

Politechnika Warszawska
Plac Politechniki 1
00-661 Warszawa
za pośrednictwem:
Rady Doskonałości Naukowej
pl. Defilad 1
00-901 Warszawa
(Pałac Kultury i Nauki, p. XXIV, pok. 2401)

dr inż. Mariusz Rogulski
Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki
i Inżynierii Środowiska,
Politechnika Warszawska
ul. Nowowiejska 20
00-653 Warszawa

Wniosek

z dnia 26.04.2023

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie¹ inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

Tytuł osiągnięcia naukowego: **Analiza i poprawa jakości pomiarów wykonywanych za pomocą wybranych niskokosztowych czujników zanieczyszczeń powietrza oraz wykorzystanie ich do budowy urządzeń pomiarowych i rozszerzenia możliwości systemów pomiarowych** – cykl publikacji powiązanych tematycznie

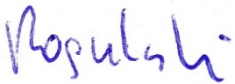
Wniosuję – na podstawie art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 zm.) – aby komisja habilitacyjna podejmowała uchwałę w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w głosowaniu ~~tajnym~~/jawnym*²

Zostałem poinformowany, że:

Administratorem w odniesieniu do danych osobowych pozyskanych w ramach postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego jest Przewodniczący Rady Doskonałości Naukowej z siedzibą w Warszawie (pl. Defilad 1, XXIV piętro, 00-901 Warszawa).

Kontakt za pośrednictwem e-mail: kancelaria@rdn.gov.pl, tel. 22 656 60 98 lub w siedzibie organu. Dane osobowe będą przetwarzane w oparciu o przesłankę wskazaną w art. 6 ust. 1 lit. c) Rozporządzenia UE 2016/679 z dnia z dnia 27 kwietnia 2016 r. w związku z art. 220 - 221 oraz art. 232 – 240 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w celu przeprowadzenie postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz realizacji praw i obowiązków oraz środków odwoławczych przewidzianych w tym postępowaniu.

Szczegółowa informacja na temat przetwarzania danych osobowych w postępowaniu dostępna jest na stronie www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodz.html


.....
(podpis wnioskodawcy)

¹ Klasyfikacja dziedzin i dyscyplin wg rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin w zakresie sztuki (Dz. U. z 2018 r. poz. 1818).

² * Niepotrzebne skreślić.

Załączniki:

1. Dane wnioskodawcy
2. Kopia dokumentu potwierdzającego posiadanie stopnia doktora
3. Autoreferat
4. Wykaz osiągnięć naukowych
5. Załącznik nr 1 zawierający treść publikacji składających się na osiągnięcie
6. Załącznik nr 2 zawierający oświadczenia o współautorstwie
7. Załącznik nr 3 zawierający treść innych publikacji powiązanych z osiągnięciem

Autoreferat

1. Imię i nazwisko.

Mariusz Rogulski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

W latach 1991-1995 uczęszczałem do Liceum Ogólnokształcącego im. Fryderyka Chopina w Sochaczewie (klasa o profilu matematyczno-fizycznym). Po zdaniu egzaminu dojrzałości w roku 1995 rozpocząłem studia na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. W roku 2001 zdobyłem tytułu magistra inżyniera (z wynikiem **celującym**) na specjalności Systemy Informatyczne Wspomagania Decyzji. Tematem mojej pracy magisterskiej, napisanej pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Eugeniusza Toczyłowskiego, była „Analiza wybranych modeli problemu doboru jednostek wytwórczych na rynku energii elektrycznej”.

Za namową promotora, jak również z uwagi na wysoką ocenę pracy i zainteresowanie tematem, w 2001 roku podjąłem studia doktoranckie w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Jako doktorant kontynuowałem na uczelni swoje badania związane z zarządzaniem rynkiem energii elektrycznej oraz prowadzeniem ruchu w sieciach przesyłowych najwyższych napięć. Uwieńczeniem moich studiów doktoranckich w 2007 roku była obrona z **wyróżnieniem** rozprawy doktorskiej, pt. „Analiza wybranych modeli zintegrowanego obrotu wielotowarowego w systemach rozproszonych na przykładzie rynku energii” napisanej pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Eugeniusza Toczyłowskiego.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

W roku 2008 (po uzyskaniu stopnia doktora) zostałem zatrudniony w Zakładzie Informatyki i Badań Jakości Środowiska, na Wydziale Inżynierii Środowiska (obecnie: Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska) Politechniki Warszawskiej na stanowisku adiunkta. Stanowisko to zajmuję do dziś. W latach 2010–2020 pełniłem równoległe funkcję Pełnomocnika Dziekana ds. Informatyki.

Na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska PW prowadzę badania naukowe i działalność dydaktyczną. Od 2023 roku działalnością dydaktyczną zajmuję się również na Wydziale Zarządzania Politechniki Warszawskiej. Współpracuję też ze środowiskiem gospodarczym i społecznym.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

4.1. Tytuł osiągnięcia

Analiza i poprawa jakości pomiarów wykonywanych za pomocą wybranych niskokosztowych czujników zanieczyszczeń powietrza oraz wykorzystanie ich do budowy urządzeń pomiarowych i rozszerzenia możliwości systemów pomiarowych

4.2. Wprowadzenie

We współczesnym świecie obserwuje się wzrostową tendencję w zakresie gromadzenia w czasie rzeczywistym danych dotyczących jakości powietrza. W celu zwiększenia rozdzielczości przestrzenno-czasowej informacji o jakości powietrza oprócz tradycyjnych, profesjonalnych urządzeń stosujących metodyki referencyjne lub równoważne referencyjnym (urządzenia wykorzystujące takie metodyki w dalszej części będą określane jako urządzenia profesjonalne), coraz częściej stosuje się również sensory niskokosztowe (zwane także niskobudżetowymi lub z angielskiego „low-cost”), używające metod innych niż referencyjne lub równoważne referencyjnym. Zazwyczaj tego typu czujniki charakteryzują się niewielkimi gabarytami, możliwością podłączenia do mikrokontrolerów i budowania stosunkowo niewielkich oraz lekkich, modułowych instrumentów pomiarowych, cechujących się również wysokim poziomem mobilności, niewielkim poborem energii oraz krótkim czasem reakcji na zmieniające się stężenia mierzonych substancji. Mogą być one cennym źródłem szczegółowych informacji o większej rozdzielczości przestrzenno-czasowej, posłużyć jako uzupełnienie klasycznych sieci monitorowania jakości powietrza czy wsparcie w podejmowaniu decyzji, jak i stanowić solidną podstawę komunikatów kierowanych do opinii publicznej, o ile zapewniona zostanie odpowiednia jakość urządzeń niskokosztowych, a co za tym idzie jakość uzyskanych z nich wyników pomiarów.

Kluczowym celem naukowym podjętych przeze mnie prac badawczych było długoterminowe przebadanie w warunkach terenowych niskokosztowych czujników zanieczyszczeń powietrza, w szczególności pyłu zawieszonego (*nota bene* zyskujących na popularności, szczególnie w naszym kraju) wykorzystujących metodę optyczną, w zakresie dokładności ich wskazań, trwałości oraz podatności na czynniki zewnętrzne zmniejszające jakość pomiarów. W celu określenia ich jakości i zidentyfikowania zakresów błędów pomiarowych były przeze mnie projektowane i budowane instrumenty pomiarowe, z wykorzystaniem wyżej wymienionych czujników, których użyto do pomiarów porównawczych z urządzeniami pomiarowymi stosującymi metodyki referencyjne (lub równoważne referencyjnym), m.in. podczas kampanii pomiarowych przeprowadzonych przez Krajowe Laboratorium Referencyjne i Wzorcujące Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska. Równolegle została przeze mnie stworzona sieć 10 urządzeń pomiarowych uruchomionych i aktywnych w latach 2016-2020 na terenie Nowego Sącza (działanie to było realizowane w porozumieniu z lokalnymi władzami samorządowymi, w oparciu na ramowej umowie o współpracy pomiędzy Politechniką Warszawską a Urzędem Miasta Nowego Sącza). Celem wspomnianych wyżej badań było zarówno długoterminowe zestawienie wartości pomiarów uzyskanych za pośrednictwem wykonanych przeze mnie instrumentów pomiarowych z danymi z lokalnych stacji pomiarowych należących do Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ), zbadanie trwałości oraz zmian wskazań w trakcie

długiego okresu eksploatacji, identyfikacja innych czynników, które wpływają na powstawanie błędów pomiarowych czy zdefiniowanie korzyści wynikających z zagęszczenia sieci pomiarowej, przy zastosowaniu sensorów niskokosztowych.

Dzięki współpracy z Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Portugalia), od 2022 roku podobne pomiary porównawcze prowadzę w Aveiro. Ich celem jest dodatkowo zbadanie wpływu pyłów z nad Sahary na pomiary wykonywane z użyciem niskokosztowych optycznych czujników pyłów.

Dane treningowe zgromadzone podczas kampanii pomiarów porównawczych niskokosztowych czujników stężeń pyłów z instrumentami pomiarowymi należącymi do PMŚ pozwoliły na wyznaczenie przeze mnie funkcji korygujących mających na celu zmniejszenie wartości błędów pomiarowych na podstawie wartości zmierzonej przez niskokosztowy czujnik pyłu zawieszonego oraz wilgotności względnej i temperatury powietrza. Zastosowanie funkcji korygującej zostało przeze mnie następnie zweryfikowane podczas kolejnej, długoterminowej kampanii pomiarów porównawczych prowadzonych przy stacji PMŚ w Nowym Sączu.

Uzyskane wyniki, zdobyte doświadczenie oraz możliwość integracji niskokosztowych czujników pyłów zawieszonych z innymi komponentami (np. meteorologicznymi) pozwoliło mi na zbudowanie instrumentów pomiarowych przeznaczonych dla nietypowych zastosowań. Zaprojektowane i wykonane przeze mnie urządzenia zostały wykorzystane m.in. na pokładzie balona na ogrzane powietrze podczas lotów promujących kampanię Balon.Lab prowadzoną przez Forum Rozwoju Efektywnej Energii we współpracy z Gaspol Energy, jako dodatkowe wyposażenie bezałogowego statku powietrznego (drona) użytego w celach pokazowych przez straż miejską w Skawinie oraz w trakcie rejsu żaglowcem STS „Fryderyk Chopin” po Morzu Północnym i Bałtyckim.

Oprócz badań czujników pyłu zawieszonego, za pomocą zaprojektowanych i zbudowanych przeze mnie instrumentów pomiarowych, zostały przeprowadzone również długoterminowe pomiary porównawcze niskokosztowych czujników innych typowych substancji stanowiących zanieczyszczenia powietrza – ditlenku siarki, ditlenku azotu oraz ozonu. Pomiary powyższych zanieczyszczeń za pomocą czujników wyprodukowanych przez firmę Spec Sensors zostały przeze mnie przeprowadzone przy stacji PMŚ w Nowym Sączu oraz przy analogicznych, profesjonalnych stacjach pomiarowych w Sewilli (we współpracy z prof. Antonio Lozano García z Universidad de Sevilla oraz z Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía), zaś przy użyciu sensorów produkcji Alphasense – przy stacjach PMŚ w Nowym Sączu i Warszawie. W przypadku komponentów pierwszego z wymienionych producentów, otrzymane rezultaty wskazywały na znikomą przydatność sensorów do pomiaru typowych stężeń tych zanieczyszczeń występujących w powietrzu zewnętrznym. Znacznie bardziej obiecujące wyniki uzyskano dla czujników NO₂ firmy Alphasense. Dla sensorów tego producenta wysoka zgodność korelacyjna wyników pomiarów ze stężeniami mierzonymi w urządzeniach profesjonalnych pozwoliła mi na zbudowanie algorytmu korekcji, który w rezultacie doprowadził do uzyskania przeze mnie średniomiesięcznych bezwzględnych błędów procentowych, znacznie mniejszych niż po wykorzystaniu metod rekomendowanych przez producenta sensorów, nawet podczas korzystania z czujników w niekorzystnych (tj. w znacząco innych niż zalecane przez producenta) warunkach meteorologicznych panujących w Polsce.

Wnioski z przeprowadzonych prac badawczych oraz różne przypadki zastosowania instrumentów pomiarowych z czujnikami niskokosztowymi pokazały, że pod pewnymi warunkami i przy dodatkowym matematycznym opracowaniu wyników, sensory niskokosztowe pozwalają na ich użycie do budowy instrumentów pomiarowych stanowiących wsparcie dla sieci składających

się z urządzeń profesjonalnych oraz wspierania podejmowania decyzji i informowania opinii publicznej. Przy mniejszej dokładności możliwe jest uzyskanie przede wszystkim większej elastyczności oraz skrócenie czasu w pozyskaniu informacji.

Należy jednak mieć świadomość wielu słabych stron czujników niskokosztowych i prawidłowo interpretować ich wskazania w zależności od warunków, w jakich pracują.

4.3. Monotematyczny cykl publikacji składający się na osiągnięcie w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

Tytuł cyklu: Analiza i poprawa jakości pomiarów wykonywanych za pomocą wybranych niskokosztowych czujników zanieczyszczeń powietrza oraz wykorzystanie ich do budowy urządzeń pomiarowych i rozszerzenia możliwości systemów pomiarowych

Część I – badania porównawcze wybranych niskokosztowych czujników zanieczyszczeń powietrza z urządzeniami profesjonalnymi oraz propozycja matematycznej poprawy dokładności wykonywanych za ich pomocą pomiarów

- Rogulski Mariusz, Badyda Artur Jerzy: *Investigation of Low-Cost and Optical Particulate Matter Sensors for Ambient Monitoring, Atmosphere, vol. 11, nr 10, 2020, s. 1-18, DOI:10.3390/atmos11101040, 70 punktów, IF(2,046).* (pozycja [A1] w załączniku nr 1)
- Rogulski Mariusz, Badyda Artur Jerzy, Gayer Anna, Reis Johnny: *Improving the Quality of Measurements Made by Alphasense NO₂ Non-Reference Sensors Using the Mathematical Methods, Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, vol. 22, nr 10, 2022, s. 1-17, DOI:10.3390/s22103619, 100 punktów, IF(3,031).* (pozycja [A2] w załączniku nr 1)
- Owczarek Tomasz, Rogulski Mariusz, Czechowski Piotr O: *Assessment of the Equivalence of Low-Cost Sensors with the Reference Method in Measuring PM₁₀ Concentration Using Selected Correction Functions”, Sustainability, 2020, vol. 12, s. 1-17, DOI 10.3390/su12135368, 100 punktów, IF(2,592).* (pozycja [A3] w załączniku nr 1)

Część II – użycie wybranych niskokosztowych czujników zanieczyszczeń powietrza do rozszerzenia możliwości sieci i systemów pomiarowych

- Rogulski Mariusz: *Using Low-Cost PM Monitors to Detect Local Changes of Air Quality, Polish Journal of Environmental Studies, Institute of Scientific Information in Philadelphia, vol. 27, nr 4, 2018, s. 1699-1705, DOI:10.15244/pjoes/77075, 15 punktów, IF(1,186).* (pozycja [A4] w załączniku nr 1)
- Firląg Szymon, Rogulski Mariusz, Badyda Artur Jerzy: *The Influence of Marine Traffic on Particulate Matter (PM) Levels in the Region of Danish Straits, North and Baltic Seas, w: Sustainability, vol. 10, nr 11, 2018, ss. 1-19, DOI:10.3390/su10114231, 20 punktów, IF: 2,592.* (pozycja [A5] w załączniku nr 1)

Treść publikacji jest dostępna w załączniku nr 1. Przedstawione publikacje stanowiące osiągnięcie zostały pozytywnie ocenione przez międzynarodowych i krajowych recenzentów oraz zacytowane 45 razy (kwiecień 2023, Scopus). Opracowane wyniki długoterminowych badań porównawczych niskokosztowych sensorów zanieczyszczeń powietrza z instrumentami stosującymi metodyki referencyjne (lub równoważne referencyjnym), propozycje poprawy ich dokładności oraz możliwości zastosowania czujników niskokosztowych w sytuacjach, w których

wykorzystanie urządzeń profesjonalnych byłoby niemożliwe bądź utrudnione, popularyzowano na konferencjach naukowych i w czasopismach branżowych.

Jestem pomysłodawcą całego cyklu, głównym autorem tez badawczych, autorem przebiegu eksperymentów, a także, z wyłączeniem publikacji [A3] – głównym autorem opracowania wyników, przedstawienia dyskusji i odpowiedzi na recenzje. We wszystkich publikacjach, oprócz [A3], jestem pierwszym autorem oraz autorem korespondencyjnym. Część prac badawczych związanych z analizą uzyskanych wyników w publikacji [A3] była współrealizowana z zespołem prof. UMG dra hab. inż. Piotra Oskara Czechowskiego z Zakładu Marketingu i Metod Ilościowych, Zespołu Metod Ilościowych, Finansów i Zarządzania Środowiskiem Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Dokładny podział udziału wszystkich współautorów z uwzględnieniem realizowanych zadań w każdej z publikacji (z wyłączeniem [A4]) został przedstawiony w załączniku nr 2. W ramach osiągnięcia wykazuję jedynie najbardziej istotne publikacje w czasopismach posiadających indeksowanie Journal Citation Report (IF) lub znajdujących się na liście MNiSW/MEiN. Sumaryczny IF dla cyklu publikacji składających się na osiągnięcie wynosi **11,447** a suma punktów **MNiSW 305** wg Bazy Wiedzy Politechniki Warszawskiej. Inne publikacje, które nie zostały włączone bezpośrednio do cyklu, zostały przedstawione w dalszej części wniosku.

4.4. Najważniejsze elementy osiągnięcia

Najważniejszym celem naukowym podjętych przeze mnie prac badawczych była analiza jakości pomiarów wykonywanych za pomocą wybranych niskokosztowych czujników zanieczyszczeń, w szczególności czujników pyłu zawieszonego, wypracowanie matematycznych algorytmów poprawy ich dokładności oraz budowa prototypowej sieci pomiarowej w Nowym Sączu. Na główne elementy osiągnięcia składa się:

- projektowanie i budowanie, począwszy od 2015 roku, prototypowych urządzeń pomiarowych zawierających różne modele niskokosztowych sensorów badających jakość powietrza (w zależności od potrzeb badawczych), elementy elektroniczne umożliwiające ich poprawną pracę i gromadzenie wykonanych pomiarów na karcie pamięci czy wysyłanie ich na centralny serwer oraz integracja z instrumentami do pomiaru parametrów meteorologicznych;
- zaprojektowanie i zbudowanie prototypowej sieci składającej się z urządzeń zawierających niskokosztowe sensory badające stężenie pyłów zawieszonych oraz parametry meteorologiczne badanego powietrza (sieć badawcza powstała w Nowym Sączu dzięki uprzejmości jego władz oraz podpisaniu Porozumienia między Miastem Nowy Sącz, Politechniką Warszawską oraz Akademią Morską w Gdyni). Pierwszych pięć urządzeń rozpoczęło pracę w 2016, co według mojej wiedzy, było pionierską w Polsce siecią urządzeń pomiarowych wykorzystujących niskokosztowe czujniki pyłów zawieszonych;
- przeprowadzenie długoterminowych kampanii pomiarów porównawczych wybranych niskokosztowych czujników pyłów zawieszonych z urządzeniami prowadzącymi pomiary z użyciem metodyk referencyjnych (lub równoważnych referencyjnym) w zróżnicowanych warunkach klimatycznych i w różnych lokalizacjach (m.in. Polsce – w Nowym Sączu, Rabce-Zdroju, Dobczycach, w Hiszpanii – w Sewilli oraz w Portugalii – w Aveiro);
- przeprowadzenie długoterminowych kampanii pomiarów porównawczych wybranych niskokosztowych czujników ditlenku azotu z urządzeniami prowadzącymi pomiary za pomocą metodyk referencyjnych (lub równoważnych referencyjnym) w zróżnicowanych

warunkach klimatycznych i w różnych lokalizacjach (m.in. Polsce – w Nowym Sączu, Warszawie, oraz w Hiszpanii – w Sewilli),

- zbadanie możliwości wykorzystania niekonwencjonalnych nośników (balon na ogrzane powietrze, dron, żaglowiec) do montażu i przeprowadzenia pomiarów z użyciem urządzeń zawierających niskokosztowe czujniki pyłów zawieszonych.

