



dr hab. inż. Marta Staniszevska, prof. UG
Wydział Oceanografii i Geografii
Katedra Oceanografii Chemicznej i Geologii Morza
Uniwersytet Gdański
Al. Marszałka Piłsudskiego 46
81-378 Gdynia

Gdynia, 5.07.2023

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Przemysława Furmana
pt. „IDENTYFIKACJA STOPNIA NARAŻENIA SPOŁECZNOŚCI NA WYBRANE
KSENOBIOTYKI Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY ZANIECZYSZCZENIA
POWIETRZA ORAZ MODELI TRANSPORTU ZANIECZYSZCZEŃ I
ALGORYTMÓW UCZENIA MASZYNOWEGO”**

wykonanej na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im.
Stanisława Staszica w Krakowie pod kierunkiem promotorów rozprawy:

dr hab. inż. Mirosław Zimnoch, prof. AGH
oraz dr hab. inż. Katarzyna Styszko, prof. AGH
Wydział Energetyki i Paliw AGH

wykonana na wniosek
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne AGH
Prof. dr hab. Janusza Wolnego

W przedstawionej mi do recenzji rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Przemysława Furmana poruszony jest ważny aspekt zanieczyszczenia powietrza w kontekście szybkiego ostrzegania, reagowania na jego zły stan w obszarze dużych skupisk ludzkich. W tym celu starano się opracować szybki, prosty oraz tani system ostrzegania przed potencjalnym zagrożeniem zanieczyszczenia powietrza w oparciu o najnowsze narzędzia numeryczne. Praca łączy analizy środowiskowe w oparciu o rzeczywiste pomiary składu chemicznego frakcji pyłu zawieszonego PM₁₀, danych meteorologicznych, trajektorii mas powietrza oraz modeli transportu zanieczyszczeń, a także algorytmy uczenia maszynowego. Założeniem pracy jest opracowanie nowego modelu, który w oparciu o dane historyczne stężenia pyłu, wybranych

zanieczyszczeń, warunków meteorologicznych, z wysokim prawdopodobieństwem, może przewidzieć narażenie na dane zanieczyszczenie w danym miejscu w niedalekiej przyszłości.

Już od dawna zdajemy sobie sprawę z obecności wielu zanieczyszczeń w różnych elementach środowiska. Co rusz wprowadzamy nowe związki na listę substancji niebezpiecznych. Z drugiej strony ich obecność i zagrożenie w środowisku zależy od wielu czynników, obecności innych związków. Nie jest łatwo więc znając stężenie potencjalnego zanieczyszczenia, wnioskować o jego zagrożeniu. To samo dotyczy powietrza. Medium szalenie dynamicznego. W którym zanieczyszczenie nie tylko zależy od poziomu lokalnej emisji, ale czynników meteorologicznych takich jak np. opady, temperatura czy kierunek, siła, trajektoria mas powietrza. Jest to element środowiska w którym zanieczyszczenia wyjątkowo szybko mogą się rozprzestrzeniać i ulegać przemieszczaniu nawet na bardzo dalekie odległości.

W pracy skupiono się na priorytetowych zanieczyszczeniach z grupy wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w pyłe zawieszonym PM_{10} . WWA to bardzo duża grupa związków zawierających od dwóch do kilkunastu pierścieni aromatycznych. 16 spośród nich to zanieczyszczenia priorytetowe znajdujące się na liście utworzonej przez Amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (US EPA) jak i Międzynarodową Agencję Badań nad Rakiem (IARC). Za najbardziej uciążliwy dla zdrowia (w 100% odpowiadający za powstawanie raka u ludzi) uznano benzo(a)piren – B[a]P.

W Polsce zanieczyszczenie powietrza benzo(a)pirenem stanowi duży problem, zwłaszcza w południowym rejonie kraju i przekracza w skali roku dopuszczalną wartość 1 ng/m^3 w pyłe zawieszonym PM_{10} . Również dla miast południowej Polski obserwuje się znacznie przekroczone dopuszczalne normy średniego dobowego stężenia pyłu PM_{10} wynoszące $50 \text{ }\mu\text{g/m}^3$. Wynika to głównie z niskiej emisji, opalania domów w sezonie grzewczym węglem (lub niestety nadal współspalania śmieci) oraz ruchu kołowego. Zjawisko niekorzystnego wpływu na zdrowia wspomaga często lokalizacja centrów miast w obszarach o słabej cyrkulacji powietrza np. w dolinach w obszarach górskich.

