



Zastosowanie teorii grafów do potencjalnych lokalizacji farm wiatrowych

inż. Kacper Ściuba

dr hab. inż. Arkadiusz Miaskowski, prof. Uczelni

Politechnika Lubelska

Morskie farmy wiatrowe są jednym z kluczowych kierunków rozwoju energetyki odnawialnej. Wybór lokalizacji wpływa jednocześnie na produkcję energii, koszty fundamentów i długość kabli. Decyzja lokalizacyjna musi uwzględniać ograniczenia środowiskowe, przestrzenne i techniczne.



Rys. 1. Zużycie energii elektrycznej w kolejnych latach na obszarze Polski (źródło GUS).



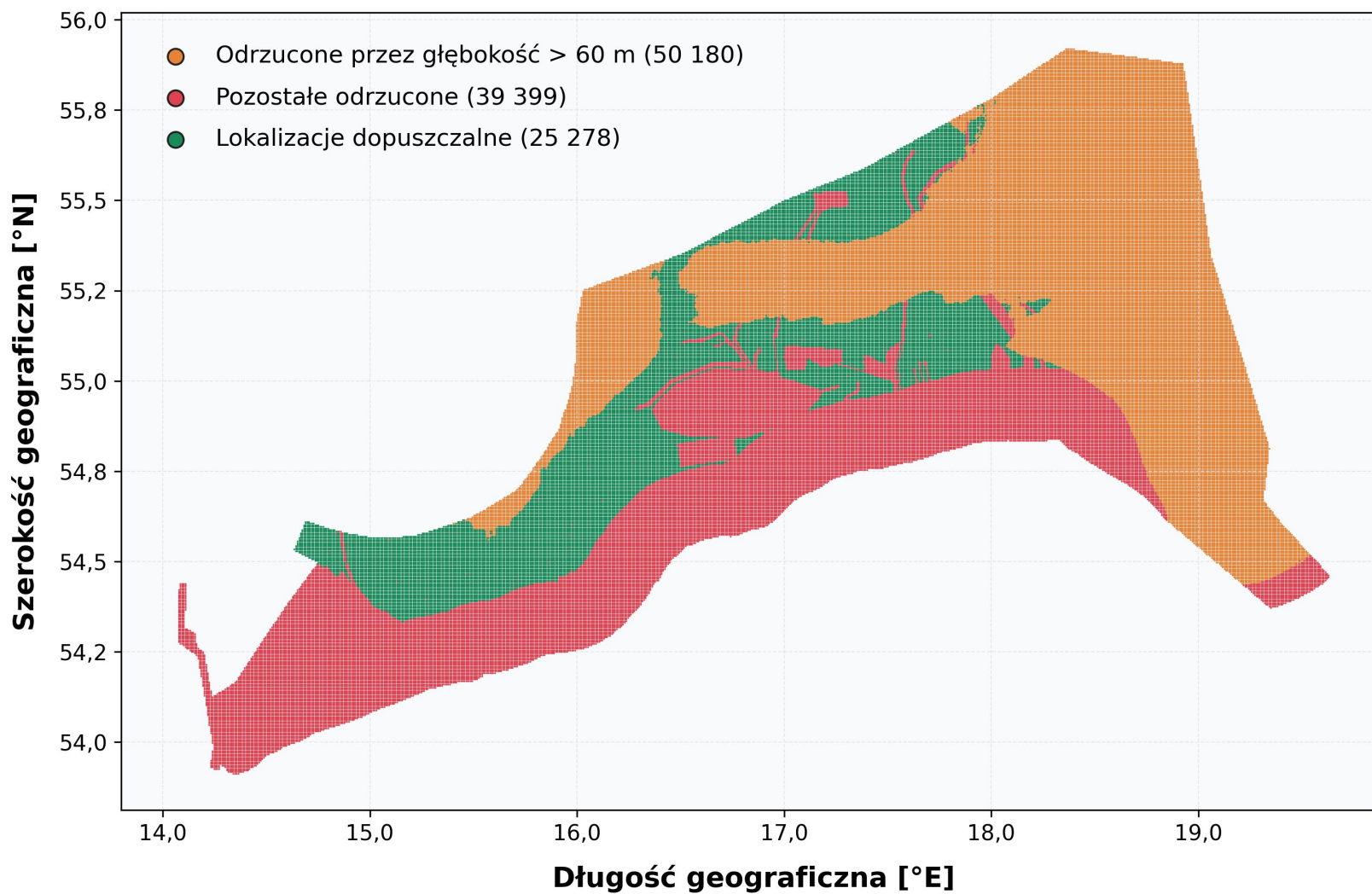
Cel pracy

Celem pracy jest opracowanie metodyki wyznaczania optymalnych lokalizacji farm wiatrowych oraz rozmieszczenia turbin, z uwzględnieniem uwarunkowań terenowych i środowiskowych.



Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje implementację algorytmów grafowych, a także przeprowadzenie symulacji na podstawie danych z **polskiej wyłącznej strefy ekonomicznej**.



Siatka punktów: 500 m

Rys. 2. Wynik filtracji punktów siatki dla analizowanego obszaru

Obszar: polska wyłączna
strefa ekonomiczna

