

prof. dr hab. inż. Jerzy Malachowski
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa
Tel.: +48 261 839 140
E-mail: jerzy.malachowski@wat.edu.pl

Warszawa, 26.01.2023 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej (tytuł w j. polskim)

„*Energetyczne i akustyczne uwarunkowania lokalizacji farm wiatrowych*”

i tytuł w j. angielskim

„*Energy and Acoustic Conditions for the Location of Wind Farms*”

autorstwa mgr KATARZYNY WOLNIEWICZ

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo od Pani Rektor Politechniki Koszalińskiej, dr hab. DANUTY ZAWADZKIEJ, prof. Politechniki Koszalińskiej i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr KATARZYNY WOLNIEWICZ pt. „*Energetyczne i akustyczne uwarunkowania lokalizacji farm wiatrowych*”. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. MIROSLAW WESOŁOWSKI, prof. PK, a promotorem pomocniczym dr inż. ADAM ZGUBIEŃ.

2. Omówienie pracy

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana łącznie na 95 stronach maszynopisu formatu A4. Składa się ona z: streszczenia w j. polskim i j. angielskim, wykazu skrótów i oznaczeń, wykazu dorobku naukowego stanowiącego rozprawę doktorską i następujących rozdziałów: (1) Wprowadzenie i przegląd literatury; (2) Cel i zakres badań; (3) Materiał i metody badań; (4) Wyniki badań; (5) Podsumowanie i wnioski oraz spisu literatury (66 pozycji bibliograficznych) i kopii cyklu czterech opublikowanych artykułów naukowych stanowiących rozprawę doktorską wraz z oświadczeniami autorów.

W niniejszej dysertacji Autorka podjęła się bardzo aktualnych zagadnień związanych z odnawialnymi źródłami energii (OZE) i wskazaniem ich roli w rozwoju gospodarczym wynikającym ze zwiększonego popytu na energię elektryczną. Bardzo celnie wskazano na problematykę dotyczącą wprowadzanych zmian w otaczającej przestrzeni, a co za tym idzie także potrzebę określenia dopuszczalnego poziomu hałasu w środowisku. OZE, a szczególnie energetyka wiatrowa, podlegają stałemu dynamicznemu rozwojowi i mają wszelkie predyspozycje do tego, by stać się odpowiedzią zarówno na kryzys klimatyczny, jak i gospodarczy. Mając powyższy aspekt na uwadze, Doktorantka w rozprawie skupiła się na analizie wietrzności w określonej lokalizacji oraz hałasu pochodzącego od turbin wiatrowych (WT) determinujących umiejscowienie farmy wiatrowej (WF).

Doktorantka jako główny cel badawczy przyjęła określenie najważniejszych parametrów pozwalających maksymalnie wykorzystać teren pod elektrownię wiatrową. Na potrzeby realizacji celu głównego zostały określone następujące cele cząstkowe, odzwierciedlone w będącym podstawą doktoratu cyklu czterech publikacji, a które dotyczą:

- identyfikacji źródła hałasu,
- identyfikacji zagrożenia,
- optymalizacji ustawienia turbin ze względu na hałas i wydajność,
- doboru turbiny ze względu na wydajność.

Mając na względzie przedstawione cele badawcze, Autorka dysertacji zdefiniowała także dwie tezy badawcze, które brzmią:

1. Nominalna moc prądowa turbiny wiatrowej nie jest głównym kryterium wpływającym na wybór urządzenia farmy wiatrowej.
2. Jest możliwe takie przekształcenie terenu pod elektrownię wiatrową, które spowoduje maksymalne wykorzystanie potencjału wietrznego bez szkody dla środowiska akustycznego.