Jak podaje światowa Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) w Polsce liczba zgonów związana z utrzymującą się niską jakością powietrza jest wysoka na tle innych krajów europejskich. Dlatego podjęcie badań w celu ostrzegania przed zanieczyszczeniem powietrza w obszarze dużych skupisk ludzkich wpisuje się w nurt badań niezmiennie istotnych.

Struktura pracy

Struktura pracy jest klasyczna dla prac przedstawianych w formie monografii i nie budzi zastrzeżeń. Praca jest napisana w języku polskim. Jedynie abstrakt przedstawiono dodatkowo w języku angielskim. Część teoretyczna, doświadczalna, wyniki badań z podsumowaniem zajmują

proporcjonalną ilość stron (25+20+50). Dodatkowo praca opatrzona jest streszczeniem (w j. polskim i angielskim), spisem bibliografii, rysunków, równań i tabel. Łącznie praca liczy 118 stron, co czynią ją wystarczająco, choć nie nadmiernie obszerną. Pracę ubogacają liczne rysunki i wykresy – jest ich 42 oraz tabele 28. Rozprawa zakończona jest dużym (ponad 100 pozycji) spisem aktualnych pozycji piśmienniczych, świadczącym o dobrym rozpoznaniu literaturowym tematu.

W strukturze pracy brak mi jedynie jasno zaznaczonego rozdziału dyskusja lub po prostu rozdział wyniki powinien się nazywać wyniki i dyskusja. Rozdział „wyniki” stanowi najważniejszą, merytoryczną część pracy, a nie są to same wyniki, tylko ich wykorzystanie do stworzenia rozwiązania stawianego problemu badawczego – modelu. I to powinno być jasno uwypuklone.

Ocena merytoryczna poszczególnych rozdziałów pracy

Abstrakt - Po jego przeczytaniu czytelnik, ma możliwość w sposób klarowny zapoznania się z założeniami całej pracy. Od razu widzimy najważniejsze aspekty badań:

1. Połączenie rzeczywistych wyników składu chemicznego pyłu PM_{10} , z modelami transportu zanieczyszczeń i algorytmami uczenia maszynowego.
2. Określenie w oparciu o analizy środowiskowe (pomiarы rzeczywiste) profili źródeł zanieczyszczeń, profili narażenia oraz wartości wskaźników ekwiwalentu toksyczności wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych zalecanych przez EPA: ekwiwalentu działania mutagennego względem B[a]P (ang. *mutagenic equivalent, MEQ*), ekwiwalentu działania toksycznego względem B[a]P (ang. *toxic equivalent, TEQ*) i ekwiwalentu działania kancerogennego względem 2,3,7,8-tetrachlorodienzo-p-dioksyny (ang. *carcinogenic equivalent, CEQ*).
3. Określenie transport zanieczyszczeń w oparciu o kierunki napływu mas powietrza i ich trajektorii.
4. Opracowanie, w oparciu o dane rzeczywiste modeli identyfikacji stopnia narażenia społeczności. W modelach wykorzystano cztery algorytmy uczenia maszynowego: wektory nośne, regresję logistyczną, lasy losowe oraz sztuczne sieci neuronowe. Wskazano najbardziej dokładny model – model sieci neuronowych.

Wprowadzenie i cele pracy- W rozdziale tym po części Doktorant przedstawił skrótowo stan wiedzy na temat zanieczyszczenia powietrza pyłem PM_{10} . Uwypuklił konsekwencje dla zdrowia wdychania drobnych frakcji pyłu oraz niekorzystną w tym względzie sytuację w Polsce na tle innych krajów europejskich. W konsekwencji wskazał potrzebę badań monitoringu powietrza i znajomość składu chemicznego, a zwłaszcza opracowywanie prognoz rozprzestrzeniania się

zanieczyszczeń, w celu uzyskania informacji o potencjalnym zagrożeniu przed jego wystąpieniem, a nie po fakcie. Czyli odmienne podejście do typowego monitoringu, który określa stan środowiska po emisji. Uzasadnieniem są prognozy, które pozwalają na wczesne ostrzeżenie i alarmowanie społeczeństwa. Autor podkreśla, że jak do tej pory pomijane są w literaturze prognozy dla zanieczyszczeń, takich jak WWA.

