

dr hab. Andrzej Wyszogrodzki, prof. IMGW-PIB
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Państwowy Instytut Badawczy
ul. Podleśna 61, Warszawa

Warszawa, 09 grudnia 2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Paoli Porretta-Tomaszewskiej

pt. „Makroskala przestrzenna w modelowaniu stabilnej warstwy granicznej atmosfery przy użyciu statystycznych modeli turbulencji”

przygotowanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Lecha Łobockiego. Recenzja wykonana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej.

1. Struktura techniczna pracy

Przedstawiona rozprawa napisana jest w j. polskim, zawiera także streszczenie w języku angielskim, spis symboli i oznaczeń, 7 rozdziałów merytorycznych; bibliografię (100 prac), spis rysunków (21 pozycji) oraz tabel (3 pozycje). Całość pracy wypełnia łącznie 117 stron.

Poszczególne rozdziały zawierają bardzo bogatą informację dotyczącą: podstaw teoretycznych warstwy granicznej atmosfery w warunkach równowagi stabilnej i założeń teorii podobieństwa Monina-Obuchowa (rozd. 2), definicje skal przestrzennych i czasowych turbulencji a także sposoby ich określania w modelach warstwy granicznej (rozd. 3), opisują statystyczne modele turbulencji (rozd. 4), sformułowania skal przestrzennych na gruncie teorii podobieństwa Monina-Obuchowa (6.1) oraz z gradientowej teorii podobieństwa Sorbjana (6.2). Rozdział 6.3 zawiera implementację profili prędkości wiatru i temperatury potencjalnej z wykorzystaniem sformułowania integralnego do modeli Mellora-Yamady (rozd. 6.3). Główne wyniki badań zawierają analizę porównawczą literaturowych metod wyznaczania skali przestrzennej (6.1.6), oraz wyniki modelu GWARAT z zastosowaniem rozwiązania integralnego dla różnych wersji modelu Mellora-Yamady (6.4). Rozdział 7 podsumowuje wyniki tych badań.

Oceńm iż, część opisowa jest stosunkowo bogata i wyczerpująca, zaznajamia czytelnia z problematyką modelowania warstwy granicznej atmosfery w warunkach równowagi stabilnej. W części literaturowej wyszczególniona jest także jedna praca Autorki (Łobocki i Porretta-Tomaszewska 2021), w której przedstawione są kluczowe opracowania funkcji uniwersalnych. Rozdział 6.2 zawiera streszczone analiz opublikowanych w ww artykule, dotyczących zgodności wyników modelu turbulencji, skonstruowanych w ostatnim piętnastoleciu na gruncie gradientowej teorii podobieństwa stabilnej warstwy granicznej, z materiałem obserwacyjnym.

Jedna uwaga krytyczna dotycząca struktury pracy odnosi się do nieco rozrzuconych informacji opisujących metody wyznaczania skal przestrzennych turbulencji. Sformułowanie przestrzennych skal w funkcji gradientowej liczby Richardsona (Ri) z rozdziału 6.1 i 6.2 mogło by być połączone z pierwszymi definicjami tych skal w rozdziale 3.2. Podobnie prezentacja wariantów modeli Mellora-Yamady z rozdziałów 4.2-4.6 mogła by być przesunięta dalej i połączona z sekcją 6.3 gdzie implementowane są wzory profili w formach bezwymiarowych. Obecny układ pracy zmusza czytelnika do częstego przeskakiwania pomiędzy wieloma oddalonymi od siebie rozdziałami.

Drobniejsza uwaga dotyczy także pozostawiania pustych stron przed głównymi rozdziałami, co wydaje się jest w formie drukowanej uwarunkowane pomysłem rozpoczynania tychże rozdziałów zawsze od nowej kartki, co zwiększa trochę sztucznie objętość pracy.

W kwestii użytej nomenklatury, w kilku miejscach pracy wykorzystuje się dość swobodnie i zamiennie zwroty „równowaga stała” i „równowaga stabilna”. Mam zatem tutaj pytanie czy wymiennosc tych sformułowań jest w pełni jednoznaczna i w odniesieniu do warstwy granicznej atmosfery obie formy opisują dokładnie te same warunki fizyczne?

2. Tezy badawcze i aspekty nowatorskie

W rozprawie nie wypisano *explicite* tez badawczych, można je jednakże dość czytelnie wydedukować z tytułu i kontekstu pracy. Zasadniczym naukowym aspektem rozprawy jest zbadanie możliwości określania optymalnej przestrzennej makroskali turbulencji w modelach warstwy granicznej atmosfery, w warunkach równowagi stałej.

Część wstępna pracy dość dokładnie definiuje pojęcia związane z procesami turbulencji, oraz związanych z nią skal przestrzennych i czasowych. Daje czytelnikowi możliwość zapoznania się z podstawowymi zagadnieniami w modelowaniu procesów stabilnej warstwy granicznej atmosfery. Makroskala określa tu rozmiar największych wirów w widmie, które dominują pod względem udziału w całkowitej energii kinetycznej turbulencji i efektywności powodowanego mieszania (ang. energy-containing eddies). Dla danego przepływu makroskala może być interpretowana jako największa, charakterystyczna odległość, na której istnieje jeszcze znacząca, statystyczna zależność pomiędzy fluktuacjami prędkości w dwóch różnych punktach przestrzeni.

Autorka pracy wskazuje, iż makroskala turbulencji jest jednym z najważniejszych parametrów w hipotezach domykających układy równań (t.j. ewolucji drugich momentów) wykorzystywanych w modelach statystycznych turbulencji. Jak najlepsze wyznaczenie tego parametru jest kluczowe w uzyskaniu zadowalających wyników symulacji numerycznych w szerokim zakresie aplikacji. Kluczowym problemem w praktycznych zastosowaniach jest wzrost rozdzielczości przestrzennej modeli wynikający z dostępnych mocy obliczeniowych komputerów oraz z rosnących oczekiwań odbiorców w stosunku do większej dokładności oraz szczegółowości uzyskiwanych wyników.

Uwzględniając powyższe aspekty Autorka rozprawy wskazuje na konieczność dalszego udoskonalania parametryzacji drobnoskalowych procesów w modelach numerycznych. W szczególności za główny cel pracy przyjęto analizę porównawczą najczęściej stosowanych skal przestrzennych w statystycznych modelach turbulencji. Ważnym praktycznym wynikiem podjętych badań miało być opracowanie takiego rozwiązania, które pozwoliłoby zastosować proponowany schemat parametryzacji turbulencji w trójwymiarowych modelach operacyjnych.

Przedstawione w ten sposób cele badawcze wydają się wpisywać w obecne potrzeby rozwoju modeli numerycznych i wypełniają lukę w zakresie badań nad stabilną warstwą graniczną atmosfery. Autorka rozprawy nie ogranicza się tylko do porównania istniejących parametryzacji ale także sformułuje i bada własną propozycję makroskali, wyprowadzonej na gruncie gradientowej teorii podobieństwa co jest według mojej opinii wystarczające na zakres przygotowanej rozprawy doktorskiej.

3. Modele i inne narzędzia badawcze.

Wkład poznawczy pracy opiera się na przygotowaniu właściwego narzędzia badawczego w postaci modelu numerycznego zdolnego do symulacji stabilnej warstwy granicznej atmosfery oraz implementacji i przetestowania zestawu parametryzacji opisujących skale przestrzenne.

Ze względu na skomplikowaną chaotyczną strukturę zaburzeń turbulentnych w pracy wykorzystano modele pozwalające na uzyskanie miar statystycznych charakteryzujących turbulencję. Modele te w ogólności powstają z różnego stopnia modyfikacji równań Navier-Stokesa (N-S) opisujących podstawowe prawa zachowania dynamiki płynów. Statystyczne uśrednianie równań N-S wymaga dodatkowo wyznaczenia powstałych w tej procedurze wartości strumieni pędu i ciepła. Niezależne określenie strumieni w celu wyrównania liczby zmiennych i równań nazywane jest problemem domknięcia (ang. closure problem), wykorzystującym do tego celu skale czasowe lub przestrzenne charakteryzujące turbulencję w rozważanym typie przepływu.

W niniejszej pracy rozpatrywany jest model typu RANS (ang. Reynolds Averaged Navier-Stokes) z domknięciem drugiego rzędu i parametryzacjami procesów turbulencji w wersji Mellora-Yamady, szeroko stosowanymi w badawczych, jak operacyjnych modelach dynamiki atmosfery i oceanu. W modelu tym mamy do czynienia z układem równań ewolucji drugich momentów statystycznych, które zawierają większą liczbę momentów statystycznych trzeciego rzędu niż samych równań.. Autorka rozprawy koncentruje się na przebadaniu hipotezy domykającej, wykorzystującej różne formy makroskali przestrzennej.

Do weryfikacji wyników wykorzystano jednowymiarowy model warstwy przyziemnej GWARAT, działający w trybie integralnej parametryzacji warstwy przyziemnej, jak i całkowania z dużą rozdzielczością przy powierzchni ziemi. Model ten ma zaimplementowane kilka wariantów modelu turbulencji Mellora-Yamady (MY74, MY82, MY93, MYNN01 oraz MYNN09). Ta różnorodność opcji umożliwia przetestowanie metod, które mogłyby być zastosowane w modelach aplikacyjnych.

4. Wyniki eksperymentów numerycznych.

W rozdziale 6.1 (6.1.1-6.1.5) zestawiono literaturowy przegląd najczęściej spotykanych skal przestrzennych, sformułowanych na gruncie teorii podobieństwa Monina-Obuchowa: Prandtla, Deardorffa, Ellisona, Denby'a, Zilitinkevicha. Skale te zostały przekształcone w taki sposób, aby były zależne tylko od gradientowej liczby Richardsona (Ri). Pozwala to zastąpić bezpośrednie całkowanie równań transportu z wysoką rozdzielczością siatki numerycznej w obszarze warstwy przyziemnej aproksymacją rozwiązań równań modelu wyrażonych w postaci funkcji uniwersalnych.

W sekcji 6.1.6 dokonano analizy porównawczej powyższych metod wyznaczania skali przestrzennej w warunkach równowagi produkcja-dyssypacja, w którym osiąga się układ równań opisujący rozwiązania dla stanu ustalonego. Pozwoliło to dalej wyrazić stosunek owych skal do wysokości w postaci funkcji parametrów równowagi – dynamicznej i gradientowej liczby Richardsona oraz bezwymiarowej wysokości Obuchowa. Wykorzystano przy tym założenia modelu turbulencji M-Y ze zmianami Nakanishi'ego i Niino (opisanego w rozdz. 4.3).

Otrzymane funkcje uniwersalne (bezwymiarowe gradienty temperatury i prędkości wiatru) porównano z wynikami LES (DATABASE64 i SHEBA). Przeprowadzona analiza wykazała jakościową zgodność funkcji z danymi literaturowymi uzyskanymi drogą symulacji LES, przy na ogół niewielkich różnicach ilościowych zwłaszcza w obszarze silnej stabilności. Istotne różnice uwidaczniają się jedynie w przypadku drogi turbulencyjnego mieszania Prandtla, zakładającej proporcjonalność skali do wysokości przy braku zależności od stanu równowagi. Dla skal, w których model uzyskuje najwyższą zgodność z danymi doświadczalnymi, utworzono dalej rozwiązanie integralne, które pozwalają określić parametry warstwy przyziemnej.

W rozdziale 6.4 zawierającym główne wyniki numeryczne, przeprowadzono symulacje rozwoju stabilnej warstwy granicznej atmosfery w scenariuszu porównawczym modeli LES (6.4), wykorzystywanym do studium parametryzacji turbulencji stosowanych w operacyjnych modelach prognoz pogody i zmian klimatu oraz badawczych modelach dynamiki atmosfery. Zastosowano rozwiązania integralne do wyznaczenia profili wiatru i temperatury potencjalnej dla modeli turbulencji M-Y (6.3) zaimplementowanych w modelu GWARAT. Profile te powstają dla każdego wariantu modelu M-Y przy pomocy skalowania według teorii podobieństwa Monina-Obuchowa, wiążąc bezwymiarowe parametry wysokości z dynamiczną liczbą Richardsona. Zastosowano przy tym sformułowanie skali przestrzennej zaproponowanej w pracy Nakanishi'ego i Niino (2009) (NN) i porównano go z nowym skalowaniem z pracy Łobocki i Porretta-Tomaszewska (2021) (LBw).

W sekcji 6.4.3 przedstawiono ewolucję profili (temperatury potencjalnej, prędkości wiatru, kinematycznego strumienia ciepła i pędu, wariancji temperatury potencjalnej oraz TKE) w trybie integralnej parametryzacji warstwy przyziemnej (SLI) oraz bezpośredniego całkowania równań transportu (FD) przy zastosowaniu rozwiązania integralnego MYNN09.

W sekcji 6.4.4. dokonano zestawienia wyników 5ciu różnych wariantów modelu turbulencji M-Y (MY74, MY82, MY93, MYNN01 i MYNN09) z zastosowaniem podstawowej skali przestrzennej NN oraz nowego skalowania „w”. Obliczeń dokonano w trybie FD i porównano z LES w postaci wykresów modelowanych dla tych samych profili co w sekcji 6.4.3.

Sekcja 6.4.5 opisuje zmienność czasową parametrów WGA (prędkość tarciowa i wysokość) dla modeli M-Y w zależności od zastosowanej skali (w ; NN) i trybu całkowania (FD, SLI).

Prezentowane eksperymenty numeryczne w powyższych podrozdziałach wydają się w sposób w kompletny i przejrzysty oceniać charakterystyki rozwoju stabilnej warstwy granicznej atmosfery przy wykorzystaniu testowanych skalowań oraz modeli turbulencji. W szczególności, symulacje pokazują dla większości badanych parametrów dużą zgodność rozwiązań uzyskanych przy pomocy nowej skali turbulencji LBw ze skalą NN oraz z wynikami LES. Przewaga niektórych wyników skali NN może być zniwelowana odpowiednim dopasowaniem stałych modelu, zaczerpniętych z pracy źródłowej, choć

Autorka rozprawy nie zaprezentowała wyników takich optymalizacji. Wyniki modeli M-Y były zbliżone i żaden z nich nie odbiegał znacznie od innych, natomiast nieco lepiej dopasowane do wyników LES okazały się warianty MY93, MYNN01 i MYNN09. Jedną niewiadomą w prezentowanej analizie jest brak w porównaniach modelu MYNN09-CK (Canuto-Kitamury) opisanego w par. 4.4 i 4.5 oraz 6.2.1, który umożliwiał zlikwidowanie problemu szybkiego spadku turbulencji w równowadze stałej poprzez usunięcie problemu z krytyczną wartością gradientowej liczby Richardsona. Brak tego wariantu w analizie w paragrafie 6.4 nie jest w pracy wyjaśniony.

Wyniki uzyskane w trybie integralnej parametryzacji warstwy przyziemnej (SLI) są nieco bardziej zbliżone do symulacji LES w porównaniu z trybem bezpośredniego całkowania równań transportu (FD). Jest to spowodowane różnicą w rozłożeniu poziomów obliczeniowych w całkowaniu po wysokości w obu przypadkach. Tryb FD jest bardziej odpowiedni dla równowagi chwiejnej, natomiast w równowadze stałej, można stosować dłuższy krok całkowania przy powierzchni ziemi, który cechuje tryb SLI. Autorka wskazuje, iż ogólna dobra zgodność wyników w trybie SLI i FD potwierdza przydatność metody z zastosowaniem sformułowania integralnego do zastosowań praktycznych.

Wyniki symulacji numerycznych pokazują jednak widoczne różnice w porównaniu do rezultatów LES, zwłaszcza w sekcji 6.4.4, rys. 6.16 oraz 6.17 dla kinematycznych strumieni. W przedstawionej dyskusji brakuje odniesienia do tych różnic, zwłaszcza w kontekście dobrej zgodności dla pozostałych profili. Podobna sytuacja dotyczy się rozbieżności z wynikami LES parametru prędkości tarciowej na rys. 6.21 w kontekście dobrej zgodności wysokości warstwy granicznej H_{ABL} na rys. 6.20. Skąd te różnice mogą pochodzić i czy nie ograniczają one możliwości praktycznych zastosowań tych metod?

Analiza przedstawionych rozwiązań pokazuje także pewne niefizycznie wyglądające mody w danych początkowych z godziny 22:00. Dotyczy to ostrych pików w profilach kinematycznego strumienia ciepła (rys. 6.10) oraz profilach wariancji temperatury potencjalnej (rys. 6.12). Czy jest to efekt wynikający z zachowania balansu pomiędzy zmiennymi czy też jakiś inny efekt numeryczny?

Nasuwać się także ogólniejsze pytania, czy wnioski wyciągnięte z przedstawionych symulacji są dostatecznie ogólne. W szczególności dotyczy to jednowymiarowego modelu warstwy granicznej (ang. single-column model) oraz ograniczeń teorii podobieństwa przy założeniu istnienia pewnego stanu równowagowego. W zastosowaniach praktycznych, np. numerycznych prognozach pogody stosuje się modele trójwymiarowe, zawierające schematy parametryzacji pionowego transportu turbulencyjnego. Czy modele jednokolumnowe nie wykazują tutaj jakichś ograniczeń ich stosowalności?

Analiza metod opartych na teoriach podobieństwa wskazuje także na wiele ograniczeń w zależności od konkretnej metody, np. założenie stałych strumieni z wysokością lub też ich liniowe zmiany charakteryzujące quasi-ustalony stan turbulencji. Przy tym dodatkowymi ograniczeniami jest konieczność zachowania jednorodności podłoża oraz siły stabilności, od której zależą wartości i błędy strumieni pędu i ciepła. Pewnym postępowaniem jest wykorzystanie pionowych wariancji kluczowych parametrów (w funkcji gradientowej liczby Richardsona) do skalowania pionowych turbulencyjnych strumieni. Zatem pytanie czy nowe parametryzacje przedstawione w obecnej pracy polepszają zakres stosowalności tych metod w porównaniu do wcześniejszych wersji, np. tych wyprowadzanych w oryginalnych pracach Sorbjana na podstawie teorii gradientowej?

5. Końcowa ocena rozprawy.

Zaprezentowana rozprawa udowadnia, iż Autorka posiada ugruntowaną wiedzę teoretyczną w zakresie procesów fizycznych stabilnej warstwy granicznej atmosfery. Wykazała się ona umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, znajomością oraz biegłością w sferze wykorzystania zaawansowanych technik matematycznych oraz informatycznych do przeprowadzenia analizy i weryfikacji wyników. W szczególności zaprezentowany aparat matematyczny jest na bardzo wysokim poziomie zaawansowania i staranności jego prezentacji. Uzyskane wyniki mają szansę na praktyczne wykorzystanie w operacyjnych i badawczych modelach prognoz pogody i modelach dynamiki płynów. W związku z powyższym **wnioskuje o uhonorowanie Autorki pracy zasłużonym wyróżnieniem.**

Podsumowując, uważam iż recenzowana praca spełnia wymagania formalne i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim. **Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy mgr inż. Paoli Porretta-Tomaszewskiej do dalszej części przewodu doktorskiego i publicznej obrony.**

Wydział Inżynierii