potencjał energii wiatru oraz ochrona przyrody.

Badania ankietowe do analizy wielokryterialnej AHP zostały przeprowadzone wśród ekspertów. Z uwagi na rozpatrywany przedmiot jakim jest transformacja energetyczna, czyli dziedzina stosunkowo młoda, liczba dostępnych osób jest ograniczona. Powoduje to pewne trudności w przeprowadzaniu badań ankietowych. Wraz z postępowaniem działań transformacyjnych osób tych będzie coraz więcej a przeprowadzanie analiz będzie ułatwione poprzez łatwiejszy dostęp do grup eksperckich. Badania ankietowe wykazały, że największy wpływ na miejsce lokalizacji powinny mieć zasoby energii odnawialnej (31.1% ankietowanych) oraz ochrona środowiska (26.9% ankietowanych). W niektórych przypadkach są to kryteria wzajemnie wykluczające się, ponieważ obszary o znacznej wietrzności mogą występować na obszarach podlegających ochronie środowiska. Wagi kryteriów zostały uwzględnione modelu decyzyjnym w analizie GIS.

Działanie modelu zweryfikowano dla obszaru województwa wielkopolskiego. Uzyskane wyniki badań, pokazują, że zdecydowana część obszaru Wielkopolski jest trudno dostępna dla realizacji projektów P2G. Niemniej jednak, pomimo ograniczonych możliwości lokalizacyjnych projektów P2G, istnieją miejsca, które umożliwiają rozwój tej technologii. Z otrzymanych wyników najbardziej atrakcyjną pod kątem dostępnej powierzchni jest gmina Złotów. Powierzchnia jest kluczowym czynnikiem gdyż umożliwia zainstalowanie większych mocy produkcji energii elektrycznej. Jak wykazano duże ograniczenia regulacyjne powodują, że dostępna powierzchnia jest bardzo istotnym czynnikiem przy instalacji źródeł odnawialnych. Farmy wiatrowe pomimo występowania nieregularności ich pracy (zależnej od wietrzności) charakteryzują się znacznie stabilniejszą produkcją energii niż np. źródła solarne dlatego też mogą stanowić podstawowe źródło produkcji energii elektrycznej w procesie transformacji.

Opracowany model stanowi nowe, interdyscyplinarne, podejście do podejmowania decyzji w nadchodzących zmianach transformacyjnych. Pozwala on dokonać odpowiednich wyborów jak również zminimalizować koszty zarówno, społeczne, techniczne, prawne czy środowiskowe. Zaproponowana metoda wyboru lokalizacji stanowi pierwszy krok analizy wykonalności integracji systemów gazowych z systemami energetycznymi. Pozwala skrócić czas analizy a także zaoszczędzić środki finansowe na badania terenowe. Dzięki temu wyniki badań mają ogromne znaczenie w procesie podejmowania decyzji dla przedsięwzięć energetycznych związanych z nadchodzącą transformacją energetyczną. Przedsiębiorstwa transportu energii w nadchodzących latach będą musiały wdrażać projekty transformacyjne m.in. integrujące elektroenergetykę z energetyką gazową.

W opinii autora osiągnięcie założonego celu pracy doktorskiej przyczyniło się do wskazania następujących wniosków:

- opracowana metoda stanowi praktyczny sposób wspomagania decyzji wyboru lokalizacji farm wiatrowych w korelacji z systemami gazowymi i elektroenergetycznymi,
- zaproponowany model umożliwia modyfikację i rozbudowę co w sposób łatwy można dostosować do innych źródeł wytwórczych
- wskazana w pracy metoda umożliwia przeprowadzenie rankingu lokalizacji i daje praktyczny obraz możliwości realizacji projektów integracji systemów energetycznych
- model daje możliwość ilościowej oceny obszarów przeznaczonych na realizacyjne projektów energetycznych.

Rozwijający się w dużym tempie obszar sztucznej inteligencji (AI) może stanowić kolejny krok w rozwoju analiz podejmowania decyzji. Opracowany podczas realizacji pracy doktorskiej model decyzyjny wykorzystuje duże ilości danych co daje szerokie możliwości jego wykorzystania w analizach AI-

## 5 Wykaz publikacji:

- 1) Rafał Goraj, Marcin Kiciński, Rafał Ślęfarski, Anna Duczkowska, "Validity of decision criteria for the selection of Power to Gas projects: The case of Poland", *Utilities Policy*, 2023 <https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101619>
- 2) Ogniwa paliwowe w systemach zasilania awaryjnego obiektów infrastruktury krytycznej Rafał Ślęfarski, Paweł Czyżewski, Rafał Goraj W: *Nauka dla obronności. Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej. Tom 2* / red. Michał Ciałkowski (WIŚiE), Tomasz Łodygowski (WILiT), Andrzej Żyluk - Warszawa, Polska Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, 2022 - s. 259-268
- 3) Analiza systemów zasilania obiektów strategicznych: Michał Gołębiowski, Rafał Goraj, W: *Nauka dla obronności i środowiska. Tom 1* / red. Tomasz Łodygowski (WILiT), Michał Ciałkowski (WIŚiE), Andrzej Żyluk: Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 2020,
- 4) Paweł Czyżewski, Rafał Goraj, Rafał Ślęfarski; "Study on Hydrogen Addition Into Public Natural Gas Distributon on Operational Parameters and Combustion Characteristic"; *Journal of Mechanical and Transport Engineering*