Do najważniejszych oryginalnych efektów prowadzonych przeze mnie badań można zaliczyć:

- określenie dokładności wskazań niskokosztowych czujników pyłów oraz ditlenku azotu w różnych warunkach klimatycznych (badania prowadzone w Polsce, Hiszpanii i Portugalii),
- zbadanie wzajemnej korelacji niskokosztowych czujników pyłów oraz wzajemnej korelacji niskokosztowych czujników ditlenku azotu,
- zidentyfikowanie zewnętrznych czynników wpływających na wskazania niskokosztowych czujników pyłów,
- sformułowanie i zweryfikowanie zależności, które na podstawie wartości pomiaru pochodzącego bezpośrednio z niskokosztowego czujnika pyłów, wartości zidentyfikowanych, istotnych parametrów meteorologicznych korygują wskazania niskokosztowego sensora pyłów, minimalizując błędy pomiarowe,
- sformułowanie i zweryfikowanie zależności, które na podstawie wartości pomiaru pochodzącego bezpośrednio z niskokosztowego czujnika ditlenku azotu, wartości zidentyfikowanych, istotnych parametrów meteorologicznych korygują wskazania niskokosztowego sensora ditlenku azotu, minimalizując błędy pomiarowe.

Realizacja postawionych podstawowych celów naukowych umożliwiła wykonanie dodatkowych zadań. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- przeprowadzenie pomiarów stężeń pyłów zawieszonych na Morzach Północnym i Bałtyckim podczas II edycji seminarium naukowego *Politechnika na Fali* odbywającego się na żagłowcu STS Fryderyk Chopin i organizowanego przez Politechnikę Warszawską,
- przeprowadzenie pomiarów stężeń pyłów zawieszonych w pomieszczeniach wewnętrznych w wybranych placówkach biurowych i edukacyjnych w m. st. Warszawie,
- prowadzenie działalności edukacyjnej oraz popularyzującej naukę z wykorzystaniem badanych narzędzi, czego przykładem jest udział w kampanii Balon.Lab prowadzonej przez Forum Rozwoju Efektywnej Energii we współpracy z Gaspol Energy,
- wykorzystanie zdobytych doświadczeń w doradztwie związanym z projektowaniem sieci pomiarowych oraz określeniem wymagań dotyczących urządzeń pomiarowych zawierających czujniki niskokosztowe – czego przykładem jest udział w projekcie „Opracowanie i wdrożenie Warszawskiego Indeksu Powietrza oraz systemu informacyjno-analitycznego jakości powietrza (Etap II, część 1 – opracowanie szczegółowego opisu przedmiotu zamówienia; oszacowanie wartości zamówienia)” realizowanym na potrzeby m. st. Warszawy, czy zbudowanie sieci pomiarowej dla Polskiej Spółki Gazownictwa Sp. z o.o. (pomiar stężeń pyłów oraz parametrów meteorologicznych takich jak temperatura, wilgotność względna powietrza, ciśnienie, siła i kierunek wiatru, suma i natężenie opadów atmosferycznych).

4.5. Motywacja i uzasadnienie podjęcia badań

Historycznie monitoring jakości powietrza prowadzono w dwóch głównych celach: nadzoru legislacyjnego i badań naukowych. Ogólne ramy dla współczesnego oficjalnego monitoringu jakości powietrza stanowi ustawodawstwo i wynikające z niego przepisy. Jednym z istotniejszych przykładów aktów prawnych jest europejska dyrektywa CAFE (dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy). Dokument ten upoważnia państwa członkowskie Unii Europejskiej do oceny jakości powietrza na poziomie krajowym poprzez prowadzenie odpowiednich systemów pomiarowych (obserwacji i modeli). Dla szeregu zanieczyszczeń powietrza dyrektywa określa ogólne zasady dotyczące tworzenia sieci pomiarowych, w tym rozdzielczości przestrzennej i czasowej oraz wymagań dotyczących miejsc pobierania próbek. Definiuje ona metody pomiaru, które powinny być stosowane w państwach członkowskich przy monitorowaniu jakości powietrza. Dyrektywa otwiera również możliwości do realizowania innych technik uzupełniających, takich jak modele jakości powietrza i pomiary indykatoryjne.

Jedną ze strategii monitorowania zanieczyszczeń powietrza jest użycie danych z odpowiednio zlokalizowanych konwencjonalnych stacji monitorujących. Pochodzące z nich informacje są wykorzystywane w celu oceny zgodności z ustawodawstwem dotyczącym jakości powietrza, badania ekspozycji, wsparcia zarządzania jakością powietrza i planowania odpowiednich działań. Konwencjonalne systemy monitorowania zanieczyszczeń powietrza korzystają głównie ze stacjonarnych urządzeń pomiarowych. Najczęściej są one oparte na powszechnie uznanych, wyrafinowanych instrumentach i referencyjnych metodykach prowadzenia pomiarów. W celu zagwarantowania dokładności i jakości danych, przyrządy te stosują skomplikowane metody oraz wiele narzędzi pomocniczych, takich jak: regulatory temperatury, regulatory wilgotności względnej, filtry powietrza, itp., co zapewnia tego rodzaju stacjom monitoringu jakości powietrza wysoką niezawodność, precyzję i zdolność do mierzenia szerokiego zakresu zanieczyszczeń. Dane o zanieczyszczeniu powietrza w miejscach bez stacji monitoringu jakości powietrza uzyskuje się, opierając się na modelach lub szacunkach jakości powietrza.

W Polsce badanie stanu środowiska odbywa się w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ). PMŚ realizuje zadania, które są uwarunkowane poprzez wymagania Parlamentu i Rady Europejskiej oraz standardy zawarte w polskich aktach prawnych dotyczących jakości powietrza, przede wszystkim w ustawie z dnia 27 kwietnia 2001 roku – Prawo Ochrony Środowiska. W ramach PMŚ działania w zakresie kontroli jakości powietrza polegają m.in. na ciągłej ocenie stanu jego zanieczyszczenia, a także kontroli dotrzymywania dopuszczalnych stężeń zanieczyszczeń.

Stacje funkcjonujące w ramach PMŚ są w większości stacjami automatycznymi, wykonującymi i przekazującymi wyniki pomiarów i umożliwiającymi udostępnienie na bieżąco informacji o średnich stężeniach 1-godzinnych zanieczyszczeń takich jak pyły PM₁₀ i PM_{2,5}, NO₂, SO₂, CO czy O₃. Na większości z nich mierzy się jednocześnie wiele rodzajów zanieczyszczeń – najczęściej pyły zawieszone, tlenki azotu, siarki, węgla, itd., ale są też lokalizacje, w których mierzone są tylko pojedyncze zanieczyszczenia. Wyniki pomiarów stężeń zanieczyszczeń powietrza ze stacji automatycznych są przekazywane automatycznie za pomocą sieci telekomunikacyjnej do bazy danych PMŚ. Dane te są również udostępniane społeczeństwu. Lokalizacje stacji pomiarowych należących do PMŚ zostały ustalone w miejscach pozwalających na uzyskanie

danych z różnego rodzaju otoczenia (pomiar tła krajowego, regionalnego, miejskiego, stacje komunikacyjne, czy przemysłowe) i są dostępne m.in. na portalu GIOŚ „Jakość powietrza”.

Instrumenty pomiarowe stosowane w tradycyjnych automatycznych stacjach monitorowania jakości powietrza należą do urządzeń kosztownych i wymagają regularnej konserwacji. Z powyższych powodów liczba stacji monitorujących jakość powietrza jest na ogół niewielka, a gęstość obserwacji zbyt mała, aby umożliwić szczegółowe odwzorowanie przestrzenne jakości powietrza. Obecnie w Polsce funkcjonuje łącznie niespełna 300 takich stacji pomiarowych (łącznie 285, z czego 209 to stacje automatyczne lub automatyczno-manualne).

Prawdopodobnie między innymi z tych powodów, w drugiej dekadzie XXI wieku w sprzedaży zaczęły pojawiać się niskokosztowe czujniki służące do pomiaru stężeń określonych zanieczyszczeń powietrza. Ich koszt to ułamek ceny urządzeń profesjonalnych, a przy tym cechują się niewielkimi rozmiarami, krótkim czasem odpowiedzi i wysoką częstotliwością wykonywania pomiarów. W kolejnych latach niektóre podmioty, takie jak samorządy, czy organizacje pozarządowe zaczęły prowadzić starania służące rozszerzeniu zasięgu konwencjonalnych sieci pomiarowych poprzez wykorzystywanie, oprócz urządzeń profesjonalnych, również instrumentów pomiarowych wykorzystujących czujniki niskokosztowe, które stawały się coraz bardziej dostępne oraz pojawiły się w ofercie firm komercyjnych (szczególnie zainteresowanie takimi rozwiązaniami wyrażały samorządy, na terenie których nie funkcjonowały żadne stacje pomiarowe funkcjonujące w ramach PMS.). Dzięki nim informacje dotyczące zanieczyszczenia powietrza mogą być aktualizowane w ciągu kilku minut lub nawet sekund. Sensory niskokosztowe oferują mobilność, łatwą konfigurację i rekonfigurację rozmieszczania węzłów pomiarowych. Istotną cechą tych sensorów jest jednak nieznaną dokładność i jakość wykonywanych za ich pomocą pomiarów.

Decyzja o podjęciu przeze mnie badań w zakresie określenia jakości i przydatności niskokosztowych czujników jakości powietrza wynikała zatem z kilku powodów. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- niewystarczającą gęstość rozmieszczenia profesjonalnych stacji pomiarowych należących do Państwowego Monitoringu Środowiska,
- oczekiwania społeczeństwa związane z dostępnością do danych o jakości powietrza w czasie rzeczywistym oraz możliwość prowadzenia pomiarów w wybranym przez siebie miejscu i z użyciem niekonwencjonalnych nośników instrumentów pomiarowych, takich jak na przykład drony,
- pojawienie się na rynku tanich, małych, lekkich, umożliwiających podłączenie do minikontrolera niskokosztowych sensorów do pomiaru stężeń niektórych zanieczyszczeń powietrza,
- wzrastającą popularność bezpośredniego stosowania niskokosztowych sensorów do pomiaru stężeń zanieczyszczeń przez np. samorządy, osoby indywidualne, korzystające z tego typu czujników bez świadomości i wiedzy na temat dokładności wykonywanych za ich pomocą pomiarów.

Aby pochodzące z nich dane mogły mieć praktyczną przydatność, konieczne było i jest rzetelne, długotrwałe przebadanie tego typu narzędzi w zróżnicowanych rzeczywistych warunkach w terenie, co jest głównym tematem prowadzonej przeze mnie działalności naukowej i czego owocem jest cykl artykułów stanowiących prezentowane przeze mnie osiągnięcia w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Kompleksową realizację badań poprzez samodzielne zbudowanie całościowych rozwiązań, począwszy od warstwy sprzętowej, poprzez przesył danych przez sieć GSM, po narzędzia analizy danych umożliwiła mi także wiedza z zakresu elektroniki, informatyki i telekomunikacji zdobyta w trakcie wcześniejszych studiów i studiów doktoranckich na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej.

4.6. Omówienie osiągniętych wyników i wskazanie możliwości ich wykorzystania w praktyce

Część I – badania porównawcze wybranych niskokosztowych czujników zanieczyszczeń powietrza z urządzeniami profesjonalnymi oraz propozycje matematycznej poprawy dokładności wykonywanych za ich pomocą pomiarów

Istotną część mojej działalności naukowej przeznaczyłem na zbadanie jakości pomiarów wykonywanych za pomocą popularnych obecnie w naszym kraju sensorów do pomiaru stężenia pyłów zawieszonych oraz ditlenku azotu, działających w warunkach rzeczywistych, w okresie wielu miesięcy, a nawet lat.

Główne pytania badawcze dotyczyły następujących kwestii:

- wzajemnej korelacji pomiędzy rozkładami wyników pomiarów wykonywanych za pomocą czujników niskokosztowych,
- korelacji pomiędzy rozkładami wyników pomiarów wykonywanych z wykorzystaniem czujników niskokosztowych w stosunku do rozkładów stężeń zanieczyszczeń zmierzonych przez stację PMŚ w warunkach terenowych,
- błędów pomiarowych sensorów niskokosztowych występujących podczas ich pracy w warunkach rzeczywistych w stosunku do wskazań profesjonalnych instrumentów pomiarowych znajdujących się w stacjach pomiarowych PMŚ, przy których były prowadzone pomiary porównawcze,
- identyfikacji prawidłowości, cech specyficznych czujników bądź ich podatności na czynniki zewnętrzne (np. pogodowe) i możliwości zbudowania na tej podstawie funkcji korygującej oraz określenia skali poprawy dokładności, jaką można byłoby w ten sposób osiągnąć.

Poniżej zostaną zaprezentowane wyniki badań oraz modele sensorów, dla których udało się w wyniku przeprowadzonych przeze mnie prac badawczych wypracować znaczącą poprawę dokładności ich wskazań.

Badania porównawcze sensorów mierzących stężenia pyłów zawieszonych

Wybrane rezultaty prac związanych z określeniem jakości wskazań niskokosztowych sensorów mierzących stężenia pyłów zawieszonych PM₁₀ zostały opisane w składającym się na osiągnięcie artykule:

Rogulski Mariusz, Badyda Artur Jerzy: Investigation of Low-Cost and Optical Particulate Matter Sensors for Ambient Monitoring, Atmosphere, vol. 11, nr 10, 2020, s. 1-18, DOI:10.3390/atmos11101040, 70 punktów, IF(2,046). (pozycja [A1] w załączniku nr 1)

W celu uzyskania odpowiedzi na wcześniej postawione pytania badawcze zostały przeze mnie wykorzystane różne możliwości przeprowadzenia w warunkach rzeczywistych (tj. w terenie) pomiarów porównawczych sensorów niskokosztowych z urządzeniami profesjonalnymi

stosowanymi w stacjach pomiarowych PMŚ. Główną sposobnością do przeprowadzenia badań okazała się współpraca z Miastem Nowy Sącz i uzyskanie możliwości montażu instrumentów pomiarowych w bezpośrednim sąsiedztwie stacji PMŚ w wyżej wspomnianym mieście, jak również kampanie pomiarów porównawczych zorganizowane w Rabce-Zdroju i Dobczycach przez Urząd Marszałkowski Województwa Małopolskiego, Krajowe Laboratorium Referencyjne i Wzorcujące Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska.

Najistotniejsza w tym aspekcie była kampania pomiarów porównawczych niskokosztowych czujników stężeń pyłów zawieszonych PM₁₀, która odbyła się w Rabce-Zdroju w okresie luty-czerwiec 2017 roku (urządzenia pomiarowe zamontowane na stacji PMŚ zostały pokazane na fot. 1). Dane zgromadzone w trakcie tej kilkumiesięcznej kampanii pomiarowej posłużyły mi do określenia korelacji wzajemnej czujników, korelacji względem urządzenia pomiarowego PMŚ oraz analizy błędów pomiarowych czujników w zależności od pory roku. Podczas wszystkich kampanii pomiarowych (zarówno z sensorami stężeń pyłów, jak również innych zanieczyszczeń), pomiary z użyciem czujników niskokosztowych były wykonywane średnio co minutę, a następnie agregowane do wartości 1-godzinnych, a następnie do 24-godzinnych.



Fotografia 1. Urządzenia pomiarowe na stacji PMŚ w Rabce-Zdroju. Dwa testowane urządzenia pomiarowe z sensorami niskokosztowymi zostały zaznaczone za pomocą czerwonej ramki. Fotografia własna

W wyniku preselekcji przeprowadzonej na niskokosztowych czujnikach stężeń pyłów zawieszonych różnych producentów względem urządzenia pomiarowego DustTrak8533 do dalszych pomiarów porównawczych w odniesieniu do stacji PMŚ wybrano stosujące metodę optyczną sensory firmy DFRobot. Pomiary porównawcze dwóch niskokosztowych sensorów pyłów zawieszonych wspomnianego wyżej producenta z urządzeniem profesjonalnym obejmowały okres o zróżnicowanych parametrach, zarówno meteorologicznych jak i typowych stężeń pyłów. Z tego też względu analiza została wykonana dla poszczególnych miesięcy kalendarzowych (luty – czerwiec). Uzyskane wartości podstawowych parametrów statystycznych pomiarów z sensorów niskokosztowych oraz z urządzenia profesjonalnego zostały zamieszczone w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry statystyczne wyników pomiarów prowadzonych przy stacji PMŚ w Rabce-Zdroju w poszczególnych miesiącach badanego okresu dla dwóch badanych niskokosztowych czujników pyłu PM₁₀ firmy DFRobot względem stacji PMŚ (luty-czerwiec 2017 roku)

Parametr statystyczny	Sensor	Luty	Marzec	Kwiecień	Maj	Czerwiec
Średnie stężenie PM ₁₀ [µg/m ³]	1	92,57	55,59	35,57	30,89	16,96
	2	88,28	53,86	38,66	28,18	16,23
Średnie stężenie PM ₁₀ – PMŚ [µg/m ³]	-	50,28	39,41	25,73	20,9	15,8
Współczynnik korelacji Pearsona <i>r</i>	1	0,975	0,922	0,793	0,783	0,767
	2	0,908	0,912	0,784	0,776	0,75
Błąd średni [µg/m ³]	1	42,29	16,17	9,84	9,99	1,16
	2	38	14,45	12,92	7,28	0,43
Średni błąd procentowy [%]	1	87,22	42,22	42,47	48,45	6,99
	2	83,05	37,01	54,34	33,51	2,4
Średni bezwzględny błąd procentowy [%]	1	87,22	45,8	43,58	48,54	15,32
	2	70,94	40,79	54,66	39,05	13,32

Zgromadzone wyniki pomiarów pokazały dość wysoką korelację między rozkładami stężeń uzyskanymi z pomiarów za pomocą sensorów DFRobot a przeprowadzonymi z użyciem instrumentu profesjonalnego. Dla sensora nr 1 wartość współczynnika korelacji Pearsona oscylowała między $r = 0,767$ a $r = 0,975$, zaś dla czujnika nr 2 – od $r = 0,75$ do $r = 0,912$. Dla obu czujników miała miejsce korelacja dodatnia. Jej najwyższe współczynniki zaobserwowano w miesiącach z najwyższymi stężeniami PM₁₀, zaś dla kwietnia, maja i czerwca zanotowano nieco słabszą zależność. W zdecydowanej większości przypadków badane czujniki zawyżały wartości pomiarów. W skali miesiąca wartości te były zwykle o 40-50% wyższe w stosunku do tych uzyskanych z urządzenia profesjonalnego. Znacznie wyższe wartości uzyskano jedynie w lutym – o ponad 80%. Jednocześnie współczynnik korelacji Pearsona sensorów względem siebie w okresie całej kampanii wyniósł $r = 0,95$.

