



Forum
Innowacyjności

Energetyka wiatrowa

zmienność produkcji, prognozowanie, lokalny mikroklimat

B. Bochenek¹, M. Figurski¹, A. Jaczewski¹, J. Jurasz², G. Nykiel¹, M. Wdowikowski¹, A. Wyszogrodzki¹



Ministerstwo
Klimatu i Środowiska



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

Energetyka wiatrowa - zmienność produkcji, prognozowanie, lokalny mikroklimat

Znaczenie ekstremalnych warunków meteorologicznych dla systemu energetycznego.

Wykorzystanie numerycznych modeli pogody (NMP) do prognozowania produkcji energii z farm wiatrowych.

Uczenie maszynowe w prognozowaniu produkcji energii pozyskiwanej z energii wiatru.

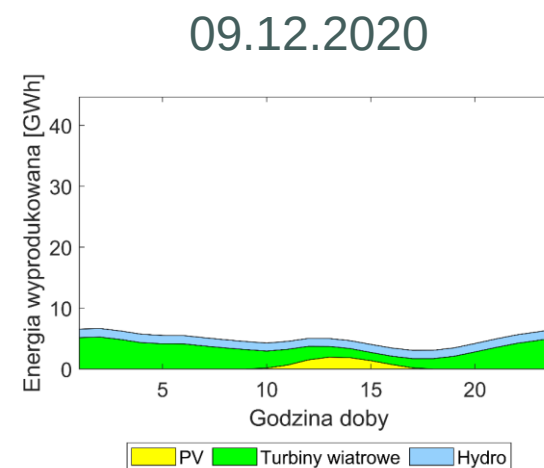
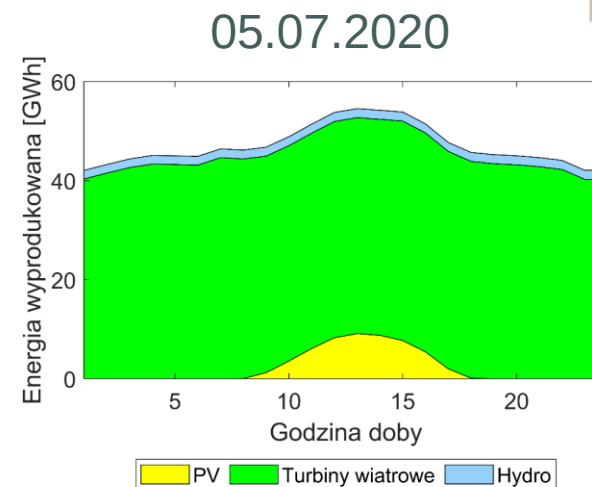
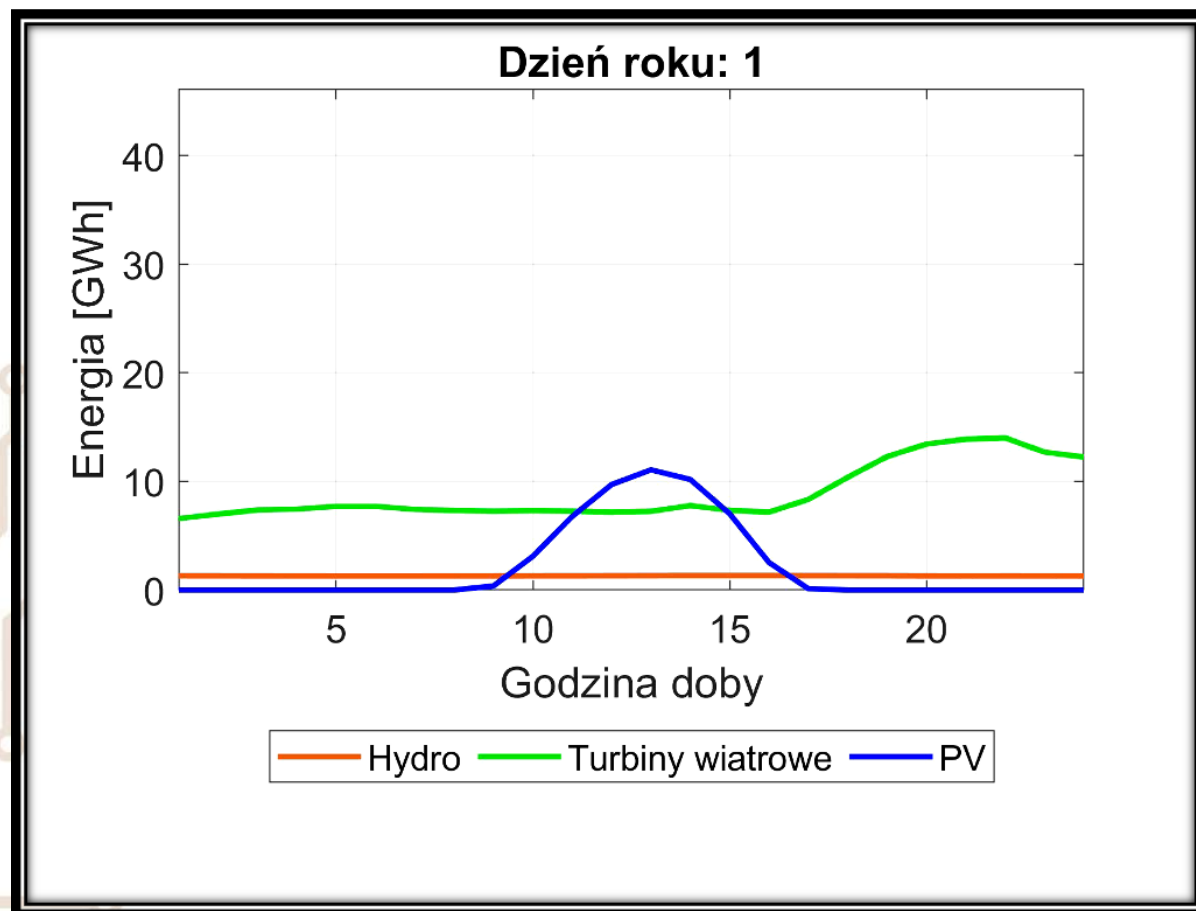
Przykład prognozowania produkcji energii wiatrowej w Polsce.

Dlaczego warto opracowywać modele i prognozy dla potrzeb energii wiatrowej?

Wpływ turbin wiatrowych na ruch powietrza w atmosferze.

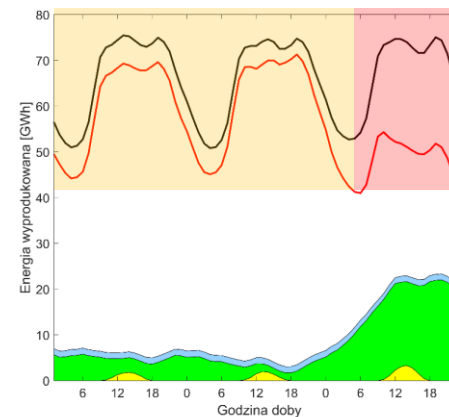
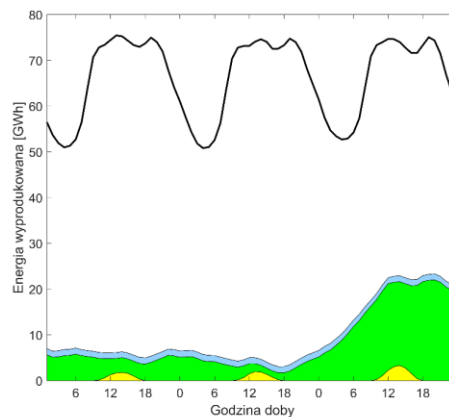
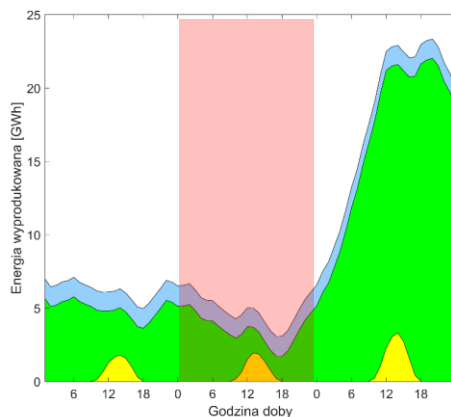


Sytuacje ekstremalne w systemie energetycznym



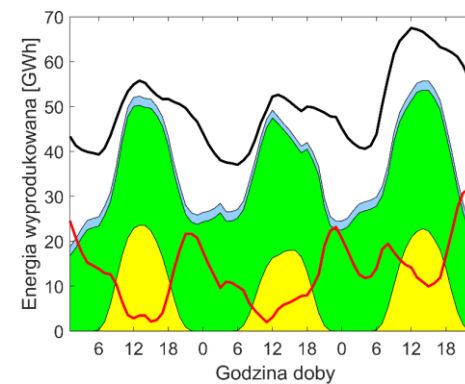
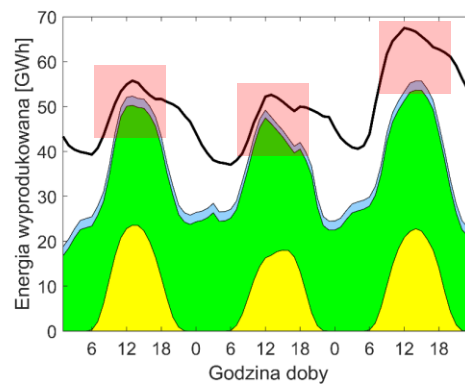
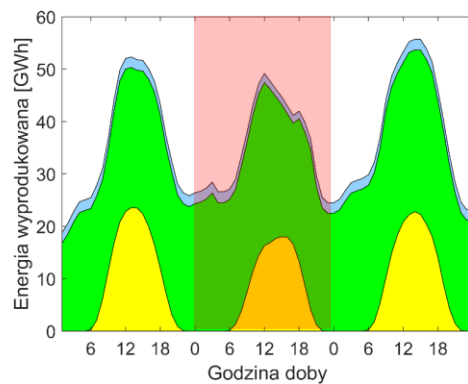
Sytuacje ekstremalne w systemie energetycznym

09.12.2020



Udział
OZE 15%

05.07.2020



Udział
OZE 73%



Ministerstwo
Klimatu i Środowiska



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

Prognozowanie produkcji i wpływ energii wiatrowej na środowisko

Pytania badawcze



Czy można prognozować z dużą dokładnością produkcję energii wiatrowej na następny dzień w skali całego kraju?

Czy numeryczne modele pogody (NMP) rozwiązują problem prognozowania produkcji energii z farm wiatrowych?

Czy zastosowanie metod uczenia maszynowego i wyników z NMP pozwalają na podniesienie dokładności prognozowania produkcji energii pozyskiwanej z energii wiatru.

Czy istnieją różnice w dokładności takich prognoz w ciągu roku i w ciągu doby?

Jaki jest wpływ farm wiatrowych na klimat i mikroklimat?



