

prof. dr hab. Tomasz Niedzielski  
Zakład Geoinformatyki i Kartografii  
Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska  
Uniwersytet Wrocławski  
pl. Uniwersytecki 1  
50-137 Wrocław

Wrocław, dnia 14 grudnia 2023 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała Mierzwiaka**  
na temat „Modelowanie meteorologicznych danych przestrzennych na  
potrzeby krótkoterminowych prognoz warunków solarnych  
w Europie Środkowo-Wschodniej”  
przygotowanej pod kierunkiem  
dra hab. inż. Krzysztofa Kroszczyńskiego (promotor)  
i dra inż. Andrzeja Araszkiwicza (promotor pomocniczy)

Recenzja została przygotowana w odpowiedzi na pismo z dnia 16 października 2023 roku skierowane do mnie przez płk. prof. dra hab. inż. Michała Kędzińskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport” Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego, w którym zawarta była informacja o powołaniu mnie na recenzenta ww. rozprawy doktorskiej.

## **1 Znaczenie problemu badawczego i ocena hipotezy badawczej**

Optymalna lokalizacja infrastruktury pozwalającej na wytwarzanie prądu elektrycznego dzięki energii słonecznej jest zadaniem ważnym i jednocześnie złożonym. Przeprowadzając analizy terenu, zwykle oparte na przetwarzaniu numerycznych modeli wysokościowych, rozważa się m.in. wysokości bezwzględne, nachylenia, ekspozycje, uzupełniając wyniki o badanie lokalnych czynników infrastrukturalnych i rozpoznanie sytuacji formalnoprawnej. Dokładne studia lokalizacyjne wymagają dodatkowo wiedzy na temat zmieniających się w czasie czynników środowiskowych wpływających na możliwość i efektywność produkcji energii słonecznej. Wśród nich jest głównie zachmurzenie, które można również modelować numerycznie, jednak nie poprzez analizę stałych w czasie modeli wysokościowych, ale przez zastosowanie numerycznych modeli meteorologicznych. Pozwalają one na symulowanie i prognozowanie różnych elementów pogody, w tym zachmurzenia. Warto w tym miejscu zauważyć, że w literaturze przedmiotu można znaleźć inne zmienne meteorologiczne, które są dodatkowo uwzględniane w analizach mających na celu znalezienie optymalnych



lokalizacji dla instalacji fotowoltaicznych – należą do nich na przykład opad deszczu i śniegu, pokrywa śnieżna czy też obecność pyłów w powietrzu. Z tego powodu uważam, że modelowanie meteorologiczne stanowi dobre podejście do ulepszania procesu lokalizacji infrastruktury służącej do wytwarzania prądu elektrycznego. Znaczenie tego podejścia jest szczególnie ważne w dobie zmian klimatu, które wymuszają konieczność aktualizacji opracowań lokalizacyjnych. Modele meteorologiczne są jednak nie tylko przydatne do prowadzenia analiz lokalizacyjnych, ale mogą też służyć do generowania krótkoterminowych prognoz warunków solarnych, co ma bardzo duże znaczenie w planowaniu i zarządzaniu zasobami energetycznymi.

Recenzowana rozprawa doktorska wpisuje się w opisany wyżej kierunek badań. Doktorant podjął się wykonania takiej parametryzacji mezoskalowego modelu meteorologicznego WRF (Weather Research and Forecasting), która pozwalałaby na zwiększenie skuteczności prognoz warunków solarnych w Europie Środkowo-Wschodniej w miejscach, które stanowią potencjalne lokalizacje farm fotowoltaicznych. Trudności w prognozowaniu tych warunków w obszarze badań wynikają, zdaniem Doktoranta, ze znacznej dynamiki przebiegu zjawisk atmosferycznych.

Oprócz realizacji wspomnianego wyżej celu głównego Pan mgr inż. Michał Mierzwiaak postawił przed sobą trzy cele szczegółowe. Pierwszym było stworzenie metod określania lokalizacji farm wiatrowych. Za drugi cel przyjęto znalezienie domen obliczeniowych, przy których model jest najskuteczniejszy do opisanych wyżej zastosowań. Trzecim celem szczegółowym była już właściwa parametryzacja modelu. Cele te są jasno sformułowane, a ich osiągnięcie pozwala zrealizować cel główny.