Podjęwając próbę identyfikacji czynników wpływających na występowanie znaczących przeszacowań wyników pomiarów realizowanych za pomocą sensorów niskokosztowych, przeanalizowano zależność odchylenia stężeń PM₁₀ zmierzonych przez czujniki niskokosztowe od wyników pomiarów uzyskanych z urządzenia profesjonalnego dla najważniejszych parametrów meteorologicznych.

W tabeli 2 zostały przedstawione współczynniki korelacji pomiędzy odchyleniami zmierzonych stężeń pyłu PM₁₀ w zależności do temperatury, wilgotności względnej i siły wiatru w poszczególnych miesiącach okresu pomiarowego.

Tabela 2. Wartości współczynników korelacji Pearsona *r* pomiędzy odchyleniami stężeń PM₁₀ z czujników niskokosztowych w stosunku do wartości z urządzenia profesjonalnego a poszczególnymi czynnikami meteorologicznymi.

Czynnik meteorologiczny	Miesiąc					
	Luty	Marzec	Kwiecień	Maj	Czerwiec	Cały okres
Temperatura	-0,26	-0,39	-0,21	-0,04	-0,31	-0,34
Wilgotność względna	0,65	0,28	0,58	0,55	0,33	0,49
Siła wiatru	-0,24	-0,29	0,05	-0,12	0,01	-0,1

Przedstawione wyniki wskazują, iż stopień przeszacowania bądź niedoszacowania wartości pomiarów jest związany z wartościami niektórych parametrów meteorologicznych powietrza zewnętrznego. Szczególnie silnie można to zaobserwować w przypadku wilgotności względnej. W

przypadku powiązania wilgotności względnej z odchyleniami zmierzonych stężeń PM₁₀ od wyników pomiarów z urządzenia profesjonalnego ma miejsce dość umiarkowana korelacja dodatnia, co w większości przypadków oznacza, że skala odchylenia wskazań czujników niskokosztowych zwiększa się wraz ze wzrostem wartości wilgotności względnej powietrza zewnętrznego.

Zjawisko zawyżania wartości pomiarów przez czujniki niskokosztowe w sytuacjach wysokiej wilgotności względnej może wynikać z faktu, iż w przypadku wysokiej wilgotności kropelki wody (pochodzące np. z mgły), unoszące się w powietrzu, mogą być traktowane jako cząstki pyłu. Przy zasysaniu powietrza do czujnika mogą one powodować, podobnie jak cząstki stałe, rozpraszanie światła. Prawdopodobnym jest, że wówczas instrument pomiarowy odczyta je jako zanieczyszczenia.

W przypadku temperatury wartości współczynników korelacji Pearsona są bliższe zeru w porównaniu do wartości współczynników korelacji Pearsona dla wilgotności względnej, zaś sama korelacja w stosunku do poprzedniej jest odwrotna. Oznacza to, iż stopień przeszacowania wyników zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. Odpowiedzi na pytanie o przyczynę takiej zależności można upatrywać w powiązaniu temperatury z wilgotnością. W badanym okresie przeważał następujący schemat powiązania tych dwóch parametrów meteorologicznych: niska temperatura przy dużej wilgotności względnej, zaś wysoka temperatura z o wiele niższą wilgotnością względną.

Analizowaną listę parametrów wpływających na wskazania czujników zamyka prędkość wiatru. Kolejne pomiary prowadzone w testowej sieci pomiarowej w Nowym Sączu pokazały, iż przy silniejszym wietrze ilorazy wskazania czujników niskokosztowych w stosunku do urządzenia profesjonalnego mogą być mniejsze niż przy takich samych warunkach atmosferycznych, ale przy słabszym wietrze. Przyczyną wpływu silnego wiatru na wskazania sensorów optycznych może być fakt szybkiego wdmuchiwanie powietrza do komory sensora. Wiatrak zaciągający powietrze nie spełnia wtedy prawidłowo swojej roli, gdyż parcie powietrza z zewnątrz staje się silniejsze niż ciąg wytwarzany przez wiatrak. To z kolei prawdopodobnie wpływa na algorytm zliczania cząstek stosowany przez sensor, uzależniony od ustalonego, wymuszonego przepływu powodowanego przez wbudowany wiatrak.

Bazując na zgromadzonych danych pomiarowych oraz obserwacjach, w artykule zaproponowano różne postaci funkcji korygującej, które na podstawie wyników pomiarów z czujnika oraz dostępności parametrów meteorologicznych charakteryzujących badane powietrze umożliwiały wyznaczenie skorygowanych stężeń PM₁₀:

$$P_C = -0,0007P^2 + 0,674P + 3,35 \quad (1)$$

$$P_C = -0,0007P^2 + 0,678P - 0,187H + 17,6 \quad (2)$$

$$P_C = -0,0007P^2 + 0,6747P - 0,039T - 0,191H + 18,42 \quad (3)$$

gdzie:

P – stężenie PM₁₀ zmierzone przez sensor niskokosztowy [$\mu\text{g}/\text{m}^3$],

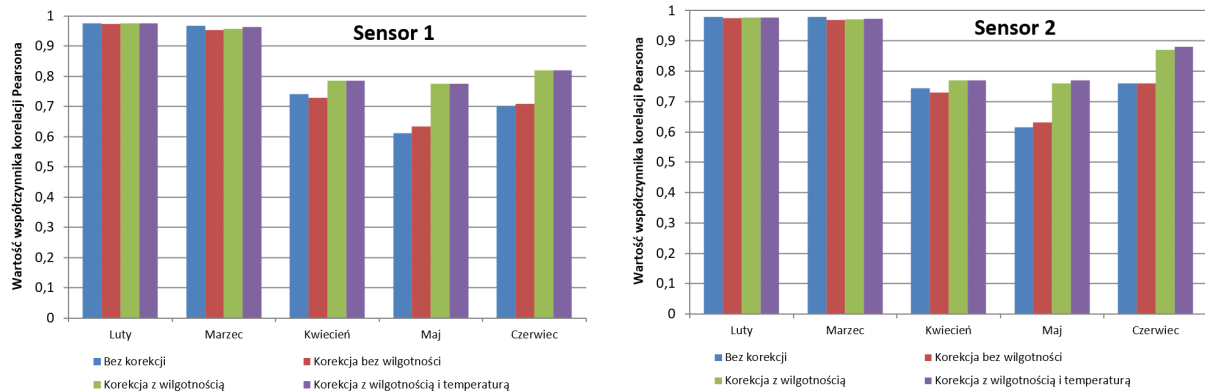
H – wilgotność względna badanego powietrza [%],

T – temperatura badanego powietrza [$^{\circ}\text{C}$],

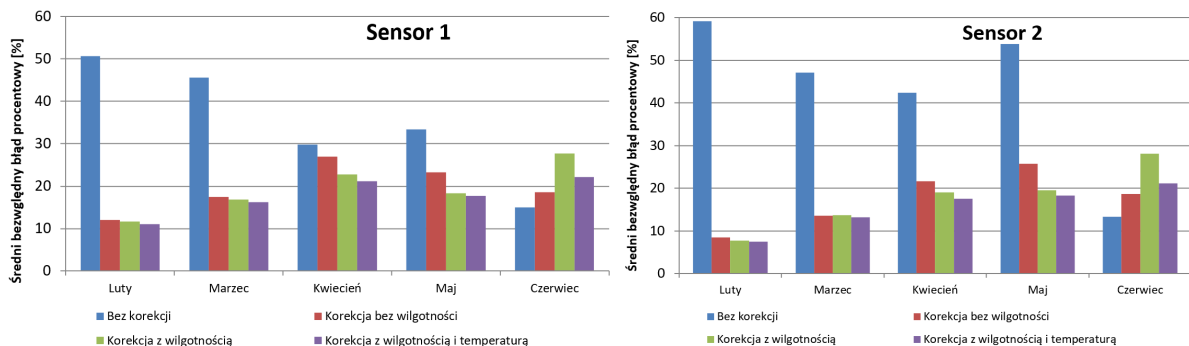
P_C – skorygowane stężenie PM₁₀ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Zależność (1) wykorzystuje jedynie wartości zmierzone przez sensor, zależność (2) – także wilgotność względną powietrza, natomiast zależność (3) – dodatkowo temperaturę (w prezentowanym artykule nie przedstawiano zależności (3)).

Zaproponowane zależności przetestowano na innych egzemplarzach sensorów stężeń pyłów zawieszonych firmy DFRobot w trakcie kolejnej kampanii pomiarów porównawczych, która miała miejsce przy stacji PMŚ w Nowym Sączu w okresie luty-czerwiec 2018 roku. Wybrane rezultaty zostały zaprezentowane na wykresach 1-2.



Wykres 1. Wartości współczynnika korelacji Pearsona r dla pomiarów stężeń pyłu PM_{10} wykonanych za pomocą niskokosztowych sensorów pyłów zawieszonych firmy DFRobot względem pomiarów wykonanych przez stację PMŚ w Nowym Sączu bez i z zastosowaną funkcją korygującą (1), (2) i (3) dla poszczególnych miesięcy okresu pomiarowego.



Wykres 2. Wartości średniego bezwzględnego błęd procentowy dla pomiarów stężeń pyłu PM_{10} wykonanych za pomocą niskokosztowych sensorów pyłów zawieszonych firmy DFRobot w stosunku do pomiarów wykonanych przez stację PMŚ w Nowym Sączu bez i z zastosowaną funkcją korygującą (1), (2) i (3) dla poszczególnych miesięcy okresu pomiarowego luty-czerwiec 2018.

Luty i marzec 2018 r. charakteryzowały się relatywnie niskimi temperaturami powietrza, co przyczyniło się do wysokich rzeczywistych stężeń pyłu PM_{10} . Jak pokazano wcześniej, tego typu warunki klimatyczne sprzyjają również znaczącemu zawyżaniu „surowych” wskazań przez czujniki niskokosztowe. W stosunku do stacji PMŚ, w przypadku pierwszego czujnika w lutym zanotowano wartości wyższe prawie o 50%, zaś w przypadku drugiego czujnika – prawie o 60%. Największe różnice pomiędzy stężeniami PM_{10} zmierzonymi przez stację PMŚ a surowymi pomiarami pochodzącymi z czujników niskokosztowych zanotowano dla 7 lutego. Miało wtedy miejsce najwyższe, w analizowanym okresie, stężenie PM_{10} zarejestrowane przez stację PMŚ (średnie 24-

godzinne stężenie PM_{10} : $141 \mu\text{g}/\text{m}^3$). W lutym i marcu, w stosunku do instrumentu profesjonalnego, wyniki pomiarów pochodzących z obu sensorów cechowała natomiast bardzo wysoka wartość współczynnika korelacji Pearsona, wynosząca blisko 0,98.

Po zastosowaniu funkcji korygującej wyznaczonej na podstawie pomiarów porównawczych w Rabce-Zdroju uzyskano znaczące polepszenie jakości pomiarów w stosunku do wartości pochodzących ze stacji PMŚ. Wartości współczynników korelacji wciąż pozostały na bardzo wysokim poziomie, natomiast największą poprawę zaobserwowano w przypadku odchyień procentowych i różnic w wartościach bezwzględnych. Bezwzględny błąd procentowy wyniósł w lutym 8-11%, zaś w marcu ok. 13-16%. Zanotowano również znaczącą redukcję zawyżania stężeń w przypadku dni z wysokimi stężeniami pyłów PM_{10} (7, 12 i 13 lutego). Osiągnięcie pożądanego skutku działania funkcji korygującej niewątpliwie wynikało z wyznaczenia jej na podstawie obszernego zbioru danych treningowych, uwzględniającego pomiary prowadzone w różnych porach roku i w zróżnicowanych warunkach atmosferycznych.

W kwietniu i maju zaobserwowano nieco niższe wyjściowe wartości współczynnika korelacji niż w dwóch miesiącach je poprzedzających. Zastosowanie funkcji korygującej w tym przypadku przyniosło poprawę, szczególnie wyraźną w maju, co odnotowano w większej zbieżności uzyskanej poprzez uwzględnienie warunków meteorologicznych, dla obu czujników. W powyższych dwóch miesiącach znaczącemu polepszeniu uległy również wartości błędów pomiarowych, w szczególności bezwzględnych. Ostatecznie ich wartość w skali miesiąca wyniosła około 20%, zaś błędów średnich – poniżej 6%.

Interesująco przedstawia się kwestia wielkości błędów w zależności od uwzględnienia wilgotności względnej i temperatury powietrza w funkcji korygującej. W przypadku miesięcy zimowych (luty, marzec) dla zdecydowanej poprawy dokładności wyników, wystarczyło zastosowanie funkcji korygującej bez uwzględniania zmienności wilgotności względnej i temperatury powietrza. Użycie rozszerzonej postaci funkcji korygującej jeszcze nieznacznie polepszało niektóre wskaźniki, jednak poprawa nie była już tak wyraźna. Wystąpił także zauważalny spadek wartości błędów bezwzględnych oraz bezwzględnych błędów procentowych.

Dla miesięcy wiosennych (kwiecień, maj) zastosowanie funkcji korygującej bez uwzględniania parametrów meteorologicznych przyniosło pewne polepszenie jakości pomiarów, które dało się jeszcze wyraźniej zauważyć przy uwzględnieniu temperatury i wilgotności względnej. Najwyraźniej widać ten fakt w przypadku wartości współczynnika korelacji dla maja. Biorąc pod uwagę wartości błędów bezwzględnych, zastosowanie funkcji korygującej w każdym przypadku przyniosło dalszą poprawę.

Zaprezentowane wyniki pokazały między innymi to, że postać funkcji korygującej wyznaczonej na parze czujników w jednej miejscowości, sprawdziła się po zastosowaniu jej na innej parze sensorów w innej części kraju. Niewątpliwie wpływa na to wysoka wzajemna korelacja badanych czujników.

Wykorzystując długoterminowe pomiary porównawcze prowadzone dla sensorów PM przy stacji PMŚ w Nowym Sączu, rozszerzoną analizę związaną z oceną równoważności wskazań czujników niskokosztowych przy zastosowaniu różnych postaci funkcji korygujących w stosunku do metod referencyjnych przedstawiono w osiągnięciu:

Owczarek Tomasz, Rogulski Mariusz, Czechowski Piotr O: Assessment of the Equivalence of Low-Cost Sensors with the Reference Method in Measuring PM_{10} Concentration Using Selected

Celem pracy było wykazanie możliwości budowy i zaawansowana ocena różnych modeli korygujących wyniki pomiarów stężeń pyłów zawieszonych PM₁₀ uzyskanych przy pomocy niskokosztowych sensorów wykorzystujących metodę optyczną do wartości porównywalnych ze stężeniami uzyskanymi metodą zgodną z referencyjną. Dodatkowym celem było wykazanie, że tak skorygowane wyniki mogą posłużyć do przeprowadzenia procedury badania równoważności metod. W analizach do konstrukcji funkcji korygujących wykorzystano Uogólnione Modele Regresji (GRM). Skonstruowane modele oceniono przy wykorzystaniu współczynników determinacji i metodologii obliczania niepewności pomiarowej urządzenia. W celu analizy dane zebrane z czujników niskokosztowych (wraz ze zmierzonymi parametrami meteorologicznymi) podzielono na dwie grupy – dane uczące oraz dane weryfikujące.

W konstrukcji modeli wykorzystano stężenia PM₁₀ pochodzące z metody zgodnej z referencyjną (ze stacji PMS w Nowym Sączu) jako zmienną zależną oraz stężenia PM₁₀ z metody kandydującej i czynniki które mogą istotnie wpływać na zachowanie się niskokosztowych czujników pyłów, tj. temperaturę i wilgotność powietrza, oraz siłę wiatru jako zmienne niezależne. Z racji niekonieczności liniowych związków między zmiennymi niezależnymi a zmienną zależną zbudowano również modele o nieliniowo przekształconych zmiennych. Wykorzystano w tym celu logarytmowanie logarytmem naturalnym ($\ln X_i$), przekształcenie wykładnicze (e^{X_i}) oraz funkcję wielomianową drugiego stopnia. Uzyskano w ten sposób osiem grup modeli podlegających oddzielnym procedurom estymacji i wyboru najlepszych modeli:

- modele liniowe,
- modele liniowe z interakcjami zmiennych,
- modele oparte na wielomianach drugiego stopnia,
- modele oparte na wielomianach drugiego stopnia z interakcjami zmiennych,
- modele wykorzystujące zmienne niezależne wraz z ich logarytmami,
- modele stosujące zmienne niezależne wraz z ich logarytmami i interakcjami zmiennych,
- modele wykorzystujące zmienne niezależne wraz z ich przekształceniami wykładniczymi
- modele stosujące zmienne niezależne wraz z ich przekształceniami wykładniczymi i interakcjami zmiennych.

W każdej grupie modeli przeprowadzono estymację wszystkich możliwych modeli, wybierając te o istotnych oszacowaniach parametrów strukturalnych, a spośród nich model o najwyższej wartości skorygowanego współczynnika determinacji R^2 . Następnie tak pozyskane modele podlegały ocenie z wykorzystaniem skorygowanego współczynnika determinacji na podstawie uczącego zbioru danych.

Przykładowo – model liniowy funkcji korygującej miał postać:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + \dots + a_kX_k$$

gdzie Y jest zmienną zależną, X_i to zmienna niezależna a parametry a_i są oszacowaniami parametrów strukturalnych.

Dla sformułowanej powyżej grupy modeli oszacowano parametry modeli dla każdej kombinacji zmiennych niezależnych (wykorzystując uczącą część danych), usunięto modele o nieistotnych parametrach strukturalnych, a spośród pozostałych wybrano model najlepszy. W tabeli 3 zaprezentowano wyniki estymacji parametrów modelu korygującego oddzielnie dla stężeń

pochodzących z obu sensorów PM (S1 i S2). Podane oszacowania parametrów należą do istotnych statystycznie na poziomie istotności przynajmniej $\alpha=0,05$.

Tabela 3. Oszacowania parametrów strukturalnych dla najlepszych modeli liniowych funkcji korygujących wartości stężenia PM_{10} metody kandydującej, wartość statystyki testowej F oraz skorygowanego współczynnika determinacji R^2 .

Sensor PM	a_0	Stężenie PM_{10}	Prędkość wiatru	Wilgotność	Wartość F	Uzyskany R^2
S1	39,413	0,521	3,967	-0,368	806,46	0,964
S2	46,792	0,485		-0,400	1012,31	0,958

Na podstawie modeli funkcji korygującej opisanych w tabeli 3 stwierdzono, że na skorygowane stężenia PM_{10} wpływ miało stężenie uzyskane z badanego instrumentu pomiarowego oraz wilgotność względna powietrza. Wzrost wilgotności wpływał na spadek skorygowanego stężenia PM_{10} . W przypadku powietrza o wysokiej wilgotności badane czujniki niskokosztowe miały tendencję do przeszacowania stężenia zanieczyszczenia. Oba modele wykazywały różnicę przede wszystkim w istotności wpływu prędkości wiatru. W modelu dla sensora S1 prędkość wiatru była istotna statystycznie, natomiast w modelu konstruowanym, opierając się na stężeniach z S2, zmienna nie należała do istotnych statystycznie. Wspomniana rozbieżność mogła wynikać nawet z bardzo niewielkich różnic w danych. W przypadku parametru na granicy istotności niewielkie odchylenia w danych mogą spowodować odrzucenie lub nieodrzućenie hipotezy o istotności tego parametru w teście t .

Uzyskane modele zostały prawidłowo skonstruowane, co potwierdzały wysokie wartości statystyki testowej F w teście na łączną istotność parametrów modelu (każdy z parametrów był również indywidualnie istotny statystycznie). Bardzo wysokie w obu przypadkach wartości współczynnika determinacji (0,964 i 0,958) wskazywały na znakomite dopasowanie modelu do danych empirycznych. Na podstawie zbudowanych modeli nie można było wyjaśnić odpowiednio jedynie 3,6% oraz 4,2% zmienności stężeń PM_{10} .