Ministerstwo
Klimatu i Środowiska



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

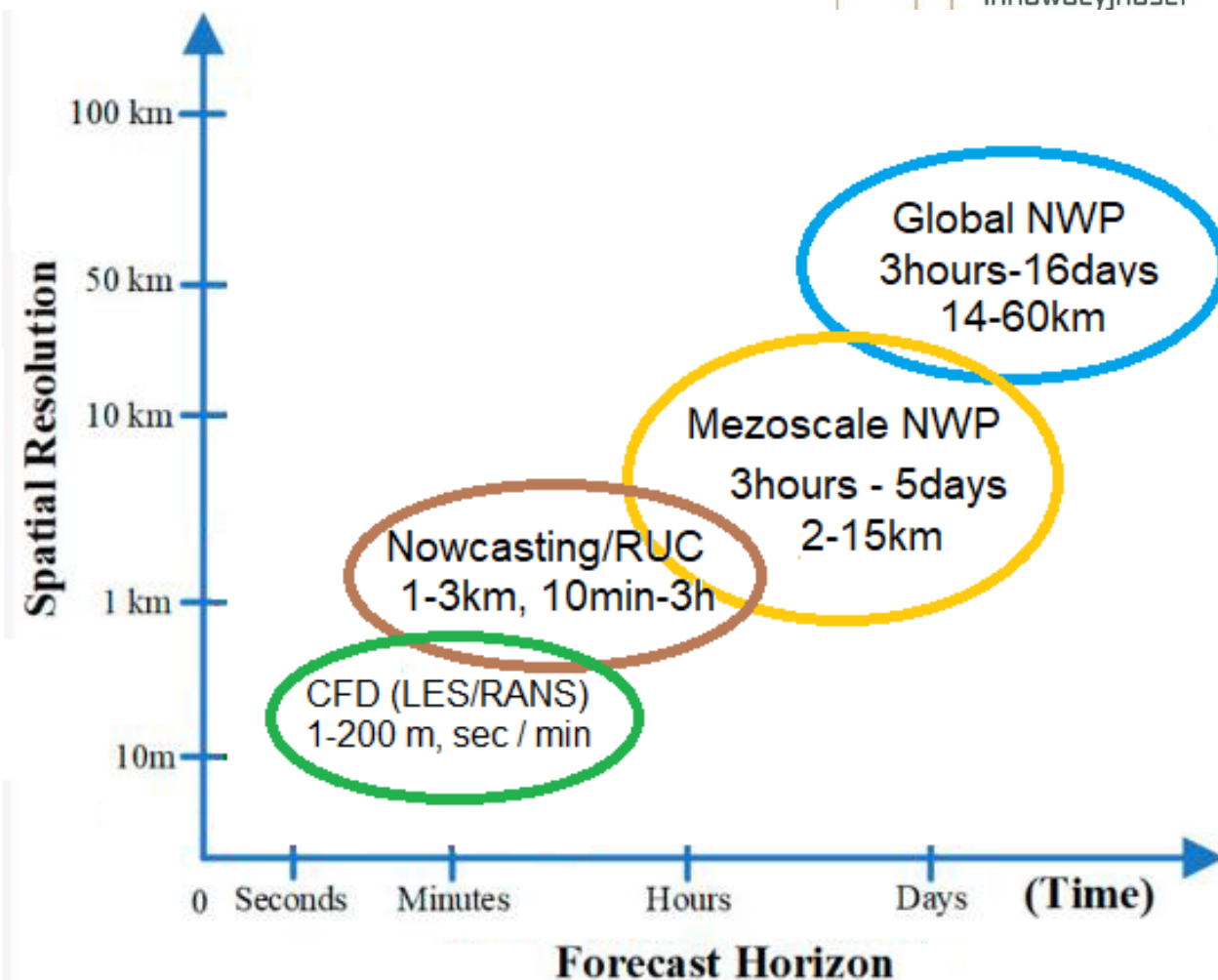
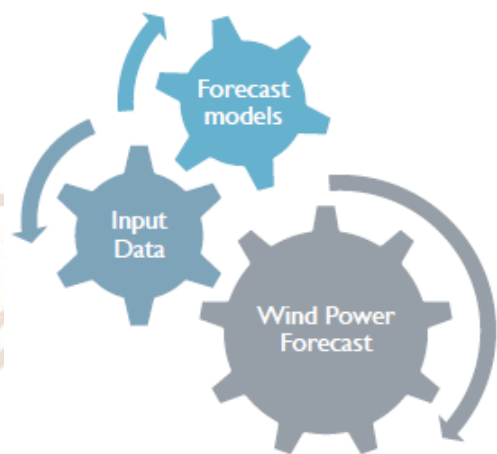
Zastosowanie modeli numerycznych

Modele fizyczne

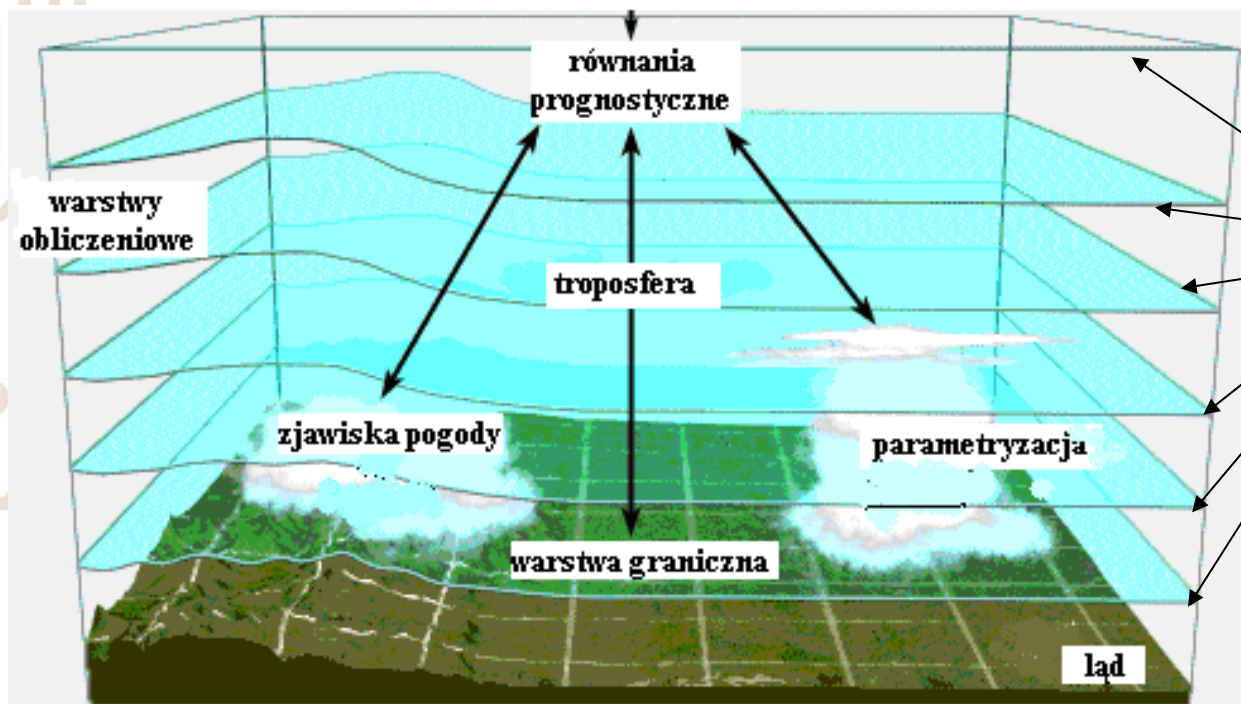
- ❑ Modele Prognozy Pogody (NWP)
- ❑ Modele hydrodynamiczne (CFD - LES/RANS)

Modele statystyczne

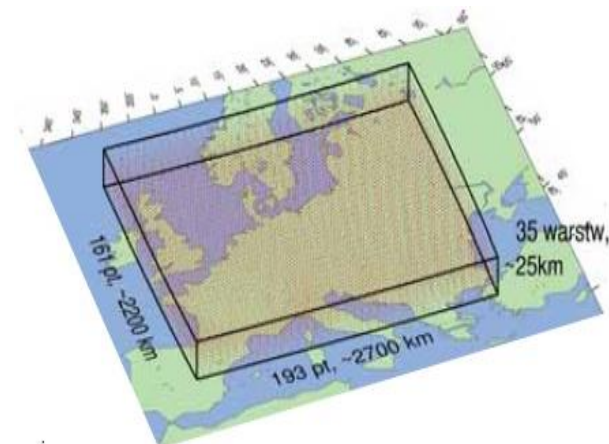
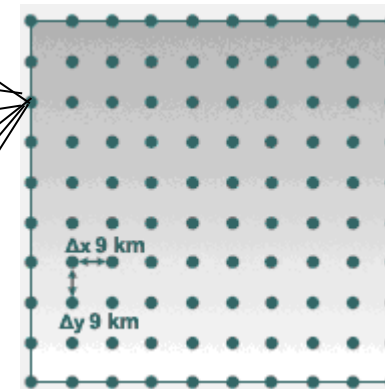
- ❑ Metody uczenia maszynowego
(Artificial Neural Networks)



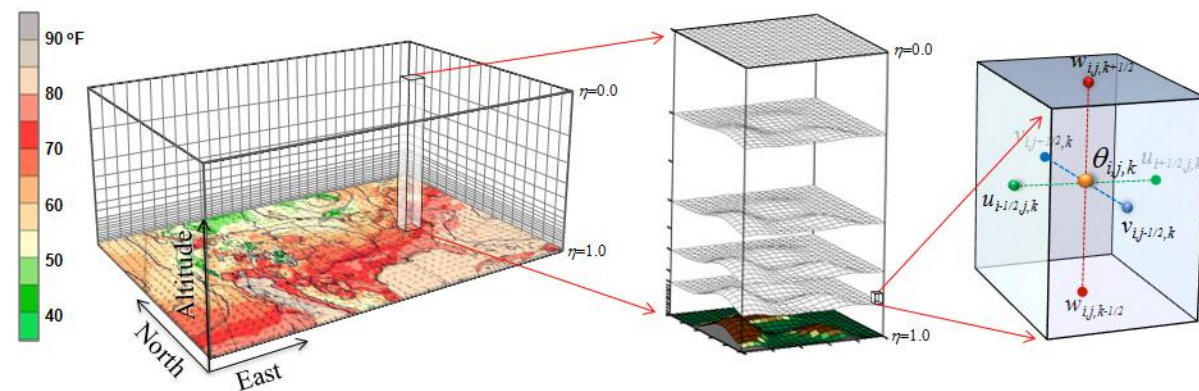
Numeryczne modele pogody - parametryzacja



