

Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych
Wydział Budownictwa Architektury i Inżynierii Środowiska
Politechnika Łódzka

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Gnypa

pt. "Analiza parametryczna i weryfikacja eksperymentalna numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP"

1. Podstawa formalna wykonania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej z dnia 6 lipca 2018 r. o powołaniu recenzenta oraz na prośbę Pana Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej – prof. dr hab. Andrzeja Szłęka z dnia 18 lipca 2018 r., sformułowaną w piśmie RIE-BD/4/386/2017/2018

2. Ogólna charakterystyka pracy

Praca zawiera 143 strony tekstu, w tym 114 stron w części głównej, 4 strony streszczenia w języku polskim i angielskim oraz 16 stron spisu literatury, rysunków i tabel. Łączna liczba rysunków wynosi 78, tabel 29.

Merytoryczne rozdziały pracy poprzedza jednostronicowy spis treści oraz dwustronicowy spis oznaczeń.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów oraz spisu bibliografii. Zestawiona literatura obejmuje 54 artykuły, książki i normy oraz 39 źródeł internetowych.

Głównym celem pracy – zgodnie z tytułem pracy oraz informacjami zawartymi w rozdziale 1.3 - jest weryfikacja eksperymentalna numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP na podstawie danych o wietrzności pochodzących z pomiarów in-situ przeprowadzonych w czterech lokalizacjach. Szczególny nacisk położono na określenie wpływu orografii i szorstkości terenu na wyniki symulacji.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawia uzasadnienie podjęcia tematu, skupiając się na uwarunkowaniach rozwoju energetyki wiatrowej oraz możliwościach wykorzystania symulacji numerycznych w określeniu docelowej produktywności energetycznej planowanej farmy wiatrowej. Rozdział zawiera także sformułowanie problemu badawczego, cel i zakres pracy. Jako główną tezę pracy Autor przyjmuje stwierdzenie, że: **„Użycie numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP pozwala prawidłowo prognozować warunki wietrzności w sąsiednich lokalizacjach przy założeniach, że w bliskim otoczeniu masztu pomiarowego nie występują obszary o wysokich wartościach szorstkości terenu w szczególności na dominującym kierunku wiatru, a różnice w rzędnych terenu, klasyfikują obszar jako równinny.”**

Drugi, teoretyczny rozdział pracy obejmuje przegląd najważniejszych informacji dotyczących metod oceny zasobów wiatru. Autor opisuje procedurę wykonywania pomiarów prędkości i kierunku wiatru w terenie otwartym i przedstawia podstawowe urządzenia pomiarowe. W dalszej części charakteryzuje metody statystyczne stosowane w ocenie zasobów wiatru skupiając się na podstawowych parametrach takich jak: rozkład Weibulla czy pionowy profil średniej prędkości wiatru. Zwieńczeniem tego rozdziału pracy jest przedstawienie metod modelowania numerycznego przepływu z wykorzystaniem CFD oraz zastosowanego w pracy modelu WAsP. Autor szczegółowo omawia również równania Naviera – Stoksa oraz warunki brzegowe stosowane w analizach numerycznych.

Rozdział trzeci pracy poświęcony jest badaniom eksperymentalnym przeprowadzonym w warunkach naturalnych. Badania obejmowały między innymi pomiar podstawowych parametrów wiatru tj. prędkości i kierunku na różnych wysokościach w obrębie czterech masztów pomiarowych. Okres wykonywania pomiarów wynosił trzy lata. Autor szczegółowo opisuje lokalizację i otoczenie masztów pomiarowych oraz wykorzystaną aparaturę. Przeprowadzone badania stały się podstawą do wyznaczenia przez Autora pionowych profili prędkości wiatru, rozkładów Weibulla oraz częstości występowania wiatru w poszczególnych kierunkach.