Rzeczywista skuteczność wyznaczonych modeli została zbadana przy pomocy stężeń PM_{10} pochodzących z części weryfikacyjnej danych. Po obliczeniu wartości funkcji korygujących dla tych danych zweryfikowano ich tożsamość z pomiarami stężeń PM_{10} dla metody referencyjnej. W tym celu zbudowano funkcje kalibrujące, czyli modele regresji liniowej pomiędzy skorygowanymi stężeniami pochodzącymi z badanych urządzeń, a stężeniami pochodzącymi z urządzenia należącego do PMŚ. Wyniki estymacji przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Weryfikacja liniowej funkcji korygującej: oszacowania parametrów, błędy oszacowań, wartości współczynników determinacji R^2 oraz wartość statystyki t dla funkcji kalibrujących S1 i S2.

Sensor PM	Współczynnik a_1	Błąd oszacowania $s(a_1)$	Uzyskany R^2	$t(a_1-1)$
S1	0,979	0,031	0,957	-0,668
S2	0,979	0,032	0,957	-0,669

W obydwu modelach kalibrujących uzyskano nieistotnie różne od 0 oszacowania współczynnika a_0 i z tego powodu nie ujęto ich w tabeli 4. Oszacowania a_1 są dla obu modeli równe 0,979 i nieistotnie różne od 1. Tak postawioną tezę potwierdzają wartości statystyki $t(a_1 - 1)$, które są bliskie 0. Bardzo wysokie wartości skorygowanych współczynników determinacji wskazują na wysoką skuteczność modeli. Modele kalibrujące w obu przypadkach w blisko 96% stanowiły

wyjaśnienie na zmienność stężeń PM przy pomocy wartości wyliczonych na podstawie modeli korygujących.

W wyniku przeprowadzonej analizy, przedstawionej w artykule stanowiącym osiągnięcie, okazało się, że w czterech grupach uzyskano modele o obiecujących właściwościach i istotnie różniące się pod względem konstrukcji. Należały do nich modele liniowe, modele liniowe z interakcjami zmiennych, modele liniowe z logarytmami zmiennych oraz modele liniowe z przekształceniami wykładniczymi zmiennych. W pozostałych grupach uzyskano niezadowalające postaci funkcji: o niskich właściwościach statystycznych, bardzo skomplikowanej budowie lub zbudowane analogicznie do wcześniej skonstruowanych modeli.

Analiza istotności statystycznej zmiennych oraz wartości oszacowań ich współczynników strukturalnych wskazała, że na pomiary stężeń PM₁₀ wykonywanych przez badane instrumenty pomiarowe wpływ miały wilgotność i siła wiatru. Temperatura powietrza natomiast oddziaływała w sposób bardzo ograniczony. W przypadku siły wiatru we wszystkich modelach zanotowano dodatnie wartości parametrów strukturalnych. Oznacza to, że silny wiatr powoduje obniżenie rejestrowanego poziomu stężenia PM₁₀, na co model musi następnie zareagować skorygowaniem tej wartości w górę. Odwrotna sytuacja występuje w przypadku wilgotności powietrza. Ujemne wartości parametrów strukturalnych wskazują na to, że wzrost poziomu wilgotności wpływa na pozorny wzrost stężeń PM₁₀ wykrywanych przez sensor. Porównując wytypowane modele pod względem zdolności do przybliżania wartości stężeń PM₁₀ z metody odniesienia (współczynnikami determinacji) oraz braku błędów systematycznych (badając właściwości funkcji kalibracyjnej), można wysnuć wniosek, że wszystkie modele posiadają pod tym względem zbliżone właściwości. Wartości skorygowanych współczynników determinacji obliczane zarówno dla zbioru uczącego danych jak i dla zbioru weryfikacyjnego były zbliżone i bardzo wysokie. Wartości R^2 przekraczały 0,95. Oznacza to bardzo dobre dopasowanie modeli do danych empirycznych, czyli stężeń PM₁₀ pochodzących z metody równoważnej referencyjnej. Wszystkie modele pomyślnie przeszły również ocenę braku błędów systematycznych. Modele kalibracyjne dla wszystkich wytypowanych funkcji korygujących miały zadowalające właściwości, czyli nieistotnie statystycznie różnią się od funkcji tożsamościowej. Można zatem uznać, że pod względem konstrukcji wszystkie funkcje korygujące spełniają założenia i mają zbliżoną zdolność do prawidłowego korygowania surowych wyników.

Ocena wybranych funkcji korygujących pod względem niepewności pomiarowej zróżnicowała je w niewielkim stopniu. Wartości rozszerzonej niepewności względnej dla wszystkich funkcji korygujących były niskie i spełniały wymogi stawiane metodom równoważnym.

Reasumując, należy stwierdzić, że w analizowanych przypadkach zastosowanie nawet prostej postaci funkcji korygującej przynosiło znaczącą poprawę i mogło doprowadzić do uzyskania akceptowalnych poziomów jakości otrzymywanych wyników pomiarów (jak na czujniki niskokosztowe). Uwzględnienie dodatkowych parametrów meteorologicznych – np. wilgotności względnej powietrza, poza korekcją samych wartości pomiarów, w większości przypadków może przynieść jeszcze większą poprawę dopasowania wyników pomiarów wykonywanych za pomocą sensorów niskokosztowych w odniesieniu do wyników pochodzących z urządzeń profesjonalnych. Koszt dodatkowego instrumentu pomiarowego do mierzenia temperatury i wilgotności względnej jest bardzo niewielki, a tym samym opłacalny, biorąc pod uwagę jakość kompletnego urządzenia. Sam czujnik cechują niewielkie gabaryty, co nie dyskwalifikuje go do zastosowania nawet w niewielkim przenośnym urządzeniu pomiarowym.

Z drugiej strony przeprowadzone badania pokazały także, iż bezkrytyczne przyjmowanie bezpośrednich wyników z niskokosztowych sensorów mierzących stężenie pyłów zawieszonych może w pewnych sytuacjach stanowić źródło nieprawdziwych informacji. Jak pokazano, sensory te zawyżają wyniki pomiarów w okresach z wysoką wilgotnością i niską temperaturą (badano także czujniki innych producentów i one również mocno przeszacowywały wskazania w takich warunkach). W polskich warunkach klimatycznych zwykle w takich okresach panują o wiele wyższe stężenia PM_{10} niż na przykład w okresach letnich, a przez to zwiększa się zainteresowanie społeczeństwa jakością powietrza. Niskokosztowe czujniki pyłów zawieszonych mogą zatem stanowić źródło dodatkowych informacji, jednak wyłącznie wówczas, gdy zostaną odpowiednio przebadane i, w razie potrzeby, wspomagane dodatkową analizą matematyczną.

Badania porównawcze sensorów mierzących inne stężenia zanieczyszczeń powietrza

W ramach badań jakości sensorów niskokosztowych, wykorzystując zdobyte doświadczenia związane z sensorami pyłów zawieszonych, zostały przeze mnie zbadane również niektóre czujniki innych, typowo występujących w powietrzu zanieczyszczeń: NO_2 , SO_2 i O_3 . Zagadnienie badawcze w tym obszarze stanowiło określenie potencjalnej przydatności niskokosztowych czujników do budowy urządzeń pomiarowych, które skutecznie mogłyby mierzyć typowe stężenia zanieczyszczeń w powietrzu zewnętrznym, określenie błędów pomiarowych oraz próba wyznaczenia funkcji korygujących, które pełniłyby podobną rolę, jak w przypadku niskokosztowych czujników pyłów zawieszonych.

Niskokosztowe czujniki wspomnianych zanieczyszczeń produkuje wiele firm. Analizując literaturę naukową w tym zakresie, można wysnuć wniosek, iż grupę najczęściej badanych czujników, a jednocześnie oferujących najwyższą jakość (na miarę czujników niskokosztowych) stanowią sensory produkowane przez brytyjską firmę Alphasense. Jednocześnie na rynku obecnych jest wielu innych producentów niskokosztowych czujników, dla których nie można było znaleźć jakichkolwiek badań weryfikujących jakość ich produktów oraz potencjalną przydatność. Do jednego z wielu przykładów zalicza się amerykańska firma SpecSensors.

Badania czujników firmy Spec Sensors zostały przeze mnie przeprowadzone w trzech lokalizacjach:

- pomiary porównawcze sensorów NO_2 i SO_2 umieszczonych przy stacji PMŚ w Nowym Sączu – w okresie lipiec-listopad 2018 roku,
- pomiary porównawcze sensorów NO_2 i O_3 w dwóch lokalizacjach w Sewilli (Hiszpania) w okresie sierpień-listopad 2018: na stacji pomiarowej Santa Clara (stacja tła) oraz stacji pomiarowej Ranilla (stacja komunikacyjna) – fot. 2. Obydwie stacje należą do Consejería de Medio Ambiente w Junta de Andalucía w Hiszpanii (hiszpański odpowiednik polskiego GIOŚ). Możliwość przeprowadzenia na nich pomiarów porównawczych była rezultatem współpracy z prof. Antonio Lozano García z Universidad de Sevilla oraz z Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía (Sewilla).



Fotografia 2. Miejsca prowadzenia pomiarów porównawczych w Sewilli (z lewej: stacja pomiarowa Santa Clara, z prawej: Ranilla). Urządzenia pomiarowe zostały zaznaczone za pomocą czerwonych ramek. Fotografia własna.

W każdym urządzeniu zostały zamontowane po dwa sensory mierzące dany typ zanieczyszczenia.

Badania porównawcze wykazały niestety brak przydatności tych czujników w typowych warunkach zewnętrznych. Dla czujników SO_2 , w zależności od miesiąca, współczynnik korelacji Pearsona wyniósł od $r \approx -0,5$ do $r \approx 0,3$, dla sensorów NO_2 oscylował między $r \approx -0,1$ a $r \approx 0,2$, natomiast dla czujników ozonu – od $r \approx 0,6$ do $r \approx 0,8$. Wszystkie pary sensorów cechowały się również niską wzajemną korelacją (w niektórych przypadkach poniżej 0,3), dlatego zrezygnowano z prób wyznaczenia algorytmu poprawy dokładności pomiarów wykonywanych z ich wykorzystaniem.

Znacznie lepsze rezultaty otrzymano przy badaniu niskokosztowych czujników NO_2 firmy Alphasense. Zostały one przedstawione w trzecim artykule składającym się na osiągnięcie:

Rogulski Mariusz, Badyda Artur Jerzy, Gayer Anna, Reis Johnny: Improving the Quality of Measurements Made by Alphasense NO_2 Non-Reference Sensors Using the Mathematical Methods, Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, vol. 22, nr 10, 2022, s. 1-17, DOI:10.3390/s22103619, 100 punktów, IF(3,031). (pozycja [A2] w załączniku nr1)

Czujniki NO_2 firmy Alphasense badano w następujących lokalizacjach:

- przy stacji PMŚ w Nowym Sączu w okresie lipiec-listopad 2019 roku,
- przy stacji PMŚ Warszawa-Chrościckiego w okresie grudzień 2019-maj 2020 roku.

Wyniki pomiaru są zwracane przez sensory firmy Alphasense w nieco inny sposób względem badanych wcześniej czujników pyłów (w ich przypadku wartość pomiaru w odpowiednich jednostkach jest zwracana bezpośrednio z czujnika). Do wyznaczenia stężenia danego zanieczyszczenia producent zaleca zastosowanie jednej z dwóch zależności, które wykorzystują zmieniającą się w trakcie pomiarów wartość napięcia dla elektrody roboczej WE_u

[mV] oraz wartość napięcia dla elektrody pomocniczej AE_u [mV], a także parametry podane dla konkretnego egzemplarza czujnika:

- WE_e – wartość elektronicznego offsetu dla użytej płytki ISB (Alphasense Individual Sensor Board) dla elektrody roboczej [mV]
- AE_e – wartość elektronicznego offsetu dla użytej płytki ISB dla elektrody pomocniczej [mV]
- WE_0 – wskazanie elektrody roboczej w [mV] w przypadku powietrza pozbawionego zanieczyszczeń
- AE_0 – wskazanie elektrody pomocniczej w [mV] w przypadku powietrza pozbawionego zanieczyszczeń

W celu wyznaczenia skorygowanej wartości napięcia (WE_C) producent proponuje zastosowanie jednej z dwóch zależności:

$$WE_C = (WE_U - WE_E) - n_T(AE_U - AE_E) \quad (4)$$

$$WE_C = (WE_U - WE_E) - (WE_0 - AE_0) - k'_T(AE_U - AE_E) \quad (5)$$

gdzie:

- n_T – współczynnik podany przez producenta (korekcja w zależności od temperatury)
- k'_T – współczynnik podany przez producenta (korekcja w zależności od temperatury).

W badaniach porównawczych prowadzonych przy stacji PMŚ na terenie Nowego Sącza wykorzystano dwa czujniki NO2-B43F firmy Alphasense oznaczone w dalszej części jako NO2_1 i NO2_2. Dla każdego z tych sensorów dysponowano zbiorem parametrów: WE_e , AE_e , WE_0 , AE_0 , wyznaczonym przez producenta podczas kalibracji, a w trakcie pomiarów gromadzono zmierzone wartości WE_u oraz AE_u . Pomiar tych wartości odbywał się co minutę. Napięcia były potem przeliczane na odpowiadające im stężenia. Wartości były następnie agregowane do średnich 1-godzinnych i porównywane z odpowiednimi danymi ze stacji PMŚ.

Parametry statystyczne dla stężeń wyznaczonych z użyciem czujników NO2_1 i NO2_2 podczas pomiarów porównawczych prowadzonych w Nowym Sączu znajdują się w tabeli 5.

Tabela 5. Parametry statystyczne wyników pomiarów prowadzonych przy stacji PMŚ w Nowym Sączu w poszczególnych miesiącach badanego okresu (lipiec–listopad 2019 roku) dla dwóch czujników NO₂ wyznaczone z użyciem dwóch metod rekomendowanych przez producenta sensorów (zależność (4) i (5)).

	Sensor	Zależność	Lipiec	Sierpień	Wrzesień	Październik	Listopad
Współczynnik korelacji Pearsona r	NO2_1	4	0,566	0,615	0,727	0,734	0,715
		5	0,561	0,657	0,698	0,702	0,615
	NO2_2	4	0,598	0,679	0,789	0,777	0,657
		5	0,592	0,725	0,745	0,754	0,602
Błąd średni [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	NO2_1	4	-3,36	-1,32	-0,65	-4,86	-4,66
		5	-1,04	1,18	2,76	0,46	-0,13
	NO2_2	4	-4,11	-0,02	0,49	-6,01	-7,41
		5	-3,32	0,87	1,85	-2,14	-4,78
Średni błąd procentowy [%]	NO2_1	4	-70,01	-46,21	-8,67	-3,24	1,34
		5	-34,35	-5,49	35,23	33,90	28,09
	NO2_2	4	-62,86	-20,57	7,46	-16,51	-16,88
		5	-41,90	5,09	32,08	9,07	-3,89
Średni bezwzględny błąd procentowy (%)	NO2_1	4	166,16	154,08	93,33	54,64	41,91
		5	134,24	123,00	105,73	72,51	58,48
	NO2_2	4	136,40	119,57	71,21	49,18	52,04
		5	110,83	50,61	83,27	52,84	47,44

Parametry statystyczne przedstawione w tabeli 5 wskazują na zróżnicowaną jakość wskazań czujników Alphasense w zależności od miesiąca. Dla obu badanych czujników i obu sugerowanych przez producenta zależności przeliczania napięć na wartości stężeń, najniższe wartości współczynnika korelacji odnotowano w przypadku lipca. Dla miesięcy jesiennych zaobserwowano o wiele większą zbieżność z rzeczywistymi stężeniami.

Najwyższe wartości bezwzględnych błędów procentowych wystąpiły dla pomiarów z miesięcy letnich, a wraz ze zmniejszaniem się średniej temperatury, wartości wskaźnika ulegały poprawie. Podczas gdy w lipcu przekraczały one 130%, z każdym kolejnym miesiącem poprawiały się i w przypadku listopada oscylowały wokół 50%. Warto też wspomnieć o wysokiej wzajemnej korelacji wskazań czujników niskokosztowych – dla całego okresu wyniosła ona $r = 0,952$ po zastosowaniu zależności (4) i $r = 0,949$ po wykorzystaniu zależności (5).

Przeprowadzone badania pokazały, że jeden z istotnych czynników zaburzających wskazania czujników Alphasense stanowi temperatura. Jak wynika z zależności opracowanych przez producenta, w celu wyznaczenia wartości zmierzonego stężenia zanieczyszczenia należy przeprowadzić obliczenia wykorzystujące zmierzone napięcia na elektrodach sensora i indywidualne wartości podane dla danego sensora przez producenta. Jednak w obu zależnościach (4) i (5) pojawia się również istotny parametr (n_T albo k'_T) zależny od temperatury, którego wartości także podaje producent (tym razem są to wartości wspólne dla wszystkich egzemplarzy danej serii czujników). W obu zależnościach stosuje się ten współczynnik dla wskazań związanych z elektrodą pomocniczą, której zadaniem jest w pewnym sensie redukcja wpływu temperatury.

Podane przez producenta wartości parametrów n_T i k'_T nie spełniają jednak w pełni swojej funkcji. W trakcie ciepłych i upalnych dni, gdy temperatura zbliżała się do i przekraczała 30°C regularnie dochodziło do sytuacji, w których oba czujniki generowały takie wartości napięć, że po zastosowaniu zależności (4) lub (5) otrzymywano ujemne stężenia ditlenku azotu.

Pomiary porównawcze prowadzone przy stacji PMS w Nowym Sączu potraktowano jako serię danych treningowych, zidentyfikowano istotne czynniki mające wpływ na odchylenia wartości zmierzonych od tych uzyskanych za pomocą profesjonalnych narzędzi pomiarowych i na tej podstawie dla każdej z zależności rekomendowanych przez producenta zaproponowano algorytm, który poprawiał dokładność wskazań oraz eliminował ujemne wartości stężeń w przypadku pomiarów prowadzonych w wysokich temperaturach.

Przykładowo – dla zależności (4) zaproponowany sposób wyznaczania stężenia przedstawia się następująco:

$$N_A'' = 1.059N_A' - 0.244(WE_U - WE_E) + 0.463(AE_U - AE_E) - 0.304T - 0.023H + 5.54 \quad (6)$$

gdzie:

N_A'' – stężenie NO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

T – temperatura powietrza [$^{\circ}\text{C}$]

H – wilgotność względna powietrza [%]

$$N_A' = 0.0085N_A^2 + 0.4215N_A + 5.7901$$

$$N_A = (WE_C + WE_C') s_A n_A$$

s_A – współczynnik konwersji z [mV] na [ppb] podany przez Alphasense dla danego sensora,

n_A – współczynnik konwersji z [ppb] na [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Skuteczność wyznaczonej zależności sprawdzono na danych zebranych w trakcie kampanii pomiarów porównawczych prowadzonych w Nowym Sączu oraz na innym czujniku NO₂ w trakcie kampanii pomiarowej prowadzonej przy stacji PMŚ Warszawa-Chrościckiego w okresie grudzień 2019–maj 2020. Wyniki surowe przeliczono z użyciem zależności (5) jako tej, która jest sugerowana przez producenta jako podstawowa metoda, a następnie zastosowano zaproponowany algorytm. Rezultaty zostały przedstawione w tabelach 6 i 7.

