

Katowice, 22.07.2022

dr hab. inż. Barbara Sensuła, prof. PŚ
Politechnika Śląska
Instytut Fizyki - Centrum Naukowo-Dydaktyczne
Zakład Geochronologii i Badań Izotopowych Środowiska
ul. Konarskiego 22B
44-100 Gliwice

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy doktorskiej:

Rola warunków meteorologicznych w kształtowaniu zanieczyszczenia powietrza pyłem zawieszonym PM₁₀ w obszarach zurbanizowanych o zróżnicowanej rzeźbie terenu na przykładzie Krakowa

Autor rozprawy doktorskiej: **mgr inż. Piotr Paweł Sekuła**

I Promotor: dr hab. inż. Mirosław Zimnoch, prof. AGH

II Promotor: prof. dr hab. Zbigniew Ustrnul

Dziedzina nauk ścisłych i przyrodniczych

Dyscyplina: Nauki Fizyczne

Praca wykonana w: Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Katedra Zastosowań Fizyki Jądrowej

Ocena układu rozprawy doktorskiej, informacje o poszczególnych częściach składowych

- Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy ważnego i aktualnego zagadnienia związanego z modelowaniem i określeniem roli warunków meteorologicznych w kształtowaniu zanieczyszczenia powietrza pyłem zawieszonym w obszarze o zróżnicowanej rzeźbie terenu. Rozprawa doktorska ma formę zbioru opublikowanych artykułów i składa się ze spisu treści, streszczenia, listy publikacji autora rozprawy, wprowadzenia wraz z przedstawieniem dotychczasowego stanu badań, sześciu rozdziałów (podzielonych na podrozdziały), podsumowania i wniosków, bibliografii (160 pozycji polskich jak i zagranicznych, w tym bazy danych; cytowane prace stanowią dokumenty publikowane od 1901 roku do najnowszych), wykazu publikacji spoza rozprawy, wykazu siedmiu grantów oraz staży naukowych, listy siedmiu wystąpień konferencyjnych i seminaryjnych, deklaracji wkładu współautorów publikacji oraz publikacji:

- A1. Sekula P., Bokwa A., Bochenek B., Zimnoch M. (2019). Prediction of Air Temperature in the Polish Western Carpathian Mountains with the ALADIN-HIRLAM Numerical Weather Prediction System. *Atmosphere*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/atmos10040186>
- A2. Sekula P., Bokwa A., Ustrnul Z., Zimnoch M., Bochenek B. (2021). The impact of a foehn wind on PM10 concentrations and the urban boundary layer in complex terrain: a case study from Krakow, Poland. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 73(1). <https://doi.org/10.1080/16000889.2021.1933780>
- A3. Sekula P., Zimnoch M., Bartyzel J., Bokwa A., Kud M., Necki J. (2021). Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics. *Sensors*, 21(9). <https://doi.org/10.3390/s21092920>
- A4. Sekula P., Bokwa A., Bartyzel J., Bochenek B., Chmura L., Galkowski M., Zimnoch M. (2021). Measurement report: Effect of wind shear on PM10 concentration vertical structure in the urban boundary layer in a complex terrain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(15), 12113- 12139. <https://doi.org/10.5194/acp-21-12113-2021>
- A5. Sekula P., Zbigniew U., Bokwa A., Bochenek B., Zimnoch M. (2022). Random Forests Assessment of the Role of Atmospheric Circulation in PM10 in an Urban Area with Complex Topography. *Sustainability*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/su14063388>

We wprowadzeniu rozprawy doktorskiej przedstawiony został dotychczasowy stan badań, w tym: czynniki kształtujące lokalne warunki dyspersji zanieczyszczeń powietrza w miejskiej warstwie granicznej, metody pomiarów parametrów atmosfery w profilu pionowym, numeryczne modele prognoz pogody, badania wpływu warunków pogodowych na stężenia zanieczyszczeń powietrza w Polsce.

W drugiej części pracy doktorskiej zostały omówione: koncepcja pracy oraz główne i szczegółowe cele wraz z hipotezami badawczymi.

W trzeciej części omówiono obszar badań uwzględniając ukształtowania terenu oraz aspekty związane z emisją zanieczyszczeń.

W czwartej części zostały przedstawione i omówione: dane wykorzystane w badaniach, charakterystyka naziemnych stacji meteorologicznych oraz stacji badających jakość powietrza, informacje o badaniach w profilu pionowym stanu atmosfery i klasyfikację cyrkulacji atmosferycznej oraz numeryczne modele prognoz pogody.