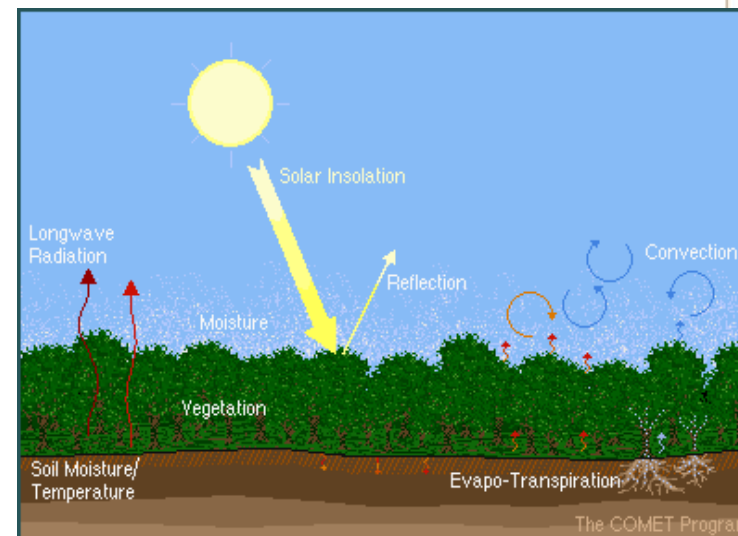
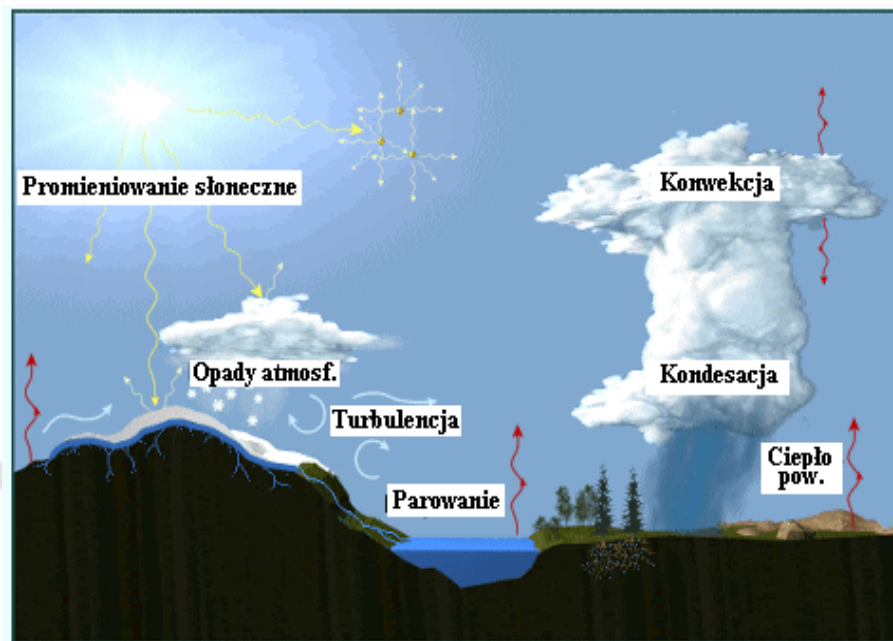
Siatka obliczeniowa



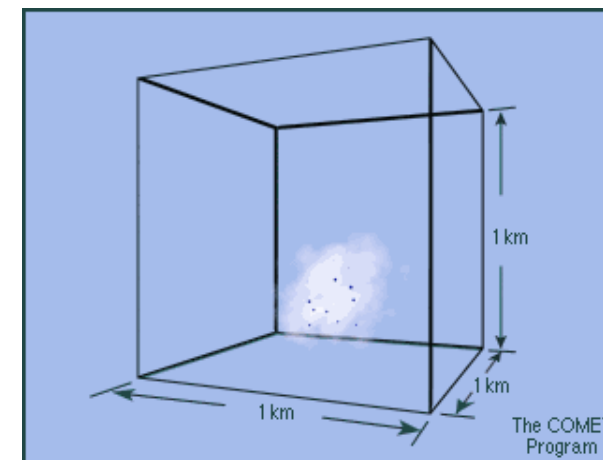
Obszar modelu globalnego lub mezoskalowego podzielony jest na warstwy obejmujące zwykle stratosferę, troposferę, oraz warstwę graniczną atmosfery. Stan atmosfery opisany jest parametrami określonymi w węzłach dyskretnej, przestrzennej siatki obliczeniowej



Numeryczne modele pogody - parametryzacja



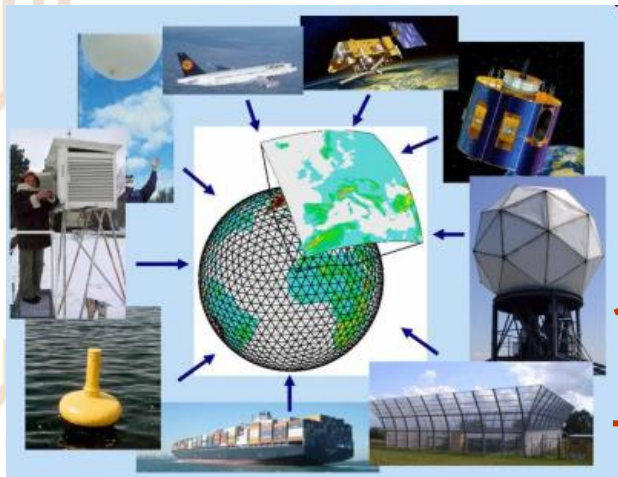
Przykład zjawiska kondensacji pary wodnej - wynik zderzeń kropli wody i wydzielania utajonego ciepła parowania. Kondensacja zachodzi w małym podobszarze np. 1km kostki - siatki modelu mezoskalowego.



Potencjał prognostyczny IMGW-PIB



Global Model ICON
icosahedral-hexagonal grid



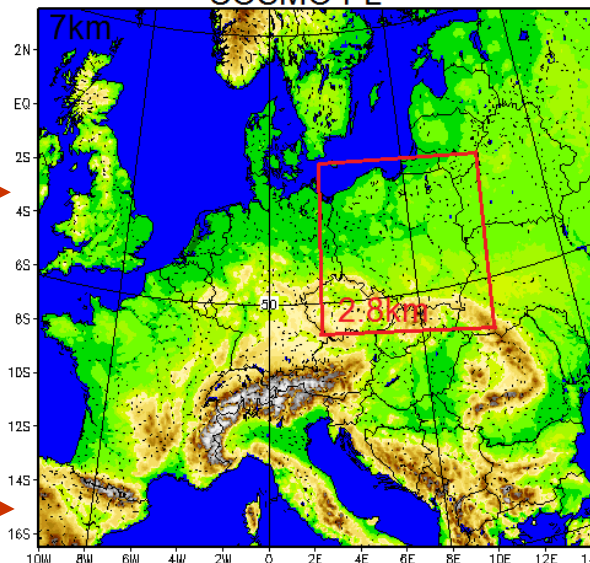
ICON
forecast

boundary and
initial conditions

COSMO Data
Assimilation

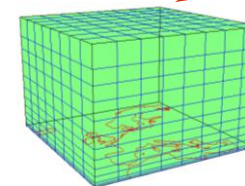


COSMO PL

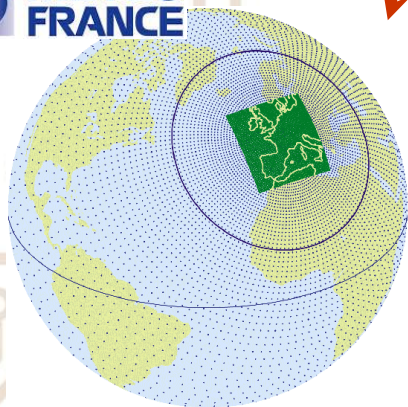


Forum
Innowacyjności

forecast



products
verification
statistical
postprocessing

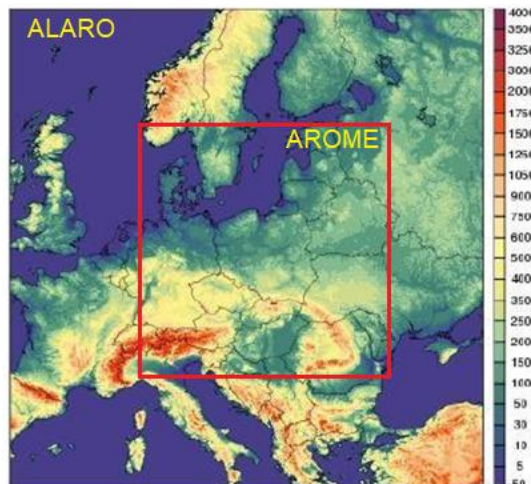


Model Globalny
ARPEGE/IFS



ARPEGE
forecast

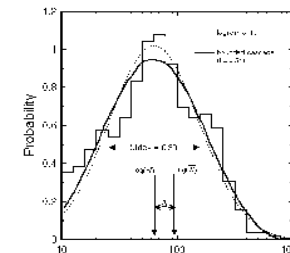
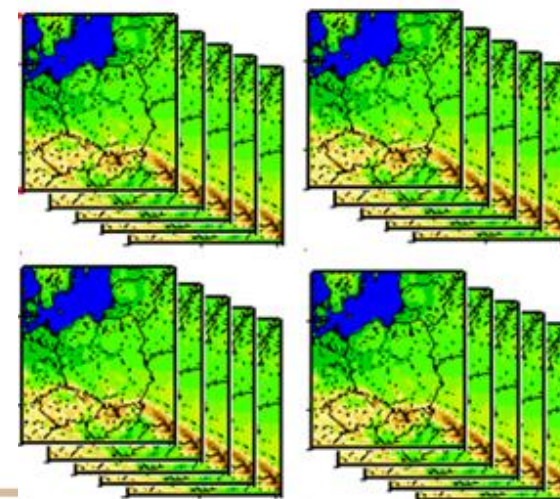
boundary
and initial
conditions



Ministerstwo
Klimatu i Środowiska



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

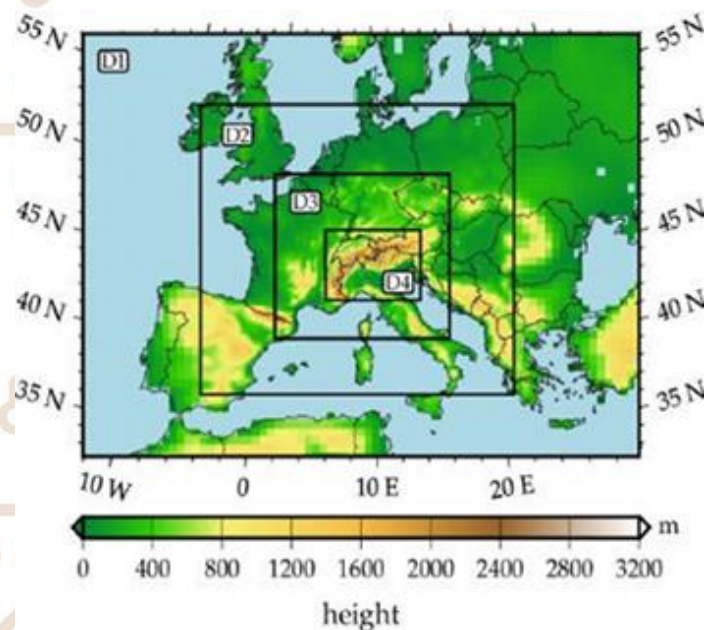


TIME LAGGED EPS
20 members
COSMO 2.8 km

Dedykowane prognozy z wykorzystaniem modelu WRF

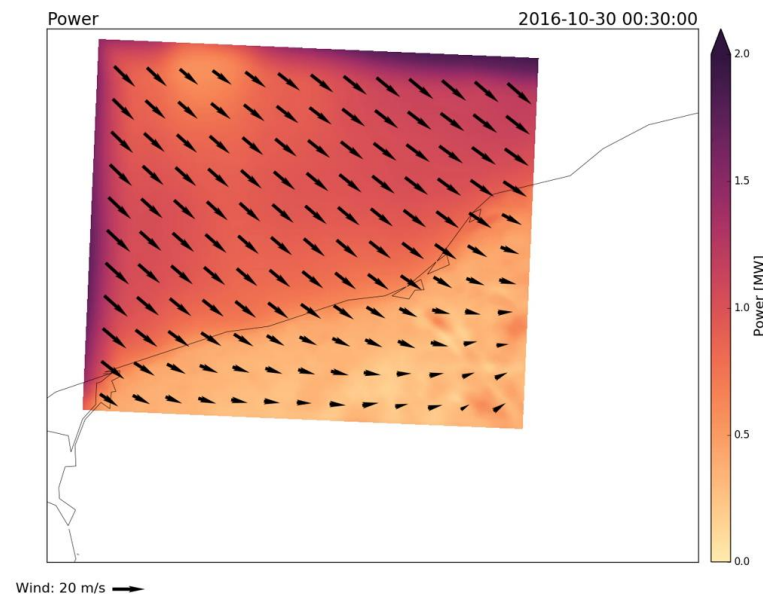
WRF ARW (Advanced Research) model
badawczo-prognostyczny z wieloma
rdzeniami dynamicznymi **Instytucje**
oficjalnie rozwijające model i
dostarczające wsparcia użytkownikom:

NCAR, NOAA/ESRL and NOAA/NCEP/EMC.