Istotnym kryterium decydującym o wyborze terenu lokalizacji elektrowni, oprócz topografii terenu oraz istniejącej zabudowy infrastrukturalnej, są warunki wietrzności oraz zabudowa chroniona akustycznie (jednorodzinna, wielorodzinna i zagrodowa) mając na względzie spełnienie dopuszczalnego poziomu hałasu. W związku z powyższym bardzo ważne jest podjęcie odpowiedzialnej decyzji, w efekcie której następuje dalszy przebieg realizacji przedsięwzięcia z odpowiednio wykonaną koncepcją techniczną minimalizującą ryzyko inwestycyjne poprzez optymalizację kosztów na etapie projektowym, budowlanym i eksploatacyjnym. Doktorantka słusznie zauważa, że często występuje brak koordynacji działań zespołów projektowych. Stąd też następuje, z uwagi na uwarunkowania środowiskowe i przestrzenne, wprowadzanie korekt przez zespoły akustyków wpływające na zmianę lokalizacji turbin oraz korekt trybów pracy urządzenia. Jak zauważa Autorka dysertacji, dochodzi do ograniczenia mocy akustycznej urządzenia kosztem produktywności, a tym samym wydłużenia czasu zwrotu kosztów inwestycji. Kluczową jest więc rola tego typu badań i zespołów, które biorą udział w ocenach lokalizacyjnych turbin wiatrowych. Dlatego też konieczne jest równoległe prowadzenie analiz akustycznych i energetycznych podczas projektowania umiejscowienia oraz doboru typu turbiny na farmie wiatrowej. Pozwala to uniknąć błędnego wytypowania turbiny, która w danej lokalizacji nie byłaby optymalna ze względu na jej produktywność przy danych warunkach wietrznych, przestrzennych i środowiskowych.

Autorka rozprawy doktorskiej do analiz wybrała kilka turbin o podobnej mocy akustycznej. Recenzent zgadza się, że odpowiedni dobór turbiny wiatrowej (przy równoczesnym uwzględnieniu analizy środowiskowej i energetycznej) pozwala w konsekwencji osiągnąć

maksymalny wynik ekonomiczny inwestycji. Kluczowym parametrem w doborze turbiny, z punktu widzenia generowanej przez nią mocy, jest jej krzywa mocy, która przedstawia zależność generowanej mocy od prędkości wiatru. Z przeprowadzonych przez Autorkę dysertacji analiz okazało się, że najmniej wydajne w badanych lokalizacjach były turbiny o mocy nominalnej 2.3-2.5 MW, a najwydajniejsze energetycznie okazały się turbiny o mocy 2 MW. Ważnym elementem badań były pomiary hałasu w celu uzyskania celu akustycznego, gdyż niespełnienie tego kryterium wymaga często redukcji mocy akustycznej kilku turbin wiatrowych na farmie, a co w konsekwencji oznacza spadek ich produktywności. W przeprowadzonych badaniach wskazano na znaczenie optymalnego zlokalizowania samej turbiny na farmie wiatrowej.

Doktorantka poprzez swoje badania i analizy udowodniła, że możliwe jest przekształcenie terenu pod elektrownie wiatrową z ograniczeniem emisji akustycznej turbin bez straty wydajności energetycznej farmy wiatrowej.

Po dokonaniu analizy wyników uzyskanych z badań empirycznych oraz symulacyjnych Autorka rozprawy sformułowała m.in. następujące główne wnioski:

1. Spośród przebadanych turbin wiatrowych (WT) hałas słyszalny rejestrowany wokół turbin zamocowanych na wieżach kratowych jest o około 10 dB mniejszy niż hałas przy wieżach WT o konstrukcji rurowej. W odległości 250 m od wieży turbiny o konstrukcji kratowej hałas turbiny jest nierozróżnialny z tłem akustycznym.
2. W pobliżu turbiny zamocowanej na kratowej konstrukcji wspanie nie występuje gwałtowna zmiana ciśnienia akustycznego związana z przemieszczaniem się łopaty wirnika w pobliżu wieży.
3. Niższe poziomy hałasu infradźwiękowego oraz akustycznego przy turbinach o wieżach kratowych powodują mniejsze zagrożenie dla ludzi i zwierząt.
4. Dla odległości 500 m od turbin przyjęte kryterium hałasu niskoczęstotliwościowego pozwala stwierdzić niską lub nieistotną ekspozycję ludzi na hałas niskoczęstotliwościowy oraz brak zagrożenia hałasem infradźwiękowym. Zmierzone poziomy znajdują się poniżej progu percepcji człowieka na infradźwięki.
5. Wybór lokalizacji farmy wiatrowej powinien być poprzedzony przeprowadzoną łącznie analizą energetyczną i akustyczną uwzględniającą specyfikę pracy konkretnej turbiny.