Kandydat do stopnia doktora wskazał kryterium wystąpienia wiatru fenowego, w oparciu o kryteria innych badaczy, na podstawie którego wyznaczył epizody trwania wiatru fenowego w Karpatach i dokonał weryfikacji wystąpienia wiatru fenowego na terenie Krakowa i okolic. Metody pozyskania i opracowania danych zostały przedstawione w kolejnej części pracy. Pomiary stratyfikacji pionowej atmosfery oraz stężenia PM₁₀ w profilu pionowym przedstawione w niniejszej pracy zostały wykonane z wykorzystaniem bezałogowego statku powietrznego i balonu na uwięzi. W tej części pracy omówione zostały również sposoby opracowania danych pomiarowych systemu AirDust (kalibracja, usunięcie szumów, korekty, dopasowanie, analiza błędów pomiarowych). Przedstawiona została również klasyfikacja

profilu pionowych zanieczyszczeń PM₁₀ oraz metoda uczenia maszynowego oparta na konstruowaniu drzew decyzyjnych stosowana do regresji i klasyfikacji.

Szóstą część pracy doktorskiej stanowią streszczenia publikacji naukowych tworzących rozprawę doktorską, w których autor omawia cele, przedstawia wyniki oraz przeprowadza dyskusję wyników przedstawioną w każdej z publikacji.

Siódmą część pracy stanowią: podsumowanie i wnioski. W tej części rozprawy stawiane hipotezy badawcze poddane są krytyce, która potwierdza lub zaprzecza ich słuszności.

Wszystkie artykuły naukowe stanowiące podstawę rozprawy zostały dołączone do rozprawy. Dorobek naukowy, stanowiący podstawę pracy doktorskiej stanowią recenzowane artykuły opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym.

Układ rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie.

Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Od strony językowej i formalnej recenzowana dysertacja doktorska może zostać pozytywnie oceniona. Jak w każdym tego typu opracowaniu, również i w pracy przedstawionej przez Kandydata do stopnia doktora, można znaleźć drobne błędy edytorskie, gramatyczne, ortograficzne np.:

- strona 4: w drugim akapicie tekst powinien stanowić ciągłość bez podziału pomiędzy 5 i 6 wierszem,
- strona 11: jest: „ jest on silnie zależy od”, „transport drogowy (10%). (EEA,2021)”,
- strona 18: jest: „profilu pionowym w chłodnej porze roku co zostało zaprezentowane” brakuje przecinka
- strona 18: „Badania występowania mgły w okresie 1966–2015 w Krakowie wskazały, że znaczący trend malejący tego zjawiska w okresie chłodnym związany jest z poprawą jakości powietrza” podczas, gdy na stronie 21 można przeczytać: „Zjawisko niskiej emisji występuje zwykle w okresie jesienno–zimowym, kiedy ze względu na niskie temperatury konieczne jest zwiększenie zużycia paliwa w celach ogrzania budynków”. Zwiększenie zużycia paliwa w celu ogrzania budynków wskazywałoby na wzrost emisji zanieczyszczeń do atmosfery i nie stanowi poprawy jakości powietrza w okresie chłodnym
- strona 29: ryc.6c) opis osi powinien zawierać informację jaka wielkość fizyczna jest przedstawiona a nie tylko jednostkę i obszar badań
- strona 39: jest: „Epizody które zostały zaklasyfikowane do powyższej...” brakuje przecinka
- strona 41: jest: „są zbieżne się z obserwacjami”
- strona 41: jest: „50–100 n.p.g.”, brakuje m
- strona 46: jest: „korelacja pomiarów z pomiaru”
- strona 46: opis pod rysunkiem jest: „R-kwadrat (c) oraz (d) balon widokowy” wg przyjętej kolejności powinno być „R-kwadrat (c) oraz balon widokowy (d)”
- strona 49: 13 linia i 14 linia powinny stanowić kontynuację tekstu

- strona 49: jest: „Ponadto, w dniach o wysokim poziomie stężenia PM₁₀ często obserwowane było lokalne minimum wilgotności względnej powietrza na poziomie 925 hPa”, prawdopodobnie jest to skrót myślowy i powinno być raczej: „Ponadto, na poziomie (...) 925 hPa, w dniach o wysokim poziomie stężenia PM₁₀ często obserwowane było lokalne minimum wilgotności względnej powietrza”.
- strona 53: jest: „jest bezsprzeczny co zostało wielokrotnie” brakuje przecinka
- strona 53: jest: „nie udokumentowanych”

Wskazanie oraz ocena celu pracy Kandydata do stopnia doktora

Praca doktorska przedstawia analizę warunków dyspersji kształtowanych przez procesy atmosferyczne modyfikowane przez rzeźbę oraz zagospodarowanie terenu. Głównym celem pracy doktorskiej było ilościowe określenie wpływu warunków pogodowych (zarówno o charakterze lokalnym, jak i regionalnym) na rozkład czasowy i zróżnicowanie przestrzenne zanieczyszczenia powietrza PM₁₀ w obszarze zurbanizowanym o zróżnicowanej formie terenu. Analiza została wykonana z wykorzystaniem nowoczesnych technik pomiarowych i metod badawczych.