Rozdział zakończono poprawnie sformułowanymi tezami badawczymi, wpływającymi z logicznie przedstawionego wprowadzenia.

Część teoretyczna - W części teoretycznej mgr. inż. Furman przybliżył szeroko globalny problem zanieczyszczenia powietrza związany z szybkim rozprzestrzenianiem się zanieczyszczeń. Omówił w sposób wystarczający definicję, regulacje prawne dotyczące zanieczyszczenia powietrza pyłami oraz związkami z grupy WWA. W rozdziale 1.2. bardzo szczegółowo Doktorant opisał właściwości, budowę powstawanie, źródła WWA w powietrzu. W tym w tabeli 2. przedstawił tzw. diagnostyczne wskaźniki pochodzenia WWA, wykorzystane później do obliczeń w pracy. Następnie w rozdziale 1.5 autor podaje ważne informacje na temat wykorzystanych w pracy założeń uczenia maszynowego.

Rozdział część teoretyczną świadczy o dobrej wiedzy teoretycznej Doktoranta w zakresie poruszanej tematyki badań, mam jednak kilka uwag:

1. praca, dla przejrzystości powinna być opatrzona wykazem skrótów i akronimów; wynika to po części z niekonsekwencji Autora w przybliżaniu skrótów czytelnikowi: niekiedy brak jest rozwinięcia skrótu w j.ang. – np. TSM str 11. lub str 16 (US EPA);
2. Tab. 1 – brak jednostki przy masie cząsteczkowej, literówka-temperatura „września”;
3. Str. 15-pomyłka WWA charakteryzują się dużą lipofilowością (a nie słabą jak jest w pracy);
4. Str. 15 - niefortunne sformułowanie *WWA z węglowodorami zbudowanymi z węgla i wodoru...*, powinno być *WWA z pierścieniami....* węglowodory to grupa związków, a nie element struktury;
5. Str. 15, niepełna informacja. *WWA bardzo słabo rozpuszczają się w wodzie, natomiast dobrze w rozpuszczalnikach organicznych.* Zdanie to ma uwypuklić lipofilowy, niepolarny charakter WWA. A przecież spora część rozpuszczalników organicznych rozpuszcza/dobrze się miesza z substancjami polarnymi np. metanol. Powinno więc być: w niepolarnych rozpuszczalnikach organicznych....;
6. Przy podawaniu wartości liczbowych w j. polskim stosujemy przecinek do oddzielenia części całkowitej od ułamkowej (u Doktoranta czasem zdarza się kropka np. w Tab.2);
7. Str. 17. Zapewne autor miał na myśli „remobilizację” WWA z osadu do wody, a nie *mobilizację*;

8. Str. 19. nie do końca się zgadzam ze stwierdzeniem, że „*Benzo[a]piren jest powszechnie oznaczany w analizach środowiskowych jako marker całkowitej zawartości wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych*” Owszem, jest on oznaczany jako jedyny spośród wszystkich WWA, ale raczej jako WWA wskaźnikowe, priorytetowe, jako związek najbardziej istotny, szkodliwy....
9. Rys. 4 str 20 w legendzie pozostał opis w j.angielskim;
10. Str. 20. *W Polsce stężenia B[a]P utrzymują się stale na wysokim poziomie, znacznie przekraczając wartości dopuszczalne.....*Autor miał na myśli zapewne głównie obszar południowej polski, a nie całej Polski.

Część doświadczalna - W rozdziale tym opisano miejsca oraz sposób pobierania próbek pyłu zawieszonego, a także część analityczną przeprowadzonych oznaczeń. Scharakteryzowano bardzo szczegółowo dwa miasta Wadowice i Kraków pod względem liczby ludności, powierzchni i stopnia uprzemysłowienia, czy warunków meteorologicznych. Podano również szczegółowe informacje dla stacji pomiarowej położonej w Krakowie. Zabrakło mi jednak bardziej szczegółowej charakterystyki (oprócz mapki lokalizacyjnej, rozdział 2.2) stacji pomiarowej w Wadowicach.