Zagnieżdżanie
wielokrotne siatek na
ograniczonym obszarze
(nesting)

WRF Wind Farm - parametryzacje
farm wiatrowych (WFP) obejmują
efekty oporu farm wiatrowych



Ministerstwo
Klimatu i Środowiska



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

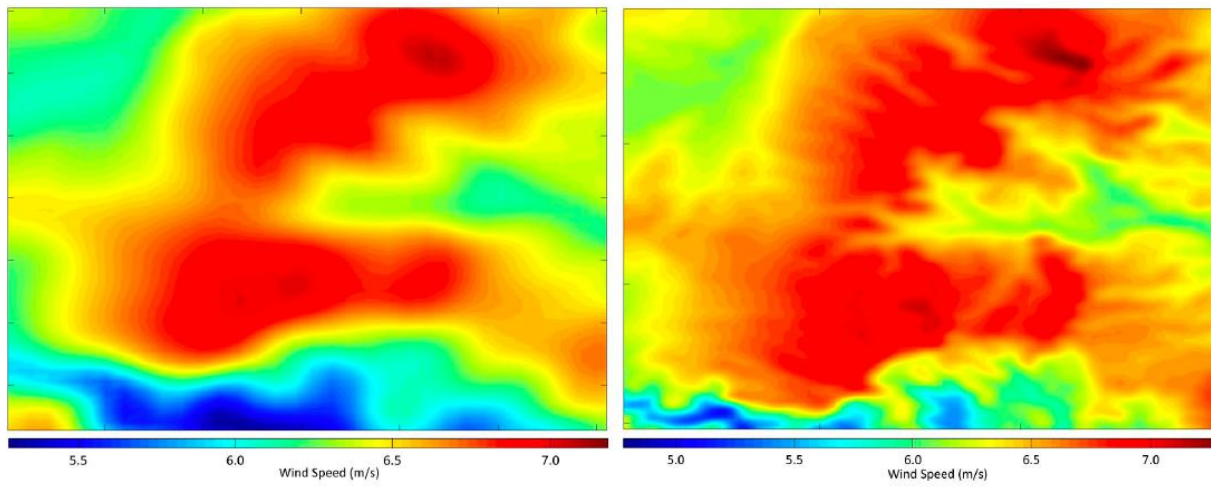
Numeryczne modele pogody w kontekście prognoz wiatrowych

Modelowanie z wykorzystaniem modeli mezoskalowych wymaga wykorzystania dużych mocy obliczeniowych należy rozważyć kilka praktycznych pytań.

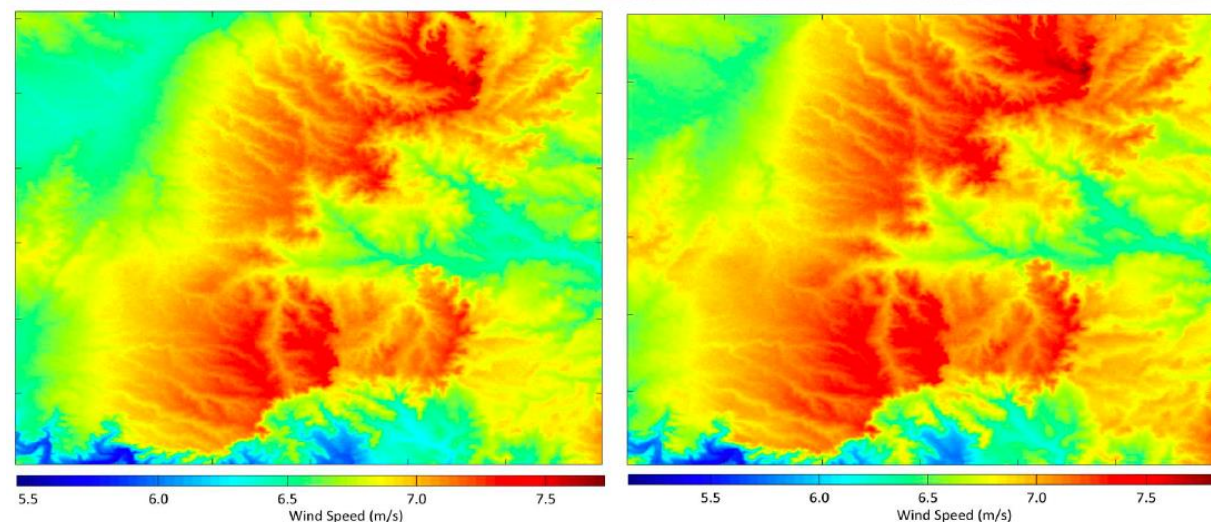
- Jaka jest najtańsza obliczeniowo konfiguracja i parametryzacja, aby zminimalizować niepewność modelu?
- Czy konfiguracja i parametryzacja zmienia się z typem terenu?
- Czy konfiguracja i parametryzacja zmienia się wraz z typem użytkowania terenu?



Model WRF rozdzielczość pozioma – teren nizinny



bez downscalingu



Simple terrain, 600-m NWP

Simple terrain, 200-m NWP

downscaling



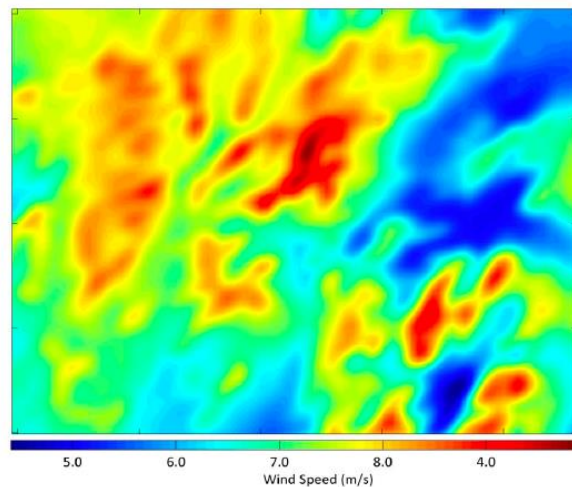
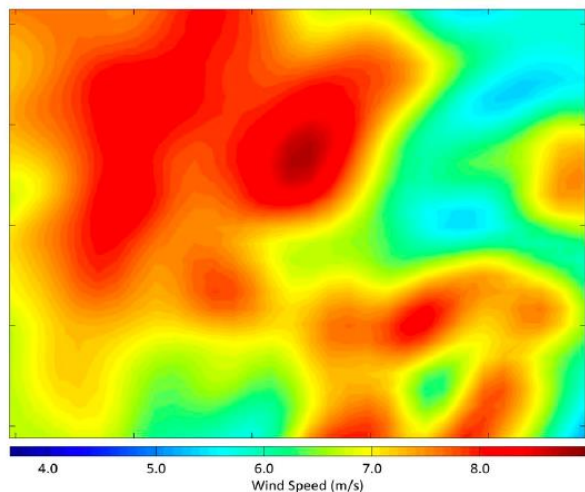
Ministerstwo
Klimatu i Środowiska



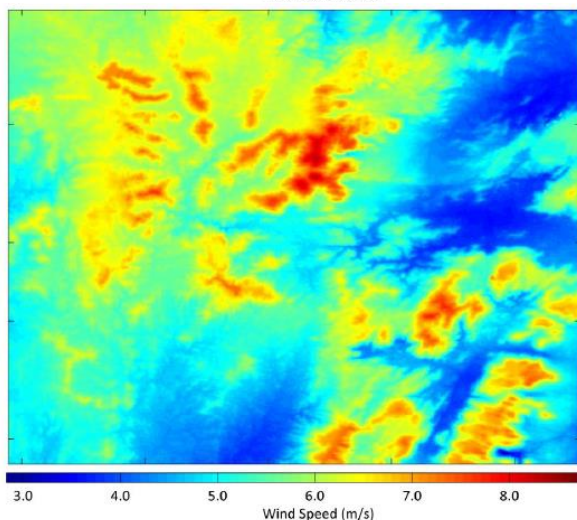
Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

Model WRF rozdzielczość pozioma - teren wyżynny

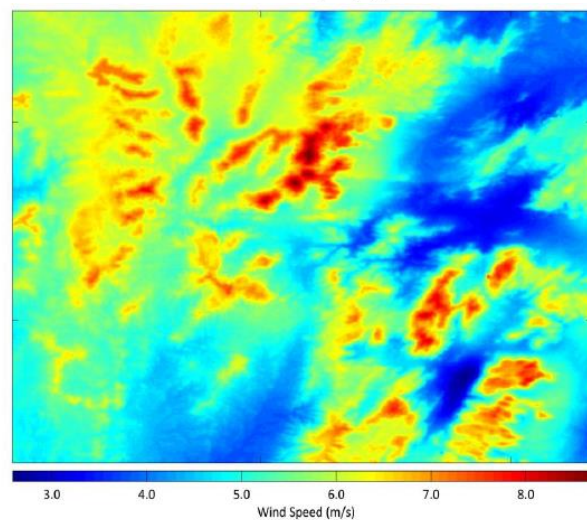
bez downscalingu



downscaling



Complex terrain, 900-m NWP



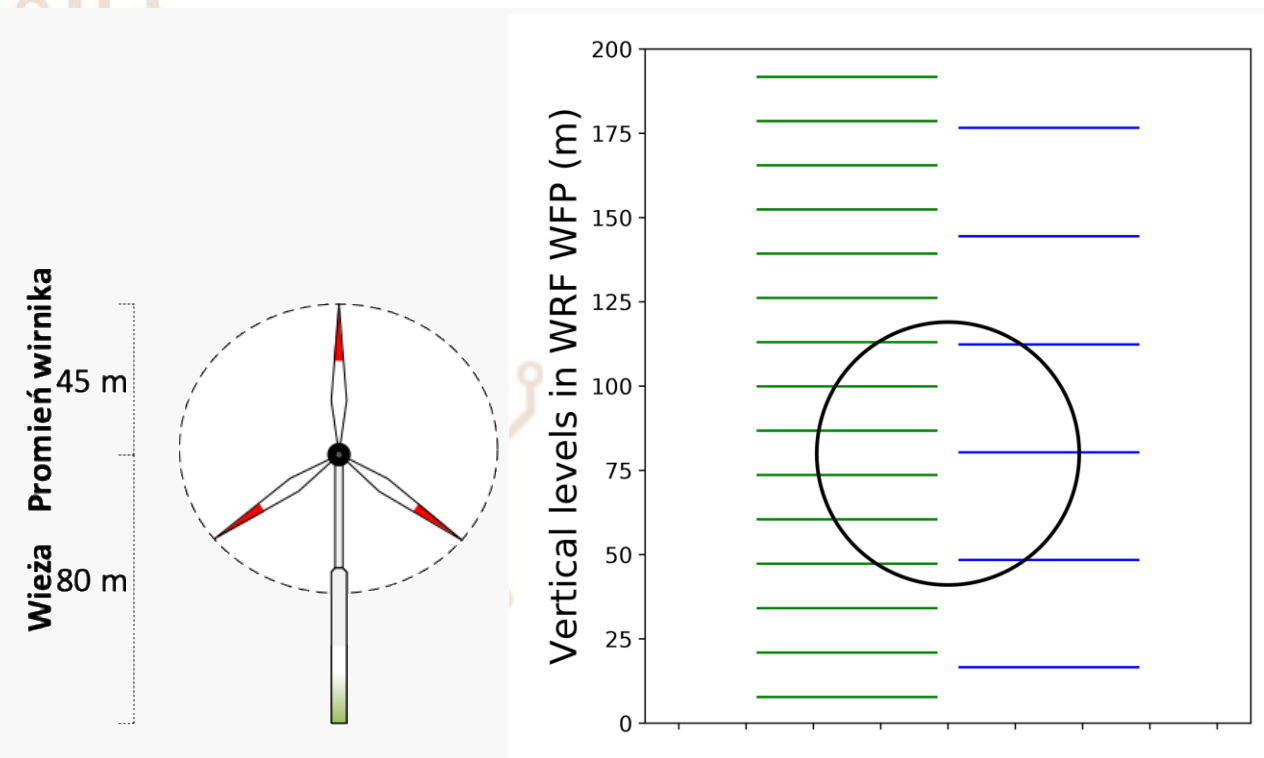
Complex terrain, 300-m NWP

Rozdzielczość pozioma wpływa na deficyt prędkości wiatru, jak i na ocieplenie powierzchni:

- zbyt gruba siatka (>9 km) osłabia intensywność tzw. efektu kilwateru (efekt aerodynamiczny) na większych obszarach
- siatki o rozpiętości 0.5 km do 3 km są spójne na obszarach o podobnych sobie wielkościach i dają podobny efekt przestrzenny skutków kilwateru. Tym samym jest to zalecany przez nas wybór rozmiaru poziomej siatki.



Model WRF rozdzielczość pionowa



Włączenie opcji turbulencji generowanych przez turbinę ma:

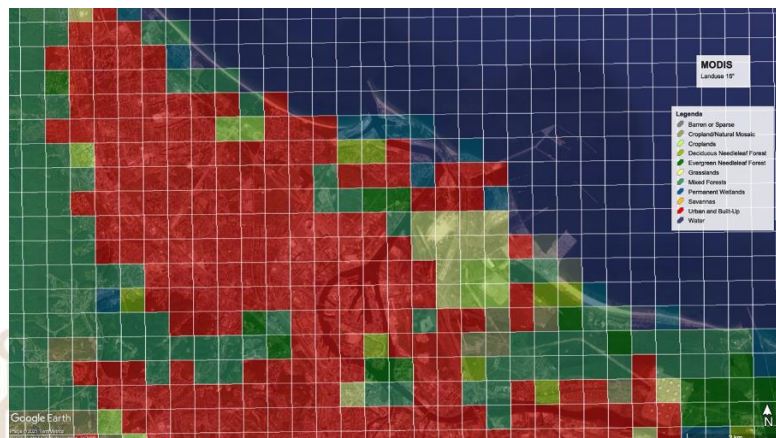
- niewielki wpływ na rozwiązanie problemu deficytu prędkości wiatru,
- wyłączenie skutkuje niedokładnym sygnałem chłodzenia pod farmą wiatrową.

Zgrubna (50-30 m) rozdzielczość pionowa ma minimalny wpływ na przedstawienie deficytu wiatru w górze, ale drastycznie wpływa na sygnał temperatury powierzchni.

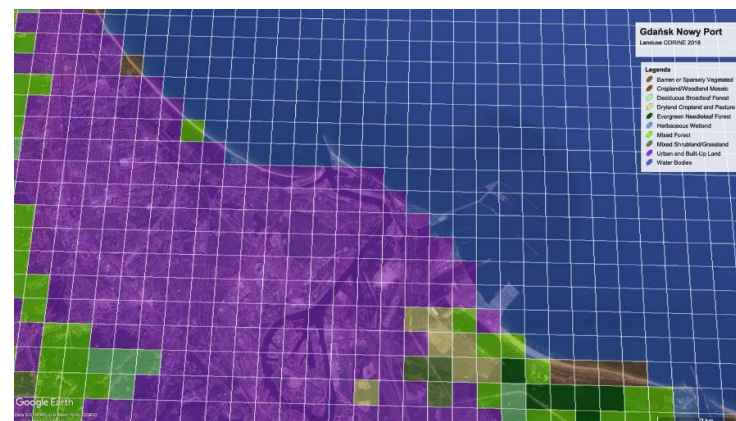
Symulacje WRF WF wymagają rozdzielczości pionowej **~10 m** do wysokości kilkuset metrów oraz włączenie opcji turbulencji turbiny, aby umożliwić wytworzenie uskoku wiatru niezbędnego do pionowego mieszania powietrza inwersji i uzyskania oczekiwanego ocieplenia i wysuszenia powierzchni.

NMP i NMT w NMP

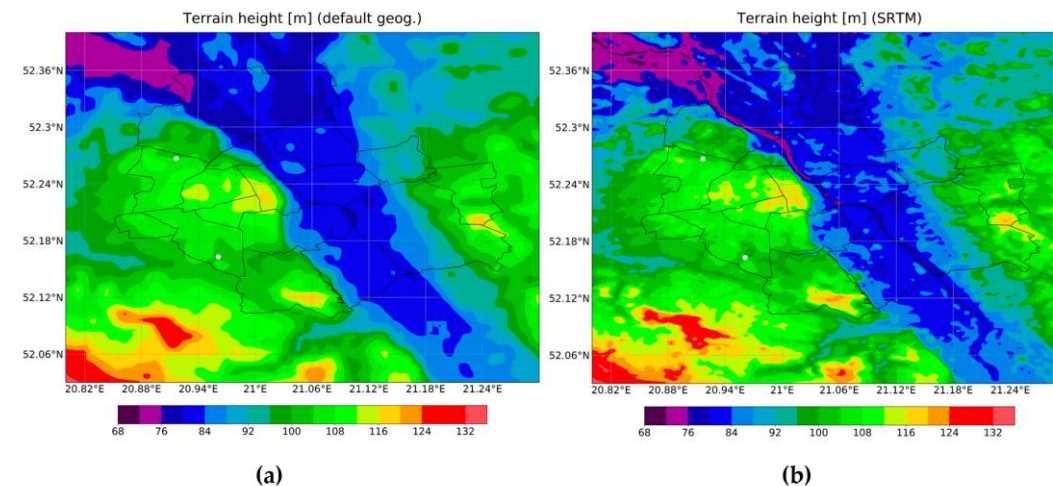
MODIS 15"



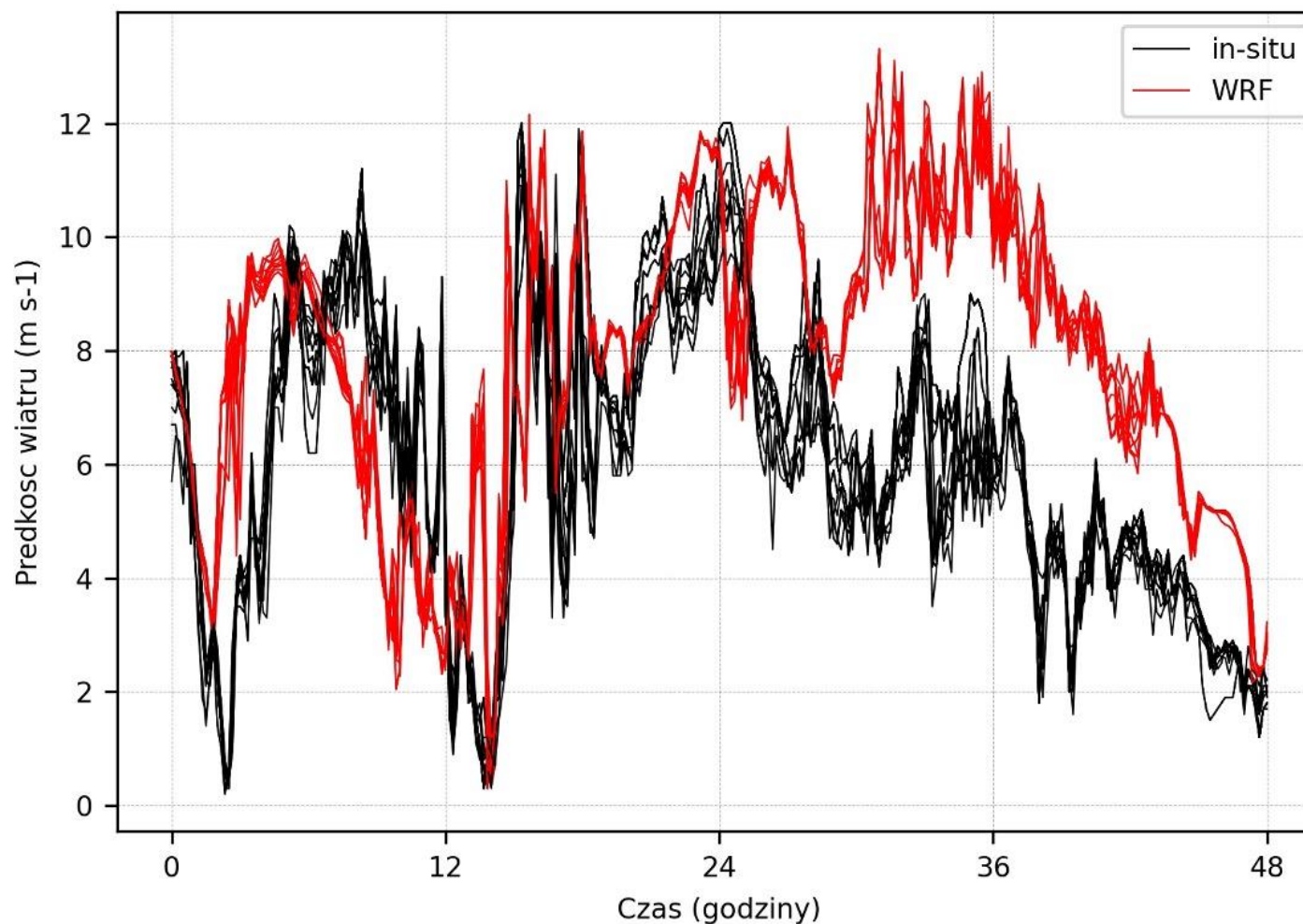
Corine 2018 100m



- Modelowanie mezoskalowe o wysokiej rozdzielczości wykazuje lepszą dokładność wraz ze wzrostem rozdzielczości i mniejszą dokładność wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni.
- Model jest dokładniejszy na użytkach zielonych/krzewach (MAD 0.16m/s) niż na obszarach zalesionych (MAD 0.2m/s).



Prognozowanie produkcji energii z farmy wiatrowej. Model WRF



Prognozowanie produkcji energii z farmy wiatrowej. Krzywa mocy vs uczenie maszynowe.

Dane 10 min produkcji energii z turbin wiatrowych oraz pomiary prędkości wiatru za turbiną - okres V-VI 2020.