Otrzymane rezultaty potwierdziły osiągnięcie założonych w dysertacji celów i zarazem wpisują się w trend podkreślający rolę OZE (a szczególnie w tym przypadku energetyki wiatrowej) w rozwoju społeczeństw, co Doktorantka zawarła w stwierdzeniu końcowym pisząc, „że przekształcenie terenu rolniczego w elektrownię wiatrową może być dokonane bez szkody dla środowiska przy jednoczesnej realizacji celów ekonomicznych”.

Jak już wskazano na początku recenzji, rozprawa doktorska składa się z cyklu czterech publikacji Doktorantki:

- 1) Zagubień A., Wolniewicz K.: *The impact of supporting tower on wind turbine noise emission*, Applied Acoustics, Vol. 155(2019), p. 260-270.
DOI:10.1016/j.apacoust.2019.05.032, IF 3.290

W niniejszym artykule metodami pomiarowymi Autorzy określili poziomy hałasu infradźwiękowego i akustycznego rejestrowane wokół farm wiatrowych. Przedstawiono wyniki pomiarów dźwięków zarejestrowane w pobliżu turbin wiatrowych o różnych wysokościach i konstrukcjach wieży nośnej (rura lub kratownica). Na tej podstawie ustalony został charakter emisji źródła.

- 2) Wolniewicz K., Zagubień A.: *The Assessment of Infrasound and Low Frequency Noise Impact on the Results of Learning in Primary School – Case Study*, Archives of Acoustics, Vol. 45(1), 2020, pp. 93 – 102. DOI:10.24425/aoa.2020.132485, IF 1.152

W tej publikacji Autorzy ustalili poziomy dźwięku rejestrowane w badanym obiekcie oraz jego otoczeniu. Zabudowa chroniona akustycznie oddalona jest zazwyczaj o kilkaset metrów od farmy wiatrowej. Zgodnie z rozporządzeniem o dopuszczalnych poziomach hałasu w środowisku najniższe poziomy ustalono są dla zabudowy jednorodzinnej. Ze względu na brak możliwości wykonywania pomiarów w prywatnych budynkach mieszkalnych Autorzy wytypowali do badań inny obiekt, którym jest szkoła, a która jest terenem chronionym akustycznie tak jak zabudowa jednorodzinna. Na tej podstawie zrealizowano pomiary i ustalono poziom dźwięku z obiekcie.

- 3) Wolniewicz K., Zagubień A., Wesolowski M. (2021) *Energy and Acoustic Environmental Effective Approach for a Wind Farm Location*, Energies, Vol. 14(21), 7290. DOI: 10.3390/en14217290, IF 3.333

W niniejszej pracy zaprezentowano proces doboru typu turbiny wiatrowej do konkretnej lokalizacji. Skupiono się na maksymalnym wykorzystaniu dostępnego terenu charakteryzującego się dobrymi parametrami wietrzności. Do prowadzonych analiz wytypowano kilka typów turbin powszechnie instalowanych na farmach wiatrowych. Wykazano konieczność równoległego prowadzenia analiz środowiskowych i energetycznych podczas projektowania umiejscowienia oraz doboru typu turbiny na farmie wiatrowej (WF). Wykonane symulacje pozwoliły na optymalne rozmieszczenie turbin przy zachowaniu poziomów dopuszczalnych hałasu i uzyskaniu maksymalnej wydajności energetycznej farmy wiatrowej.