Kandydat do stopnia doktora postawił pięć hipotez badawczych: (1) zwiększenie rozdzielczości przestrzennej i pionowej siatki numerycznych modeli prognoz pogody na terenach górskich znacząco poprawia dokładność prognoz temperatury (2) adwekcja ciepłych i suchych mas powietrza w sezonie chłodnym z sektora południowego (w tym wiatru halnego) negatywnie wpływa na warunki dyspersji w Krakowie modyfikując strukturę miejskiej warstwy granicznej (3) bezzałogowe statki powietrzne mogą być wykorzystane w miastach do profilowania miejskiej warstwy granicznej, dostarczając dodatkowych informacji o dynamice struktury pionowej atmosfery (4) występowanie ścinania wiatru nad doliną przyczynia się do pogorszenia warunków aerosanitarnych poprzez modyfikację wysokości warstwy mieszania (5) metody uczenia maszynowego mogą być wykorzystane do prognozowania jakości powietrza dla obszarów o dużym zróżnicowaniu terenu.

W przedstawionej rozprawie doktorskiej oraz w artykułach naukowych stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej hipotezy te zostały zweryfikowane i poddane krytyce.

Rozprawę doktorską od strony postawionych celów i hipotez badawczych oceniam pozytywnie.

Wskazania oraz ocena zastosowanych metod badawczych oraz omówienia wyników badań

Badania naukowe zostały wykonane z wykorzystaniem wyników pomiarów meteorologicznych i jakości powietrza. Nowoczesne metody pomiarowe (układy pomiarowy umieszczone m.in. w bezzałogowych statkach powietrznych i balonie na uwięzi) pozwoliły na uzyskanie danych naziemnych oraz dla profilu pionowego oraz na przeprowadzenie modelowania. W pracy doktorskiej wskazano słabe i mocne strony różnych współczesnych metod badawczych, takich jak pomiary stacjonarne z wykorzystaniem lokalnej infrastruktury

(maszt, wieża nadawcza), pomiary naziemne w profilu pionowym doliny, wykorzystanie balonów, statków powietrznych, czujników opartych na emisji wiązki akustycznej (SODAR) oraz lasera (LIDAR).

Układy pomiarowe (przedstawione na ryc. 4 i 5 i 6 pracy doktorskiej) umożliwiające wykonywanie pomiarów pionowych atmosfery z wykorzystaniem dronów jak i balonów na uwięzi zostały wykonane przez badaczy z zespołu Fizyki Środowiska Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Pomiary pionowe parametrów meteorologicznych i stężenia PM_{10} zostały wykonane we współpracy z firmą Balon Widokowy Sp. z o. o. (<http://balonwidokowy.pl/>).

W pracy doktorskiej szczegółowo zostały omówiono metody kalibracji urządzeń i przetwarzania danych pomiarowych (w tym metody usunięcia szumów, korekty, dopasowania oraz analizy błędów pomiarowych, metodę analizy danych w oparciu o uczenie maszynowe (Random Forest) w celu określenia zależności między poziomem stężeń PM_{10} a warunkami meteorologicznymi w Krakowie). W badaniach wykorzystano wyniki prognoz numerycznych modeli meteorologicznych, reanalizy atmosferyczne dla różnych typów cyrkulacji atmosferycznej. Spójne szeregi czasowe opracowano na podstawie danych modelowych i obserwacyjnych z dużą rozdzielczością czasową i przestrzenną.