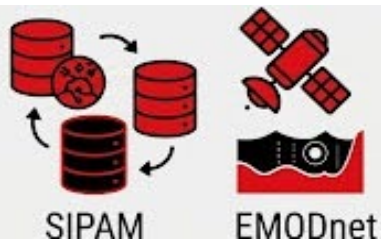
Siatka punktów co 500 metrów

Wynik 25 278 lokalizacji

Odrzucone punkty w strefie
ograniczeń:

- Natura 2000 i obszary chronione,
- tory wodne i strefy zamknięte,
- kable morskie,
- wraki,
- głębokość w punkcie > 60 m.

1. Gromadzenie danych



2. Przetwarzanie danych



3. Modelowanie Grafu



4. Implementacja algorytmów



5. Wizualizacja i analiza



Mapy batymetryczne,
prędkości wiatrów,
ograniczenia prawne

Dyskretyzacja obszaru
morskiego (siatka
punktów), wykluczenie
obszarów zabronionych,
utworzenie **róży
wiatrów** dla dyskretnego
punktu

Definicja wierzchołków
(W) i krawędzi (E),
przypisanie wag
(głębokość, prędkość
wiatru na 150 m),
stworzenie digrafu z
cieniami
aerodynamicznymi

algorytm Prima
(połączeń między
turbunami),
algorytm Dijkstry
(połączenia między
stacjami OSS a
brzegiem),
**algorytm rozmytych
c-średnich**
(wyznaczenie lokalizacji
stacji OSS)

Wyznaczenie
**optymalnych
lokalizacji** na mapie,
**analiza
wyników i porównanie
variantów.**

Model Jensena:

$$\frac{\Delta v}{v_o} = \frac{1 - \sqrt{1 - C_t(u)}}{\left(1 + \frac{2kx}{D}\right)^2}$$

gdzie:

