

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej
mgr inż. Piotra SEKUŁY

pt.: „Rola warunków meteorologicznych w kształtowaniu zanieczyszczenia powietrza pyłem zawieszonym PM10 w obszarach zurbanizowanych o zróżnicowanej rzeźbie terenu na przykładzie Krakowa.”

1. Podstawa recenzji

Recenzję opracowano na podstawie pisma dr hab. Łukasza Gondka, profesora AGH, Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (AGH) z dnia 30 czerwca 2022 r. (pismo nr WFiŚ-b.510-2/22/258/22). Pracę doktorską wykonano w Katedrze Zastosowań Fizyki Jądrowej, na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Promotorami pracy są dr hab. inż. Mirosław Zimnoch, prof. AGH oraz prof. dr hab. Zbigniew Ustrnul z Uniwersytetu Jagiellońskiego.

2. Uwagi wstępne

W pracy podjęto zagadnienie wpływu warunków meteorologicznych na zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego przez pył zawieszony PM10 w obszarach miejskich o zróżnicowanej rzeźbie terenu. Oceny jakości powietrza przeprowadzane corocznie przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska wykazują przekroczenia standardów jakości powietrza dla pyłu zawieszonego PM10 i PM2.5 w wielu strefach w kraju, w tym w miastach i aglomeracjach, zwłaszcza w południowej części Polski. Jakość powietrza w Krakowie – w którym przeprowadzano badania – jest szczególnie niekorzystna, co skłoniło naukowców do przeprowadzania zaawansowanych badań zanieczyszczenia atmosfery w tym mieście już od przynajmniej 40 lat. Skuteczne zarządzanie jakością powietrza wymaga przede wszystkim określenia źródeł emisji w największym stopniu odpowiedzialnych za ponadnormatywne stężenia zanieczyszczeń. Jednakże na stan zanieczyszczenia silnie wpływają także warunki rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze, a więc warunki meteorologiczne oraz rodzaj ukształtowania i pokrycia terenu. Jak wiadomo, warunki te są w Krakowie niekorzystne, co skutkuje złą jakością powietrza oraz częstym występowaniem tzw. epizodów smogowych, z bardzo niekorzystnymi skutkami dla zdrowia mieszkańców. W związku z tym wszystkie prace, które w efekcie końcowym mogą pomóc w zrozumieniu przyczyn występowania wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza są niezwykle cenne. Omawiana praca wpisuje się w europejski i światowy nurt identyfikacji przyczyn powszechnie występujących wysokich stężeń pyłu zawieszonego, stanowiących jedno z najpoważniejszych globalnych wyzwań ochrony środowiska.

A zatem podjęte przez Doktoranta badania doświadczalne, wykorzystanie pomiarów meteorologicznych i jakości powietrza zarówno naziemnych jak i w profilu pionowym, a także badania modelowe, z wykorzystaniem numerycznych modeli meteorologicznych dla zbadania wpływu warunków dyspersji na wartości stężeń pyłu PM10 w Krakowie, łączą interesującą tematykę badawczą z bieżącymi wyzwaniem z zakresu jakości powietrza atmosferycznego.

3. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska ma formę zbioru powiązanych tematycznie 5 artykułów naukowych, opublikowanych w latach 2019 – 2022 w czasopismach indeksowanych przez *Journal Citation Reports (JCR)*. Wszystkie artykuły są współautorskie, o udziale Doktoranta od 55% (3 prace) do 30% (2 prace), przy czym Doktorant jest we wszystkich artykułach pierwszym autorem. Załączone artykuły naukowe to:

- **A1:** Sekuła i in., 2019. Czasopismo *Atmosphere*, IF 2019 = 2.4; 3ci kwartył listy rankingowej JCR (Q3); Liczba autorów: 4; Udział Doktoranta 30%.
- **A2:** Sekuła i in., 2021. Czasopismo *Tellus Series B – Chemical and Physical Meteorology*, IF 2021 = 3.5; 3ci kwartył listy rankingowej JCR (Q3); Liczba autorów: 5; Udział Doktoranta 55%.
- **A3:** Sekuła i in., 2021. Czasopismo *Sensors*, IF 2021 = 3.8; 2gi kwartył listy rankingowej JCR (Q2); Liczba autorów: 6; Udział Doktoranta 30%.
- **A4:** Sekuła i in., 2021. Czasopismo *Atmospheric Chemistry and Physics*, IF 2021 = 7.2; 1szy kwartył listy rankingowej JCR (Q1); Liczba autorów: 7; Udział Doktoranta 55%.
- **A5:** Sekuła i in., 2022. Czasopismo *Sustainability*, IF 2021 = 3.9; 2gi kwartył listy rankingowej JCR (Q2); Liczba autorów: 5; Udział Doktoranta 55%.