W rozdziale czwartym przedstawiono opracowane przez Autora cyfrowe modele wysokości i szorstkości terenu, które wykorzystano w dalszej części pracy jako dane wejściowe w analizach symulacyjnych wykonanych za pomocą modelu WAsP. Model wysokościowy terenu został opracowany na podstawie danych NASA, natomiast

model szorstkości terenu bazował na danych Corine Land Cover 2012 oraz mapach lotniczych i topograficznych.

W kolejnym, piątym rozdziale Autor przedstawił symulację warunków wiatrowych przeprowadzoną za pomocą numerycznego modelu WAsP zaimplementowanego w komercyjnym programie WindPRO. Analizy mające na celu weryfikację działania modelu przeprowadzono dla czterech wariantów. Każdy z wariantów polegał na symulacji warunków wiatrowych panujących w miejscu lokalizacji jednego z czterech masztów, na podstawie danych o wietrzności, zmierzonych przy użyciu pozostałych trzech masztów pomiarowych. W konsekwencji każdy z wariantów obejmował trzy symulacje różniące się przyjętymi warunkami brzegowymi. Dodatkowo, wykorzystując metodę przedstawioną szczegółowo w roz.4., Autor określił profile ukształtowania oraz szorstkości terenu pomiędzy poszczególnymi masztami. Dane te zostały następnie uwzględnione w przeprowadzonych obliczeniach. Dla każdego rozpatrywanego wariantu określono profile średniej prędkości wiatru, parametry rozkładu Weibulla, częstości występowania wiatru w sektorach kierunkowych oraz średnią prędkość wiatru - wyznaczone na podstawie pomiarów in situ oraz na podstawie trzech symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem danych z pozostałych masztów pomiarowych.

W rozdziale szóstym Autor skupił się na analizie wpływu topografii i szorstkości terenu na otrzymane wyniki symulacji oraz dokonał oceny poprawności badań symulacyjnych wykonanych za pomocą modelu WAsP. Zaproponowany przez Autora współczynnik topograficzny terenu uwzględnia zarówno wpływ rzeźby, jak i szorstkości terenu. Może być wykorzystany do wstępnej oceny przydatności modelu. W celu określenia wpływu orografii i szorstkości terenu w bliskim sąsiedztwie masztu pomiarowego oraz uwzględnienia kierunku wykonywanych obliczeń, Autor zaproponował dodatkowo skorygowaną postać współczynnika uwzględniającą określone wagi.

Stopień dopasowania modelu WAsP określono przy pomocy współczynnika determinacji R^2 (dopasowanie rozkładu Weibulla) oraz błędu procentowego PE w odniesieniu do zmierzonej i obliczonej prędkości średniej wiatru na określonych wysokościach.

W rozdziale siódmym Autor dokonuje podsumowania i krytycznej oceny analizowanego modelu WAsP. Wykazuje, że w przypadku lokalizacji

charakteryzujących się wysokimi wartościami szorstkości terenu oraz dużymi zmianami rzędnych terenu, wyniki symulacji są nieprawidłowe.

3. Ocena merytoryczna pracy

3.1. Ocena doboru tematu pracy

Postępujące zmiany klimatyczne, stale rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną, stopniowe wyczerpywanie się nieodnawialnych źródeł energii to największe wyzwania XXI wieku. W tym kontekście rozwój nowych technologii w zakresie odnawialnych źródeł energii nabiera coraz większego znaczenia. Jedną z najintensywniej rozwijających się gałęzi energetyki odnawialnej jest energetyka wiatrowa. Aby w pełni wykorzystać jej potencjał musimy dysponować szczegółowymi informacjami dotyczącymi rzeczywistych warunków wiatrowych, które bezpośrednio przekładają się na docelową produktywność elektrowni.

W tym kontekście, tematyka poruszana w rozprawie doktorskiej mgr inż. Piotra Gnypa jest bardzo aktualna, interesująca i ważna z praktycznego punktu widzenia.