- 4) Kuczyński W., Wolniewicz K., Charun H. (2021). *Analysis of the Wind Turbine Selection for the Given Wind Conditions*, Energies, Vol. 14(22), 7740.
DOI:10.3390/en14227740, IF 3.333

Dla potrzeb przeprowadzonych badań i powstałej na ich bazie publikacji wybrano kilka typów turbin powszechnie instalowanych na farmach wiatrowych i dokonano analiz pod kątem maksymalnej wydajności urządzeń w badanych lokalizacjach. Zaproponowano metodykę doboru typu turbiny wiatrowej na podstawie zarejestrowanych rocznych pomiarów wiatru. Przedstawiony proces doboru turbiny

pozwoił wypracować algorytm doboru optymalnego urządzenia dla danych warunków wietrznych w badanej lokalizacji.

Udział procentowy Doktorantki w poszczególnych wyżej wymienionych pracach wyniósł odpowiednio: (1) 50%, (2) 50%, (3) 60% i (4) 40%. Przedstawione udziały procentowe wskazują na wiodącą rolę Autorki dysertacji. Ten udział wyrażony był w takich aktywnościach jak:

- Ad. 1. Koncepcja badawcza, przeprowadzenie badań, wizualizacja danych, przygotowanie i redakcja tekstu.
- Ad. 2. Koncepcja badawcza, przeprowadzenie badań, wizualizacja danych, przygotowanie i redakcja tekstu.
- Ad. 3. Koncepcja badawcza, nadzór nad realizacją badań, analiza formalna wyników badań, zapewnienie materiałów badawczych i oprzyrządowania, przeprowadzenie badań, wizualizacja danych, przygotowanie i redakcja tekstu.
- Ad. 4. Koncepcja badawcza, zapewnienie materiałów badawczych i oprzyrządowania, przeprowadzenie badań, wizualizacja danych, przygotowanie i redakcja tekstu oraz korekta tekstu.

Recenzent nie wnosi do zaprezentowanych oświadczeń żadnych uwag.

Mgr Katarzyna Wolniewicz jest współautorką łącznie 19 publikacji. Z tej bogatej listy publikacji 9 jest zarejestrowanych w bazie Scopus. Dane naukometryczne według bazy Scopus to 48 cytowań z indeksem Hirscha wynoszącym 5 na dzień opracowania recenzji. Należy podkreślić, że jest to publikacyjność na poziomie znacząco przekraczającym wymagania stosownej ustawy przy składaniu rozprawy doktorskiej i zasługuje na szczególne wyróżnienie.

3. Pytania merytoryczne oraz uwagi

Po zapoznaniu się z treścią całej rozprawy, Recenzent chciałby otrzymać odpowiedzi/wyjaśnienia na następujące kwestie:

- 1) Przedstawiona do oceny dysertacja ma klasyczny układ artykułu naukowego. Celowym więc byłoby przedstawienie przeglądu literaturowego, który kończy się formą podsumowania ze wskazaniem niszy badawczej, która jeszcze nie została podjęta przez autorów cytowanych prac i stanowi zarazem dla Doktorantki podstawę do wypracowania celu i zakresu badań objętych rozprawą, a które są omówione w rozdziale następnym. Warto więc zaprezentować ten opis w układzie przyczynowo-skutkowym.
- 2) W prowadzonych przez Autorkę analizach był wykorzystywany jeden model rozkładu prawdopodobieństwa prędkości wiatru. W literaturze spotyka się szereg różnych modeli (np. wg rozkładu Weibulla, rozkładu gamma, rozkładu wartości ekstremalnych, wg wieloparametrycznego rozkładu lub szeregu innych), ze względu na szczególną ich

przydatność w różnych lokalizacjach. Zazwyczaj stwierdza się, że nie istnieje sytuacja, w której konkretny model miałby być najlepiej dopasowany mając na względzie dane dotyczące prędkości wiatru zarejestrowane we wszystkich lokalizacjach. Każdy z modeli ma swoje zalety i wady, które są odpowiednie dla różnych modeli danych obserwacyjnych. Ważnym jest zatem, aby przy wyborze modelu rozkładu prędkości wiatru dla konkretnego miejsca wziąć pod uwagę wszystkie potencjalne modele i wówczas na podstawie wybranego jednego i charakterystyk danych obserwacyjnych prędkości wiatru określić metodę estymacji parametrów i prowadzić analizy statystyczne pod kątem najlepszego dopasowania. Czy Autorka prowadziła tego typu analizy lub czym sugerowała się wybierając dwuparametryczny model Weibulla (najczęściej spotykane w literaturze ujęcie)?

