

Prof. dr hab. inż. Witold ELSNER
Instytut Maszyn Ciepłych
Politechnika Częstochowska
ul. Armii Krajowej 21; 42-200 Częstochowa
tel.: (034) 3250507; e-mail: witold.elsner@pcz.pl

Częstochowa, 10.01.2023

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Moein Mohammadi:

**„Cloud Microphysical Measurements with Shadowgraph Imaging
Technique””**

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego prof. dr hab. Wojciecha Satuła w piśmie BRN-XII/531/74/2022 z dnia 15.11.2022r.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska przygotowana została pod kierunkiem Prof. dr hab. Szymona Malinowskiego. Praca została napisana w języku angielskim, zawiera 137 strony i jest podzielona na sześć rozdziałów. Na początku pracy zamieszczono oświadczenie o oryginalności pracy, streszczenia w języku angielskim i polskim oraz spis tabel i rysunków. Pracę kończy spis pozycji literaturowych związanych z tematyką rozprawy. W pracy umieszczone zostały trzy załączniki prezentujące kolejno, opis wstępnych badań laboratoryjnych przeprowadzonych przez J. L. Nowaka w Laboratorium Mechaniki Płynów Instytutu Geofizyki Uniwersytetu Warszawskiego (Załącznik A), metody korekcji danych (Modified swept method) (Załącznik B) oraz metodę filtracji danych pomiarowych (Załącznik C).

1. Ogólna charakterystyka rozprawy.

Tematyka rozprawy dotyczy zagadnień z zakresu mikrofizyki chmur atmosferycznych, w tym rozwoju metody pomiarów ich własności. Chmury odgrywają istotną rolę w procesach odpowiedzialnych za pogodę i kształtowanie klimatu a znajomość ich własności mikrofizycznych umożliwia min. opis mechanizmów powstawania opadu oraz oddziaływania zachmurzenia z promieniowaniem słonecznym.

Do pomiaru struktury wewnętrznej chmur wykorzystuje się najczęściej dwie metody, zdalną opartą o pomiary teledetekcyjne oraz *in-situ*, realizowaną w bezpośrednim kontakcie z chmurą. Praca poświęcona jest zastosowaniom tej drugiej metody. Doktorant jako swój obiekt zainteresowania wybrał przyrząd VisiSize D30, który zaprojektowany został z przeznaczeniem do zastosowań przemysłowych. przyrząd ten, produkowany przez Oxford Lasers Ltd, oparty jest na analizie rejestrowanych obrazów i pozwala na pomiar wielkości cząstek i kropli oraz ich ilości w czasie rzeczywistym. Zbadanie możliwości zastosowania tego przyrządu i rozszerzenie jego

zakresu aplikacyjnego do badań terenowych, w obecności wymagających warunków zewnętrznych, wydaje się słusznym podejściem.

Działanie przyrządu VisiSize D30 oparte jest na technice pomiarowej Particle/Droplet Imaging Analysis (PDIA). Głównym celem recenzowanej pracy było więc zbadanie możliwości zastosowania techniki PDIA do pomiaru wybranych właściwości mikrofizycznych chmur atmosferycznych, min. takich jak rozkład rozmiarów kropeł (DSD), rozkład koncentracji kropeł (DNC), czy zawartość wody w objętości pomiarowej (LWC).

Praca została zrealizowana w ramach trzech zasadniczych etapów obejmujących kolejno: badania laboratoryjne z wykorzystaniem polidispersyjnych i monodispersyjnych kropeł wody, mające na celu opracowanie odpowiednich metod korekcji danych pomiarowych dla kalibracji urządzenia, badania terenowe w stacji badań środowiskowych w niemieckich Alpach, pozwalające na analizę porównawczą VisiSize z interferometrem dopplerowskim (PDI) oraz badania terenowe pomiarów cząstek opadowych w Instytucie Geofizyki UW, których celem było sprawdzenie możliwości wykorzystania w tym celu przyrządu VisiSize i porównanie dokładności pomiarów z optycznym disdrometrem laserowym OTT Parsivel. W ramach pracy Doktorant nie ograniczył się tylko do przeprowadzenia i dokumentacji samych pomiarów, ale przedstawił również dogłębną analizę dokładności i ograniczeń badanych urządzeń z wykorzystaniem metod analizy statystycznej.

Praca dotyczy zagadnienia istotnego nie tylko z poznawczego punktu widzenia, ale również ma wartość praktyczną. W mojej ocenie podjęta tematyka poszukiwania nowych metod pomiarów własności mikrofizycznych chmur wpisuje się w światowe tendencje i jest zgodna z badaniami nad lepszym poznaniem i zrozumieniem zjawisk wpływających na pogodę i klimat na Ziemi.

Należy również stwierdzić, że tytuł rozprawy jest dobrze dobrany i właściwie oddaje jej treść. Uważam również, że tematyka badań oraz ich zakres został właściwie nakreślony i może stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej. Z formalnego punktu widzenia i obecnej klasyfikacji dyscyplin rozprawa, choć zawiera elementy z dziedzin pokrewnych sytuuje się zasadniczo w dyscyplinie Nauki Fizyczne.

2. Ocena szczegółowa.

Praca rozpoczyna się od wprowadzenia (**Rozdział 1**), które w pierwszej części zawiera charakterystykę badań eksperymentalnych struktury i własności chmur, gdzie Doktorant skoncentrował się na pomiarach bezpośrednich „*in-situ*”. Omówione są nie tylko same metody badawcze, ale również wykorzystywane instrumenty pomiarowe. Wyróżniono tu dwie kategorie urządzeń, tj. takie, które wykrywają i zliczają, w sposób ciągły, krople w bardzo małej objętości pomiarowej, oraz te wykorzystujące metodę objętościową i rejestrujące obrazy obejmujące duże ilości kropeł. Przegląd literatury w tym zakresie jest merytorycznie interesujący i jednocześnie wyczerpujący. W drugiej części **Rozdziału 1** zawarto opis stacji badań środowiskowych Schneefernerhaus (UFS) w niemieckich Alpach oraz prowadzonych tam wcześniej badań.

W tym miejscu chciałbym zwrócić uwagę, że wedle Ustawy rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, które jest sformułowane w oparciu o krytyczny przegląd literatury (ten wymóg został spełniony), który powinien stanowić tło do podejmowanej tematyki oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej. Rozprawa doktorska powinna zawierać cel, lub cele, jak również pytania, czy hipotezy badawcze. W recenzowanej pracy hipotez badawczych nie postawiono, natomiast jako cel pracy wskazano „*zbadanie możliwości zastosowania techniki PDIA i przyrządu VisiSize do pomiaru wybranych właściwości mikrofizycznych chmur atmosferycznych*”. Cel ten nie jest jednak wskazany w sposób jawny. Powyższe sformułowanie znajduje się bowiem na końcu podrozdziału 1.1 (na str. 22). Nie ma, co najczęściej spotyka się w pracach naukowych tego typu, wyodrębnionego rozdziału zatytułowanego przykładowo „Cel i zakres pracy”. Moim zdaniem brakuje tu również ważnego elementu jakim jest naukowe uzasadnienie podjęcia tematu pracy. Poprzedzające sformułowanie, że „*metoda PDIA nie była stosowana do tej pory do pomiaru kropel w chmurach atmosferycznych*” nie jest moim zdaniem wystarczające.

Rozdział 2 zawiera opis wykorzystywanej w pracy aparatury pomiarowej, tj. przyrządu VisiSize D30, sondy PDI-FPDR oraz laserowego deszczomierza OTT Parsivel. Opis ten jest wystarczająco szczegółowy, zawierający nie tylko charakterystykę ww. aparatury, ale również metodykę pomiaru i ograniczenia wynikające z zasad działania tej aparatury. Czytając ten rozdział odnosi się wrażenie, że Autor doskonale orientuje się w technice pomiarowej, w możliwościach poszczególnych urządzeń pomiarowych i rozumie zasady ich działania.

Rozdział 3 poświęcony jest badaniom laboratoryjnym i testom przyrządu VisiSize z wykorzystaniem polidispersyjnych i monodispersyjnych kropel wody. Celem prac było opracowanie metod korekcji danych pomiarowych i kalibracji urządzenia. Krople wody generowane były z wykorzystaniem generatora 1520 (FMAG) produkcji TSI Inc. Generator ten jest powszechnym narzędziem stosowanym do kalibracji spektrometrów aerozolowych i przyrządów do określania wielkości kropel. W badaniach generowano krople z zakresu 20 do ok. 57 μm . Szkoda, że w tym miejscu nie uzasadniono wyboru tego zakresu rozmiaru kropel w odniesieniu do zakresu spotykanego w chmurach i nie wskazano typowego poziomu koncentracji kropel w chmurach. Badania opisane w tym rozdziale były okazją do przetestowania nastaw parametrów (np. ustawienia powiększenia obiektywu) czy też metody filtracji danych. Zwrócono uwagę na skutki zaobserwowanych zderzeń i parowania kropel, które mogą zniekształcać wyniki pomiarów.

Jednym z ważniejszych rozdziałów pracy jest **rozdział 4**, poświęcony pomiarom terenowym w stacji UFS w Alpach. Badania z wykorzystaniem VisiSize prowadzono równolegle z zastosowaniem standardowego interferometru dopplerowskiego PDI. W trakcie całej kampanii zarejestrowano ponad 130 15-minutowych sesji pomiarowych. Pomiary takie są wymagające, zwłaszcza ze względu na zmieniającą się prędkość i kierunek wiatru oraz warunki termiczne i wilgotność. Do porównania czułości, dokładności obu urządzeń pomiarowych zdefiniowano szereg parametrów statystycznych, w tym wartość średnią, rozkład rozmiarów kropel (DSD),

rozkład koncentracji kropel (DNC), czy zawartość wody w objętości (LWC) i inne. Doktorant przeprowadził rzetelną analizę, uwzględniając zmienne warunki atmosferyczne, z zastosowaniem i bez metod metody korekcji danych, wskazując jak taka korekcja wpływa na interpretację wyników pomiarów.

Spośród zaprezentowanych porównań interesujące są diagramy przedstawione na rys. 4.11 uzupełnione o kolorową skalę prezentowanych parametrów statystycznych (tu wartości średniej i odchylenia standardowego). Podobna prezentacja dotyczy zawartości wody LWC (rys. 4.15). Jednym z najważniejszych wniosków jest stwierdzenie, że pomimo wykorzystania różnych zasad optycznych, oba przyrządy dają dość zbliżone wyniki. Doktorant zauważył, że VisiSize ze względu na ograniczenia prędkości rejestracji niedoszacowuje wartości średnie przy wyższych prędkościach wiatru. Posiada on jednak wyższą czułość niż sonda PDI w zakresie małych kropli. Ograniczeniem sondy PDI jest również rosnąca niepewność pomiarowa przy większej zmienności chwilowych prędkości. Ta ostatnia konkluzja nie jest jednak podparta stosownym uzasadnieniem.

Rozdział 5 poświęcony jest ocenie możliwości wykorzystania VisiSize do pomiarów cząstek opadowych, gdzie jako przyrząd referencyjny wykorzystano, wspomniany już wcześniej disdrometr laserowym OTT Parsivel. Ponownie wykazano, że badany przyrząd nadaje się do tego typu pomiarów, przy czym lepszą zgodność rozkładów prawdopodobieństwa DSD uzyskano w zakresie średnich wartości niż w przypadku najmniejszych rozmiarów kropel o charakterystyce mżawki. W tym ostatnim zakresie VisiSize charakteryzuje się większą dokładnością.

Praca została podsumowana w **rozdziale 6**. Podsumowanie to jest, moim zdaniem, jednak zbyt ogólne i sprowadza się głównie do powtórzenia co było realizowane w kolejnych etapach prowadzonych badań. Brak jest uwypuklenia, co jest głównym osiągnięciem pracy, jakie są jej efekty naukowe. Uważam, że cenne byłoby przytoczenie najważniejszych wyników cząstkowych, w tym zalety i ograniczenia badanego urządzenia pomiarowego a zwłaszcza podkreślenie opracowanej metodyki „postprocessingu” danych, które zawarte są w podsumowaniu kolejnych rozdziałów. Takie uzupełnienie zwiększyłoby walor poznawczy pracy.

3. Uwagi rzeczowe i redakcyjne

Poniżej przedstawiono uwagi szczegółowe dotyczące treści poszczególnych części pracy.

- brak jest spisu oznaczeń i skrótów. Autor wprowadził i posługuje się wieloma skrótami a brak ich spisu wpływa negatywnie na czytelność pracy,
- str. 58: jaka była koncentracja kropli w prowadzonym eksperymencie? Czy była zbliżona do typowej koncentracji kropel w chmurach? Czy obserwowany efekt zderzeń i odparowania na pomiar mógł być inny niż w warunkach rzeczywistych?
- parametry otoczenia (np. temperatura, ciśnienie, wilgotność) były inne niż te obecne w warunkach rzeczywistych. Jaki wpływ na zachowanie kropel w eksperymencie mogły mieć odmienne warunki?

- str. 66: Proszę o wyjaśnienie dlaczego „metoda swept” tak mocno zawyżała wartość LWC w stosunku do „transit method”?
- str. 50: Jaki jest zakres rozmiarów kropeł w chmurach? Jakie jest uzasadnienie przyjęcia generowanych eksperymentalnie kropeł w zakresie 20-57 μm ?
- jaka była miara poziomu fluktuacji prędkości, przy której uznano, że wpływa ona na odczyt sondy PDI?
- w pracy Doktorant kilkakrotnie używa pojęć, „*highly turbulent clouds*”, „*high turbulent velocity fluctuations*”. Prosiłbym o sprecyzowanie co Doktorant rozumie pod tym pojęciem. Jaka jest miara turbulencji w chmurach? Czy rzeczywiście w chmurach mamy zawsze wysoki poziom turbulencji?

4. Główne walory rozprawy

Praca dotyczy istotnej, zarówno z praktycznego jak i poznawczego punktu widzenia, problematyki pomiarów własności mikrofizycznych chmur. Pomiary te są z pewnością dużym wyzwaniem wynikającym z dużej zmienności warunków zewnętrznych w trakcie rejestracji, które wpływają na dokładność odczytów oraz na formułowane wnioski. Należy podkreślić, że podjęta tematyka dobrze wpisuje się w światowe tendencje i jest zgodna z badaniami nad lepszym poznaniem i zrozumieniem zjawisk wpływających na pogodę i klimat na Ziemi.

Poza brakiem spisu stosowanych skrótów, który wpływa na czytelność rozprawy, napisana jest ona przystępnym językiem i czyta ją się z zainteresowaniem. Doktorant umiejętnie posługuje się narzędziami z zakresu statystyki matematycznej i obróbki danych, w tym zarówno obróbki obrazu jak i szeregów liczbowych. Moim zdaniem największą zaletą proponowanej pracy jest wykazanie możliwości zastosowania przyrządu VisiSize do pomiarów terenowych oraz opracowanie i weryfikacja metod korekty danych usuwającej potencjalne błędy w interpretacji uzyskanych wyników.

5. Uwagi końcowe

Pomimo przedstawionych powyżej uwag o charakterze dyskusyjnym stwierdzam, że przedłożona do oceny rozprawa doktorska stanowi wartościowe opracowanie naukowe, a wyniki badań wzbogacają stan wiedzy dotyczący metody pomiarów własności mikrofizycznych chmur. Praca dotyczy aktualnej tematyki badawczej i jest istotna z praktycznego i poznawczego punktu widzenia. Zawartość pracy oraz jej poziom merytoryczny świadczy, że Doktorant dysponuje wiedzą oraz odpowiednim doświadczeniem w rozwiązywaniu problemów naukowych.

Należy również podkreślić, że Doktorant jest współautorem trzech publikacji naukowych zamieszczonych w indeksowanych czasopismach.

Reasumując uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Moein Mohammadi'ego, jest opracowaniem naukowym, mającym odpowiednią wartość poznawczą, co pozwala mi stwierdzić, że spełnia ona wymogi ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. 2022 poz. 574 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.