Kandydat do stopnia doktora wraz z zespołem badaczy przedstawił (publikacja A1) ilościowe porównanie różnych konfiguracji modeli numerycznych prognoz pogody pod względem prognozowanej temperatury powietrza a także stratyfikacji pionowej atmosfery dla obszaru o dużym zróżnicowaniu terenu. W wyniku badań wyodrębniono charakterystyczne sytuacje synoptyczne towarzyszące zawyżeniu prognozowanej temperatury powietrza a także zweryfikowano hipotezę dotyczącą poprawy jakości prognoz poprzez zmianę rozdzielczości siatki obliczeniowej (rozdzielczość przestrzenna i pionowa modelu). Problem reprezentacji stabilnej warstwy atmosfery w operacyjnych modelach numerycznych okazał się być złożony. W publikacji A2, przedstawiono analizę warunków meteorologicznych oraz jakości powietrza towarzyszących wystąpieniu wiatru fenowego w okresie chłodnym. Badania potwierdziły, że w przypadku Krakowa kluczowym czynnikiem modyfikującym warunki pogodowe w skali lokalnej jest rzeźba terenu. Krytyczna hipoteza, przedstawiona w pracy mówiąca, że adwekcja ciepłych mas powietrza z sektora południowego negatywnie wpływa na warunki dyspersji w Krakowie okazała się być nie w pełni słuszną. Badania pozwoliły na określenie trzech rodzajów transportu wiatru fenowego zależne od lokalnych warunków atmosferycznych oraz charakterystyki fenu. Profilowanie pionowe z wykorzystaniem bezzałogowych statków oraz balonu na uwięzi (publikacji A3 i A4) umożliwiły identyfikację czynników atmosferycznych kształtujących dyspersję pionową zanieczyszczenia w dolinie w znacznym stopniu zurbanizowanej. Autorzy zauważają, że wystąpienie silnego ścinania wiatru może powodować wzrost wysokości warstwy mieszania, usuwanie zanieczyszczenia przy zaniku ruchów konwekcyjnych, ale również ograniczenia rozwoju warstwy mieszania poprzez separację mas powietrza w dolinie i ponad nią (ścinanie wiatru powyżej warstwy inwersyjnej). Publikacja A5 przedstawia ilościową ocenę wpływu cyrkulacji atmosferycznej na jakość powietrza w Krakowie i możliwości ich zastosowania do prognozowania jakości powietrza w mieście.

Wyniki badań pozwoliły na ilościowe określenie zależności pomiędzy poszczególnymi elementami pogody a poziomem zanieczyszczenia w mieście. Badania zrealizowane z wykorzystaniem modelu *Random Forests* wskazały, że prócz dobrze poznanych parametrów, takich jak: temperatura powietrza, prędkość wiatru oraz gradient pionowy temperatury powietrza, kluczowymi czynnikami determinującymi poziom stężenia zanieczyszczenia PM₁₀ są gradient pionowy względnej wilgotności powietrza oraz uskok wiatru w najniższej warstwie troposfery.

Rozprawę doktorską od strony metod badawczych i omówienia wyników badań oceniam pozytywnie.

Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Na podstawie przeprowadzonych analiz, Kandydat do stopnia doktora zauważył, że:

a) zwiększenie rozdzielczości przestrzennej siatki modelu numerycznego nie jest wystarczające do lepszego odwzorowania warunków stabilnej atmosfery w obszarze o dużym zróżnicowaniu topograficznym,

b) wpływ wiatru halnego na poziom stężenia zanieczyszczenia nie jest jednoznaczny i zależy od struktury atmosfery oraz dynamiki tego zjawiska,

c) zastosowanie wielowirnikowych bezzałogowych statków powietrznych umożliwia dokładne profilowanie atmosfery miejskiej warstwy granicznej,

d) wpływ pionowego ścinania wiatru na strukturę pionową zanieczyszczenia powietrza nie jest jednoznaczny i zależy od warunków atmosferycznych i dynamiki tego zjawiska,

e) wpływ lokalnej rzeźby terenu na dynamikę miejskiej warstwy granicznej na obszarze aglomeracji krakowskiej jest bezsprzeczny co zostało wielokrotnie potwierdzone w skali mikroklimatycznej,

f) wpływ wybranych typów cyrkulacji atmosferycznej na jakość powietrza w Krakowie został jednoznacznie potwierdzony, choć zaznaczają się pewne różnice w stosunku do wcześniejszego stanu badań,

g) zastosowanie metod uczenia maszynowego pozwala na znaczącą poprawę dokładności oceny jakości powietrza w warunkach zróżnicowanej rzeźby i zagospodarowania terenu.