Przedstawione artykuły zostały opublikowane w czasopismach, o współczynnikach wpływu od 2.4 do 7.2, z których jedno – *Atmospheric Chemistry and Physics* – można określić mianem czasopisma prestiżowego, jako że mieści się w obrębie pierwszego kwartyła listy rankingowej *Journal Citation Reports*, co jest warte podkreślenia i zasługuje na docenienie.

Zamieszczone w rozprawie publikacje poprzedza „Przewodnik” autorski, który przypomina tradycyjną pracę doktorską i składa się z wprowadzenia przedstawiającego dotychczasowy stan wiedzy, celu i zakresu pracy, opisu obszaru badań, opisu danych wykorzystywanych w badaniach, metod pozyskiwania i opracowywania danych, a następnie zawiera streszczenie artykułów tworzących rozprawę doktorską. Ostatnią część *Przewodnika* stanowią Posumowanie i wnioski końcowe oraz Bibliografia. Bibliografia zawiera 160 pozycji; w większości są to artykuły naukowe, w tym około 60% pozycji pochodzi z ostatnich 10 lat. Bibliografia została przygotowana bardzo starannie i poprawnie.

4. Ocena rozprawy

W ocenie przedłożonej rozprawy doktorskiej trzeba podkreślić, że podjęty temat jest bardzo ważny, zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia. Głównym celem przedstawionych w pracy doktorskiej badań jest „ilościowe określenie wpływu warunków pogodowych (o charakterze lokalnym i regionalnym) na rozkład czasowy i zróżnicowanie

przestrzenne zanieczyszczenia powietrza PM10 w dużym obszarze zurbanizowanym położonym we wklęsłej formie terenu jaki stanowi aglomeracja krakowska”. Realizacji głównego celu służyło 6 celów szczegółowych:

- rozpoznanie czasowej i przestrzennej zmienności występowania przygruntowej inwersji temperatury powietrza na terytorium Karpat Zachodnich (publikacja A1),
- identyfikacja głównych mechanizmów mających wpływ na dyspersję zanieczyszczeń w dolinie, towarzyszących wystąpieniu wiatru fenowego w okresie chłodnym (publikacja A2),
- skonstruowanie bezzałogowego systemu do pomiarów pionowych atmosfery i stworzenie procedury opracowania danych (publikacja A3),
- identyfikacja czynników atmosferycznych kształtujących dyspersję pionową zanieczyszczenia w zurbanizowanej dolinie (publikacja A3 i A4),
- wyznaczenie zależności pomiędzy poszczególnymi elementami pogody a poziomem zanieczyszczenia dla miasta zlokalizowanego w dolinie (publikacja A5),
- ilościowa ocena wpływu cyrkulacji atmosferycznej na jakość powietrza w Krakowie oraz sprawdzenie możliwości jej zastosowania do prognozowania jakości powietrza w mieście (publikacja A5).

Trzeba powiedzieć, że przygotowanie spójnego i przejrzystego *Przewodnika* do rozprawy doktorskiej będącej zbiorem powiązanych tematycznie artykułów nie jest wcale sprawą prostą. Doktorantowi udało się przedstawić swój *Przewodnik* w sposób ciekawy, logiczny, klarowny i spójny. Streszczenia artykułów tworzących rozprawę zawarte w *Przewodniku* są bardzo dobrze opracowane, przedstawiają ich ogólny cel, hipotezę, którą miały zweryfikować, streszczają uzyskane wyniki i ich dyskusję oraz przedstawiają najważniejsze wnioski. Ten sposób przedstawienia wskazuje na dojrzałość naukową Doktoranta, umiejętność przeprowadzania dyskusji otrzymanych wyników, ich klarownego streszczenia, a również umiejętność weryfikowania postawionych hipotez. O dojrzałości pracy naukowej Doktoranta świadczy również to, że w podsumowaniu pracy doktorskiej stwierdził, że nie wszystkie postawione przez niego hipotezy można potwierdzić na podstawie uzyskanych wyników. Hipoteza H1 (publikacja A1) mówiąca, że poprawa zmienności przestrzennej temperatury powietrza jest możliwa przez zmniejszenie rozdzielczości siatki obliczeniowej nie uzyskała potwierdzenia na podstawie uzyskanych wyników. Hipoteza H2, ściśle związana z zanieczyszczeniem powietrza, mówiąca o tym, że adwekcja ciepłych mas powietrza z sektora południowego negatywnie wpływa na warunki dyspersji w Krakowie okazała się nie w pełni słuszna (publikacja A2). Publikacja A3, w której opisano wyniki badań bezzałogowych statków powietrznych potwierdziła słuszność hipotezy badawczej H3 mówiącej o tym, że skonstruowany i przetestowany system AirDust do pomiarów pionowych parametrów meteorologicznych i jakości powietrza może być wykorzystany jako dodatkowe źródło danych do badań dynamiki miejskiej warstwy granicznej. Kolejna hipoteza H4, mówiąca o tym, że występowanie ścinania wiatru nad doliną przyczynia się do pogorszenia jakości powietrza poprzez modyfikację warstwy mieszania nie okazała się w pełni słuszna na podstawie badań przedstawionych w publikacji A4. Ostatnia hipoteza – H5 – została pozytywnie zweryfikowana, a mówi ona o tym, że metody uczenia maszynowego mogą być