- 3) W literaturze często spotyka się stosowanie symulacji numerycznych w celu uzyskania pola ciśnienia akustycznego na powierzchniach obiektów stosując metodę symulacji dużych wirów (ang. *large eddy simulation*, LES) połączoną z akustyczną metodą analogową równania FW-H (Ffowcs Williams–Hawkings) w celu uzyskania rozkładu natężenia ciśnienia akustycznego bezpośrednio na obiektach lub w pewnej odległości dla zidentyfikowania obszaru o maksymalnym natężeniu. Jak Autorka rozprawy widzi możliwość zastosowania metod numerycznych, a szczególnie metod związanych z komputerową mechaniką płynów (potocznie zwanych CFD, ang. *computational fluid dynamics*) do przebadania tego typu rzeczywistych przypadków na drodze symulacji lub sprawdzania potencjalnych obszarów lokalizacji turbin wiatrowych pod kątem ich efektywności energetycznej z uwzględnieniem zagadnień związanych z powstawaniem hałasu? Byłaby z pewnością to jedna z metod pozwalająca uzasadnić przewagę rozwiązań nośnych konstrukcji kratowych turbin nad konstrukcjami rurowymi.
- 4) Podstawową wiedzą niezbędną do podjęcia decyzji o inwestycji w elektrownię wiatrową na danym terenie są lokalne zasoby energii wiatrowej oraz oczywiście wspomniane już aspekty bezpieczeństwa z uwagi na generowany hałas lub drgania o niskiej częstotliwości. Uzyskane wyniki zasadniczo podkreślają możliwość występowania dużych różnic średniorocznych prędkości wiatru pomiędzy punktami pomiarowymi. Potencjał wiatru potrafi różnić się między analizowanymi latami i dlatego długoterminowe pomiary wiatru są niezbędne, aby uniknąć wpływu sezonowości lub zachodzących zmian klimatycznych. Czy ten aspekt był rozważany w badanych obiektach, gdyż jest on kluczowy w analizach ekonomicznych, szczególnie wyliczając roczną produkcję energii, koszty uzyskania energii, całkowite roczne koszty eksploatacji turbin wiatrowych oraz szacując np. współczynnik zwrotu kapitału?

- 5) Czy Autorce znany jest tzw. syndrom turbin wiatrowych (badania zainicjowane w roku 2004 przez dr Ninę Pierpont wskazujące, że turbiny wiatrowe są przyczyną występowania zespołu objawów) i szereg publikacji, które były pokłosiem tego kierunku badawczego? Szereg badań nie wskazuje powiązania wpływu na zdrowie (w tym także ostatni raport Komitetu Inżynierii Środowiska PAN z roku 2022, z opracowania którego jednoznacznie wynika, że planowana w nowelizacji ustawy 10H odległość 500 m od wiatraka jest całkowicie bezpieczna dla zdrowia, <https://samorzad.pap.pl/kategoria/aktualnosci/raport-pan-o-wplywie-elektrowni-wiatrowych-na-zdrowie>). Jaka jest opinia Doktorantki w tym zakresie?
- 6) Wykazana przewaga rozwiązań kratowych konstrukcji nośnych turbin wiatrowych nad rozwiązaniami w postaci rurowej konstrukcji nośnej niesie za sobą szereg skutków, w tym także aspekty bezpieczeństwa i ekonomiczne. Czy prowadzone były przez Autorkę dogłębne analizy w tym obszarze i jakie kluczowe parametry mogą mieć wpływ na tego typu analizy porównawcze poza wskazanym niższym poziomem generowanego hałasu?