W rozdziale 2.3 przedstawiono metodę chromatograficznego oznaczania WWA w próbkach pyłu, wraz z jej walidacją. Wg mojej opinii powinny tu być jasno i po kolei wyodrębnione aspekty metodyczne jak: etap przygotowania próbki do oznaczenia chromatograficznego (ekstrakcja do fazy ciekłej), następnie oznaczenie końcowe (GC-MS), oraz walidacja metody. W rzeczywistości wątki te mieszają się i brak jest uporządkowania wiadomości.

Mam kilka pytań/wątpliwości do części analitycznej:

1. Rys. 22 str. 43 przedstawiono na nim bardzo prosty schemat ideowy chromatografu gazowego, a nie jak napisano w tekście układu GC-MS;
2. Str 43. Faza polimerowa stosowana w kapilarnych kolumnach chromatograficznych to nie jest faza stała, dla poprawności określa się ją jako „fazę stacjonarną” – czyli gęstą trudno lotną ciecz (nie ciało stałe);
3. Rozumiem, że korzystano z gotowych procedur, a nie jak napisano w podsumowaniu, że opracowano metodę oznaczeń WWA. Czytając rozdział metodyczny nie widać, jakiś elementów dobierania warunków ekstrakcji (czas, ilość rozpuszczalnika) czy oznaczeń końcowych, ich optymalizacji, jedynie metodę poddano walidacji. Walidacja to weryfikacja metody po wcześniejszej jej opracowaniu i optymalizacji;

4. Brak mi jasnej informacji (str. 45) jak dokonywano ostatecznych pomiarów powierzchni pików do obliczeń stężeń WWA, w jakim trybie pracy MS SCAN (zapisu całkowitego prądu jonów) czy SIM (wybranie kilku jonów o największych intensywnościach charakterystycznych dla oznaczanego związku chemicznego, co zdecydowanie zwiększa czułość oznaczeń);
5. Sposób wyznaczenia odzysku jest akceptowalny – tak można jak najbardziej zrobić. Jednak dla czego do jego wyznaczenia nie zastosowano materiału referencyjnego, takie materiały są dostępne, zwłaszcza w przypadku WWA;
6. Str 46. Wątpliwość mam do zapisu: „W celu wyznaczania efektywności ekstrakcji metody analitycznej sporządzono dodatkowe próbki o znanym stężeniu analitu” – czy to jest efektywność ekstrakcji, czy też odzysk (dokładność) całej procedury (wszak po ekstrakcji, poddano je oznaczeniu chromatograficznemu). Tematyka ta jest poruszona w dwóch miejscach rozdz. 2.4 i 2.4.1. – raz mówi się o efektywności ekstrakcji, raz o odzysku metody. Nie bardzo w tym zapisie rozumiem różnicę. Efektywność ekstrakcji wg mnie to badanie np. wpływu różnego czasu ekstrakcji, różnych ilości i rodzajów rozpuszczalników na jej efektywność. – jest to wtedy tzw. dobór warunków i optymalizacja ekstrakcji;
7. Rozdz. 2.4.4. Zasadniczo najpierw wyznacza się granicę wykrywalności, czyli najmniejsza ilość lub najmniejsze stężenie substancji, które można wykryć z zadowalającą pewnością stosując daną metodę czy technikę analityczną. Następnie dopiero granicę oznaczalności- czyli ilość/stężenie przy, której mamy pewność (z założoną dokładnością i precyzją) oznaczenia ilościowego danego analitu. Wartość LOQ jest zawsze wielokrotnością LOD przeważnie jest trzy razy większa. W pracy zastosowano inny, sposób postępowania, a mianowicie wyznaczono najpierw LOQ, potem LOD dzieląc uzyskaną wartość granicy oznaczalności przez trzy. Dodatkowo granica oznaczalności wyznaczona przez doktoranta w rozdz. 2.4.4. to jak się domyślam granica oznaczalności przyrządu pomiarowego (wyznaczona z krzywej kalibracji). Mam więc pytanie: Czy i jak została wyznaczona granica oznaczalności całej procedury analitycznej oznaczania WWA? Zwłaszcza, że w rozdziale Wyniki, rezultaty pomiarów WWA są przedstawione w jednostce ng/m^3 . Natomiast w rozdziale 2.4.4. granica oznaczalności została wyznaczona w jednostce ng/ml . Ile w związku z tym wynosi gr. oznaczalności wyrażona w jednostce ng/m^3 – czyli granica oznaczalności całej procedury?
8. Co też, ciągnąc ten wątek dalej, zastanawia co znaczy np.: (str 63) *W okresie letnim wartości stężeń dla wielu związków były poniżej LOQ = czyli jaka to wartość?, czy str. 66 stężenia Fluorenu w okresie grzewczym były poniżej LOQ,...* Generalnie lepiej dla