3.2. Ocena postawionej tezy i zakresu pracy

Na podstawie przeglądu literatury Doktorant postawił tezę badawczą, że numeryczny model przepływu wiatru WASP prawidłowo prognozuje warunki wietrzności w pobliżu masztu pomiarowego pod warunkiem, że w jego sąsiedztwie występują obszary o niskiej szorstkości terenu a obszar możemy zaklasyfikować jako równiny. Aby udowodnić powyższą tezę Doktorant przeprowadził analizę danych uzyskanych z badań in-situ, jak również symulacje numeryczne. W szczególności badania objęły:

- analizę danych dotyczących rozkładu prędkości i kierunku wiatru z okresu trzyletniego z czterech masztów pomiarowych,
- wyznaczenie profilu prędkości wiatru, rozkładu Weibulla oraz częstości występowania wiatru w poszczególnych sektorach kierunkowych dla każdej z czterech lokalizacji,
- opracowanie szczegółowego modelu wysokościowego terenu i modelu szorstkości terenu, zaimplementowanych do numerycznego modelu przepływu wiatru WASP,

- symulacje numeryczne warunków wietrzności dla każdej z czterech lokalizacji, odpowiadającej lokalizacji poszczególnych masztów pomiarowych. Jako warunki brzegowe w modelu symulacyjnym przyjęto wyniki pomiarów pochodzące z pozostałych trzech stacji,

- weryfikację działania modelu numerycznego polegającą na porównaniu wyników symulacji z pomiarami rzeczywistymi w odniesieniu do parametrów rozkładu Weibulla, średniej prędkości wiatru oraz profili średniej prędkości wiatru,

- dodatkową weryfikację modelu uwzględniającą wpływ topografii i szorstkości terenu, obejmującą opracowanie współczynnika topograficznego terenu,

- ocenę poprawności działania modelu WAsP polegającą na wyznaczeniu współczynników determinacji R^2 w odniesieniu do rozkładów Weibulla oraz błędu procentowego PE w przypadku prędkości średniej wiatru.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że wysokie wartości szorstkości terenu wraz z dużymi zmianami wysokości terenu, w bliskim sąsiedztwie masztu pomiarowego mają największy wpływ na ekstrapolację parametrów wietrzności z wykorzystaniem numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP. Tym samym udało się potwierdzić tezę sformułowaną we wstępnym rozdziale pracy.

3.2. Ogólna ocena wartości naukowej pracy

Opiniowaną rozprawę oceniam pozytywnie z niżej wymienionych powodów.

- Tematyka rozprawy jest aktualna i ważna zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia.
- Połączenie badań w skali rzeczywistej z badaniami symulacyjnymi jest szczególnie cenne z uwagi na możliwość weryfikacji stosowanych powszechnie modeli numerycznych
- Rozprawa zawiera obszerne i starannie opracowane wyniki trzyletnich pomiarów in situ, przeprowadzonych na czterech masztach pomiarowych
- Autor opracował oryginalne modele numeryczne rzeźby i szorstkości terenu
- Opracowanie metody oceny i weryfikacji działania numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP na podstawie zaproponowanych i wyznaczonych współczynników topograficznych terenu
- Wyniki uzyskane w pracy są interesujące poznawczo

4. Uwagi krytyczne

4.1. Uwagi ogólne

Po dokładnym zapoznaniu się z rozprawą nasuwają się następujące uwagi o charakterze ogólnym

1) Część teoretyczna pracy została potraktowana w sposób ogólnikowy. Autor nie odniósł się do wielu pozycji literatury, które bezpośrednio dotyczą badań oddziaływania topografii terenu na przepływ wiatru prowadzonych z wykorzystaniem zaawansowanych metod CFD czy w skali rzeczywistej.

2) Z uwagi na fakt, że istotnym zagadnieniem poruszonym w pracy jest wpływ szorstkości podłoża na warunki wiatrowe, należało nieco bardziej rozbudować część teoretyczną dotyczącą charakterystyki granicznej warstwy atmosfery. W szczególności - sposobów wyznaczania profili średniej prędkości wiatru, wskazując na różne podejścia (profil potęgowy, logarytmiczny). Pewnego komentarza i uwagi wymaga również kwestia wpływów termicznych na profil prędkości wiatru. Podobnie w przypadku współczynnika szorstkości należało przedstawić różne metody wyznaczania tego parametru zaproponowane przez wielu Autorów (np. klasyfikacja Weringa, Davenporta, Lorenc).

3) Rozdział 2.7. sprawia wrażenie chaotycznie skonstruowanego. Informacje dotyczące symulacji ruchu turbulentnego przeplatane są opisem ruchu laminarnego. Należało wyraźnie skupić się na opisie wykorzystanego przez Autora modelu i szczegółowo opisać podstawowe równania, założenia, ograniczenia. Brakuje również dokładnej charakterystyki warunków brzegowych, informacji na temat wielkości domeny obliczeniowej czy przyjętej siatki.

4) Wyjaśnienia wymaga zaproponowana przez Autora koncepcja współczynnika topograficznego terenu. Dlaczego w przypadku współczynnika wysokości brany jest pod uwagę stosunek wysokości, zaś w przypadku współczynnika szorstkości - stosunek pól. Na jakiej podstawie przyjęto wagi współczynnika topograficznego i współczynnika szorstkości terenu ?

4.2. Uwagi szczegółowe

- kompozycja pracy jest generalnie poprawna pod względem logicznym, ale szczegółowy układ treści nie jest do końca trafny, zdarzają się powtórzenia tych samych wątków w różnych rozdziałach.

- praca zawiera dużo błędów literowych
- wielokrotnie powtarzane są te same sformułowania w obrębie jednego akapitu
- szczegółowy opis aparatury pomiarowej zawarty w roz.2.3.1 – 2.3.4 powinien znaleźć się w roz. 3.2.
- Autor często stosuje sformułowanie profil wiatru zamiast profil średniej prędkości wiatru
- niepotrzebnie powtarzane są opisy zmiennych np. w równaniach 5-10, tym bardziej, że praca zawiera spis symboli i oznaczeń
- str. 36 dwukrotnie przytoczona jest definicja współczynnika z_0
- str. 36 akapit drugi nie ma związku z pracą
- str. 39 błędnie stosowane jest pojęcie „początkowe warunki brzegowe”
- str.53 niepotrzebnie zamieszczono rys.18, gdyż ilustruje rozkład średniej prędkości wiatru a nie siatkę obliczeniową
- str. 54 rys. 19 – błędne odwołanie do źródła
- str. 64 jaką prędkość średnią przedstawiono na rys. 29, czy jest to średnia z całego okresu pomiarowego ?
- analiza topografii – czym różni się zaproponowana przez Autora metoda oceny warunków topograficznych i szorstkości podłoża od powszechnie stosowanych metod
- str.98, tab. 19 – co oznaczają wartości w nawiasach (brak wyjaśnienia)
- str.101, tab.20 – błąd w zakresie współczynnika topograficznego terenu, powinno być 1,0 – 4,0

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Pomimo przedstawionych powyżej uwag krytycznych natury ogólnej i tych bardziej szczegółowych należy jednak stwierdzić, że opiniowana praca stanowi z pewnością oryginalną i samodzielną próbę rozwiązania problemu badawczego.

Autor wykazał się umiejętnością prowadzenia badań in-situ, analiz symulacyjnych oraz teoretycznych. Wykazał się znajomością i umiejętnością wykorzystania dostępnej wiedzy, samodzielnego planowania i prowadzenia badań, wykorzystania

nowoczesnych narzędzi badawczych. Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej opinię, uważam, że przedłożona przez mgr inż. Piotra Gnypa rozprawa doktorska pt. „Analiza parametryczna i weryfikacja eksperymentalna numerycznego modelu przepływu wiatru WAsP” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach naukowych i tytule naukowym w zakresie sztuki (Dz. U. RP, nr 65, poz. 595). W związku z tym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Dr hab. Katarzyna Klemm