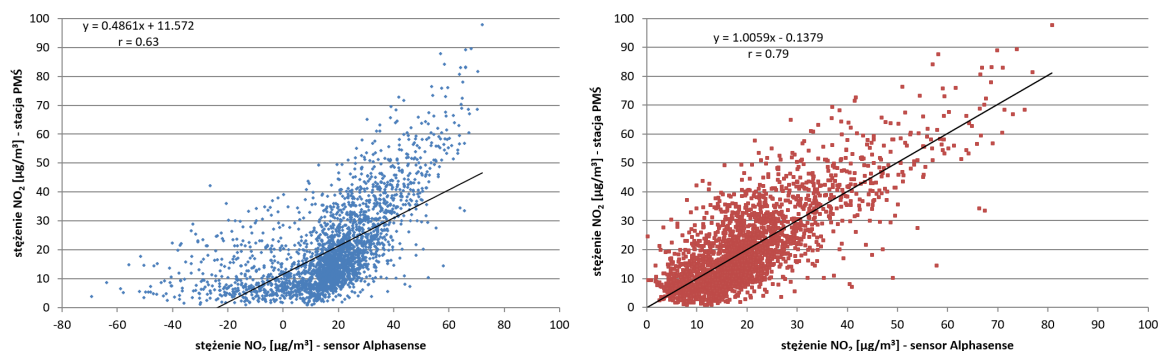
Tabela 6. Parametry statystyczne wyników pomiarów prowadzonych przy stacji PMŚ w Nowym Sączu w poszczególnych miesiącach badanego okresu (lipiec–listopad 2019 roku) po zastosowaniu zależności (6)

	Sensor	Lipiec	Sierpień	Wrzesień	Październik	Listopad
Współczynnik korelacji Pearsona <i>r</i>	NO2_1	0,699	0,829	0,858	0,859	0,745
	NO2_2	0,672	0,803	0,839	0,842	0,697
Błąd średni [µg/m ³]	NO2_1	2,57	3,47	1,25	-3,42	-4,47
	NO2_2	1,19	3,50	2,74	-2,71	-4,74
Średni błąd procentowy [%]	NO2_1	35,21	50,61	41,41	11,73	7,60
	NO2_2	23,42	51,06	50,95	11,65	5,47
Średni bezwzględny błąd procentowy [%]	NO2_1	56,02	68,03	60,03	43,96	42,55
	NO2_2	52,69	68,37	67,76	42,12	44,99

Tabela 7. Parametry statystyczne wyników pomiarów prowadzonych przy stacji PMŚ Warszawa-Chrościckiego w poszczególnych miesiącach badanego okresu (grudzień 2019–maj 2020 roku) po zastosowaniu zależności (4) oraz (6)

	Zależność	Grudzień	Styczeń	Luty	Marzec	Kwiecień	Maj
Współczynnik korelacji Pearsona <i>r</i>	4	0,837	0,541	0,566	0,779	0,785	0,696
	6	0,858	0,617	0,619	0,808	0,865	0,856
Błąd średni (µg/m ³)	4	-11,93	-14,09	-11,29	-6,72	0,79	4,17
	6	-6,92	-8,80	-7,05	-4,65	1,40	3,82
Średni błąd procentowy [%]	4	-54,03	-57,79	-41,05	-11,79	26,46	42,44
	6	-8,64	-22,97	-11,38	10,85	24,49	41,17
Średni bezwzględny błąd procentowy (%)	4	54,20	59,23	46,69	36,40	52,62	61,17
	6	40,01	37,47	35,77	35,73	49,51	51,29

Zastosowanie funkcji korygującej przyniosło w większości przypadków poprawę jakości wyznaczonych wartości pomiarów. Dla każdego miesiąca zwiększyła się wartość współczynnika korelacji Pearsona *r* – największy wzrost zaobserwowano dla maja, a najniższy dla marca. Dla wszystkich miesięcy uległa poprawie wartość średniego bezwzględnego błędu procentowego, przy czym najwyższe wartości uzyskano dla miesięcy chłodniejszych, zaś nieco niższe, dla miesięcy cieplejszych. Poprawę jakości pomiarów dobrze widać również na wykresach rozrzutu średnich 1-godzinnych stężeń (wykres 3).



Wykres 3. Po lewej – wykres rozrzutu średnich 1-godzinnych stężeń NO_2 (bez korekcji, po zastosowaniu zależności (4)) z czujnika NO_2_1 na tle stężeń zmierzonych w stacji PMS, po prawej – po zastosowaniu zależności korekcyjnej (6).

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż czujniki NO_2 firmy Alphasense cechują się znacznie mniejszymi błędami pomiarowymi pod względem jakości niż wcześniej badane sensory firmy Spec Sensors. Dzięki wyprowadzeniu i zastosowaniu funkcji korygującej, w trakcie prowadzonych badań porównawczych ze stacjami PMS w warunkach rzeczywistych udało się w wielu przypadkach dość istotnie poprawić jakość wykonanych za ich pomocą pomiarów. Po zastosowaniu korekcji średniomiesięczny bezwzględny błąd procentowy zmniejszono do wartości ok. 40-50%. Z jednej strony, jest to wciąż duża wartość, z drugiej jednak strony należy wziąć pod uwagę fakt, iż cena tych czujników jest znacznie niższa od cen sprzętu profesjonalnego. Ponadto, w porównaniu z sensorami pyłu zawieszonego, przestrzeń możliwych czynników zwiększających błędy pomiarowe jest znacznie bardziej wielowymiarowa. Oprócz czynników meteorologicznych (analogicznie do czujników pyłu zawieszonego) są nimi także: dokładność pomiaru napięcia (napięcia na elektrodach czujnika są dość małe, a zatem potrzebny jest precyzyjny pomiar), wpływ innych zanieczyszczeń (w szczególności ozonu), a także bezwładność (czas reakcji czujnika na zmianę stężenia zanieczyszczenia oraz czas po uruchomieniu wymagany do uzyskania względnie wiarygodnych rezultatów jest znacznie dłuższy niż w przypadku czujników PM).

Podsumowując tę część, bardzo istotnym elementem osiągnięcia naukowego w tym obszarze jest rzetelne i długoterminowe zbadanie opisywanych czujników w polskich warunkach klimatycznych oraz wyznaczenie matematycznych zależności umożliwiających zmniejszenie błędów pomiarowych. Według mojej wiedzy, tego typu badania w momencie ich rozpoczęcia oraz prowadzenia były unikalne w skali kraju.

Zaprezentowane badania nie zamykają problemu poprawy jakości wskazań tego typu czujników, dlatego też zamierzam kontynuować badania w powyższym zakresie poprzez m.in. przeprowadzenie równoległych pomiarów porównawczych czujników różnych zanieczyszczeń (np. ozonu, na który są podatne czujniki ditlenku azotu), a także zainstalowanie sensorów w komorze ze stabilizowaną temperaturą, w celu zbliżenia jej do wartości zalecanej przez producenta (tj. ok. 20°C).

Cześć II – użycie niskokosztowych czujników zanieczyszczeń powietrza do rozszerzenia możliwości sieci i systemów pomiarowych

Drugą część osiągnięcia stanowią prace związane z praktycznym zastosowaniem zaprojektowanych i zbudowanych przez mnie urządzeń.

Pierwszy artykuł prezentuje wybrane analizy wyników pochodzących z prototypowej, pionierskiej sieci pomiarowej uruchomionej w 2016 roku w Nowym Sączu, której byłem głównym twórcą (zarówno w zakresie fizycznego wykonania urządzeń pomiarowych, ich instalacji w terenie, jak również późniejszego utrzymania oraz zbierania i analizowania wyników).

- *Rogulski Mariusz: Using Low-Cost PM Monitors to Detect Local Changes of Air Quality, Polish Journal of Environmental Studies, Institute of Scientific Information in Philadelphia, vol. 27, nr 4, 2018, s. 1699-1705, DOI:10.15244/pjoes/77075, 15 punktów, IF(1,186). (pozycja [A4] w załączniku nr 1)*

Sieć pomiarowa w Nowym Sączu powstała dzięki otwartości i chęci współpracy w tym zakresie ówczesnych władz Miasta, zainteresowanych stałym monitorowaniem jakości powietrza w różnych rejonach miasta, które w momencie podejmowania współpracy znajdowało się wśród nie tylko jednych z najbardziej zanieczyszczonych polskich miast, ale również w grupie miejscowości o jednych z najwyższych stężeń pyłu zawieszonego w Europie. Władze Nowego Sącza uznały, że istnieje pilna potrzeba podjęcia monitorowania różnych obszarów miasta, aby ocenić, czy problem złej jakości powietrza dotyczy w jednakowym stopniu obszaru całej miejscowości, czy też występują miejsca o zróżnicowanej skali problemu. Z perspektywy prowadzenia badań Nowy Sącz okazał się być interesujący pod względem częstotliwości występowania na jego terenie wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza oraz zróżnicowanych warunków atmosferycznych. Miejscowość leży na urozmaiconym terenie – najniższy punkt miasta jest położony na wysokości 272 m n.p.m., zaś najwyższy – 475 m n.p.m. W mieście znajduje się jedna stacja monitoringu jakości powietrza funkcjonująca w ramach PMŚ, mierząca m.in. stężenia PM₁₀ i ditlenku azotu.

Prototypowa sieć pomiarowa w tym mieście była budowana stopniowo: najpierw zostały zainstalowane stacje pomiarowe U1-U5 (wrzesień 2016), a następnie U6-U10 (lipiec 2017) – rysunek 1. Przed umieszczeniem urządzeń w terenie, zostały one przebadane w warunkach laboratoryjnych w celu sprawdzenia poprawności wskazań użytych czujników (porównanie z urządzeniem DustTrak) i sprawdzenia zbieżności pomiarów w tym samym otoczeniu.



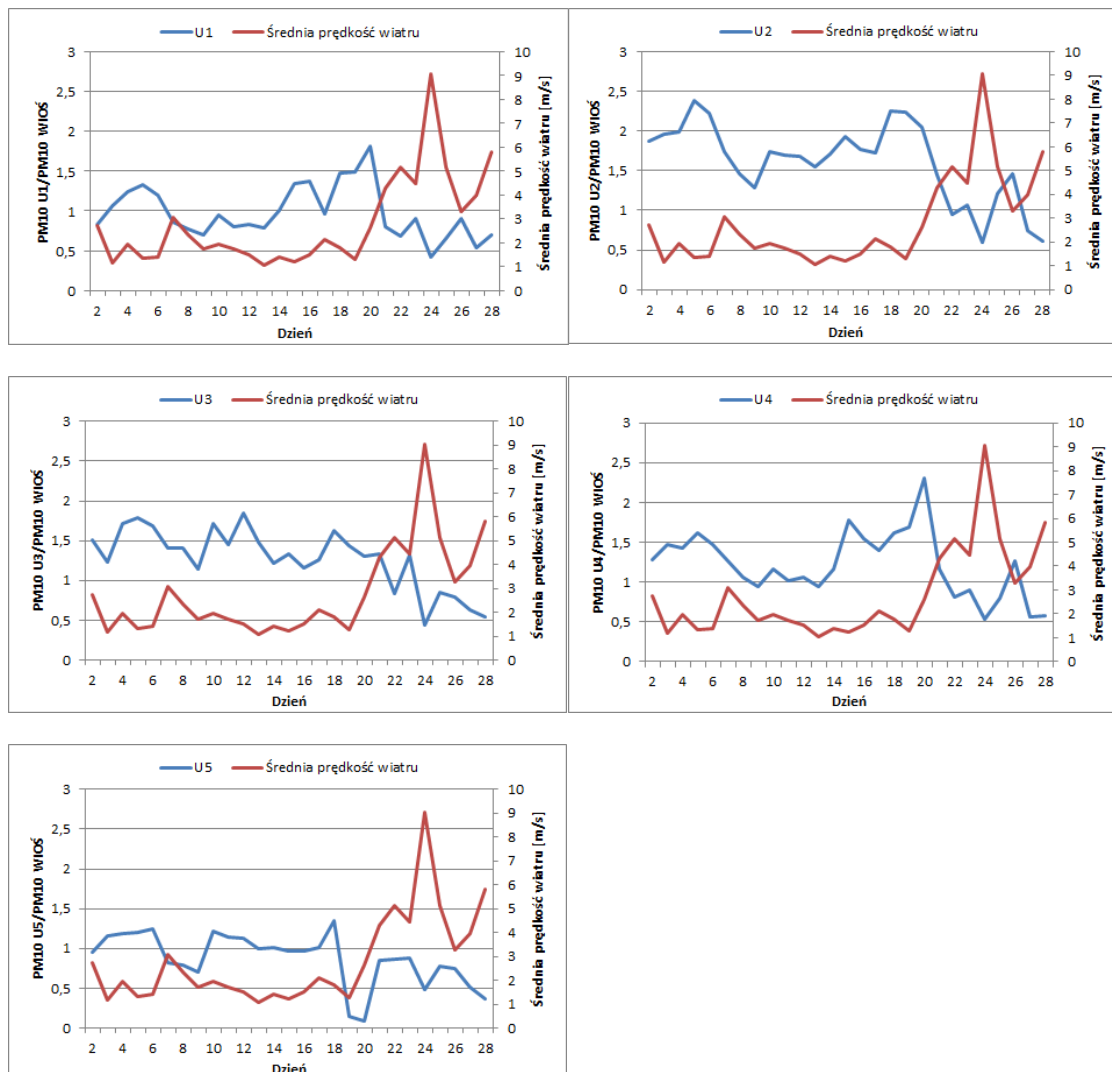
Rysunek 1. Lokalizacje prototypowych urządzeń pomiarowych oraz stacji PM₁₀ (na podstawie Google Maps).

W artykule przedstawiono możliwość użycia urządzeń z niskokosztowymi czujnikami stężeń zanieczyszczeń do wykrywania lokalnych zmian w jakości powietrza, a w szczególności do identyfikacji tzw. hot-spotów, czyli miejsc, okolic, w których lokalne źródła emisji wraz z ewentualnymi niekorzystnymi uwarunkowaniami topograficznymi lub sytuacja meteorologiczna sprzyjają gromadzeniu się zanieczyszczeń powietrza i występowania szczególnie wysokich ich stężeń w powietrzu.

W tym celu w omawianym artykule przedstawiono wykorzystanie odpowiednio dogęszczonej sieci pomiarowej (na przykładzie Nowego Sącza) oraz danych dotyczących siły i kierunku wiatru do postawienia tezy, iż obszary miasta w których występują znaczne nagromadzenie źródeł emisji zanieczyszczeń, zaczną się szczególnie ujawniać w czasie słabego wiatru i braku opadów atmosferycznych. W przypadku silnego wiatru, generowane zanieczyszczenia będą od razu przenoszone, co utrudni wykrycie hot-spotów.

W celu zbadania tej potencjalnej prawidłowości przeanalizowano dane dla lutego 2017 roku. Zależność pomiędzy średnią prędkością wiatru a zmierzonymi stężeniami PM₁₀ na pięciu stanowiskach pomiarowych została przedstawiona na wykresie 4. Lewa pionowa oś przedstawia ilorazy średnich 24-godzinnych stężeń PM₁₀ zmierzonych za pomocą danego urządzenia

podzielonych przez średnią 24-godzinną wartość zarejestrowaną przez stację PMŚ. Prawa pionowa oś wskazuje średnią 24-godzinną prędkość wiatru wyrażoną w [m/s].



Wykres 4. Średnia siła wiatru [m/s] oraz iloraz zmierzonych średnich 24-godzinnych stężeń PM_{10} do średnich 24-godzinnych stężeń PM_{10} ze stacji PMŚ dla stanowisk pomiarowych U1-U5 w lutym 2017 roku.

W pierwszej połowie lutego 2017 roku średnia 24-godzinna prędkość wiatru wynosiła zwykle ok. 2 m/s. Pod koniec miesiąca prędkość wiatru znacząco wzrosła, z maksymalną średnią wartością w dniu 24 lutego wynoszącą blisko 9 m/s. Porównując wykresy zanieczyszczeń ze wszystkich lokalizacji, można zaobserwować, że dla dni ze szczególnie silnym wiatrem, wszystkie urządzenia oparte na czujnikach optycznych wskazywały mniejsze stężenia zanieczyszczeń względem stacji PMŚ. Dodatkowo, stosunki wartości pomiarów z czujników optycznych do wartości ze stacji PMŚ były do siebie bardzo zbliżone. Dla 24 lutego należały do przedziału $<0,44-0,6>$. Dla takich warunków pogodowych trudno zatem wskazać obszary będące szczególnymi źródłami zanieczyszczeń. W tym przypadku nie miało to jednak zbyt dużego znaczenia, gdyż silny i bardzo silny wiatr powodował, że zanieczyszczenia nie ulegały koncentracji w małej przestrzeni, a podlegały szybkiej dyspersji.

Sytuacja przedstawia się odmiennie, jeśli przyjąć do analizy pierwszą i drugą dekadę lutego. W przypadku urządzeń U1 i U5 stosunek wartości zmierzonych za pomocą sensorów optycznych w porównaniu do wartości ze stacji PMŚ oscylowała wokół wartości 1. Stąd, w okresie 1-20 lutego dla urządzenia U1 wartość średnia wynosiła 1,06, natomiast dla urządzenia U5 – dokładnie 1. Można powiedzieć, że wartości bezwzględne PM₁₀ na tych stacjach były prawie identyczne, co wartości PM₁₀ zmierzone na stacji PMŚ. A zatem, w okolicach tych stacji prawdopodobnie nie było znaczących źródeł emisji zanieczyszczeń, które powodowałyby ich lokalną nadmierną koncentrację.

W przypadku pozostałych stacji sytuacja przedstawiała się zupełnie inaczej. Największy stosunek wartości zmierzonych do wartości ze stacji PMŚ występował dla urządzenia U2 i wynosił 1,84. Tę różnicę widać szczególnie dla dni, w których odnotowano najśłabszy wiatr – przykładowo 5 i 6 lutego wynosiła ona odpowiednio: 2,38 i 2,22, zaś 18 i 19 lutego: 2,25 i 2,23. W okresie 1-20 luty najmniejsza różnica wystąpiła dla 9 lutego (1,27). Druga w kolejności lokalizacja z największym odchyleniem wyników pomiarów w stosunku do stacji PMŚ, to U3. Średnia wartość odchylenia wynosiła 1,46. W okresie 1-20 lutego największe średnie dobowe odchylenia miały miejsce 12 (1,84) i 5 lutego (1,79), zaś najmniejsze – 9 lutego (1,14). Dla instrumentu pomiarowego U4 największe średnie dobowe odchylenia miały miejsce w dniach 20 (2,3) i 15 lutego (1,78), zaś najmniejsze – 9 i 13 lutego (po ok. 0,94).

Na podstawie powyższych danych stwierdzono, że spośród wszystkich lokalizacji, okolicą, w której jest generowanych lub gromadzi się najwięcej zanieczyszczeń (hot-spotem) było otoczenie urządzenia U2. W okresach, gdy występował słaby wiatr, niska temperatura i duża wilgotność, a zatem warunki sprzyjające do gromadzenia się pyłów w powietrzu, to właśnie dla urządzenia U2 odnotowano największe różnice w porównaniu do stacji PMŚ.

Dalsze analizy związane z funkcjonowaniem sieci pomiarowej w Nowym Sączu przedstawiono w artykule Rogulski M.: *Low-cost PM monitors as an opportunity to increase the spatiotemporal resolution of measurements of air quality* w punkcie 4.7.