- czytelnik pisać przykładowo: wyniki były niższe od np.: 0,01 ng/m³...czyli podać konkretną wartość, wszak granice oznaczalności mogą być bardzo różne;
9. Uwaga stylistyczna: *rysunek nie prezentuje*, na rysunku przedstawiono (str.38)
 10. Str. 43 opisano bardzo ogólnie w jaki sposób mierzono pył zawieszony na sączkach, bez podania np. wagi i jej dokładności, lub parametrów walidacyjnych jak granica oznaczalności. Wszak to też metoda stosowana przez Doktoranta w pracy i powinna być rzetelnie opisana;
 11. Brak jest wyszczególnienia charakterystyki stosowanych odczynników, wzorców, gazów (czystość, producent), oraz wielu przyrządów np. wagi, wirówki. Czy wyznaczano tło, tzw. próbę ślepą ?

W części doświadczalnej opisano również założenia wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego do celu identyfikacji stopnia narażenia na zanieczyszczenia powietrza. Cennym założeniem tej części było wyznaczenie granicznych wartości wskaźników MEQ; CEQ i TEQ, które pozwoliły przypisać stopień zagrożenia: niski/wysoki lub niski/informowania/alarmowy, a także opisanie założeń parametrów wejściowych do modelu.

Pomimo moich wątpliwości przedstawionych to tej części rozprawy warta podkreślenia jest biegłość analityczna, którą siłą rzeczy Doktorant musiał nabyć oznaczając badane związki.

Wyniki - Wyniki opisano bardzo obszernie. Przedstawiono je na 40 stronach co zajmuje ponad 1/3 pracy.

W pierwszej części przedstawiono pomierzone stężenia PM₁₀, oraz WWA w Wadowicach i Krakowie. Uzyskane wyniki scharakteryzowano statystycznie i porównano z innymi rejonami w Polsce. Pewną trudność w interpretacji i porównywaniu wyników chociażby z obu miejsc pomiarowych stanowią różne okresy pomiarowe - Wadowice II-X 2017, Kraków (I-IV, VII-VIII, XII 2020 i I-II 2021). Zapewne oba lata różniły się charakterystyką meteorologiczną, jakoś w pracy to nie wybrzmiało.

Badaniom poddano 252 próbki, z jednej strony to dużo, z drugiej biorąc pod uwagę zmienność stężeń między kolejnymi latami czy miesiącami, a nawet dniami, przydałoby się zweryfikować model o kolejne dane. Zwłaszcza dla tzw. okresu grzewczego, gdzie stężenia PM₁₀ i WWA są szczególnie uciążliwe. W przypadku Wadowic w pracy charakterystyka okresu grzewczego nastąpiła w oparciu tylko o luty, marzec, wrzesień, październik ? A co z miesiącami od listopada do stycznia, de facto w 100% grzewczymi. W przypadku Krakowa też są luki pomiarowe, choć może mniej istotne.

Otrzymane informacje dotyczące stężeń WWA zostały wykorzystane do określenia profili źródeł zanieczyszczeń, profili narażenia oraz wartości wskaźników ekwiwalentu toksyczności wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych zalecanych przez US EPA: ekwiwalentu działania mutagennego względem B[a]P (ang. *mutagenic equivalent*, *MEQ*), ekwiwalentu działania toksycznego względem B[a]P (ang. *toxic equivalent*, *TEQ*) i ekwiwalentu działania kancerogennego względem 2,3,7,8-tetrachlorodienzo-p-dioksyny (ang. *carcinogenic equivalent*, *CEQ*).