Hipoteza badawcza, którą Doktorant określa tezę, brzmi: „Optymalna parametryzacja modelu WRF zwiększa sprawdzalność prognoz warunków solarnych w potencjalnych lokalizacjach farm fotowoltaicznych”. Jest to przypuszczenie, czyli hipoteza, co wynika z tego, że – jak wskazuje Autor – została sformułowana na podstawie problemu badawczego. Stwierdzenie to można nazwać tezą dopiero po pozytywnej weryfikacji przypuszczenia zacytowanego w zdaniu poprzednim. Zdaniem recenzenta powyższe przypuszczenie powinno być nazwane hipotezą główną. Do jej weryfikacji służą trzy hipotezy badawcze, które w świetle powyższych rozważań powinny być nazwane hipotezami pomocniczymi lub szczegółowymi.

Pierwsza z nich to przypuszczenie, że przypisywanie wag różnym czynnikom stosowanym do znalezienia lokalizacji farmy fotowoltaicznej zapewnia jednoznaczność klasyfikacji przydatności terenu do takich inwestycji. Hipotezę tę warto doprecyzować określając, jak ww. jednoznaczność klasyfikacji należy rozumieć (zmiana wag może przecież zmieniać klasyfikację). Druga hipoteza brzmi: „Sposób doboru obszarów obliczeniowych (domen obliczeniowych) zwiększa efektywność prognoz warunków solarnych”. Hipoteza ta jest sfor-



mułowana nieprecyzyjnie, gdyż dowolny sposób wyboru domeny nie może zawsze wpływać na poprawę prognozy. W sformułowaniu hipotezy brakuje nazwania konkretnego sposobu wyboru domeny lub wręcz nazwania samej domeny lub jej charakterystyk. Trzecia hipoteza jest przypuszczeniem o tym, że uwzględnienie zachmurzenia w procesie modelowania zwiększa dokładność warunków solarnych. Hipoteza jest postawiona poprawnie, choć czytelnik nie wie, jaka poprawa dokładności (np. w sensie procentowym, w sensie redukcji bezwzględnych błędów prognozy) jest oczekiwana do potwierdzenia jej prawdziwości.

Mimo powyższych zastrzeżeń należy odnotować, że część metodologiczna jest uporządkowana. Świadczy o tym tabela 2, w której m.in. zestawiono problemy badawcze, odpowiadające im hipotezy i zastosowane metody.

## **2 Charakterystyka układu rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska ma formę cyklu pięciu artykułów naukowych opublikowanych w języku angielskim w międzynarodowych czasopismach naukowych, które to artykuły są poprzedzone zwięzłym wprowadzeniem i charakterystyką wyników opracowaną w języku polskim. Część wprowadzająca liczy 39 stron standardowego maszynopisu, a w jej skład wchodzi streszczenia, spis treści, wykaz skrótów, pięć rozdziałów, spis literatury i lista załączników. Artykuły liczą łącznie 90 stron i są dołączone jako załączniki do pracy. Na końcu rozprawy doktorskiej zamieszczono oświadczenia współautorów, zawierające informacje zarówno o procentowym, jak i merytorycznym udziale współautorów w przygotowaniu poszczególnych artykułów. Publikacje ukazały się w czasopismach o zróżnicowanej punktacji ministerialnej – od 20 pkt (Reports on Geodesy and Geoinformatics), przez 100 pkt (Remote Sensing), po 140 pkt (trzy prace w Energies). Pierwsze z wymienionych czasopism nie posiada wskaźnika Impact Factor, a dla pozostałych jego wartości wynoszą od 3.2 do 5.0. Należy też zauważyć, że cztery artykuły opublikowano w jedynym wydawnictwie – MDPI. Doktorant jest pierwszym autorem czterech prac, a Jego procentowy wkład w opracowanie pięciu artykułów wynosił: 20%, 70%, 80%, 80% i 90%.

Polskojęzyczna część zawierająca charakterystykę wyników jest złożona z pięciu rozdziałów. W pierwszym rozdziale zawarto ogólne wprowadzenie do problematyki lokalizacji farm fotowoltaicznych oraz opisano rolę modeli meteorologicznych w monitoringu i prognozie warunków solarnych. W drugim rozdziale scharakteryzowano problem badawczy, podano tezę (zob. uwagi w rozdziale 1 niniejszej recenzji), cel główny oraz trzy cele szczegółowe. Zamieszczono też listę artykułów tworzących cykl, podając ich charakterystyki bibliometryczne. W rozdziale trzecim podano trzy hipotezy badawcze i zestawiono w tabeli publikacje z hipotezami i metodami. Rozdział ten jest zatytułowany „Metodyka badawcza”, natomiast nie zawiera pogłębionej informacji o zastosowanych metodach – rozdział składa się tylko z jednego akapitu i jednej tabeli. W rozdziale czwartym omó-