4. Ocena końcowa przedłożonej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska charakteryzuje się przede wszystkim ważnym aspektem aplikacyjnym, ale także poznawczym. W pracy Autorka powiązała wpływ aspektu środowiskowego (emisji hałasu) i ekonomicznego (wykorzystania zasobów naturalnych) na lokalizację elektrowni wiatrowej. Każde umiejscowienie tego typu urządzeń skutkuje automatycznie przekształceniem obszaru mając na uwadze m.in. czynniki przyrodnicze (zmiany zachodzące w występowaniu niektórych gatunków zwierząt, walory krajobrazowe), prawne, ekonomiczne, techniczne i społeczne. Wszystkie te aspekty pokazują wagę podjętego zagadnienia badawczego i próbę choć w części zaprezentowania odpowiedzi na rodzące się z tą tematyką pytania i wątpliwości. Za cenne i ważne należy uznać wypracowane przez Doktorantkę autorskie wnioski badawcze, o których m.in. wspomniano w pierwszej części recenzji.

Pani mgr Katarzyna Wolniewicz zaprezentowała metodologię badawczą (połączenie badań eksperymentalnych z modelowaniem analitycznym) wskazując na poprawność przyjęcia opisanej w dysertacji ścieżki badawczej, która jest zgodna z obowiązującym stanem normatywnym. Przedłożone powyżej uwagi i pytania mają w dużej mierze charakter dyskusyjny, ale także wskazują potrzebę sprawdzenia innych metod lub udokładnienia pewnych procedur testowych wypracowanych na obecnym etapie, w tym podkreślenia roli badań numerycznych. Recenzent widzi w tych analizach także podstawę dla Doktorantki do wytyczenia i rozwijania nowych wątków poszczególnych faz badawczych. Istotnym zagadnieniem może być implementacja wspomnianych już metod numerycznych połączonych z dostępnymi rozwiązaniami analitycznymi. Na bazie już funkcjonujących obiektów badawczych możliwe jest opracowanie modeli numerycznych, które nie

tylko pozwolą odzwierciedlić funkcjonowanie bieżących obiektów badawczych, ale także zidentyfikować parametry, które mają kluczowy wpływ na poprawę funkcjonalności badanych obiektów, ich efektywności energetycznej, ale także przewidzieć ich dalsze funkcjonowanie implementując np. istniejące modele sieci neuronowych bazujące na już posiadanych wynikach. W tym zakresie wskazane byłyby także analizy efektywności prawidłowego działania elektrowni wiatrowych bazujące na współczynnikach gotowości technicznej opracowane np. z wykorzystaniem stochastycznych modeli eksploatacji wraz z przeprowadzeniem analiz wrażliwości poszczególnych współczynników eksploatacyjnych.

W opinii Recenzenta wymienione zagadnienia pokazują, jak olbrzymi potencjał badawczy istnieje w sposobie wykorzystania opracowanych modeli także dla potrzeb analiz optymalizacyjnych. Jest to szczególnie ważne z punktu widzenia zachodzących stałych zmian klimatycznych pod kątem sprawdzenia funkcjonowania turbin wiatrowych w zmiennych warunkach eksploatacyjnych.

Zdefiniowany zakres prac i analiz pozwolił Doktorantce osiągnąć postawiony cel dysertacji, a także należy zauważyć, że otrzymane wyniki już przyczyniły się do powstania bardzo licznych i wartościowych publikacji.

Recenzowana rozprawa napisana jest na bardzo dobrym poziomie edytorskim z nieznacznymi drobnymi błędami natury edytorskiej, które jednakże nie wpływają na jej wysoką ocenę jako całości.

5. Wniosek końcowy

Recenzent stwierdza, że przedstawiona dysertacja doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez stosowną ustawę i stawia wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej mgr KATARZYŃĘ WOLNIEWICZ.