wykorzystane do prognozowania jakości powietrza dla obszarów o dużym zróżnicowaniu terenu (publikacja A5).

Mimo bardzo pozytywnej oceny Przewodnika, mam do jego treści parę zastrzeżeń. W rozdziale przedstawiającym „Dotychczasowy stan badań” w moim odczuciu zabrakło podrozdziału zestawiającego w sposób chronologiczny liczne i różnorodne badania jakości powietrza w Krakowie, z których niektóre były pionierskie w skali Europy. Zabrakło także odniesień do kluczowych polskich monografii wydanych w XXI w., a dotyczących zagadnień które obejmuje rozprawa doktorska, a mianowicie dynamiki atmosfery, modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym, czy monografii całkowicie poświęconej zanieczyszczeniu powietrza przez drobne pyły zawieszone. Ponieważ w przewodzie doktorskim należy wykazać, że jego autor posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie, brak tych odniesień niepokoi i powoduje, że można zadać sobie pytanie: czy Doktorant nie zna tych prac? Ponadto, zdaniem recenzentki zbyt mało uwagi poświęcono sytuacji emisyjnej w Krakowie i zmianom jakie w wartościach i strukturze emisji zaszły w analizowanym obszarze w latach, których dotyczy analiza. W niewielkim rozdziale zatytułowanym „Emisja zanieczyszczeń” o emisji dowiemy się niewiele, ponadto większość rozdziału dotyczy stężeń zanieczyszczeń w powietrzu. Proszę o odniesienie się Doktoranta do tej kwestii w czasie obrony.

Poniżej odniosę się do wybranych zagadnień poruszanych w poszczególnych publikacjach. Brak możliwości potwierdzenia hipotezy H1 (publikacja A1) Doktorant tłumaczy trudnościami w odwzorowaniu warunków stabilności w atmosferze w schematach zaimplementowanych w modelach numerycznych. Jest to znany problem, którego rozwiązanie zaproponował m.in. Sorbjan (m.in. *Boundary Layer Meteorol*, 2010). Szkoda, że nie znalazło się takie odniesienie w artykule/przewodniku. Publikacja A2 dotyczy ciekawego i rzadko poruszanego zagadnienia jakim jest wpływ wiatru fenowego na strukturę warstwy granicznej oraz stężenia pyłu PM10. Przedstawiono ciekawe wyniki i ich dyskusję, z której wynika że w zależności od sposobu przemieszczania się wiatru fenowego może on poprawić lub pogorszyć warunki rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, a więc mieć pozytywny lub negatywny wpływ na jakość powietrza. Są to cenne obserwacje.

Publikacja A3 dotyczy badań właściwości warstwy granicznej atmosfery w Krakowie oraz pionowych profili jakości powietrza zrealizowanych z wykorzystaniem wielowirnikowego bezzałogowego statku powietrznego (dalej w recenzji nazywanego dronem). Wykorzystany w badaniach dron został wyposażony w systemy pomiarowe (AirDust) zaprojektowane i skonstruowane przez Zespół Fizyki Środowiska WFiIS AGH. System ten umożliwia pomiary temperatury powietrza, wilgotności względnej, ciśnienia atmosferycznego i stężenia PM10 w profilu pionowym. Drugim elementem systemu pomiarowego jest wiatromierz soniczny. Metoda badania pionowej struktury dolnej troposfery przy zastosowaniu drona jest ostatnio dość często wykorzystywana, choć moim zdaniem ilość czynników, które mogą wpływać na jakość pomiarów jest tak duża, że otrzymane wyniki mogą być bardzo często obarczone znacznym błędem. W omawianym systemie do pomiarów stężenia PM10 wykorzystano niskokosztowy czujnik oparty na metodzie rozpraszania światła diody. Pomiary wykonane przy pomocy tego typu czujników należy traktować z ogromną ostrożnością, w związku ze znanymi ograniczeniami tych metod pomiarowych. Brakuje mi zarówno w przewodniku, jak i w artykule opublikowanym w czasopiśmie *Sensors* wyjaśnienia dotyczącego stopnia komplikacji, jaki następuje pomiar stężenia masowego pyłu i co za tym idzie konieczności kalibracji wszystkich metod pomiarowych z

metodą referencyjną. Jak zrozumiałam z artykułu, w zastosowanej metodzie nastąpiła „pośrednia kalibracja”, tzn. nie kalibrowano bezpośrednio zastosowanego czujnika z metodą referencyjną, a z wynikami pomiaru wykonanego metodą optyczną uprzednio skalibrowanymi z wynikami metody referencyjnej. Niestety brakuje przedstawienia wyników tej kalibracji. Proszę o odniesienie się Doktoranta do tej kwestii w czasie obrony. O ile otrzymane profile pionowe wilgotności oraz temperatury nie budzą moich zastrzeżeń, to już otrzymane profile stężenia PM10 budzą moje duże wątpliwości. Dla przykładu profile otrzymane dla kampanii przeprowadzonej 18 września 2018 roku w godzinach między 15. a 21., przy wystąpieniu dolnej warstwy inwersji sięgającej do ok. 250 m, pokazują bardzo silne wahania stężeń w pionie sięgające do $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, co nie wydaje się prawdopodobne (Rys. 9 w publikacji A3). Pozostałe profile pokazane na Rys. 12 (21 września 2018) oraz na Rys. 17 (7 marca 2019) również nie są moim zdaniem wiarygodne. Artykuł zawiera dyskusję, w której Autorzy próbują znaleźć przyczynę takiego kształtu profili, przy czym argumentacja ta mnie nie przekonuje. Moim zdaniem kształt profili wynika z błędnych wskazań niskokosztowych czujników. Ponadto, moją wątpliwość budzi wybór analizowanych dni pomiarowych. Są to 3 dni pomiarowe, z czego każdy termin dotyczy tylko godzin przedpołudniowych, albo tylko popołudniowych. Jeśli głównym celem pracy było zbadanie dobowego przebiegu parametrów warstwy granicznej w Krakowie, zachodzi pytanie dlaczego nie przeprowadzono pomiarów ciągłych w ciągu jednego dnia. Ponadto, 2 analizowane loty dronem odbyły się we wrześniu – 18 i 21 września 2018 r., a jeden w marcu (7 marca 2019). Rozumiem, że ideą było zbadanie właściwości miejskiej warstwy granicznej w warunkach letnich i zimowych (terminy wrześniowe zostały w publikacji nazwane okresem letnim). Zachodzi pytanie dlaczego nie przeprowadzono pomiarów rzeczywiście w okresie letnim. Podsumowując ten fragment recenzji, w mojej opinii wyniki prezentowane w tej publikacji należy traktować jako bardzo wstępne.

Kolejna publikacja A4 dotyczy również badań związanych z pionowym profilem atmosfery, ale badania były przeprowadzone przy wykorzystaniu balonu wyposażonego w urządzenia pomiarowe. Obserwacje zostały uzupełnione pomiarami naziemnymi oraz wynikami prognoz numerycznego modelu meteorologicznego AROME. Uzyskane w tej pracy pionowe profile stężenia PM10 (od 0 do 250 m) podzielono na 3 charakterystyczne typy. Wyniki przedstawione na Rys. 5 (Publikacja A4) są moim zdaniem cennym wkładem w naszą wiedzę o pionowym rozkładzie zanieczyszczenia powietrza. Cenne są również analizy przedstawione w tym artykule, które wiążą 3 zdefiniowane typy zanieczyszczenia z konkretną sytuacją meteorologiczną, w tym występowaniem ścinania wiatru nad doliną.