Prognozy modelu ALARO o rozdzielczości przestrzennej 4 km i 87 poziomach wertykalnych modelu. Pola m.in.: wiatru, temperatury, ciśnienia, wilgotności powietrza na poziomach od powierzchni do 180 m nad gruntem [RMSE prognoz wiatru na wysokości turbiny 1.84 m/s].

Porównanie prognoz produkcji energii (wyniki dla jednej z turbin) przy pomocy metody uczenia maszynowego w stosunku do prognoz opartych tylko o krzywą mocy turbiny z pomiarów prędkości wiatru na turbinie i prognozie wiatru modelu ALARO:

	r	MAPE	BIAS	RMSE
Krzywa mocy (pomiar wiatru)	0.99	0.24	69	135
Random Forest (prognoza)	0.95	0.25	-12	216
Krzywa mocy (prognoza)	0.77	1.54	137	478



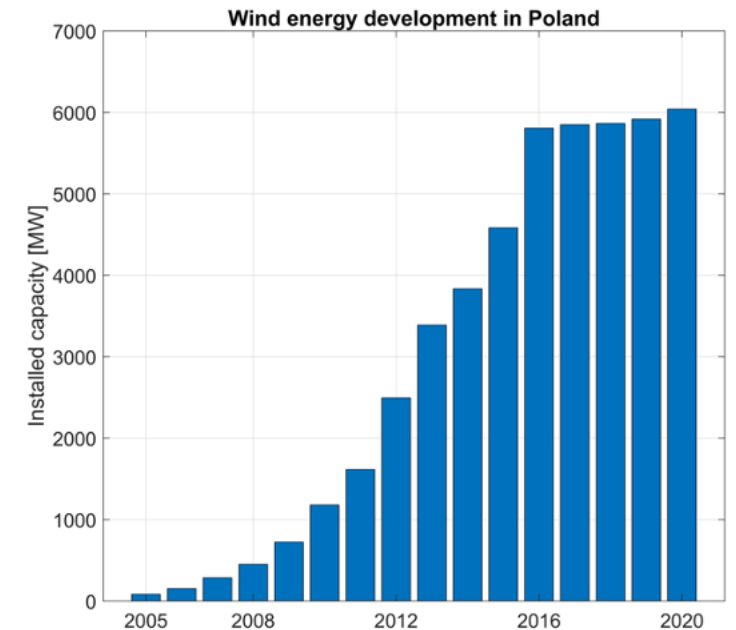
Prognozowanie produkcji energii wiatrowej w Polsce. Dane i metody.

Wykorzystanie potencjału numerycznych modeli pogody o wysokiej rozdzielczości oraz metod sztucznej inteligencji.

Od 2015 roku podobny poziom zainstalowanej mocy energii wiatrowej w Polsce (rysunek po prawej).

Dane PSE z godzinową produkcją energii wiatrowej w skali całej Polski wraz z prognozami modelu ALARO o rozdzielczości 4 km

Powyższe dane dały bazę do analiz możliwości prognoz z wykorzystaniem uczenia maszynowego.



Bochenek, B.; Jurasz, J.; Jaczewski, A.; Stachura, G.; Sekuła, P.; Strzyżewski, T.; Wdowikowski, M.; Figurski, M. **Day-Ahead Wind Power Forecasting in Poland Based on Numerical Weather Prediction**. *Energies* **2021**, *14*, 2164. <https://doi.org/10.3390/en14082164>

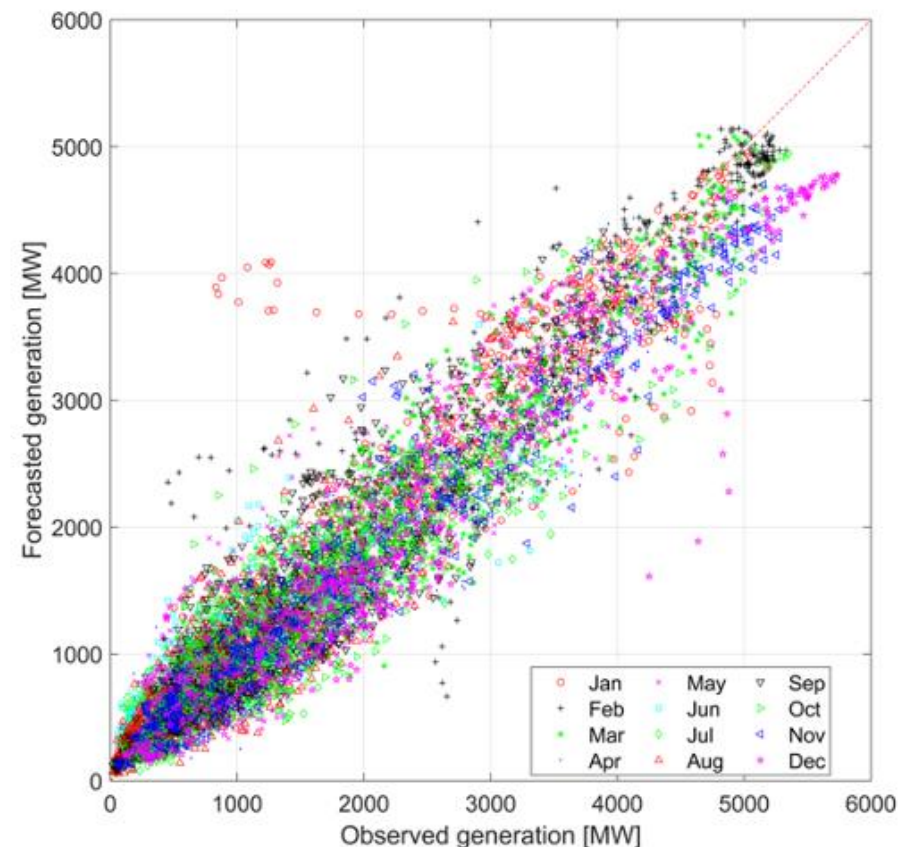


Prognozowanie produkcji energii wiatrowej, wyniki:

Wykorzystane metody sztucznej inteligencji prognozują produkcję energii wiatrowej z MAPE 26.7% dla danych godzinowych i 13.6% dla sum dobowych.

Produkcja energii jest najbardziej przeszacowana w styczniu i lutym, a w grudniu była najbardziej niedoszacowana.

Najmniejsze względne różnice pomiędzy prognozą i rzeczywistymi wartościami była obserwowana w miesiącach letnich.

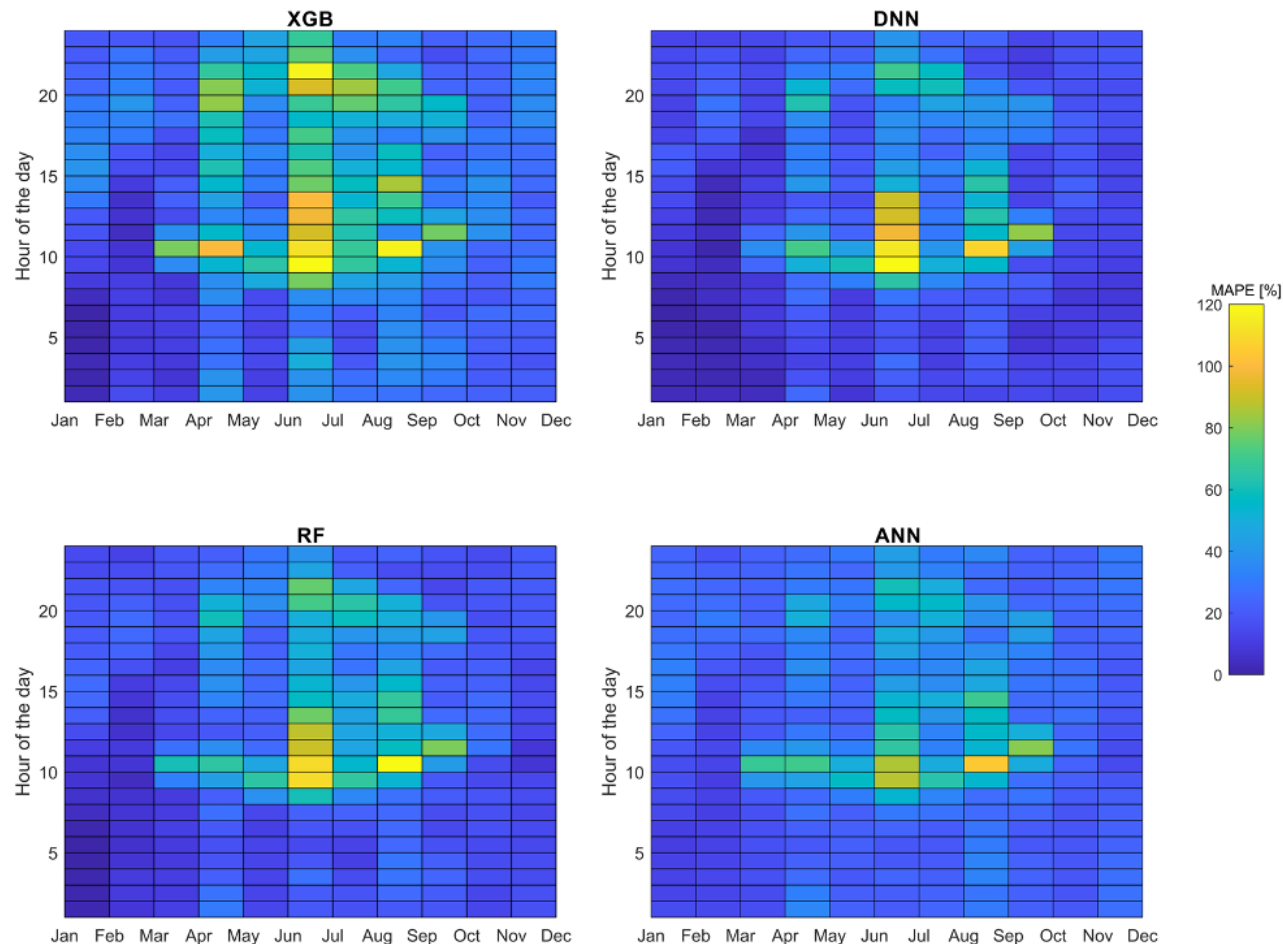


Prognozowanie produkcji energii wiatrowej, wyniki

Najwyższy błąd MAPE (żółty kolor na wykresach po prawej) zanotowano w czerwcu a najniższy w styczniu i lutym.

Najniższy błąd MAPE (kolor niebieski) dla wszystkich metod w godzinach pomiędzy 0 a 8 UTC.

Metoda ANN charakteryzowała się najniższą zmiennością błędu MAPE w skali roku i doby.