Głównym osiągnięciem badawczym w tym obszarze jest przede wszystkim zbudowanie i utrzymywanie przez kilka lat działania pionierskiej sieci pomiarowej wykorzystującej instrumenty pomiarowe z niskokosztowymi czujnikami stężeń PM₁₀ oraz pokazanie i przeanalizowanie niektórych korzyści wynikających z tego faktu. W opublikowanych artykułach wskazano, iż urządzenia niskokosztowe mogą stanowić skuteczne narzędzie do lokalizowania obszarów szczególnie zanieczyszczonych, a tym samym do określania źródeł emisji i analizowania ich wpływu na jakość powietrza. Kolejnym wnioskiem jest to, iż warto jest zagęszczać sieć pomiarową, gdyż pod pewnymi warunkami może ona być źródłem bardziej szczegółowych informacji na temat przestrzennej i czasowej zmienności stężeń zanieczyszczeń powietrza (nawet przy uwzględnieniu niższej wiarygodności czujników niskokosztowych).

Po pewnym czasie od uruchomienia omówionej powyżej prototypowej sieci pomiarowej powstało w Polsce wiele sieci komercyjnych – największą liczbę urządzeń pomiarowych posiada system Airly, ale istnieją również sieci zbudowane z użyciem urządzeń np. LookO2, Synges, itp. Prawie wszystkie z wymienionych powyżej projektów charakteryzuje zarówno bardzo podobna idea i charakter sieci (tzn. zachęta do kupna czujnika mierzącego stężenie pyłu zawieszzonego, temperatury, wilgotności względnej, ciśnienia, montaż, a następnie konieczność dzielenia się wynikami na ogólnodostępnej mapie) jak również zakres prezentowanych informacji. Zazwyczaj można skorzystać z ogólnodostępnej mapy z punktami pomiarowymi, gdzie po wybraniu lokalizacji otrzymuje się informacje na temat: historycznych danych o stężeniach pyłów (np. za ostatnie 24

godziny), podstawowych parametrów meteorologicznych, aktualnego stężenia w formie indeksu jakości powietrza oraz prognozy stężeń pyłów na kolejne 24 godziny. Powyższe inicjatywy cechuje również brak informacji na temat: dokładności pomiarów, otoczenia, w jakim zostały zamontowane czujniki (część czujników była montowana na wysokich kondygnacjach budynków wielorodzinnych, a niekiedy nawet wewnątrz pomieszczeń, co powoduje, że interpretacja takich wyników może nie przystawać do rzeczywistych warunków w zakresie jakości powietrza w danym miejscu), daty ostatniej kalibracji, powtarzalności pomiarów pomiędzy różnymi egzemplarzami tego samego typu czujnika, ich zachowania w zależności od określonych warunków meteorologicznych, trwałości, itp.

Z tej perspektywy, prototypową sieć pomiarową zbudowaną w Nowym Sączu można uznać za pionierską na terenie Polski (zaprojektowanie – marzec 2016, uruchomienie – wrzesień 2016). W tym przypadku zamiast jednak stawiać nacisk na aspekt biznesowy, skupiono się na kwestiach naukowych i na rzetelnym, długoterminowym przebadaniu użytych sensorów, w różnych lokalizacjach i w zróżnicowanych warunkach meteorologicznych i topograficznych, na wskazaniu korzyści, jakie może przynieść zagęszczenie punktów pomiarowych oraz na określeniu warunków, w jakich można takie urządzenia wykorzystywać, aby wytwarzane dane stanowiły wiarygodne źródło informacji dla decydentów oraz zwykłych mieszkańców.

- *Firląg Szymon, Rogulski Mariusz, Badyda Artur Jerzy: The Influence of Marine Traffic on Particulate Matter (PM) Levels in the Region of Danish Straits, North and Baltic Seas, w: Sustainability, vol. 10, nr 11, 2018, ss. 1-19, DOI:10.3390/su10114231, 20 punktów, IF: 2,592. (pozycja [A5] w załączniku nr 1)*

W drugim artykule tej części przedstawiono inne, praktyczne zastosowanie zaprojektowanego i wykonanego przeze mnie urządzenia wykorzystującego niskokosztowe sensory pyłów zawieszonych – do zebrania danych umożliwiających analizę stężeń PM₁₀ nad powierzchnią Morza Północnego i Bałtyckiego oraz cieśnin duńskich w porównaniu z sytuacją w portach oraz wpływ emisji ze statków na poziom tego typu zanieczyszczeń.

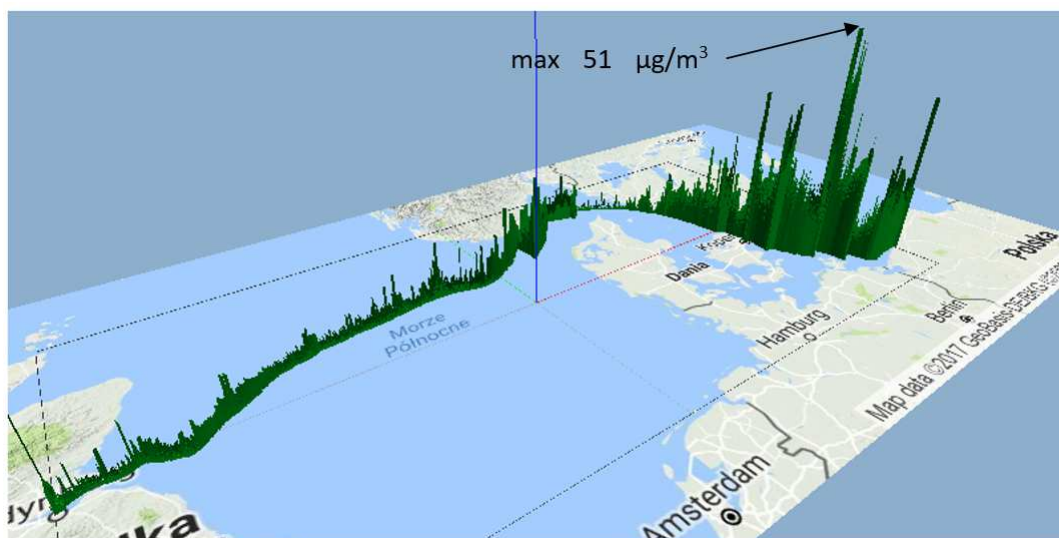
Badania stężenia pyłów z użyciem zaprojektowanego urządzenia przeprowadzono podczas rejsu na żaglowcu STS Fryderyk Chopin w ramach seminarium naukowego Politechniki na Fali. Rejs odbywał się w dniach od 16 do 30 września 2017. Żaglowiec wypłynął z portu w Edynburgu 18 września o godzinie 14:00 i rozpoczął rejs przez Morze Północne w kierunku cieśnin duńskich. Po przepłynięciu przez Skagerrak i Kattegat dotarł do Kopenhagi 24 września o 17:30. W porcie duńskiej stolicy cumował do 26 września do 8:15. Następnie przez Morze Bałtyckie dołynął do Kołobrzegu w Polsce 28 września o 8:00. Port opuścił 29 września o godzinie 18:00, obierając kurs na Szczecin.

Zaprojektowane specjalnie na tę okoliczność urządzenie pomiarowe z sensorem pyłów zawieszonych, GPS-em i wewnętrzną pamięcią zostało zamontowane na dziobie żaglowca i podstawy fokmasztu (fot. 3) na wysokości około 1,7 m nad pokładem. Wybrana lokalizacja minimalizowała wpływ emisji własnej żaglowca na pomiary. Całość rejsu odbywała się pod wiatr lub z wiatrem bocznym, co powodowało, że urządzenie było omywane przez powietrze pochodzące bezpośrednio z morza. Większość rejsu odbywała się pod żaglami a silnika używano jedynie okresowo. Spaliny pochodzące z silnika i agregatu prądotwórczego były emitowane przez komin znajdujący się w grotmaszcie na śródokręciu. Wysokość komina wynosiła 32 m od powierzchni pokładu.



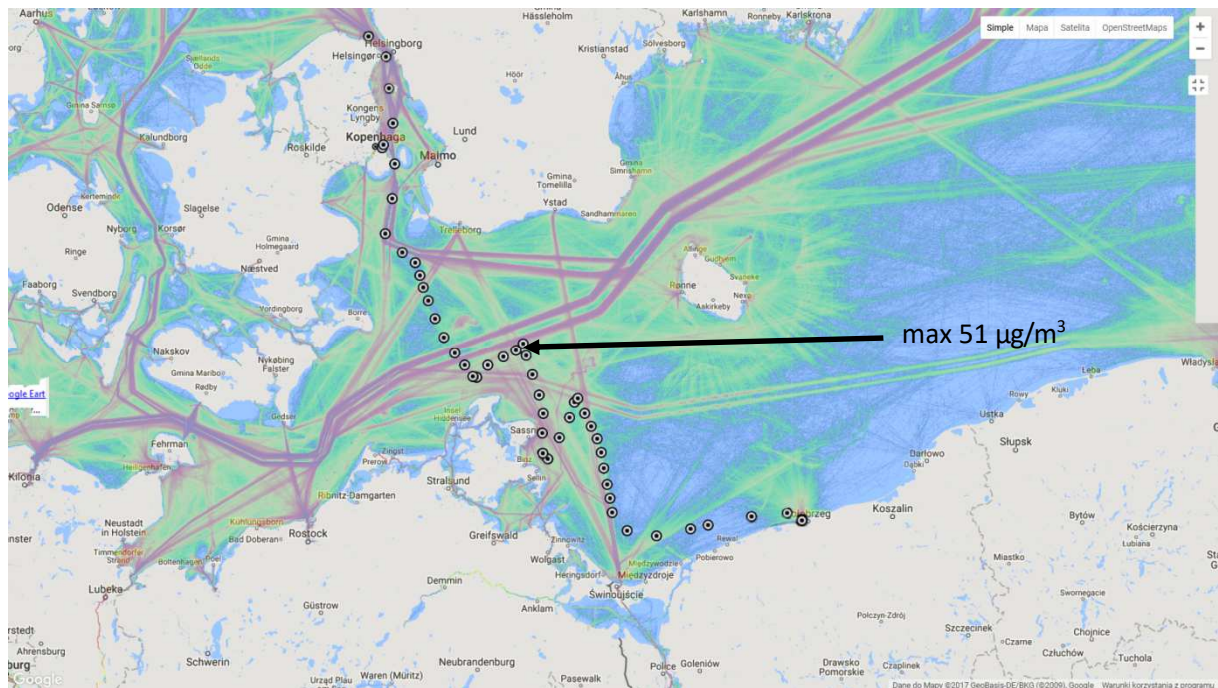
Fotografia 3. Pomiary podczas rejsu żaglowcem; urządzenie pomiarowe zaznaczono strzałką. Fotografia własna.

Zmierzone, chwilowe wartości stężeń PM_{10} w trakcie rejsu przedstawiono na rysunku 2.



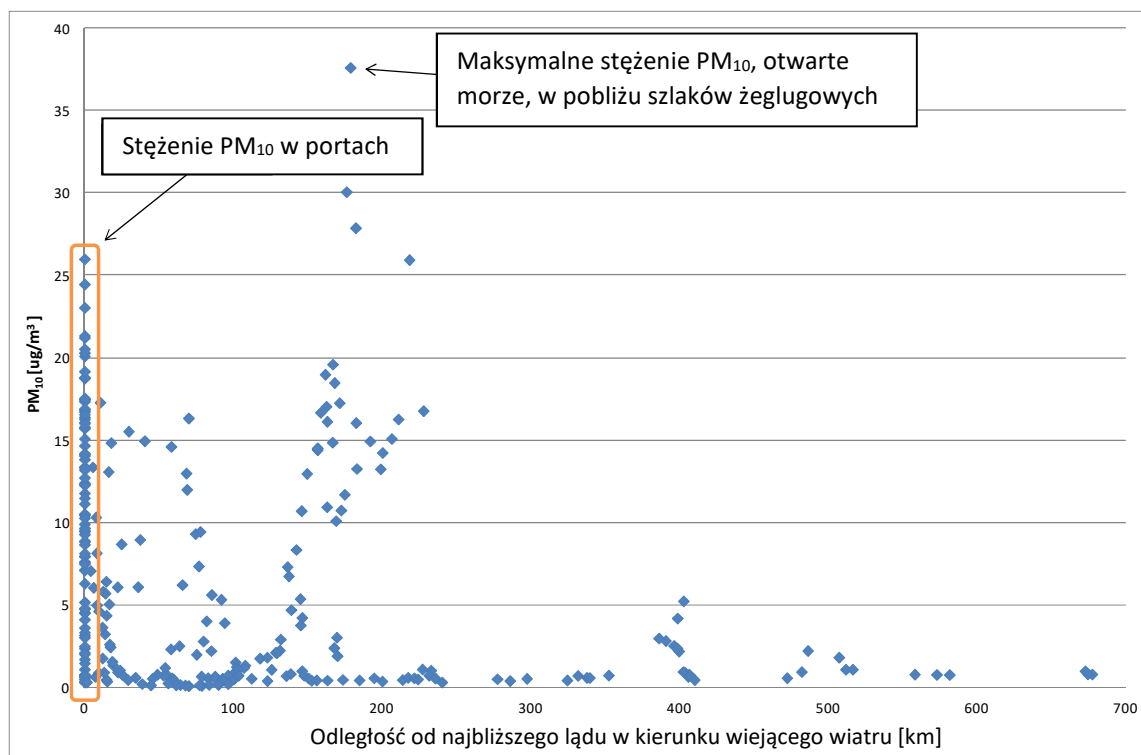
Rysunek 2. Wykres 3D chwilowych stężeń pyłu PM_{10} naniesiony na trasę rejsu.

Wyniki pomiarów pokazały wyraźnie, że transport morski wpływa negatywnie na jakość powietrza zewnętrznego. Podczas rejsu najwyższe chwilowe stężenia PM_{10} ($51 \mu\text{g}/\text{m}^3$) zmierzono na znacznie oddalonym od lądu obszarze Bałtyku, blisko tras, którymi poruszają się statki z portów północnego Bałtyku do portów w północnych Niemczech (rys. 3). Zmierzone stężenia pyłów w tym obszarze były nawet znacznie większe niż zmierzone w portach, w których zatrzymywał się żaglowiec (Edynburg, Kopenhaga, Kołobrzeg). Były także znacznie wyższe niż na Morzu Północnym, gdzie przez większość rejsu oscylowały w zakresie $0\text{-}5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Rysunek 3. Trasa żaglowca od 24 września godzina 15:00 do 29 września 19:00 na podkładzie pokazującym natężenie ruchu statków i główne szlaki żeglugowe (źródło: marinetrffic).

Przeprowadzone pomiary pozwoliły na analizę migracji zanieczyszczeń. Zależność średniego 1-godzinne stężenia PM_{10} od odległości od lądu przedstawiono na wykresie 5. Odległość obliczono w kierunku wiejącego wiatru. Na przykład, w przypadku wiatrów wschodnich, lokalizowano najbliższy ląd na wschodzie i mierzono odległość między statkiem a lądem. W celu uzyskania dokładnych obliczeń uwzględniono również cyrkulację wiatru. Analizę oparto na danych pogodowych z prognozy NOAA-GFS oraz notatkach z dziennika rejsu udostępnionego przez kapitana żaglowca.

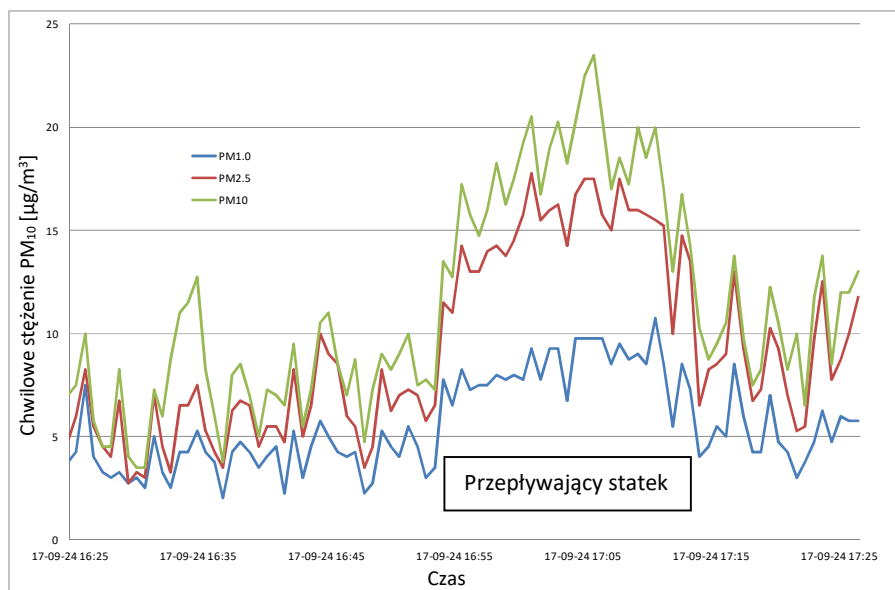


Wykres 5. Zależność średniogodzinnych stężeń pyłów PM_{10} w zależności od odległości od lądu w kierunku wiejącego wiatru.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można było zaobserwować dwa obszary o podwyższonym stężeniu. Pierwszy znajdował się w odległości od 0 do około 90 km z najwyższym poziomem PM_{10} nieco ponad $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Na wysoki poziom stężenia mogły mieć wpływ źródła lądowe, np. z portów lub miast, gdy żaglowiec znajdował się w pobliżu lądu lub gdy był zacumowany. Dla przykładu, taka sytuacja miała miejsce w cieśninach duńskich.

Drugi obszar wysokich stężeń można było dostrzec w odległości od 140 do 220 km od lądu. Najwyższy poziom PM_{10} wyniósł około $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w odległości 180 km od lądu. Ponieważ takie lokalizacje zostały zidentyfikowane w znacznej odległości od lądu – około 140–220 km, gdzie wpływ lądowych źródeł emisji jest dość znikomy, wskazuje to, że głównym źródłem emisji były prawdopodobnie statki z silnikami używającymi oleju napędowego lub żeglugowego.

W celu zbadania bezpośredniego wpływu emisji ze statków, na podstawie informacji z dziennika rejsu zidentyfikowano sytuacje, w których żaglowiec przepływał w bliskiej odległości od innych statków. Jedna z nich miała miejsce 24 września 2017 r. między 16:25 a 17:25 kilka kilometrów od centrum Kopenhagi. Płynący w tym samym kierunku tankowiec mijał żaglowiec między 16:55 a 17:15 od strony wschodniej. Sytuacja ta jest bardzo wyraźnie widoczna na wykresie 6 pokazującym zmianę stężenia PM_{10} .



Wykres 6. Chwilowe stężenia pyłów między 16:25 a 17:25 w dniu 24 września.

Przed tym spotkaniem średnie 1-godzinne stężenie PM_{10} wynosiło około $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, natomiast $PM_{2,5}$ około $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (chwilowe maksymalne stężenia PM_{10} oscylowały wokół $11\text{--}12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a $PM_{2,5}$ — $9\text{--}10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Obecność spalin z tankowca spowodowała dość gwałtowny wzrost stężeń PM_{10} do $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a $PM_{2,5}$ do $17,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wzrost trwał około 20 minut. Średnie stężenie PM_{10} wynosiło wówczas blisko $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a $PM_{2,5}$ — $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Wzrost stężenia pyłu zawieszonego spowodowany przepływającym statkiem wyniósł około $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10}) i $10,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($PM_{2,5}$). Następnie stężenia pyłu zawieszonego wszystkich frakcji ulegały spadkowi, chociaż nadal pozostały nieco wyższe niż przed spotkaniem. Zostało to prawdopodobnie spowodowane obecnością spalin z innych statków.