Głównym celem kolejnej publikacji (Publikacja A5) była ocena wpływu cyrkulacji atmosferycznej na jakość powietrza w Krakowie oparta na długich współczesnych seriach danych. Okres badań obejmował 20 lat (2000 – 2020). W badaniach wykorzystano różne wskaźniki statystyczne, narzędzia meteorologii synoptycznej oraz metody uczenia maszynowego Random Forests i regresji wielorakiej. Badania pozwoliły na wyróżnienie typów cyrkulacji, dla których występuje najwyższe prawdopodobieństwo wystąpienia szczególnie wysokich stężeń PM10 lub znacznej poprawy jakości powietrza z porównaniu z dniem poprzednim. Porównanie modeli statystycznych wykazało, że wyniki uzyskane z modeli Random Forests były lepiej zgodne z obserwacjami niż prognozy otrzymane z modeli regresji wielorakiej. Nowością jaką przynosi ta praca jest wskazanie, że oprócz parametrów meteorologicznych, których wpływ na jakość powietrza jest dobrze poznany (temperatura powietrza, prędkość wiatru, gradient pionowy

temperatury powietrza) kluczowymi czynnikami determinującymi stężenie PM10 w Krakowie są także gradient pionowy względnej wilgotności powietrza oraz zjawisko ścinania wiatru w dolinie.

Poza przedstawionymi powyżej uwagami ogólnymi, nasuwają się uwagi i komentarze szczegółowe przedstawione poniżej.

4.1 Uwagi szczegółowe

1. Zanieczyszczenia pyłowe nazywane są w pracy błędnie „cząsteczkami pyłu”. Prawidłowa nazwa to „cząstka pyłu” (z ang. particle). „Cząsteczka” zarezerwowana jest dla molekuly.
2. Wielokrotnie pojawiające się sformułowanie „poziomy stężenie” jest nieprawidłowe. W dziedzinie zanieczyszczenia i ochrony powietrza pojęcia „poziom” i „stężenie” są używane wymiennie (np. w polskim prawodawstwie standardem jakości powietrza jest poziom dopuszczalny). Zatem sformułowanie „poziomy stężenie” jest niepoprawne, należy mówić o „wartościach stężeń”.
3. Sformułowanie „niska emisja” jest nieprawidłowe. W pracy naukowej nie powinno się pojawiać (można ew. stosować zapis tzw. niska emisja, wyjaśniając o jakie źródła emisji chodzi).


5. Podsumowanie recenzji

Podsumowując przedstawioną ocenę rozprawy doktorskiej można stwierdzić, że mimo uwag i zastrzeżeń przedstawionych w punkcie 4. recenzji, należy uznać, że badania zostały przeprowadzone poprawnie i pozwoliły na uzyskanie bardzo wartościowych wyników. Praca doktorska przedstawia bardzo szeroki zakres badań, w tym dotyczący zagadnień charakterystyki pionowej struktury miejskiej warstwy granicznej i jej wpływu na jakość powietrza, co stanowi oryginalny wkład w rozwiązanie problemu naukowego. Praca posiada duże walory poznawcze, podejmuje ważne i aktualne badania o dużym stopniu trudności i zasługuje na pozytywną ocenę. Należy docenić wykonaną przez Doktoranta pracę badawczo-pomiarową oraz umiejętne zastosowanie modeli numerycznych i statystycznych, co wnosi pozytywne efekty w rozwój wiedzy w zakresie charakterystyki zanieczyszczeń pyłowych w mieście. Dalszy rozwój zastosowanych narzędzi może zaowocować kolejnym pogłębieniem wiedzy na temat zanieczyszczeń pyłowych w Krakowie i innych miastach o skomplikowanej rzeźbie terenu.

6. Wniosek końcowy

Odnosząc się do aktualnie obowiązujących aktów prawnych (Dz.U. 2003, nr 65, poz. 595, z późn. zm.; Dz.U. 2018, poz. 1669, z późn. zm.) rozprawa doktorska przygotowana pod opieką promotora lub promotorów powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazać ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Na podstawie przekazanej do recenzji rozprawy doktorskiej stwierdzam, że **oceniana rozprawa doktorska mgr inż. Piotra SEKUŁY, pt.: „Rola warunków meteorologicznych w kształtowaniu zanieczyszczenia powietrza pyłem zawieszonym PM10 w obszarach zurbanizowanych o zróżnicowanej rzeźbie terenu na przykładzie Krakowa.”** spełnia podane wymagania. Treść rozprawy potwierdza wiedzę teoretyczną Doktoranta, a sprecyzowanie tezy, celu i zakresu badań, ich zaplanowanie, wykonanie i opis, a także interpretacja wyników świadczą o dojrzałości naukowej Doktoranta i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie o **dopuszczenie mgr inż. Piotra Sekuły do dalszego postępowania kwalifikacyjnego przewidzianego w procedurze uzyskania stopnia doktora.**

Równocześnie, z uwagi na wysoką wartość naukową rozprawy, rezerwuję sobie prawo do wystąpienia o wyróżnienie po obronie pracy doktorskiej.


Katarzyna Juda-Rezler