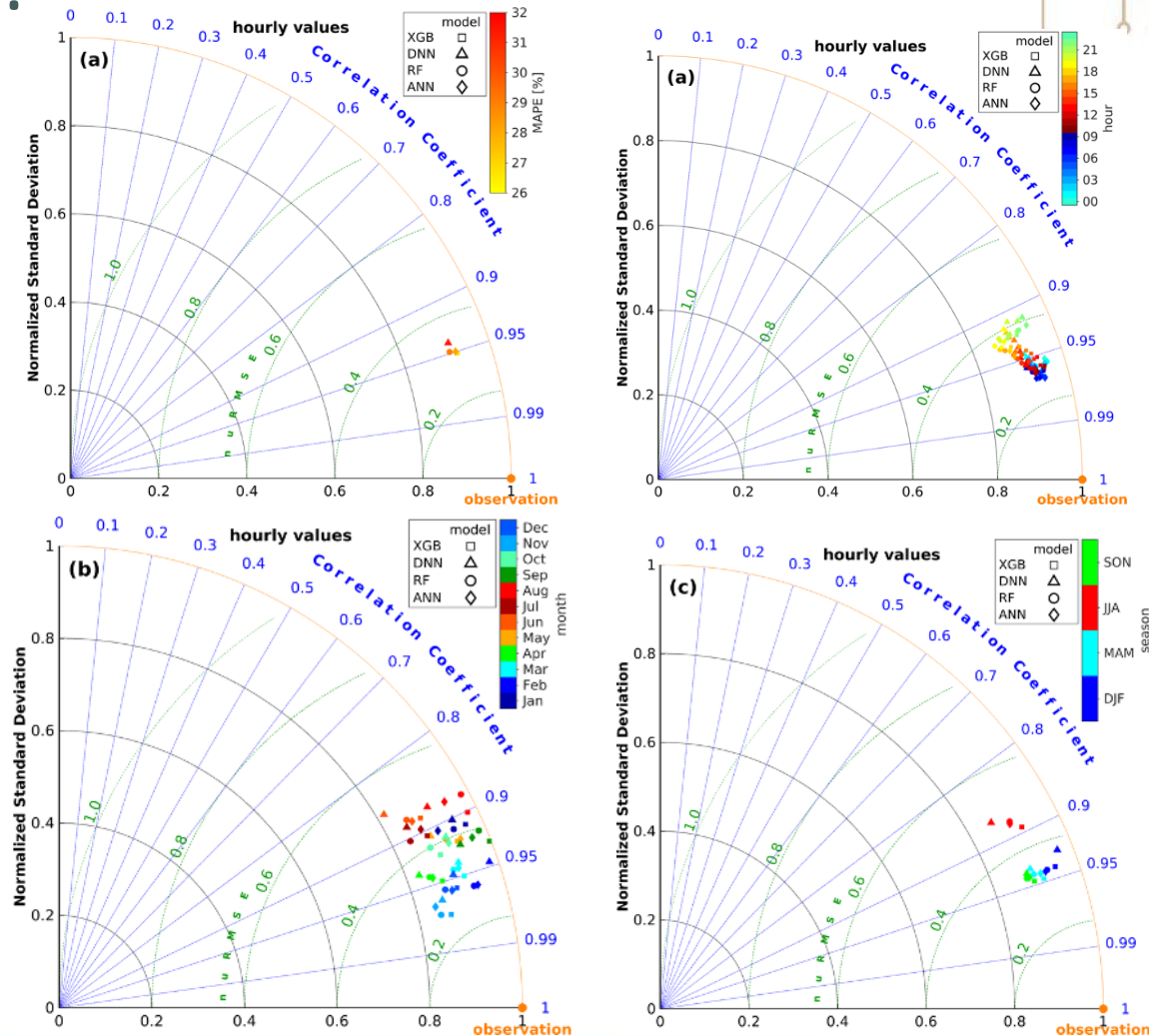


Prognozowanie produkcji energii wiatrowej, wyniki godzinowe:

W skali roku wszystkie metody prognozują z porównywalną dokładnością (lewy górny róg).

Najwyższa korelacja prognoz z rzeczywistością dla godzin porannych (kolor niebieski, prawy górny róg).

Najwyższa korelacja w miesiącach zimowych, a najniższa w letnich (dolny wiersz).

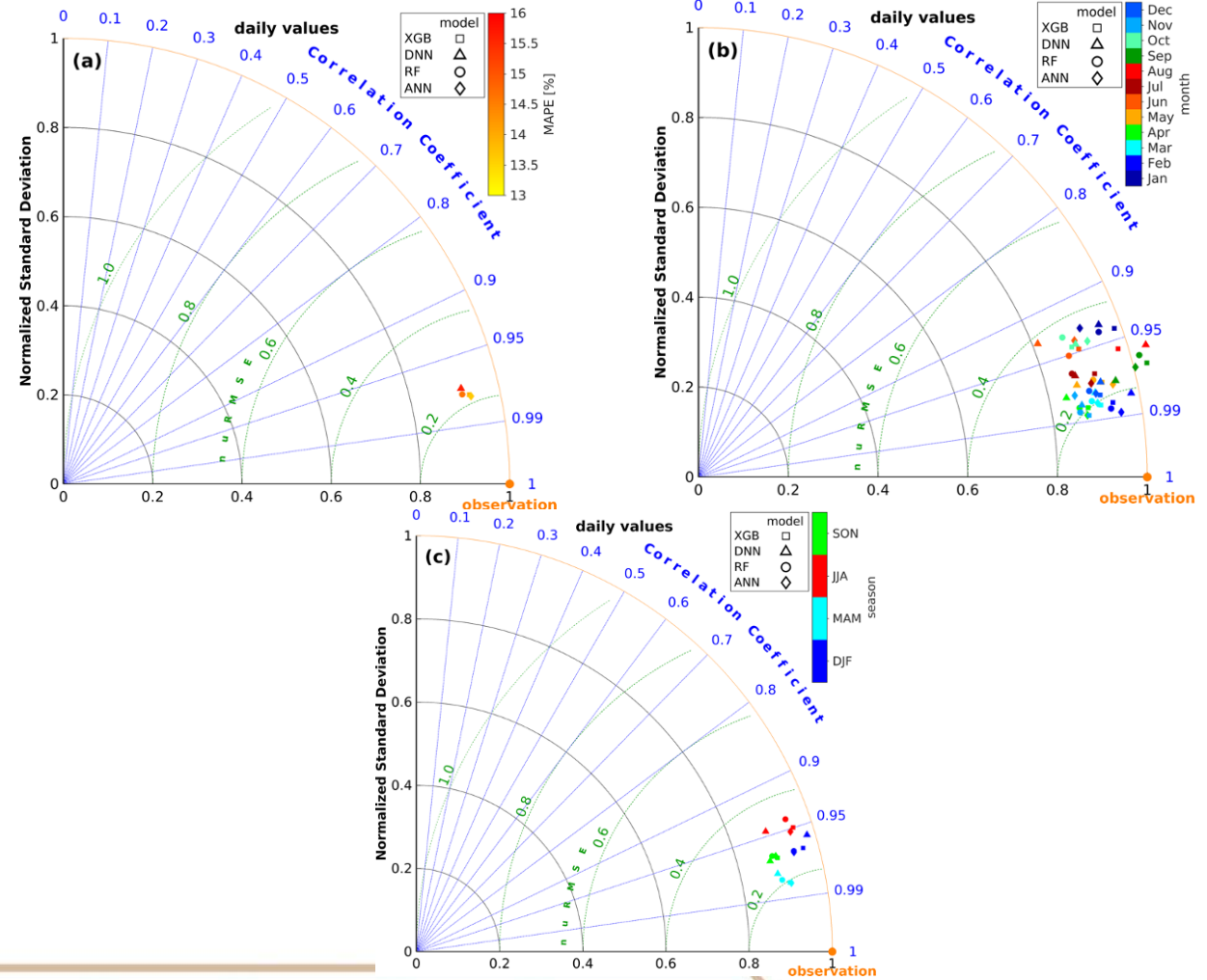


Prognozowanie produkcji energii wiatrowej, wyniki dobowe:

Podobnie jak w przypadku danych godzinowych, w skali roku wszystkie metody prognozują z porównywalną dokładnością (lewy górny róg).

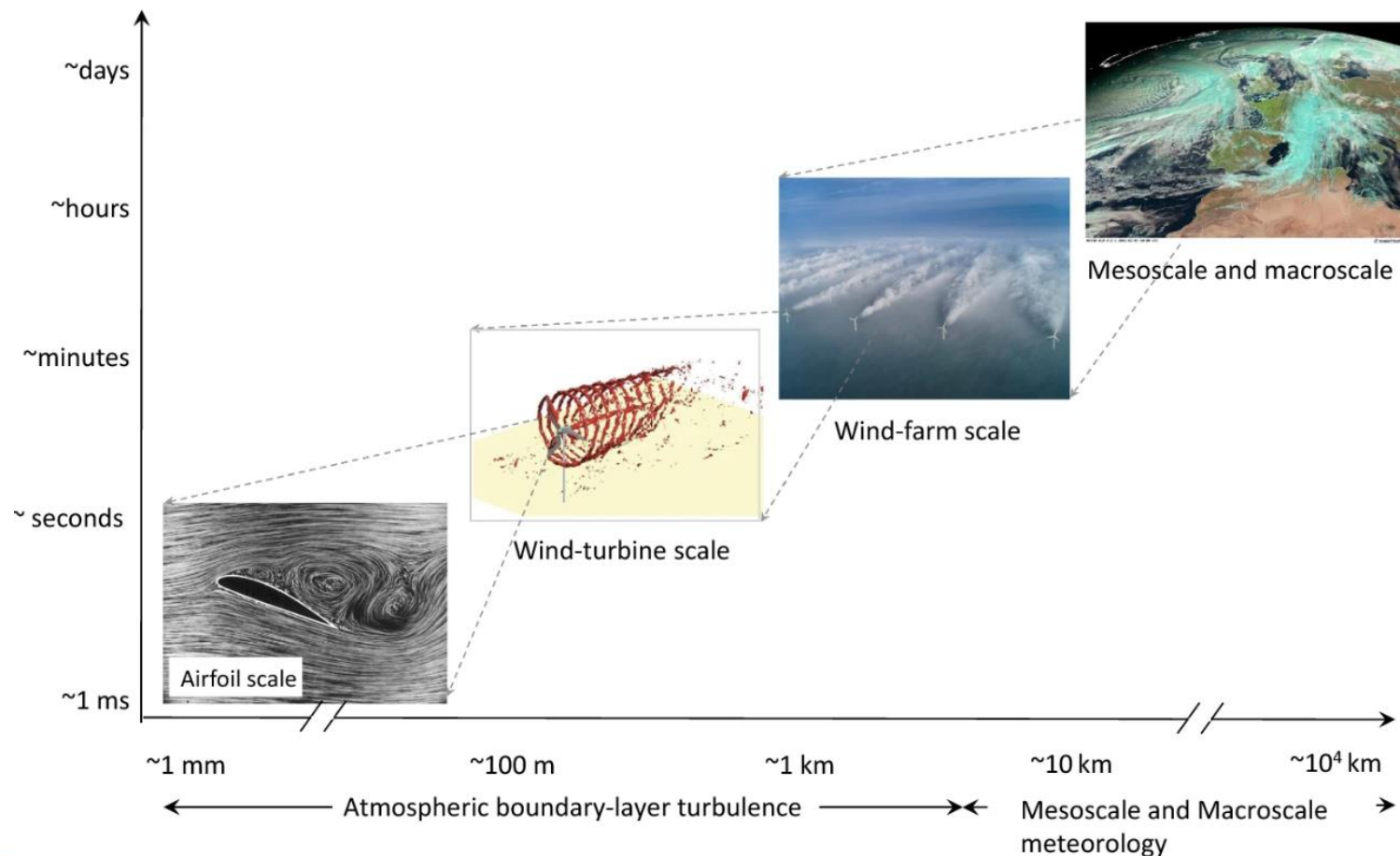
W lutym korelacja prognoz z rzeczywistością była najwyższa (prawy górny róg).

Najniższa korelacja w miesiącach letnich (dolny rysunek).