Krytyczna analiza wyników i metod badawczych, wskazuje, że liczne aspekty dotyczące zależności zanieczyszczenia powietrza od warunków atmosferycznych wciąż nie doczekały się pełnego wyjaśnienia i potwierdzenia. Uwzględnienie wielu rodzajów danych meteorologicznych, środowiskowych i modelowych a także zastosowanie nowych metod i technik badawczych pozwoliło na sformułowanie nowych stwierdzeń. Zdaniem autora rozprawy, można stwierdzić, że choć wszystkie badania zostały przeprowadzone na przykładzie Krakowa, dużej aglomeracji miejskiej zlokalizowanej w znaczącym stopniu w dnie doliny Wisły, to ich wyniki można odnieść do obszarów podobnie uwarunkowanych geograficznie i urbanistycznie nie tylko w Polsce. Uzyskane wyniki mogą mieć więc prawdopodobnie zastosowanie w skali lokalnej, regionalnej i globalnej, jednak muszą być

poprzedzone wnikliwym rozpoznaniem lokalnych warunków meteorologicznych oraz środowiskowych.

Wyniki badań mogą być wykorzystane w dalszych pracach nad wpływem zjawisk atmosferycznych na jakość powietrza w obszarach miejskich charakteryzujących się znaczącym zróżnicowaniem rzeźby terenu. Stanowią znaczący wkład do modelowania warunków dyspersji zanieczyszczeń, w tym zwłaszcza prognoz jakości powietrza.

Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej i inne uwagi

- Z przedłożonej pracy doktorskiej wynika, że Kandydat do stopnia doktora współpracował z badaczami z Zespołu Fizyki Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej jak i z Centrum Modelowania Meteorologicznego ALADIN, którzy umożliwili doktorantowi realizację własnych prac badawczych w ramach szerokorozumianej współpracy naukowej. W deklaracjach o udziale merytorycznym współautorów jest podana dość ogólna informacja o udziale merytorycznym poszczególnych współautorów. Trudno na tej podstawie jednoznacznie określić, które badania są autorskie. Warto byłoby uzupełnić deklaracje o dokładniejszy opis, który jednoznacznie wskazywałby, co jest autorską i samodzielną pracą Kandydata do stopnia doktora. Należy jednak podkreślić, że doktorant jest pierwszym autorem wszystkich pięciu artykułów, stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej i jego udział w powstaniu artykułów jest określony od 30% (w dwóch artykułach) do 55% (w trzech artykułach).
- Badania opisane w rozprawie były finansowane z budżetu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr projektu nr 16.16.220.842 B02 oraz Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój, nr projektu POWR.03.02.00-00-I004/16, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej. Warto byłoby numery projektów i nazw programów uzupełnić o informację dotyczącą tytułu realizowanych prac.
- Strona 14: „Badania wykonane dla Górnego Śląska, obszaru o podobnych problemach co rozpatrywany w niniejszej pracy wykazały, że czynnikami które kontrolują rozwój przygruntowej warstwy inwersyjnej są prędkość wiatru (Łupikasza i Niedźwiedź, 2022), występowanie pokrywy śnieżnej (Green i in., 2015), bryzy morskiej (Zhou i in., 2019) czy też bryzy miejskiej (Abbassi i in., 2020)”. Część z cytowanych prac nie dotyczy badań wykonanych dla Górnego Śląska ale innych obszarów np. Australii czy Chin.
- Strona 32: „współczynnik korelacji R^2 ”, R -jest współczynnikiem korelacji, R^2 to współczynnik determinacji.
- Strona 17: „Analiza wskazała, że zanieczyszczenie powietrza związane z silnym spalaniem biomasy pochodziło głównie z pożarów w Europie (obszar Ukrainy) oraz Północnej Ameryki” brakuje odniesienia do literatury dotyczącej badań prowadzonych dla obszaru Ukrainy.
- W rozprawie używane jest często TKE (strona 41, 44, 45, 47)- skrót nie został wyjaśniony

- Strona 49: Sezon chłodny to „półrocze ciepłe, trwające od kwietnia do września oraz półrocze chłodne, od października do marca”, strona 45: „dwa sezony chłodne (IX 2018 – IV 2019 i IX 2019 – IV 2020)”. Jakimi parametrami kierowano się określając początek i koniec sezonu chłodnego? Skąd wynika różny podział na sezon chłodny i sezon ciepły?

Ocena czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Ocena czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Dysertacja prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora w dyscyplinie Nauk Fizycznych oraz wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Spełnione są merytoryczne i formalne wymagania stawiane ustawowo rozprawie doktorskiej (art. 187 ustawy z dn. 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, tj. Dz.U. z 2021. Poz 487 z późn. zm). Na tej podstawie oceniam pracę pozytywnie oraz wnioskuję o dopuszczenie do dalszego etapu przewodu doktorskiego i publicznej obrony pracy doktorskiej.