wiono wyniki badań. Dobrze podzielono go na dwa podrozdziały, odpowiadające dwóm głównym kierunkom badań podjętym w rozprawie doktorskiej (lokalizacja farm solarnych i modelowanie meteorologiczne). Jeden z podrozdziałów został dodatkowo podzielony na odrębne części, odpowiadające wyborze domeny obliczeniowej i parametryzacji modelu WRF. Struktura rozdziału czwartego jest przemyślana i odpowiada założeniom pracy. Rozdział piąty zawiera podsumowanie i wnioski. W polskojęzycznej części rozprawy doktorskiej zamieszczono dwie tabele i dziewięć rycin, przy czym osiem rycin pochodzi z publikacji wchodzących w skład cyklu. Spis literatury do części polskojęzycznej recenzowanej rozprawy doktorskiej obejmuje 37 pozycji. W większości są to artykuły naukowe napisane w języku angielskim.

### **3 Zawartość rozprawy doktorskiej i najważniejsze uwagi szczegółowe**

Nawiązując do układu rozdziału 4 w rozprawie doktorskiej poruszane są trzy kierunki prac: (1) wybór optymalnej lokalizacji farm solarnych (artykuł nr 1), (2) wybór optymalnej domeny obliczeniowej modelu WRF (artykuł nr 4), parametryzacja tego modelu dla Europy Środkowo-Wschodniej (artykuły nr 2, 3, 5). Działania związane z zastosowaniem modelu WRF są nakierowane na prognozowanie warunków solarnych, do czego ważną daną wejściową jest zachmurzenie. Należy zauważyć, że artykuł nr 2 nie dotyczy parametryzacji modelu WRF, ale stanowi opracowanie dotyczące zawartości wody w atmosferze (zob. niżej), co ma potwierdzić konieczność uwzględniania zachmurzenia w procesie modelowania.

Artykuł nr 1 przedstawia wyniki eksperymentu numerycznego mającego na celu wygenerowanie mapy obszarów o różnym potencjale do zlokalizowania farm solarnych. Obszarem testowania przyjętej metodyki był powiat legionowski. Jest to bardzo mały obszar w stosunku do obszaru badań (Europa Środkowo-Wschodnia). Czy istnieją argumenty przemawiające za tym, że powiat legionowski jest reprezentatywny dla Europy Środkowo-Wschodniej? Wynikiem klasyfikacji jest mapa przedstawiająca trzy klasy przydatności terenu na potrzeby instalacji farm solarnych. Autor określa swój wynik jako „wyznaczenie jednoznacznie sklasyfikowanych obszarów”. Recenzent prosi o wyjaśnienie, na czym ta jednoznaczność polega, w szczególności w świetle uwagi sformułowanej wyżej w rozdziale 1 niniejszej recenzji. Czy chodzi o rozłączność wydzieleni czy też o „stabilny” wynik odporny na modyfikację parametrów wejściowych? Powstaje też pytanie, czy możliwe jest porównanie wyników z innymi podejściami służącymi do określania optymalnych lokalizacji farm fotowoltaicznych.

Jednymi z najważniejszych parametrów modeli meteorologicznych jest wielkość domeny, czyli obszaru, dla którego realizuje się obliczenia. W modelach meteorologicznych rozważa się zwykle domenę nadrzędną (obszar największy) i kolejne domeny zagnież-