Badania przeprowadzone podczas rejsu żaglowca dały możliwość pomiaru stężeń pyłów zawieszonych na Morzu Północnym i Bałtyckim, w portach oraz określenie wzrostu ich stężenia spowodowanego przepływającymi statkami. Wyniki pokazały, że istniała wyraźna różnica w zanieczyszczeniu powietrza między obszarem Morza Północnego – począwszy od wybrzeży Szkocji, aż po wybrzeże Danii czy Szwecji a Morzem Bałtyckim. W tym akwenie stwierdzono znacznie wyższe stężenia w porównaniu z obszarem Morza Północnego, czy nawet portem w Kopenhadze. Analizując pomiary chwilowe i dysponując informacjami z dziennika rejsu, udało się również zaobserwować bezpośredni wpływ na wynik pomiaru stężeń zanieczyszczeń pochodzących z emisji z przepływających statków.

Przeprowadzenie powyższego doświadczenia było kolejnym praktycznym zastosowaniem sensorów niskokosztowych (a także specjalnie w tym celu zbudowanego przeze mnie instrumentu pomiarowego wykorzystującego m.in. GPS i wbudowaną pamięć) oraz użyciem ich w warunkach, w których użycie sprzętu profesjonalnego byłoby pod wieloma względami utrudnione, czy nawet niemożliwe.

4.7. Inne opublikowane wyniki badań powiązane z osiągnięciem

Wyniki moich badań pośrednio powiązane z osiągnięciem zostały opublikowane w innych artykułach naukowych indeksowanych przez Web of Science i Scopus (treści tych artykułów podano w załączniku nr 3).

- *Rogulski Mariusz: Low-cost PM monitors as an opportunity to increase the spatiotemporal resolution of measurements of air quality, Energy Procedia, Elsevier, vol. 128, 2017, s. 437-444, DOI:10.1016/j.egypro.2017.09.026, 15 punktów. (pozycja [B1] w załączniku nr 3)*

W artykule, będącym niejako kontynuacją pracy Rogulski M. *Using Low-Cost PM Monitors to Detect Local Changes of Air Quality* przedstawionej w punkcie 4.6, skupiono się na porównaniu mierzonych wartości stężeń PM_{10} oraz ich korelacji między poszczególnymi stanowiskami pomiarowymi a stacją PMŚ w prototypowej sieci pomiarowej zbudowanej na terenie Nowego Sącza.

Najwyższe wartości współczynników korelacji Pearsona r występowały dla miesięcy zimowych, osiągając wartości dochodzące do $r = 0,9$, a nawet ją przekraczające. Charakterystyczny dla tego okresu dobowy przebieg zmian stężeń zanieczyszczeń (maksimum w późnych godzinach wieczornych, minimum w okolicach południa bądź w momencie rozpoczęcia opadów) sprzyjał występowaniu silnego trendu pomiędzy wartościami PM_{10} zmierzonymi za pomocą czujników niskokosztowych a wartościami odnotowanymi przez stację PMŚ. Inaczej sytuacja przedstawiała się w miesiącach ciepłych – przy niskich średnich stężeniach PM_{10} nawet niewielkie lokalne zmiany znacząco wpływały na stopień powiązania wskazań testowanych urządzeń w stosunku do stacji PMŚ.

Przedstawiona analiza potwierdziła tezę, iż czym bliżej stacji PMŚ, tym pomiary pochodzące z niskokosztowych czujników były bardziej zbliżone (pod względem wartości bezwzględnych) do tych wykonywanych przez sprzęt profesjonalny. Drugi wniosek, jaki wysnuło: nawet w miejscach oddalonych o niewielką odległość (rzędu kilku kilometrów), szczególnie w rejonie o zróżnicowanym ukształtowaniu terenu i różnorodnej zabudowie (ogrzewanej z użyciem różnych źródeł ciepła) występowały zupełnie inne stężenia PM_{10} . W takich warunkach rozbudowa profesjonalnej sieci PMŚ o urządzenia niskokosztowe może stanowić nie tylko dla mieszkańców cenne, dodatkowe źródło informacji na temat lokalnych warunków związanych z jakością powietrza.

- *Rogulski Mariusz: Indoor PM_{10} concentration measurements using low-cost monitors in selected locations in Warsaw, Energy Procedia, Elsevier, vol. 147, 2018, s. 137-144, DOI:10.1016/j.egypro.2018.07.043, 15 punktów. (pozycja [B2] w załączniku nr 3)*

Artykuł dotyczył badań jakości powietrza (w szczególności stężeń PM_{10}) w kilku wybranych pomieszczeniach biurowych i edukacyjnych w Warszawie z użyciem zaprojektowanych i wykonanych przez mnie urządzeń wykorzystujących sensory niskokosztowe oraz porównania wyników pomiarów z wynikami pomiarów pozyskanymi ze stacji PMŚ na terenie miasta Warszawy.

Zaprezentowane w artykule rezultaty pomiarów pokazały, że w przypadku badanych pomieszczeń biurowych oraz edukacyjnych istniała silna korelacja pomiędzy jakością powietrza zewnętrznego oraz wewnętrznego. To oznacza, że wysoki poziom zanieczyszczeń na zewnątrz przekładał się na to, czym oddychamy w trakcie pracy oraz czym oddychają dzieci w trakcie zajęć szkolnych. Chociaż poziom zanieczyszczeń w pomieszczeniach był zwykle dużo niższy niż na zewnątrz, jednak w trakcie silnych epizodów smogowych zaobserwowano stężenia PM_{10} w pomieszczeniach wewnątrz budynków, które przekraczały poziom określony jako dopuszczalny dla powietrza atmosferycznego.

Drugą konkluzją jest to, iż urządzenia oparte na sensorach niskokosztowych mogą pomagać w określaniu jakości powietrza wewnątrz pomieszczeń, co może okazać się szczególnie istotne w przypadku placówek edukacyjnych. Nie byłoby to możliwe z użyciem urządzeń profesjonalnych z powodu ich kosztu, dużych gabarytów oraz ograniczonej mobilności.

- *Rogulski Mariusz: The use of low-cost measuring devices for testing air quality in hard-to-reach locations, W: 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK 2018 / Kazimierczak Bartosz [i in.] (red.), E3S Web of Conferences, vol. 44, 2018, EDP Sciences, ISBN 9781510865945, s. 1-7, DOI:10.1051/e3sconf/20184400151, 15 punktów. (pozycja [B3] w załączniku nr 3)*

Wraz z rozwojem technologii i powstawaniem małych, niskokosztowych czujników możliwe stało się skuteczne badanie niższych warstw troposfery za pomocą dronów i balonów. W artykule przedstawiono zastosowanie zaprojektowanego i wykonanego przeze mnie urządzenia z sensorami niskokosztowymi do badania zanieczyszczeń powietrza z wykorzystaniem balonu na ogrzane powietrze – fot. 4. Okazją do przeprowadzenia powyższych badań był mój udział w kampanii Balon.Lab promującej ekologiczne paliwa prowadzonej przez Forum Rozwoju Efektywnej Energii we współpracy z Gaspol Energy.



Fotografia 4. Pomiary z użyciem balonu na ogrzane powietrze; urządzenie pomiarowe umieszczono na koszu balonu. Fotografia własna.

W artykule przedstawiono wyniki badań stężenia pyłów PM_{10} wykonane za pomocą lotów balonem na uwięzi m.in. na lotnisku Warszawa-Babice oraz w trakcie lotu swobodnego nad Nowym Targiem.

W trakcie lotu swobodnego wykonanego w godzinach wieczornych 30 sierpnia 2017 roku nad Nowym Targiem w bardzo stabilnych warunkach pogodowych (tj. przy słabym wietrze i szybko obniżającej się temperaturze) dało się wyraźnie zaobserwować wysokość nad powierzchnią ziemi, do której unosiły się zanieczyszczenia pyłowe pochodzące z tzw. niskiej emisji. Powyżej wysokości

ok. 40 m stężenie PM₁₀ było ponad dwukrotnie mniejsze niż poniżej. Taką „graniczną” wartość zidentyfikowano podczas wznoszenia się jak i lądowania balonu.

Co prawda badanie stężeń zanieczyszczeń w powietrzu przy użyciu balonu na ogrzane powietrze nie należy do tanich, wymaga dużych nakładów (operator, odpowiedni obszar do startu i lądowania) oraz podlega wielu innym ograniczeniom (np. odpowiednia pogoda), to w sprzyjających warunkach balon na ogrzane powietrze wraz z niskokosztowymi czujnikami zanieczyszczeń może stanowić interesujące mobilne laboratorium umożliwiające pomiar jakości powietrza tam, gdzie niemożliwe jest wykorzystanie innych narzędzi oraz instrumentów pomiarowych.

- *Badyda Artur, Rogula-Kozłowska Wioletta, Majewski Grzegorz, Bralewska Karolina, Widziewicz-Rzońca Kamila, Piekarska Barbara, Rogulski Mariusz, Bihałowicz Jan: Inhalation risk to PAHs and BTEX during barbecuing: the role of fuel/food type and route of exposure, w: Journal of Hazardous Materials, 2022, vol. 440, s. 1-11. DOI:10.1016/j.jhazmat.2022.129635, 200 punktów, IF: 10,588. (pozycja [B4] w załączniku nr 3)*

Artykuł przedstawia innowacyjne i całościowe podejście do ilościowego określania emisji wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) i lotnych węglowodorów aromatycznych (BTEX) z procesów grillowania z użyciem różnych typów paliw. Pomiary i analizy wykazały między innymi, że suma stężeń 15 WWA w potrawach grillowanych była najwyższa przy grillowaniu mięsa na brykiecie węglowym, a najniższa przy użyciu grilla gazowego. Z kolei w przypadku emisji BTEX, pochodzące z grilla na węgiel drzewny były 130 razy wyższe w porównaniu z grillem gazowym. Publikacja porusza również kwestie zdrowotne związane z wykorzystaniem tego rodzaju sprzętu oraz paliw.

W badaniach użyto zaprojektowanych i wykonanych przeze mnie urządzeń pomiarowych wykorzystujących sensory niskokosztowe, które wspomagały procesy pomiaru stężeń pyłów zawieszonych przez urządzenia profesjonalne wokół stanowiska badawczego (w szczególności do pomiaru stężenia tła w zakresie zanieczyszczeń pyłowych). Także w tym przypadku, zastosowanie czujników niskokosztowych pozwoliło na zwiększenie rozdzielczości przestrzennej tej „minisieci” pomiarowej.

4.8. Podsumowanie

Najważniejszym celem naukowym podjętych przeze mnie badań było intensywne, długoterminowe przebadanie wybranych niskokosztowych sensorów do pomiaru stężeń typowych zanieczyszczeń powietrza w warunkach zewnętrznych, głównie w polskich realiach klimatycznych, określenie jakości wykonywanych za ich pomocą pomiarów, zbadanie możliwości poprawy tej jakości oraz budowa urządzeń pomiarowych i użycie ich w sytuacjach, w których zastosowanie sprzętu profesjonalnego byłoby utrudnione, a jednocześnie, które są interesujące z badawczego punktu widzenia. Prace przeprowadzono w kilku obszarach badawczych:

- badania porównawcze sensorów niskokosztowych (umieszczonych w samodzielnie zaprojektowanych i zbudowanych urządzeniach pomiarowych) z urządzeniami profesjonalnymi wykorzystywanymi w PMŚ,

- budowa prototypowej sieci pomiarowej w mieście średniej wielkości i analiza potencjalnych korzyści wynikających z zagęszczenia sieci pomiarowej,
- zastosowanie zaprojektowanych urządzeń wykorzystujących sensory niskokosztowe w nietypowych zastosowaniach oraz umieszczenie ich na nietypowych nośnikach.

Do najważniejszego uzyskanego przeze mnie osiągnięcia naukowego należy zbudowanie oraz zweryfikowanie na różnych czujnikach i w zróżnicowanych lokalizacjach funkcji korygujących dla niskokosztowych sensorów stężenia pyłu zawieszonego oraz ditlenku azotu. Kolejnym osiągnięciem jest stworzenie prototypowej sieci pomiarowej oraz pokazanie, że pomimo zastosowania czujników niskokosztowych, przy znajomości ich możliwości i ograniczeń oraz dokładności użytych sensorów, prowadzone pomiary można wykorzystywać na przykład do identyfikacji hot-spotów. Małe rozmiary oraz waga umożliwiają budowanie niewielkich, a nawet przenośnych urządzeń, które wzbogacają możliwości pomiarowe konwencjonalnych sieci pomiarowych.

Zdobyta wiedza i umiejętności związane z urządzeniami pomiarowymi oraz z budową, eksploatacją i utrzymaniem sieci pomiarowych pozwoliły na pełnienie przeze mnie roli doradczej m.in. dla instytucji odpowiedzialnych za działania związane z jakością powietrza oraz wdrażaniem rozwiązań na większą skalę (np. dla Urzędu m. st. Warszawy, Urzędu Dzielnicy Bielany m. st. Warszawy, itp.).

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Od 2015 roku współpracuję w zakresie prac badawczych z profesorem Piotrem Oskarem Czechowskim i jego zespołem z Katedry Marketingu i Metod Ilościowych w Zespole Metod Ilościowych, Finansów i Zarządzania Środowiskiem z Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. W ramach współpracy pracowaliśmy wspólnie nad matematycznymi metodami poprawy jakości wskazań niskokosztowych czujników jakości powietrza. Posiadamy pięć wspólnych publikacji oraz trzy wspólne wystąpienia na konferencjach.

Od 2016 roku realizuję współpracę badawczą z doktorem habilitowanym Szymonem Firłągiem z Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. W ramach współpracy zrealizowaliśmy wspólnie 3 eksperymenty badawcze oraz posiadamy dwie wspólne publikacje i dwa wspólne wystąpienia na konferencjach.

Dzięki kooperacji, od 2017 roku, z dr hab. inż. Agnieszką Malesińską z Zakładu Budownictwa Wodnego i Hydrauliki z Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej współpracuję również z zespołem prof. dra hab. inż. Giuseppe Barbaro z Mediterranean University of Reggio Calabria, w szczególności z doktorantem Pierfabrizio Puntorieri, w zakresie implementacji algorytmów numerycznych rozwiązania problemów uderzenia hydraulicznego w Matlabie. Rezultatem naszych wspólnych działań są cztery artykuły opublikowane w czasopiśmie naukowych.

W latach 2018-2019 współpracowałem z prof. Antonio Lozano Garcíą z Universidad de Sevilla oraz z Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía w Sewilli. W ramach kooperacji zamontowałem samodzielnie zbudowane instrumenty pomiarowe i przeprowadziłem kilkumiesięczne pomiary porównawcze sensorów NO₂ i O₃ firmy SpecSensors z urządzeniami

profesjonalnymi na dwóch stacjach pomiarowych należących do Environmental Regional Government: Ranilla i Santa Clara w Sewilli. Celem badań było sprawdzenie jakości wskazań sensorów niskokosztowych oraz wytrzymałości urządzeń pomiarowych w odmiennych (w stosunku do Polski) warunkach klimatycznych, w szczególności w warunkach wysokich, letnich temperatur oraz wysokich stężeń NO₂.

Od 2021 roku realizuję współpracę badawczą z zespołem profesor Myriam Lopes z Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro (Portugalia), w szczególności, w zakresie niskokosztowych sensorów do pomiaru jakości powietrza i budowy sieci pomiarowych współpracuję z doktorantem Johnnym Reitem. W rezultacie współpracy w 2022 roku odbyłem ponad miesięczny staż w Universidade de Aveiro oraz rozpocząłem wykonywanie pomiarów porównawczych badanych przeze mnie czujników niskokosztowych z profesjonalnymi urządzeniami pomiarowymi na stanowisku pomiarowym w Aveiro. Owocem tej współpracy jest artykuł Rogulski M. i in. „Improving the Quality of Measurements Made by Alphasense NO₂ Non-Reference Sensors Using the Mathematical Methods” opublikowany w czasopiśmie Sensors.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

6.1. Nagrody i wyróżnienia

2020 – **Nagroda zespołowa II stopnia JM Rektora PW** za osiągnięcia naukowe w latach 2018-2019 (za cykl artykułów naukowych).

2017 – **Nagroda zespołowa II stopnia JM Rektora PW** za osiągnięcia organizacyjne w roku akademickim 2016/2017.

2016 – **Nagroda zespołowa III stopnia JM Rektora PW** za osiągnięcia organizacyjne w roku akademickim 2014/2015 (za promocję kierunku studiów Ochrona Środowiska).

2013 – **Nagroda indywidualna II stopnia JM Rektora PW** za osiągnięcia dydaktyczne w latach 2011-2012 (za wydanie cyklu podręczników dla studentów).

6.2. Udział w konsorcjach

Brałem udział w następujących konsorcjach zawiązanych w celu zdobycia bądź realizacji grantów europejskich lub krajowych:

- **K-HEALTHinAIR: Knowledge for improving indoor AIR quality and HEALTH (2022).** Program badawczy: **HORIZON-HLTH-2021-ENVHLTH-02-02: Indoor air quality and health** – projekt finansowany w ramach programu Horyzont Europa w latach 2022-2026, realizowany przez 16 jednostek z 8 krajów europejskich. W projekcie jestem odpowiedzialny za montaż, obsługę i nadzór nad funkcjonowaniem niskokosztowych urządzeń do pomiarów jakości powietrza, które będą zamontowane w 60 domach oraz 30 szkołach w Polsce i Austrii w celu stałego monitorowania jakości powietrza wewnętrznego (PM, CO₂ i LZO). Projekt ma na celu określenie zmienności stężeń zanieczyszczeń w powietrzu wewnątrz różnych rodzajów pomieszczeń, ocenę potencjalnych skutków, jakie zanieczyszczenia powietrza wewnętrznego mogą

powodować dla zdrowia narażonych osób oraz wypracowanie standardów w zakresie oceny jakości powietrza wewnętrznego.

- **Podkowa Leśna = Human Smart Town (2019-2021)** – projekt o charakterze badawczym finansowany w ramach programu operacyjnego „Human Smart Cities. Inteligentne Miasta współtworzone przez mieszkańców”. W trakcie przedsięwzięcia Miasto Podkowa Leśna realizowało zadania związane z niskoemisyjnością. Podstawowym był zakup urządzeń pomiarowych oraz uruchomienie systemu monitoringu jakości powietrza, a także stworzenie platformy informacyjnej. W projekcie byłem kierownikiem części inżynierskiej: nadzorowałem budowę i wdrożenie produktów software’owych (platformy informacyjnej) do gromadzenia i prezentacji danych m.in. z czujników jakości powietrza, a także doradzałem w zakresie określenia wymaganych parametrów urządzeń do pomiaru jakości powietrza.
- **Pilotażowe wdrożenie inteligentnych i innowacyjnych rozwiązań Human Smart City dla miasta Rawicza z uwzględnieniem założeń Strategii Zrównoważonego Rozwoju Gminy Rawicz (2020-2022)** – projekt o charakterze badawczym finansowany w ramach programu operacyjnego „Human Smart Cities. Inteligentne Miasta współtworzone przez mieszkańców”. Celem projektu było uruchomienie środowiska pilotażowego obejmującego system kamer cyfrowych, urządzeń do pomiaru jakości powietrza i inteligentnego oświetlenia oraz opracowanie i wdrożenie systemu integrującego dane o mieście oraz aplikacji do komunikacji z mieszkańcami. W projekcie pełniłem funkcję kierownika.
- **System monitorowania jakości powietrza o wysokiej rozdzielczości przestrzennej oparty o bezprzewodową sieć sensorową (2014)**. Konsorcjum obejmowało: DGT sp. z o.o., "DGTRONIK" – sp. z o.o., Politechnikę Warszawską, Akademię Morską w Gdyni. We wniosku występowałem jako pracownik zatrudniony przez Politechnikę Warszawską.
- **Upowszechnianie dobrych praktyk w zarządzaniu ochroną środowiska (2011)**. Konsorcjum obejmowało: Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Państwową Inspekcję Ekologiczną w obwodzie lwowskim (Ukraina). We wniosku występowałem jako pracownik zatrudniony przez Politechnikę Warszawską.
- **Transgraniczne rejestry stanu środowiska. Faza 1. Metadane, woda i powietrze. (2010)** Konsorcjum obejmowało: Lubelską Fundację Ochrony Środowiska Naturalnego, Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Lublinie, Państwową Inspekcję Ekologiczną w obwodzie lwowskim, organizację pozarządową "Ekologiczne Inicjatywy". We wniosku występowałem jako ekspert współpracujący z Lubelską Fundacją Ochrony Środowiska Naturalnego i Wojewódzkim Inspektoratem Ochrony Środowiska w Lublinie.