## 6 Literatura

- [1] Rada Europejska, "Fit for 55," *Rada Europejska*. <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>.
- [2] J. Malczewski and C. Rinner, *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. 2015.
- [3] R. E. Hodgett, "Comparison of multi-criteria decision-making methods for equipment selection," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 85, no. 5–8, pp. 1145–1157, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7993-2.
- [4] A. Emrouznejad and M. Marra, "The state of the art development of AHP (1979–2017): A literature review with a social network analysis," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 22, pp. 6653–6675, 2017, doi: 10.1080/00207543.2017.1334976.
- [5] M. Shao, Z. Han, J. Sun, C. Xiao, S. Zhang, and Y. Zhao, "A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection," *Renew. Energy*, vol. 157, pp. 377–403, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.137.
- [6] G. A. MILLER, "The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information," *Cornell Hotel Restaur. Adm. Q.*, p. 1, 1956, doi: 10.1037/h0043158. PMID 13310704.
- [7] M. Bailera, P. Lisbona, L. M. Romeo, and S. Espatolero, "Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO<sub>2</sub>," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. January 2016, pp. 292–312, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.130.
- [8] H. Blanco, W. Nijs, J. Ruf, and A. Faaij, "Potential of Power-to-Methane in the EU energy transition to a low carbon system using cost optimization," *Appl. Energy*, vol. 232, no. August, pp. 323–340, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.08.027.
- [9] C. Wulf, J. Linssen, and P. Zapp, *Power-to-gas-concepts, demonstration, and prospects*. Christina Wulf, 2018.
- [10] M. Götz *et al.*, "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review," *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 1371–1390, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.066.

- [11] S. Schiebahn, T. Grube, M. Robinius, V. Tietze, B. Kumar, and D. Stolten, "Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 12, pp. 4285–4294, 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.123.
- [12] Government of Poland, "Polska Strategia Wodorowa Do Roku 2030," no. 149, p. 50, 2021.
- [13] "https://gis-support.pl/," *website*.
- [14] K. Sejmu, "Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne," no. 54, pp. 1–289, 2021.
- [15] A. Stoltmann, "4-AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ: The method of multicriteria analysis for the selection of the location of electricity generation sources," *Politech. Gdańska*, vol. 6, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [16] L. I. Tegou, H. Polatidis, and D. A. Haralambopoulos, "Environmental management framework for wind farm siting: Methodology and case study," *J. Environ. Manage.*, vol. 91, no. 11, pp. 2134–2147, 2010, doi: 10.1016/j.jenvman.2010.05.010.
- [17] A. Bennui, P. Rattanamanee, U. Puetpaiboon, P. Phukpattaranont, and K. Chetpattananondh, "Site Selection for Large Wind Turbine Using Gis," *Int. Conf. Eng. Environ. - ICEE- 2007*, vol. 1, no. 1, pp. 90–112, 2007.
- [18] S. M. J. Baban and T. Parry, "Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK," *Renew. Energy*, vol. 24, no. 1, pp. 59–71, 2001, doi: 10.1016/S0960-1481(00)00169-5.
- [19] L. C. Rodman and R. K. Meentemeyer, "A geographic analysis of wind turbine placement in Northern California," *Energy Policy*, vol. 34, no. 15, pp. 2137–2149, 2006, doi: 10.1016/j.enpol.2005.03.004.
- [20] L. M. Costa Pinto, S. Sousa, and M. Valente, "Explaining the social acceptance of renewables through location-related factors: An application to the portuguese case," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 2, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/ijerph18020806.
- [21] P. zbiorowa. Energetyki Wiatrowej Stwoarzyszenie, "Akceptacja dorosłych Polaków dla energetyki wiatrowej i innych odnawialnych źródeł energii," *Nucl. Phys.*, vol. 13, no. 1, 2011.
- [22] K. Linnerud, S. Aakre, and M. D. Leiren, "Deliverable 2 . 1 : Technical and socio-economic conditions: A literature review of social acceptance of wind energy development , and an overview of the technical , socio- economic and regulatory starting conditions in the wind energy scarce target regio," no. V2, pp. 1–172, 2018.
- [23] J. Chodkowska-Miszczuk, S. Martinat, and R. Cowell, "Community tensions, participation, and local development: Factors affecting the spatial embeddedness of anaerobic digestion in Poland and the Czech Republic," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 55, no. May, pp. 134–145, 2019, doi: 10.1016/j.erss.2019.05.010.
- [24] T. L. Saaty, "How to make a decision: The analytic hierarchy process," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 48, no. 1, pp. 9–26, 1990, doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
- [25] R. W. Saaty, "The analytic hierarchy process-what it is and how it is used," *Math. Model.*, vol. 9, no. 3–5, pp. 161–176, 1987, doi: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.
- [26] T. L. Saaty and M. S. Ozdemir, "Why the magic number seven plus or minus two," *Math. Comput. Model.*, vol. 38, no. 3–4, pp. 233–244, 2003, doi: 10.1016/S0895-7177(03)90083-5.
- [27] S. Boroushaki and J. Malczewski, "Measuring consensus for collaborative decision-making: A

GIS-based approach," *Comput. Environ. Urban Syst.*, vol. 34, no. 4, pp. 322–332, 2010, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2010.02.006.

- [28] O. M. Pérez, T. C. Telfer, and L. G. Ross, "Geographical information systems-based models for offshore floating marine fish cage aquaculture site selection in Tenerife, Canary Islands," *Aquac. Res.*, vol. 36, no. 10, pp. 946–961, 2005, doi: 10.1111/j.1365-2109.2005.01282.x.
- [29] C. D. Tomlin, *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Englewood Cliffs NJ by Prentice Hall, 1990.