dżone (kolejne mniejsze obszary). Oczko siatki w tych mniejszych obszarach jest zazwyczaj mniejsze, co odpowiada większej rozdzielczości przestrzennej. Artykuł nr 4 cyklu poświęcony jest wyborowi domen spośród kilku przyjętych konfiguracji. Badania realizowane były dla wschodnich Niemiec (okolice Lipska, Drezna i Chemnitz) jako obszaru reprezentującego obszar badań, czyli Europę Środkowo-Wschodnią. Doktorant tłumaczy również, że wybór ww. części Niemiec do przeprowadzenia analizy został również poddyktowany dostępnością danych aktywnometrycznych, gwarantujących informacje o natężeniu promieniowania słonecznego. Czy zdaniem Doktoranta ogólnodostępne dane aktywnometryczne dla obszaru Polski, publikowane przez IMGW-PIB, mogłyby być wykorzystane do walidacji modelu? Do poszukiwania domeny, która jest najkorzystniejsza z perspektywy modelowania krótkofalowego bezpośredniego promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi (SWDDIR – Shortwave Surface Downward Direct Irradiance), finalnie rozważono trzy konfiguracje: CR\_3\_2D (podwójne zagnieżdżenie domen z rozdzielczością przestrzenną 3 km w domenie zewnętrznej i 1 km w domenie wewnętrznej), CR\_5\_2D (podwójne zagnieżdżenie domen z rozdzielczością przestrzenną 5 km w domenie zewnętrznej i 1 km w domenie wewnętrznej), CR\_3\_3D (potrójne zagnieżdżenie domen z rozdzielczością przestrzenną 9 km w domenie zewnętrznej, 3 km w domenie pośredniej i 1 km w domenie wewnętrznej). Dla tych konfiguracji postawiono prognozy SWDDIR i porównano je z danymi pomiarowymi ze stacji w Lipsku, Dreźnie i Chemnitz. Prognozy obliczono dla horyzontu czasowego 24 i 48 godzin, w różnych warunkach atmosferycznych. Statystyczna analiza błędów prognoz pozwoliła na wybór jednej z trzech ww. konfiguracji (CR\_3\_2D) jako najlepszej do przewidywania warunków solarnych w Europie Środkowo-Wschodniej z użyciem modelu WRF. Wnioski wyciągnięte na podstawie badań raportowanych w artykule nr 4 są wartościowe i mają charakter aplikacyjny. Pewne wątpliwości budzi weryfikacja drugiej hipotezy badawczej na bazie tych wyników, ale wynika to z nieprecyzyjnego jej postawienia, o czym wspomniano w rozdziale 1 niniejszej recenzji.

Artykuł nr 2 cyklu publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej nie dotyczy wprost modelowania meteorologicznego, ale ma na celu pokazanie przestrzenno-czasowych zmian zawartości wody w atmosferze (PW – precipitable water) na obszarze Polski. Dzięki przetwarzaniu danych systemu nawigacyjnego GNSS (Global Navigation Satellite System) obliczono wartości PW na bazie tzw. opóźnienia zenitalnego, a następnie porównano wyniki z pomiarami z sondaży aerologicznych wykonywanych przez IMGW-PIB. Na podstawie analizy danych z lat 2009–2020 zauważono trend rosnący PW o wartości 0,078 mm/rok oraz zmienność przestrzenną tej tendencji na terenie kraju (od 0,03 do 0,14 mm/rok). Wyniki pokazują, że zawartość wody w atmosferze nad Polską ulega zwiększeniu, co uzasadnia włączenie informacji o zachmurzeniu do mezoskalowego modelu meteorologicznego. Czy



Doktorant nie mógł dojść do podobnych wniosków na podstawie literatury, w której publikowane są długookresowe trendy opadów w Polsce? Co wnosi wiedza o trendach PW w porównaniu do wiedzy o trendach opadów atmosferycznych?

Wyniki dotyczące meteorologicznego modelowania mezoskalowego z wykorzystaniem modelu WRF do prognozowania warunków solarnych zostały zawarte w artykule nr 3. Obszarem badań były północno-wschodnie Niemcy. Doktorant umotywował ten wybór nierealizowaniem podobnych prac w tym terenie oraz – co zdaniem recenzenta jest ważniejsze – niekorzystnymi warunkami do produkcji energii słonecznej. Dla północno-wschodnich Niemiec dostępne są dane aktynometryczne, które pozwoliły na sprawdzenie skuteczności modelu. W pracy przetestowano dwa schematy promieniowania krótkofalowego, a modelowanie przeprowadzono dla wybranych ośmiu sytuacji synoptycznych (po dwie dla przechodzących frontów chłodnego, ciepłego i zokludowanego oraz dwie dla układu wysokiego ciśnienia). Wyniki modelowania i prognozowania parametru SWDDIR, bazujące na dwóch schematach promieniowania, przedstawiono dla poszczególnych sytuacji synoptycznych i porównano je z danymi na trzech stacjach (Arkona, Seehausen, Rostock-Warnemünde) oraz z reanalizami ERA5 udostępnianymi przez Europejskie Centrum Średnioterminowych Prognoz Pogody (ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Prognozy cechowały się wysokimi wartościami współczynnika korelacji dla sytuacji występowania układu wysokiego ciśnienia. Należy jednak zauważyć, że wartości znormalizowanego błędu RMSE były wysokie dla pozostałych sytuacji synoptycznych. Wyniki doprowadziły Doktoranta do wniosku, że istnieje potrzeba poprawy modelowania, w szczególności w sytuacjach przechodzenia frontów chłodnych. Porównanie wartości współczynnika korelacji i błędów prognozy prowadzi do pytania o interpretację skuteczności modelu – czy model lepiej rekonstruuje zmienność czy też jest lepszy w przewidywaniu amplitud?

Artykuł nr 5 porusza problem prognozowania promieniowania całkowitego docierającego do powierzchni Ziemi (GHI – Global Horizontal Irradiance) z użyciem modelu WRF w warunkach frontu chłodnego. W tym celu Doktorant uwzględnił parametryzację chmur przyjmując trzy scenariusze zakładające różne charakteryzacje konwekcji. Za obszar badań przyjęto południowo-wschodnią część Niemiec. Wygenerowano 24-godzinne prognozy, a wyniki porównano z danymi pozyskanymi z sześciu stacji wykonujących pomiary aktynometryczne. Wyniki modelowania doprowadziły Autora do wniosku, że zastosowanie parametryzacji modelu WRF uwzględniającej zachmurzenie (tzw. warianty C1/C2) poprawia lub nie pogarsza prognozy bazującej na domyślnej konfiguracji w przypadku frontu zimnego. Dla frontu zokludowanego poprawa jest natomiast bardziej ewidentna.

Mimo że wszystkie analizy przedstawione w artykułach wchodzących w skład cyklu dotyczą obszarów położonych w Europie Środkowo-Wschodniej, trudno jest zauważyć



spójny sposób ich wyboru. W pracy nr 1 rozważany jest powiat legionowski, którego reprezentatywność dla obszaru badań nie została udowodniona. W pracy nr 4 obszarem badań były wschodnie Niemcy. Artykuł nr 2 prezentuje analizy dla Polski, natomiast artykuł nr 3 skupia się na północno-wschodnich Niemczech. Jeszcze inny obszar badań (południowo-wschodnie Niemcy) rozważany jest w artykule nr 5.

Biorąc pod uwagę zakres merytoryczny ocenianych pięciu artykułów można zauważyć, że artykuł nr 1 tematycznie odbiega od pozostałych publikacji. Metodyka lokalizacji farm solarnych, zastosowana do małego obszaru jakim jest powiat legionowski, nie wnosi wiele do artykułów nr 3–5, które dotyczą modelowania warunków solarnych z użyciem modelu WRF. Artykuł nr 2, którego wnioski dotyczą zmian zawartości wody w atmosferze, również odbiega od głównego kierunku badań. Uważam, że cykl publikacji mógłby z powodzeniem bazować na trzech pracach (nr 3–5), co gwarantowałoby większą spójność opracowania.

#### **4 Ocena rozprawy doktorskiej**

Recenzowana rozprawa doktorska jest opracowaniem oryginalnym. Świadczy o tym w szczególności szereg eksperymentów numerycznych, których celem było prognozowanie warunków solarnych z wykorzystaniem modelu WRF. Dzięki nim Doktorant znalazł korzystną domenę na potrzeby generowania tych prognoz, przygotował parametryzację modelu WRF i obliczył prognozy. Na bazie eksperymentów doszedł też do wniosku o konieczności uwzględniania zachmurzenia w parametryzacji modelu w przypadku modelowania warunków solarnych w warunkach frontu chłodnego, co wykonał i wykazał (w pewnych sytuacjach) na przewagę tego podejścia.

Główne uwagi dotyczą: formułowania hipotez (brak precyzji), reprezentatywności obszarów badań przyjętych w poszczególnych artykułach dla warunków Europy Środkowo-Wschodniej (brak uzasadnienia wyboru różnych, często małych obszarów), spójności cyklu publikacji (z powodzeniem cykl mógł składać się z trzech publikacji na temat zastosowania modelu WRF do prognozowania warunków solarnych).

Zdaniem recenzenta rozprawa doktorska mgra inż. Michała Mierzwiaka prezentuje wyniki nowatorskich badań naukowych realizowanych na styku geodezji, meteorologii i systemów informacji geograficznej. Recenzowana praca zasługuje na dobrą ocenę, a zidentyfikowane i omówione niedociągnięcia i sprawy dyskusyjne nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę opracowania. Ich celem jest identyfikacja uchybień metodologicznych, metodycznych i analitycznych, by te mogły być usunięte w przyszłych pracach Doktoranta.

## 5 Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgra inż. Michała Mierzwiaka pt. „Modelowanie meteorologicznych danych przestrzennych na potrzeby krótkoterminowych prognoz warunków solarnych w Europie Środkowo-Wschodniej” odpowiada wymogom określonym w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku (z późn. zm.). W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport” Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego o dopuszczenie Pana mgra inż. Michała Mierzwiaka do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Toman Niedźwiedzki