$\frac{\Delta v}{v_o}$: względny ubytek prędkości wiatru (deficyt),

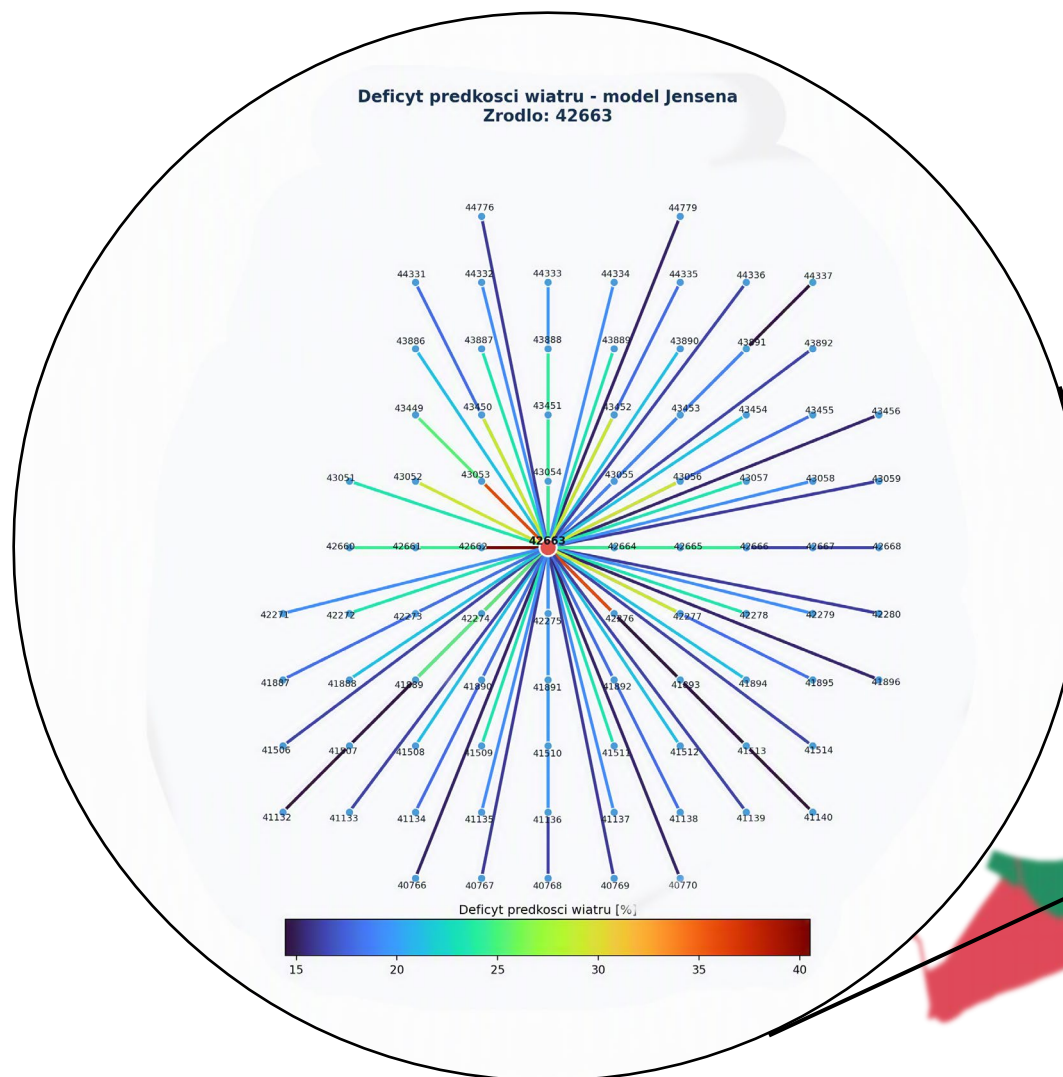
v_o : prędkość wiatru swobodnego

$C_t(u)$: współczynnik naporu

k : współczynnik rozpadu cienia

x : odległość wzdłuż osi wiatru

D : średnica wirnika



$$\text{Funkcja celu (LCOE)} = \frac{C_{WT} + C_F + C_K + C_{loss}}{E(S) \cdot L}$$

gdzie:

C_{WT} : koszt turbin,

C_F : koszt fundamentów,

C_K : koszt okablowania,

C_{loss} : koszt strat przesyłowe,

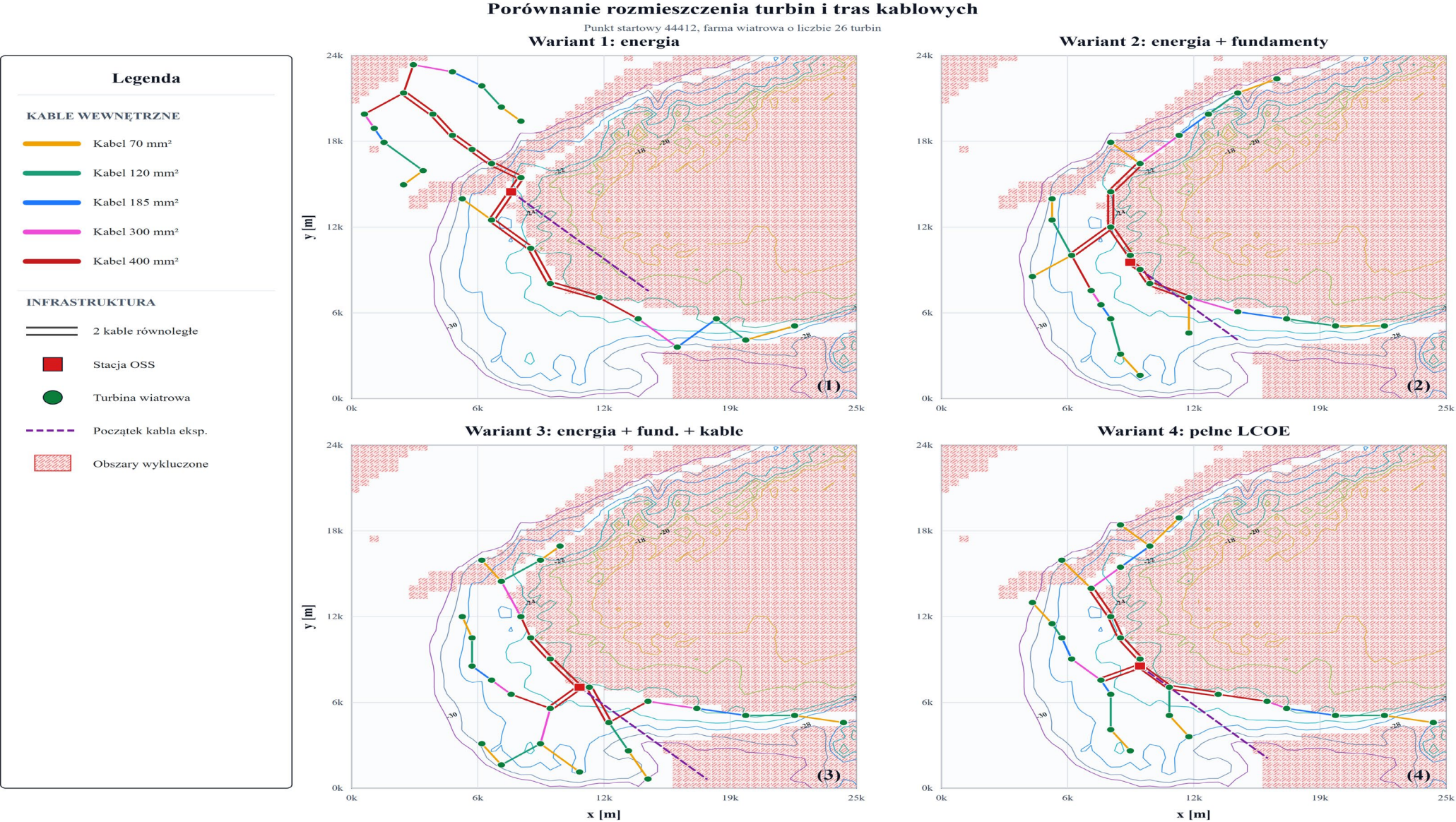
$E(S)$: roczna produkcja energii po
uwzględnieniu strat,

L : okres eksploatacji.

Warianty	Kryterium wyboru kolejnej turbiny
1	Energia
2	Energia + koszt fundamentów
3	Energia + koszt fundamentów + koszt okablowania
4	Pełna funkcja celu (LCOE)

Najlepszy wynik wymaga
równowagi między energią oraz
kosztami infrastruktury.

Wariant	Wartość funkcji celu $\frac{USD}{MWh}$	Energia $\frac{MWh}{rok}$	Koszt całkowity [mln USD]
Energia	27,85	1 561 170	1086,86
Energia + fundamenty	24,31	1 540 201	935,94
Energia + fundamenty + koszt okablowania	24,15	1531 158	924,45
Pełna funkcja celu	24,07	1 534 472	923,50



Rys. 3. Porównanie rozmieszczenia turbin i tras kablowych wszystkich wariantów

- Algorytmy grafowe pozwalają optymalizować planowanie przestrzenne morskich farm wiatrowych w Polsce,
- Najkorzystniejszy analizowany układ to 26 trubin,
- Najniższa funkcja celu w wybranym przypadku wyniosła 24,07 [USD/MWh],
- Najlepsze decyzje lokalizacyjne wymagają kompromisu energii, kosztów i ograniczeń przestrzennych.

Dziękuję!