Bardzo cennych informacji o źródłach zanieczyszczeń powietrza dostarczają wyliczone przez Doktoranta w rozdz. 3.3 stosunki diagnostyczne poszczególnych WWA. Możliwe, że dla szerszej gamy danych (rozszerzonej o więcej próbek zwłaszcza z okresu grzewczego), wyszły by one bardziej jednoznacznie. Pomimo moich zastrzeżeń, rozumiem, że zgromadzone dane posłużyły do opracowania wstępnego modelu, który jak Doktorant sam pisze jest przyczynkiem do dalszych badań i sprawdzenia modelu o kolejne pomiary rzeczywiste.

Istotnym rozdziałem jest rozdz. 3.4. Ocena kierunku napływu zanieczyszczeń, charakteryzująca możliwości transportu zanieczyszczeń, z wykorzystaniem trajektorii wstecznych i modelu HYSPLIT NOAA Air Resources Laboratory (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model*). Wskazuje on na biegłość Doktoranta w interpretacji rozchodzenia się zanieczyszczeń, w oparciu o nowoczesne narzędzia.

Jednakże na szczególne podkreślenie zasługuje, wyznaczenie wartości wskaźników ekwiwalentu toksyczności WWA (*MEQ*, *CEQ*, *TEQ*) uzyskane dla pobranych próbek z Wadowic i Krakowa (rozdz. 3.5) i ich zastosowanie do opracowania modelu pozwalającego zidentyfikować stopień narażenia społeczności (rozdz. 3.6).

Mam tu jednak pytanie czy wartości *MEQ*, *CEQ* i *TEQ*, można lub jak można porównywać w różnych frakcjach pyłu (PM₁₀, PM₁, PM_{2,5} – tab.15, str.73)

Badania dotyczące przewidywania stężeń pyłów zawieszonych, tlenków siarki, azotu oraz próby identyfikacji klasy jakości powietrza na podstawie stężeń tych zanieczyszczeń powietrza w oparciu o modele bazujące na algorytmach uczenia maszynowego są, jak podkreśla Doktorant, podejmowane. Nowością, którą zastosował było natomiast m.in. opracowanie modelu pozwalającego zidentyfikować stopień narażenia społeczności za pomocą wskaźników toksyczności które odnoszą się do udziałów najbardziej niebezpiecznych WWA, a nie de facto ich rzeczywistych stężeń w powietrzu. Doktorant, też zaproponował zakresy dla (niski/wysoki) oraz (niski/informowania/alarmowy) kategorii narażenia społeczności względem stężenia B(a)P równego 1 ng/m³ przy zmienności warunków meteorologicznych. Do modelowania wykorzystał algorytmy wektorów nośnych, regresji logistycznych, lasów losowych oraz sztucznych sieci neuronowych określając ich przydatność do założonego celu.

Obliczenia zostały przeprowadzone w środowisku Azure Machine Learning. Finalny model opierał się na sztucznych sieciach neuronowych i został poddany implementacji w ogólnodostępnym środowisku *Web Service*. Został on stworzony dla dwóch lokalizacji: Wadowice i Kraków i dla nich się sprawdził. W ten sposób Doktorant krytycznie, wykazał również ograniczenia modelu, którego dokładność zależy od miejsca zastosowania.

Nie mam wątpliwości, że zakres prac był dobrze zaplanowany i pozwolił Doktorantowi w sposób zasadny odpowiedzieć na stawiane cele. Jednak przydałoby się rozgraniczyć rozdział wyniki i wyodrębnić – dyskusję, albo w tym przypadku rozdział wykorzystanie wyników w opracowaniu modelu. Tzn chcę podkreślić, że w rozdziale wyniki doktorant zarówno przedstawił surowe dane środowiskowe, scharakteryzował je porównując z innymi rejonami badań = czyli dokonał ich interpretacji środowiskowej. Z drugiej strony posłużył się nimi do stworzenie modelu= czyli wykorzystał je praktycznie. Ta część stanowiąca kluczową sprawę doktoratu wymagałaby lepszego wyeksponowania, chociażby odrębnym rozdziałem.

Drobna uwaga: Str.65 – pojawił się tytuł i pierwszy wiersz tabeli 11; tabela powinna być w całości na str 66; Str 70. Bardzo duża przerwa po rozdziale 3.4. i na samym dole strony, pojawia się rozdz. 3.5

Znaczenie podjętej problematyki – ocena nowości pracy

Praca Pana **mgr inż. Przemysława Furmana** dostarcza nowego podejścia do oceny jakości zanieczyszczenia powietrza w obszarach zurbanizowanych. Łączy daleko idące modelowanie mające na celu identyfikację stopnia narażenia społeczności. W efekcie w oparciu o wybiórcze pomiary rzeczywiste można w przyszłości z dużym prawdopodobieństwem określać sytuacje zagrożenie zanieczyszczenia powietrza. Wskazano najbardziej dokładny model do tego celu – model sieci neuronowych. Badania są bardzo perspektywiczne, wpasowują się w nowy obszar badawczy, wykorzystujący do różnych celów tzw. sztuczną inteligencję. Z punktu widzenia chemii środowiskowej mają również tę zaletę, że w przyszłości mogą zastąpić drogie, specjalistyczne pomiary rzeczywistych stężeń wielu zanieczyszczeń, dodatkowo dając realną informację o zagrożeniu.

Za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta, stanowiące jednocześnie element nowości naukowej przedstawione w rozprawie uważam wykazanie, że uczenie maszynowe pozwala określić stopień narażenia społeczności na wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w oparciu o historyczne dane meteorologiczne, stężenia frakcji pyłu PM₁₀, stężenia B[a]P, a także wskaźniki mutagenności/kancerogenności/toksyczności WWA oraz włączenie do określenia zagrożenia społeczności, nie tylko samego benzo(a)pirenu, a także pozostałych najbardziej szkodliwych związków z grupy WWA.

W rezultacie dokonaniem Pana **mgr inż. Przemysława Furmana**, jest **praktyczne rozwiązanie, a mianowicie nowy model ostrzegania przed zanieczyszczeniem powietrza kancerogennymi WWA z wskaźnikami stopnia narażenia społeczności dla Krakowa i Wadowic**. A przeprowadzone badania mogą stanowić podstawę do rozwoju systemów wczesnego ostrzegania bazujących na algorytmach sztucznych sieci neuronowych w innych miastach/rejonach.

Podsumowując przedstawioną mi do recenzji rozprawę doktorską Pana **mgr inż. Przemysława Furmana** mogę stwierdzić, że praca świetnie wpisuje się we współczesny nurt badań istotnych i wzbudzających szerokie zainteresowanie wśród naukowców. Dzięki połączeniu badań środowiskowych i numerycznych wnosi istotny wkład w nowe podejście do badań monitoringowych oraz zagrożeń wynikających z zanieczyszczenia powietrza. Doktorant wykazał się dużą zdolnością łączenia kilku obszarów badawczych (zanieczyszczenie atmosfery, analityka śladów, statystyka, modelowanie w oparciu o algorytmy uczenia maszynowego) i wnikliwością w opracowywaniu i wnioskowaniu uzyskanych rezultatów. Natomiast zakres prac, interpretacje uzyskanych wyników oraz płynące z tego wnioski należy uznać za nowatorskie, kompleksowe i wypełniające lukę badawczą. Stanowią podstawę do dalszych ważnych badań. Z kolei wymienione przeze mnie uwagi nie obniżają wysokiej wartości merytorycznej pracy.

Stwierdzam, że dysertacja Pana **mgr inż. Przemysława Furmana** spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim, określone w art. 13 ust.1 Ustawy z dnia 14 marca 2023 roku o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach naukowych i tytule w zakresie sztuki (DZ.U. z 2017 poz 1789 z póź., zm.), w związku z czym zwracam się z uprzejmą prośbą do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie o przyjęcie ocenianej rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pana **mgr inż. Przemysława Furmana** do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

dr hab. inż. Marta Staniszewska, prof. UG