Turbiny wiatrowe a atmosfera

Wpływ turbin na ruch powietrza
w atmosferze zachodzi w
szerokim zakresie skal
przestrzennych i czasowych.



Mikroklimat w skali farmy wiatrowej

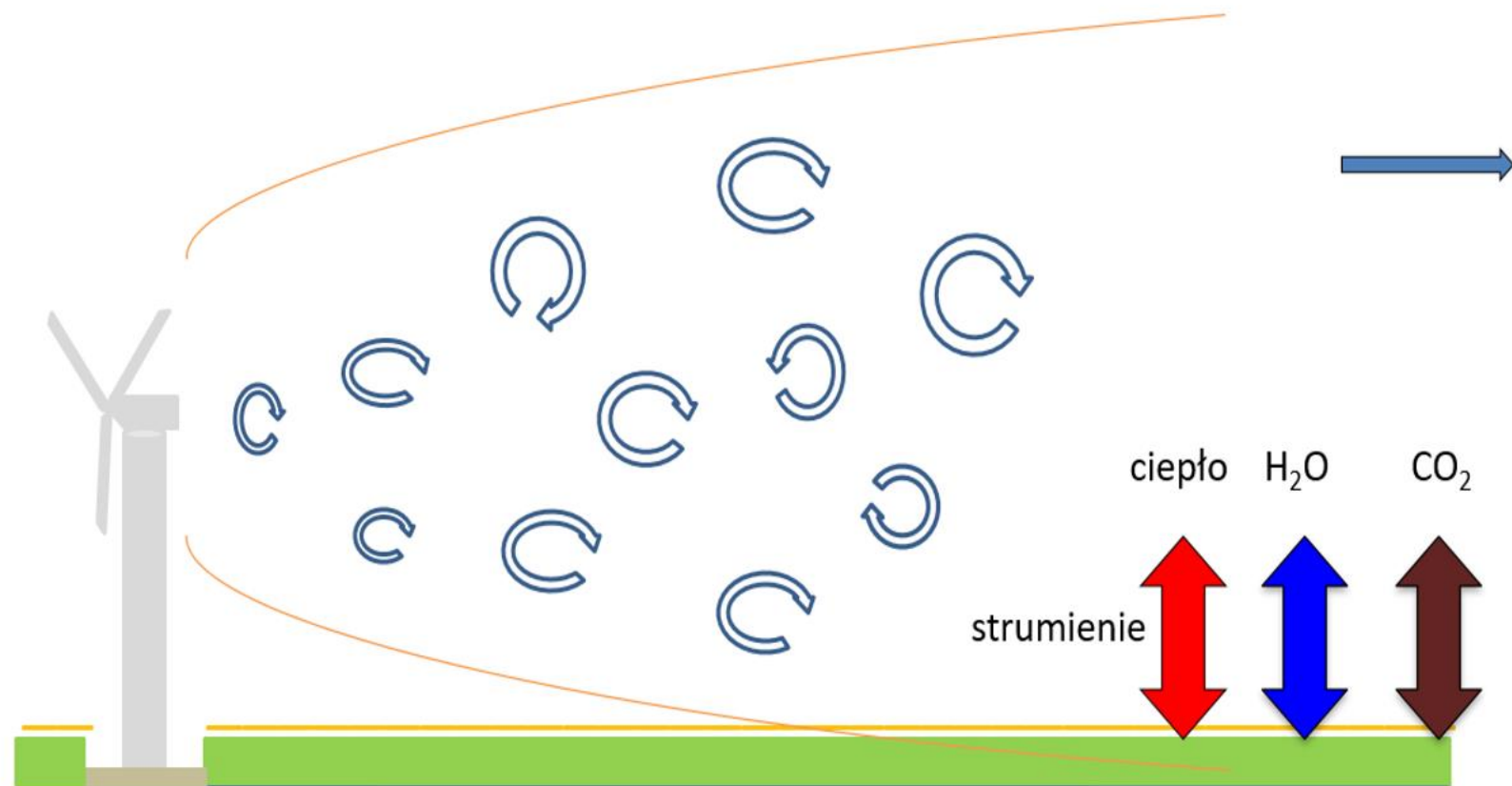
Farmy wiatrowe zwiększają szorstkość podłoża i intensyfikują turbulencyjne mieszanie.



Mikroklimat w skali farmy wiatrowej

W obecności turbin wiatrowych obserwujemy wzrost koncentracji CO_2 , co jest korzystne dla rozwoju roślin.

Z drugiej strony wzrost temperatury i parowania nocą, co może być niekorzystne (utrata wody) lub korzystne (ochrona przed przymrozkami).



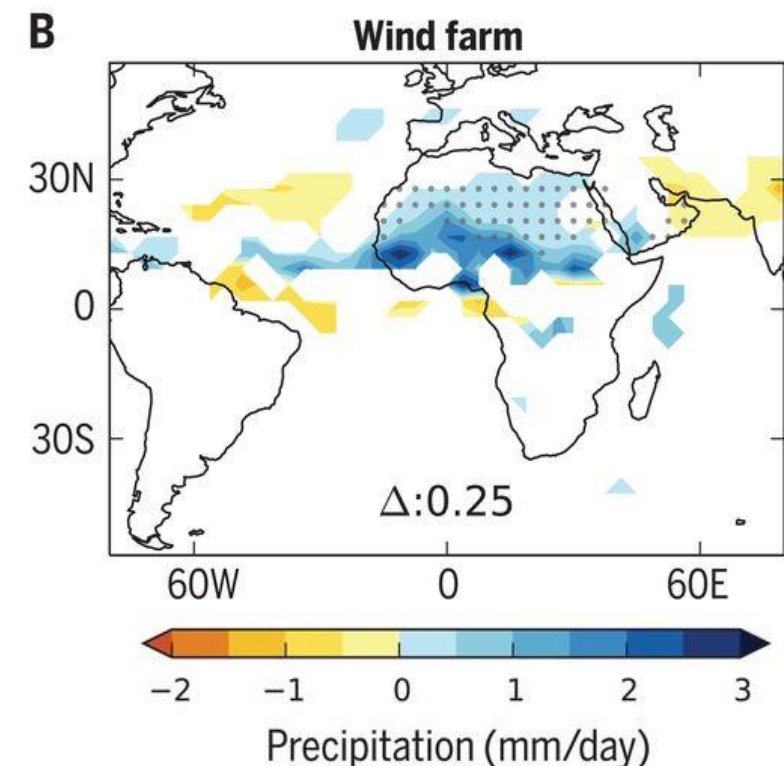
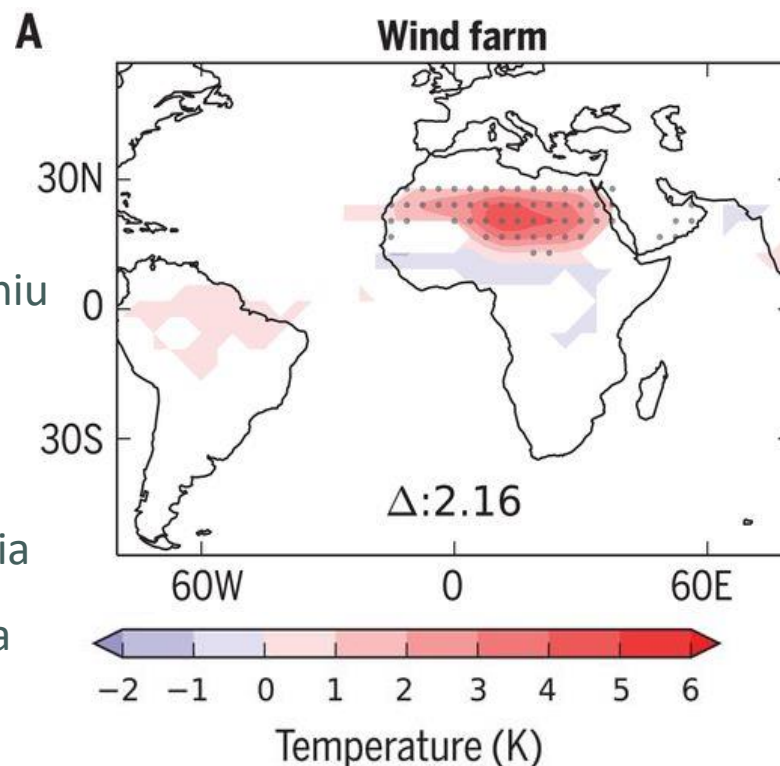
Mikroklimat w skali farmy wiatrowej

Kaffine (2019) wykazał dla USA, że bilans jest dodatni. Wzrost o 100 MW zainstalowanej mocy powoduje wzrost produkcji uprawnej o 1% a wyprodukowany 1 MWh energii to zysk 5 USD.



Klimat w mezoskali

Farmy wiatrowe mogą powodować lokalny wzrost temperatury ale globalny efekt jest mały w porównaniu do tego wywołanego przez spalanie paliw kopalnych. Dodatkowo, efekt sprzężenia między albedem, opadem a roślinnością może być potencjalnie wykorzystany w adaptacji do zmiany klimatu.



Hipotetyczna farma wiatrowa na Saharze i jej wpływ na klimat

Li i in. (2018)



Ministerstwo
Klimatu i Środowiska



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

Podsumowanie

NMP dla farm wiatrowych

Logistyka budowy farmy wiatrowej

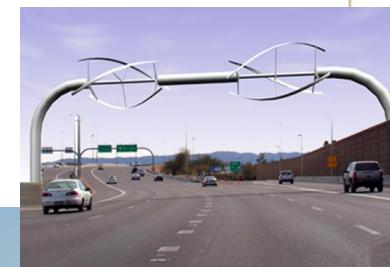
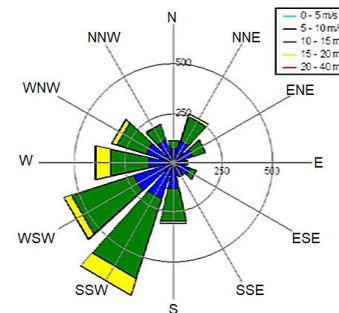
- Badanie lokalnej klimatologii pola wiatru
- Wyznaczenie optymalnej lokalizacji farmy
- Wybór typu turbiny

Wsparcie dla działań operacyjnych i konserwacji

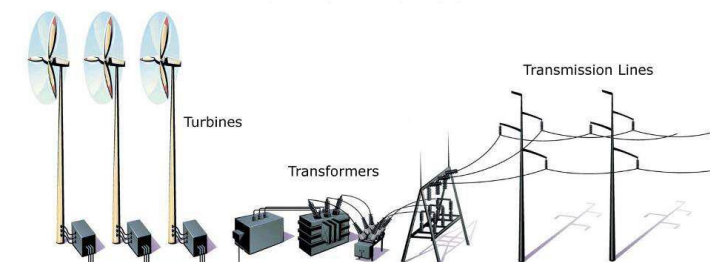
- Poprawa wydajności produkcji i transferu energii
- Optymalizacja wydajności działania sieci
- Prognozowanie produkcji energii

Ocena wpływu farmy wiatrowej na środowisko

- Efekty turbulencji
- Wzrost poziomu hałasu



Forum
Innowacyjności



Ministerstwo
Klimatu i Środowiska



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej



Forum
Innowacyjności

DZIĘKUJĘ

mariusz.figurski@imgw.pl



Ministerstwo
Klimatu i Środowiska



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

Forum Innowacyjności



Ministerstwo
Klimatu i Środowiska



Narodowy Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej