

Dr hab. Piotr M. Korczyk

Warszawa 13.01.2023

Zakład Biosystemów i Miękkiej Materii

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

ul. Pawińskiego 5B

02-106 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Moeina Mohammadiego
pt. „Cloud Microphysical Measurements with Shadowgraph Imaging Technique”,
wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. Szymona P. Malinowskiego
na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego**

Rozprawa doktorska Pana mgra Moeina Mohammadiego została zgłoszona do recenzji decyzją Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego.

W ramach przygotowywania rozprawy opublikowane zostały trzy publikacje w renomowanych pismach, w których Pan Mohammadi jest pierwszym autorem i wniósł znaczący wkład w ich powstanie.

Praca poświęcona jest zagadnieniu pomiarów wielkości kropelek chmurowych. Rozkład wielkości kropel jest głównym ilościowym parametrem charakteryzującym mikrostrukturę chmur. Wykazuje on dużą zmienność dla różnych rodzajów chmur, jak również zmienia się w czasie wraz z ewolucją chmury. Zrozumienie procesów fizycznych i chemicznych odpowiedzialnych za powstawanie chmur, ich ewolucję i powstawanie opadu wymaga gromadzenia pomiarów *in situ* uwzględniających szeroki zakres zmiennych warunków. Kluczowe jest więc rozwijanie technik pomiarowych i zwiększanie dostępności urządzeń, które mogłyby być w masowy sposób używane do charakteryzowania chmur na stacjach pomiarowych oraz podczas lotniczych kampaniach pomiarowych.

Sam pomiar rozkładu wielkości kropel jest procesem skomplikowanym wymagającym wykorzystania wysoko-rozdzielczych układów obrazowania. Dysertacja przedstawiona przez Pana Mohammadiego dotyczy wykorzystania metody obrazowania cieniem, która jest przedstawiona jako metoda bardzo skuteczna w charakteryzowaniu rozkładu wielkości kropli, a jednocześnie

korzystna cenowo. Te cechy sprawiają, że jest ona atrakcyjna do rozpowszechnienia w pomiarach właściwości chmur.

Autor pracy proponuje wykorzystanie komercyjnego urządzenia VisiSize D30. Urządzenie to oferowane przez Oxford Lasers Ltd. zostało pierwotnie zaprojektowane do celów przemysłowych do charakterystyki aerozoli w takich zastosowaniach jak na przykład opryski w rolnictwie, farby natryskowe, gaśnice proszkowe, wtryski paliwa. Głównym celem niniejszej pracy było wykazanie, że urządzenie VisiSize D30 może być wykorzystane do pomiarów *in situ* właściwości chmur atmosferycznych. Praca prezentuje szereg serii pomiarowych wykonanych przy użyciu badanego urządzenia ich interpretację oraz porównanie z symultanicznymi pomiarami wykonanymi przy użyciu innych urządzeń pomiarowych. Badania zawierają eksperymenty laboratoryjne polegające na charakterystyce zawiesin kropeł wytworzonych przez dobrze zdefiniowane sztuczne generatory (monodispersyjne i polidispersyjne), jak również serie eksperymentów terenowych polegających na badaniu charakterystyk naturalnych chmur atmosferycznych w stacji badań środowiskowych Umweltforschungsstation Schneefernerhaus znajdującej się tuż pod szczytem Zugspitze w niemieckich Alpach. Dodatkowo przeprowadzono pomiary wielkości kropeł opadu na dachu Instytutu Geofizyki UW.

W szerszej perspektywie problem pomiarów właściwości chmur rozważany w niniejszej pracy dotyczy takich zagadnień jak prognozowanie pogody i klimatu - kluczowych w wielu aspektach działalności człowieka.

Główna część pracy poprzedzona jest streszczeniem, które opisuje przedmiot dysertacji. Streszczenie zawiera również krótkie uzasadnienie poruszanych problemów w kontekście fizyki chmur i klimatologii oraz motywację do podjęcia poruszanej w pracy tematyki. Niestety elementy te nie zostały rozwinięte szerzej w kolejnych rozdziałach pracy.

Rozdział pierwszy zawiera obszerny przegląd technik pomiarowych wykorzystywanych do ilościowego charakteryzowania chmur. Szczególnie skupiono się na metodach *in situ* w tym technice obrazowania cieniem będącej przedmiotem niniejszej rozprawy. Zamieszczono też przegląd pomiarów wykonanych na stacji Umweltforschungsstation Schneefernerhaus. Rozdział ten zawiera dużo technicznych informacji i omówienie fizycznych podstaw prezentowanych technik detekcji. Brakuje jednak bardziej obszernego i szerszego wstępu do samej mikrofizyki chmur i jej związku z pogodą i klimatem. Wielkości takie jak wodność, gęstość kropeł, czy rozkład wielkości

kropel, które są mierzone i analizowane w pracy, nie zostały szczegółowo omówione we wstępie. Dużym ułatwieniem dla czytelnika byłoby podanie definicji tych wartości, omówienia przykładowych pomiarów, podanie jednostek i konwencji, w jakich się je prezentuje.

W rozdziale drugim autor opisuje system obrazowania cieniem VisiSize D30 (Oxford Laser Ltd), którego zastosowanie w badaniu struktury chmur jest głównym przedmiotem niniejszej pracy. W paragrafie tym opisano dokładnie parametry techniczne urządzenia, jego budowę i zasadę działania. Opisano również metodologię, użytą w algorytmach mierzących wielkość kropli na podstawie jej obrazu, uwzględniając analizę halo dla rozmytego obrazu kropli, leżącej poza płaszczyzną ostrości układu obrazującego. Przedstawiono również problematykę estymacji gęstości kropel oraz pomiaru ich chwilowych prędkości przy użyciu VisiSize D30 z uwzględnieniem metodologii i użytych algorytmów.

W rozdziale drugim opisano również inne urządzenia użyte w badaniach, które służyły jako odniesienie do pomiarów uzyskanych przez VisiSize D30:

- sonda PDI (Phase Doppler Interferometer, Flight Probe – Dual Range, Atrium Technologies, Inc.) oraz
- disdrometr (OTT Parsivel, OTT Hydrometer GmbH).

Rozdział trzeci poświęcony jest badaniom laboratoryjnym na sztucznie wyprodukowanej zawieszynie monodispersyjnych kropel. W eksperymentach użyty został generator aerozolu produkujący kropelki o dobrze określonej wielkości. Pomiary wielkości kropelek wykonane przy użyciu VisiSize D30 wykazały zgodność z rozmiarami kropel deklarowanymi przez producenta generatora. W szeregu eksperymentów zauważono również efekt parowania kropel i ich koalescencji. Parowanie powodowało zmianę skośności rozkładu wielkości kropelek widoczne jako wzrost długości lewego ogona rozkładu. Natomiast zaobserwowana wielomodalność rozkładu została zinterpretowana jako efekt zlewania się kropel - maksima dla poszczególnych modów pokrywają się bardzo dobrze ze średnicami kropel będącymi całkowitymi wielokrotnościami objętości kropel początkowych. Jest to bardzo ciekawa obserwacja pokazująca potencjał tego układu doświadczalnego do badania efektywności zderzeń kropel, jak również ich parowania w procesie ewolucji aerozolu o dobrze zdefiniowanych parametrach początkowych. Pewne wstępne badania wpływu prędkości przepływu czy geometrii ograniczającej przepływ (porównanie

eksperymentów z cylindrem i bez niego) zostały zamieszczone w tej pracy i pokazują interesujący kierunek badań na przyszłość.

Rozdział czwarty jest poświęcony badaniom terenowym, gdzie VisiSize D30 został użyty do badania mikro-struktury chmur wraz z sondą PDI. Badania zostały przeprowadzone w Alpach niemieckich w obserwatorium pod szczytem Zugspitze podczas trzytygodniowej kampanii pomiarowej. Udało się w tym czasie przeprowadzić 133 udanych sesji pomiarowych, z których każda obejmowała pomiary trwające przez 15 minut. Dane z obu urządzeń zostały następnie przeanalizowane i porównane. Autor porównuje takie wartości jak rozkład wielkości kropeł, gęstość kropeł, średnia prędkość kropeł i zawartość wody. Różnice między pomiarami z obu urządzeń zostały wnikliwie omówione. Uwzględniając ograniczenia techniczne obu urządzeń, autor proponuje zastosowanie szeregu filtrów do analizy danych, które skutkują lepszą zgodnością.

Rozdział piąty opisuje pomiary rozkładu kropli opadowych przy użyciu jednocześnie VisiSize D30 oraz dysdrometru laserowego OTT Parsivel. Sesje pomiarowe zostały przeprowadzone na dachu Instytutu Geofizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Porównanie wyników z obu urządzeń wykazało dobrą zgodność pomiarów w zakresie kropeł deszczowych o średnim rozmiarze. VisiSize D30 okazał się bardziej skuteczny w detekcji małych kropli (np. mżawki).

W Rozdziale szóstym autor podsumowuje pracę. Główną konkluzją jest, że urządzenie VisiSize zostało z sukcesem zaadaptowane do pomiarów kropelek chmurowych i opadowych.

Praca została napisana poprawnie, jednak poniżej zamieszczam kilka merytorycznych uwag:

- Wprowadzenie bardzo pobieżnie traktuje tematykę fizyki atmosfery, skupiając się głównie na zagadnieniach związanych z pomiarami. Brakuje między innymi definicji wartości mierzonych w pracy takich gęstość kropeł, rozkład wielkości kropeł.
- Nie zostało jasno napisane w pracy, dlaczego wybrane zostało urządzenie VisiSize D30. Można znaleźć twierdzenie, że „obrazowanie cieniem wyróżnia się jako stosunkowo niedroga, ale zarazem bardzo skuteczna metoda optyczna do próbkowania hydrometrów in situ.” Wątek ten nie został jednak szerzej rozwinięty.

- W pracy pojawia się wiele akronimów odnoszących się głównie do technicznych terminów, które nie są powszechnie znane. Lekturę pracy ułatwiłby spis wszystkich użytych skrótów wraz ze wskazaniem miejsca w pracy, gdzie zostały one zdefiniowane.
- W rozdziale trzecim autor analizuje krople produkowane przez monodispersyjny generator, zakładając rzeczywistą wielkość kropeł zgodnie z ustawieniami urządzenia i porównuje je z wartościami zmierzonymi przez VisiSize D30. Bardziej prawidłowe byłoby zastosowanie dodatkowej metody pomiarowej potwierdzającej rzeczywistą wielkość kropeł.
- W rozdziale 4.2.1 autor wprowadza średnie potęgowe rzędu 2 i 3 (nazwane *surface mean* i *volume mean*). Nie jest jednak wyjaśnione, dlaczego autor posługuje się tymi średnimi.
- We wzorach 4.2 symbol D_2 oznacza jednocześnie średnią rzędu drugiego i średnicę drugiej zmierzonej kropli. Podobna niejednoznaczność występuje we wzorze 4.3.
- Rysunek 4.6 – analizowane percentyle pomiarów średnic oznaczone zostały jako D_{10} , D_{50} i D_{90} natomiast we wzorach 4.1 – 4.3 oznaczenia te zostały zdefiniowane jako pomiary średnic pojedynczych kropeł: 10-tej, 50-tej i 90-tej.

Pomimo pewnych niedoskonałości, praca ma dużą wartość naukową. Autor wykazał się obszerną wiedzą w zakresie pomiarów mikrofizyki chmur, metodyki tych pomiarów i dostępnych rozwiązań technicznych. Należy podkreślić, że wykonanie tak dużej liczby eksperymentów w różnych warunkach wymagało międzynarodowej współpracy. Sesje pomiarowe były prowadzone między innymi w Instytucie Maxa Plancka w Getyndze, w stacji badań środowiskowych na Zugspitze w niemieckich Alpach oraz w Instytucie Geofizyki UW. Wyniki otrzymane w toku badań realizowanych w ramach pracy doktorskiej zostały opublikowane w trzech publikacjach o zasięgu międzynarodowym, gdzie Pan Mohammadi jest pierwszym autorem.

W pracy przeanalizowano wpływ szeregu parametrów takich jak powiększenie obiektywu, zakres wielkości kropli, prędkość strumienia aerozolu, geometria układu pomiarowego, zastosowane algorytmy i filtrowanie danych. Praca stanowi więc krytyczną analizę zastosowania urządzenia VisiSize D30 do pomiarów właściwości chmur. Pokazuje niewątpliwe zalety urządzenia takie jak duża efektywność w różnych warunkach pogodowych, możliwość pomiaru zarazem

wielkości kropelek chmurowych, jak również kropli opadowych. Autor analizuje też ograniczenia urządzenia, wskazując na zakresy parametrów i wielkości kropeł, dla których jakość pomiarów nie jest satysfakcjonująca. Stanowi to cenne wskazówki dla użytkowników VisiSize D30.

Rozwój wiedzy w zakresie mechanizmów odpowiedzialnych za ewolucję rozkładu wielkości kropeł i formowanie się opadu zależy od pomiarów *in situ* wielkości kropelek. Szeroka dostępność aparatury, która to umożliwia, może dostarczyć niezbędnych danych, zebranych w różnorodnych warunkach. Niniejsza praca jest ważnym i oryginalnym przyczynkiem w tym kierunku.

Biorąc pod uwagę wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej Pana mgra Moeina Mohammadiego, stwierdzam, że oceniana praca doktorska spełnia kryteria stawiane kandydatom ubiegającym się o stopień naukowy doktora, określone w § 21 pkt 2-4 Załącznika nr 1 do uchwały nr 157 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego z dnia 29 czerwca 2022r. w sprawie określenia sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora oraz doktora habilitowanego na Uniwersytecie Warszawskim.

W związku z przedstawioną wyżej **pozytywną** oceną całej pracy doktorskiej wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego o dopuszczenie Pana mgra Moeina Mohammadiego do dalszych etapów postępowania w sprawie nadanie stopnia doktora.