6.3. Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki

W 2013 r. otrzymałem Nagrodę indywidualną II stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia dydaktyczne w latach 2011-2012. Związana ona była z wydaniem podręczników dla studentów: „AutoCAD 2011 PL dla studentów” (2011) oraz „Bazy danych dla studentów. Podstawy projektowania i języka SQL” (2012).

W 2013 r. wydałem podręcznik dla studentów „**Podstawy korzystania z programu AutoCAD 2013**”, natomiast w 2016 r. podręcznik „**AutoCAD 2016. Wprowadzenie do programu. Ćwiczenia praktyczne**”.

W ramach prowadzonych przeze mnie zajęć z przedmiotów „Elementy grafiki inżynierskiej” oraz „Grafika inżynierska” od 2012 roku umożliwiam studentom zdobycie **certyfi­katów Autodesku**, organizując wraz z uprawnionym przedstawicielem firmy PROCAD S.A. egzamin dotyczący znajomości programu AutoCAD (na poziomie podstawowym lub średnio zaawansowanym).

W 2017 brałem udział w inicjatywie związanej z promowaniem czystego powietrza prowadzonej przez **Forum Rozwoju Efektywnej Energii** we współpracy z **Gaspol Energy** pod hasłem Balon.Lab. W jej trakcie przedstawiono wpływ zanieczyszczeń powietrza na zdrowie oraz metody walki z problemem wysokich stężeń zanieczyszczeń. W trakcie pokazów wykorzystywałem zaprojektowane i zbudowane przeze mnie instrumenty pomiarowe do pomiaru stężeń pyłów z użyciem balonu na ogrzane powietrze. Kampania miała miejsce m.in. w Nowym Targu, Wieliczce, Piastowie, Włocławku.

Od 2021 pełnię funkcję kierownika w projekcie „**NERW PW Nauka – Edukacja – Rozwój - Współpraca**” Zadanie 33 „Modyfikacja programu kształcenia na kierunku Ochrona Środowiska studia I stopnia”. Źródło finansowania: Program Operacyjny Wiedza, Edukacja, Rozwój. Celem projektu jest modyfikacja programu studiów I stopnia na kierunku Ochrona Środowiska w celu wprowadzenia wymaganej liczby przedmiotów obieralnych. Według założeń projektu, planowane jest wprowadzenie na kierunku 15 nowych przedmiotów.

6.4. Osiągnięcia organizacyjne

W latach 2010-2020 na Wydziale Inżynierii Środowiska/Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej pełniłem funkcje Pełnomocnika Dziekana ds. Informatyki. W tym czasie dzięki współpracy z Centrum Informatyzacji Politechniki Warszawskiej i udziale w 6 edycjach programu ogłaszanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego dotyczącego przyznawania środków finansowych na rozbudowę infrastruktury informatycznej nauki w zakresie dużej lub strategicznej infrastruktury badawczej (tzw. *dotacje LAN*), udało mi się m.in. pozyskać środki finansowe na całkowitą wymianę i rozbudowę kluczowych elementów infrastruktury sieciowej i informatycznej Wydziału (tj. switche, firewalle, serwery, UPS-y, macierze dyskowe). Wspierałem również, a czasem także zastępowałem, wydziałowego administratora w pracach związanych z utrzymaniem i rozwojem infrastruktury informatycznej Wydziału.

Ponadto, w okresie tym pełniłem rolę administratora serwera w macierzystej jednostce – Zakładzie Informatyki i Badań Jakości Środowiska, gdzie m.in. zarządzałem kontami studenckimi, a także wdrożyłem nową wersję strony internetowej Wydziału, na której później umieszczałem treści oraz administrowałem nią.

6.5. Opieka naukowa nad studentami

W latach 2009 – 2022 byłem promotorem **1 pracy dyplomowej inżynierskiej**, **11 prac dyplomowych magisterskich** oraz recenzentem ok. 30 prac dyplomowych na Wydziale Inżynierii Środowiska/Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

Politechniki Warszawskiej. Prace dotyczyły głównie zagadnień z zakresu monitoringu jakości powietrza oraz emisji do powietrza.

W zależności od dostępnych możliwości organizowałem staże dla studentów, czego przykładem może być udział czwórki studentów w 2011 w projekcie związanym z analizą systemu opłat za korzystanie ze środowiska prowadzonym w firmie Comarch.

Wprowadzałem również studentów w projekty, w których aktualnie uczestniczyłem – tu przykładem może być zaangażowanie dyplomantki do budowy portalu webowego i mechanizmów wymiany danych w projekcie „Opracowanie i wdrożenie Warszawskiego Indeksu Powietrza oraz systemu informacyjno-analitycznego jakości powietrza (Etap I)” na zlecenie Urzędu Miasta st. Warszawy.

6.6. Prowadzone przedmioty

W ramach mojej podstawowej działalności dydaktycznej na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej jestem koordynatorem oraz prowadzę następujące przedmioty:

- studia I stopnia
 - Elementy grafiki inżynierskiej
 - Grafika inżynierska
 - Informatics I (studia anglojęzyczne)
 - Informatyka i programowanie
 - Współczesne narzędzia do zbierania i przetwarzania danych o środowisku
- studia II stopnia
 - Acquisition and Management of Environmental Data (studia anglojęzyczne)
 - Bazy danych
 - Data bases (studia anglojęzyczne)
 - Informatyka środowiska
 - Język programowania
 - Zarządzanie projektami w ochronie środowiska
 - Zarządzanie ryzykiem

zaś na Wydziale Zarządzania Politechniki Warszawskiej:

- studia I stopnia
 - Podstawy programowania
 - Projekt wymagań funkcjonalności systemu informatycznego

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora nauk technicznych moja działalność naukowa koncentrowała się na zagadnieniach związanych z zasadami działania rynków energii elektrycznej (w szczególności rynku polskiego), budową modeli ich działania, rozwiązywaniu problemów dotyczących optymalizacji doboru jednostek wytwórczych do pracy przy uwzględnieniu ograniczeń systemu przesyłowego (najwyższych napięć) oraz kwestiach związanych z bezpieczeństwem przesyłu energii elektrycznej.

Od samego początku studiów III stopnia, działając w zespole badawczym pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Eugeniusza Toczyłowskiego, wraz z innymi naukowcami oraz doktorantami realizowaliśmy w tym obszarze szereg projektów oraz przez wiele lat pełniliśmy doradcą rolę dla kierownictwa operatora systemu przesyłowego oraz osób decyzyjnych – ze spółki Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. Poza opracowaniami i analizami na rzecz tego podmiotu rezultatem moich działań był szereg artykułów oraz prezentacji na konferencjach naukowych i technicznych, a także obrona z **wyróżnieniem** rozprawy doktorskiej pt. „Analiza wybranych modeli zintegrowanego obrotu wielotowarowego w systemach rozproszonych na przykładzie rynku energii”.

Okres po zdobyciu stopnia doktora to w znacznym stopniu było ukierunkowanie na nową tematykę. Dzięki wiedzy z zakresu informatyki, elektroniki i telekomunikacji zdobytej podczas studiów na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej miałem możliwość kompleksowo zająć się tematyką badania niskokosztowych sensorów do pomiaru stężeń zanieczyszczeń w powietrzu. Pozwoliło mi to na całościowe podejście do tematu budowy instrumentów pomiarowych oraz sieci pomiarowych – począwszy od aspektów związanych z warstwą elektroniki niezbędnej do zasilania i integracji sensorów z mikrokontrolerami (a także programowaniem mikrokontrolerów), poprzez warstwę telekomunikacyjną związaną z przesyłaniem wykonywanych pomiarów z użyciem modemów GSM, aż po stronę serwerową, gdzie znajduje się oprogramowanie (którego jestem autorem) do odbierania, gromadzenia i przetwarzania wykonywanych pomiarów.

Dzięki nawiązaniu współpracy i otwartości ówczesnych władz miasta Nowy Sącz w 2016 roku miałem możliwość zbudowania i rozpoczęcia testowania prototypowej sieci pomiarowej składającej się na początku z 5, a następnie z 10 urządzeń pomiarowych rozmieszczonych w różnych punktach miasta. Według mojej wiedzy była to pierwsza w Polsce sieć złożona z instrumentów pomiarowych wykorzystujących sensory niskokosztowe. Możliwość umieszczenia czujników pyłu zawieszanego, a później także innych zanieczyszczeń, tuż przy stacji pomiarowej należącej do ówczesnego WIOŚ-u, dała mi możliwość przeprowadzenia względem niej długoterminowych pomiarów porównawczych wybranych przez mnie sensorów w warunkach rzeczywistych i w zróżnicowanych warunkach pogodowych.

Prototypowa sieć pomiarowa na terenie Nowego Sącza nie była jedynym miejscem mojej aktywności naukowej. W celu rzetelnego i kompleksowego przebadania sensorów niskokosztowych wykorzystywałem również inne możliwości – w tym m.in. kampanię pomiarów porównawczych przeprowadzonych przez Urząd Marszałkowski Województwa Małopolskiego, Krajowe Laboratorium Referencyjne i Wzorcujące Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska w

Rabce-Zdroju i Dobczycach, jak również współpracę z zagranicznymi podmiotami – w Sewilli (Hiszpania) i Aveiro (Portugalia).

Zgromadzone dane oraz zdobyte doświadczenie pozwoliło mi na sformułowanie zależności matematycznych, służących do korekcji surowych pomiarów uzyskiwanych przez wybrane przeze mnie sensory, a tym samym na poprawę ich dokładności. Dodatkowo, umożliwiło to zidentyfikowanie podatności, określenie jakości, ograniczeń oraz korzyści wynikających z pomiarów wykonywanych przez czujniki tego rodzaju. Zebrane wnioski oraz najważniejsze dane zaprezentowałem w trakcie konferencji oraz w artykułach naukowych (za powyższe otrzymałem m.in. Nagrodę zespołową II stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia naukowe w latach 2018-2019).

Zdobytą wiedzę we wspomnianym (i nie tylko) obszarze wykorzystuję m.in. w prowadzonych przeze mnie zajęciach dla studentów, doradztwie jednostkom administracji publicznej (m.in. m. st. Warszawie podczas realizacji projektu Warszawskiego Indeksu Powietrza, czy Głównemu Inspektoratowi Ochrony Środowiska w trakcie realizacji projektu Ekoinfonet), projektach badawczych w obszarze smart-city (współpraca z władzami miasta Podkowa Leśna i władzami miasta Rawicz), recenzji artykułów naukowych oraz innych aktywnościach związanych z prowadzoną przeze mnie działalnością badawczo-dydaktyczną.

8. Podziękowania

Serdeczne podziękowania chciałbym przede wszystkim wyrazić Kierownikowi Zakładu Informatyki i Badań Jakości Powietrza profesorowi dr. inż. Arturowi Badydzie. Wielokrotnie zapraszał mnie do udziału w licznych projektach badawczych, dzięki czemu mogłem nawiązać współpracę z instytucjami publicznymi, realizować swoje badania i brać udział w ciekawych i różnorodnych projektach badawczych. Dzielił się również ze mną swoją rozległą wiedzą w kwestiach merytorycznych i organizacyjno-formalnych, służył ogromnym doświadczeniem, zarażał niespożytą energią i inspirował swoją pasją. Dziękuję Profesorowi również jako koledze: zawsze mogłem liczyć na dobre, wspierające słowo z jego strony, pomoc w wielu sytuacjach, nawet w tych, które wydawały się być nie do rozwiązania i za to, że pomimo bardzo napiętego grafiku zawsze znajdował dla mnie czas na rozmowę, czy pomoc.

Chciałbym również podziękować dr. hab. Szymonowi Firlągowi z Instytutu Inżynierii Budowlanej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, za umożliwienie mi realizacji badań na żaglowcu podczas rejsu po Morzu Północnym i Bałtyckim, dzięki czemu mogłem wzbogacić badania prowadzone za pomocą zbudowanych przeze mnie instrumentów pomiarowych o środowisko inne niż lądowe.

Dziękuję również zespołowi profesor Myriam Lopes z Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), Departamento de Ambiente e Ordenamento w Universidade de Aveiro za opiekę podczas stażu. Za ogromną pomoc w kwestiach formalnych w trakcie pobytu na uniwersytecie w Aveiro, za zapoznanie z tamtejszym środowiskiem akademickim, za wymianę niezwykle cennych doświadczeń w kwestii eksploatacji instrumentów pomiarowych, co mogłem również przenieść i wykorzystać na gruncie rodzimym. Za pełną dyspozycyjność jak i za wiele cennych wskazówek.

Podziękowania kieruję również do Koleżanek i Kolegów oraz Władz z macierzystego Wydziału, za udział w projektach, za wspólne prowadzenie zajęć, wymianę doświadczeń, rozmowy, pomoc w zwykłych, codziennych sprawach uczelnianych i prywatnych.

Pragnę też serdecznie podziękować moim Rodzicom, Ireneuszowi i śp. Wiesławie Rogulskim za to, że od zawsze dbali o moje wykształcenie, za ich silne wsparcie,

wyrozumiałość, pomoc i wyrzeczenia, jakie się z tym wiązały oraz za ich bezgraniczną miłość. Osobne, równie ważne, podziękowania składam na ręce mojej żony Magdy, na którą zawsze mogę liczyć, która mnie wspiera i wielokrotnie odciążała w moich obowiązkach domowych oraz rodzicielskich. Dzięki Wam zaszedłem tak wysoko. To właśnie mojej Rodzinie (w tym mojemu synowi, Wojciechowi) chciałbym zadedykować tę pracę.

Dziękuję również wszystkim tym, których nie wymieniłem, a którzy w jakiegokolwiek formie przyczynili się do tego, że dotarłem właśnie do tego miejsca w swojej karierze naukowej. Za każdą radę, dobre słowo, konstruktywną krytykę, wsparcie, uśmiech – serdecznie dziękuję.



dr inż. Mariusz Rogulski

Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny

I. INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH NAUKOWYCH ALBO ARTYSTYCZNYCH, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1. PKT 2 USTAWY

Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b Ustawy składających się na osiągnięcie w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

Tytuł cyklu: Analiza i poprawa jakości pomiarów wykonywanych za pomocą wybranych niskokosztowych czujników zanieczyszczeń powietrza oraz wykorzystanie ich do budowy urządzeń pomiarowych i rozszerzania możliwości systemów pomiarowych

Część I – badania porównawcze wybranych niskokosztowych czujników zanieczyszczeń powietrza z urządzeniami profesjonalnymi oraz propozycja matematycznej poprawy dokładności wykonywanych za ich pomocą pomiarów

- Rogulski Mariusz, Badyda Artur Jerzy: *Investigation of Low-Cost and Optical Particulate Matter Sensors for Ambient Monitoring, Atmosphere, vol. 11, nr 10, 2020, s. 1-18, DOI:10.3390/atmos11101040, 70 punktów, IF(2,046). (pozycja [A1] w załączniku nr 1)*
- Rogulski Mariusz, Badyda Artur Jerzy, Gayer Anna, Reis Johnny: *Improving the Quality of Measurements Made by Alphasense NO₂ Non-Reference Sensors Using the Mathematical Methods, Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, vol. 22, nr 10, 2022, s. 1-17, DOI:10.3390/s22103619, 100 punktów, IF(3,031). (pozycja [A2] w załączniku nr 1)*
- Owczarek Tomasz, Rogulski Mariusz, Czechowski Piotr O: *Assessment of the Equivalence of Low-Cost Sensors with the Reference Method in Measuring PM₁₀ Concentration Using Selected Correction Functions”, Sustainability, 2020, vol. 12, s. 1-17, DOI 10.3390/su12135368, 100 punktów, IF(2,592). (pozycja [A3] w załączniku nr 1)*

Część II – użycie wybranych niskokosztowych czujników zanieczyszczeń powietrza do rozszerzania możliwości sieci i systemów pomiarowych

- Rogulski Mariusz: *Using Low-Cost PM Monitors to Detect Local Changes of Air Quality, Polish Journal of Environmental Studies, Institute of Scientific Information in Philadelphia, vol. 27, nr 4, 2018, s. 1699-1705, DOI:10.15244/pjoes/77075, 15 punktów, IF(1,186). (pozycja [A4] w załączniku nr 1)*
- Firląg Szymon, Rogulski Mariusz, Badyda Artur Jerzy: *The Influence of Marine Traffic on Particulate Matter (PM) Levels in the Region of Danish Straits, North and Baltic Seas, w: Sustainability, vol. 10, nr 11, 2018, ss. 1-19, DOI:10.3390/su10114231, 20 punktów, IF: 2,592. (pozycja [A5] w załączniku nr 1)*

Treść publikacji jest dostępna w załączniku nr 1. Przedstawione publikacje stanowiące osiągnięcie zostały pozytywnie ocenione przez międzynarodowych i krajowych recenzentów. Zacytowano je 45 razy (kwiecień 2023, Scopus). Opracowane wyniki badań porównawczych niskokosztowych

czujników zanieczyszczeń powietrza z urządzeniami profesjonalnymi, propozycje poprawy ich dokładności oraz możliwości zastosowania czujników niskokosztowych w sytuacjach, w których zastosowanie urządzeń profesjonalnych byłoby utrudnione bądź niemożliwe, popularyzowano na konferencjach naukowych i w czasopismach branżowych.

Jestem pomysłodawcą całego cyklu, głównym autorem też badawczych i autorem przebiegu eksperymentów. W czterech spośród powyższych pięciu publikacji jestem głównym autorem opracowania wyników i przedstawienia dyskusji oraz pierwszym autorem i autorem korespondencyjnym. Część prac badawczych związanych z analizą uzyskanych wyników oraz weryfikacją zbieżności ze wskazaniami z urządzeń profesjonalnych prezentowanych w publikacji [A3] była współrealizowana z zespołem prof. UMG dra hab. inż. Piotra Oskara Czechowskiego z Zakładu Marketingu i Metod Ilościowych, Zespołu Metod Ilościowych, Finansów i Zarządzania Środowiskiem Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Dokładny podział udziału wszystkich współautorów z uwzględnieniem realizowanych zadań w każdej z publikacji (z wyłączeniem [A4]) przedstawiono w załączniku nr 2. W ramach osiągnięcia wykazuję jedynie najbardziej istotne publikacje w czasopismach posiadających indeksowanie Journal Citation Report (IF) lub znajdujących się na liście MNiSW. Sumaryczny IF dla cyklu publikacji składających się na osiągnięcie wynosi **11,447** a suma punktów **MNiSW 305** wg Bazy Wiedzy Politechniki Warszawskiej. Inne publikacje, których nie włączono bezpośrednio do cyklu, zostaną przedstawione w dalszej części wniosku.

II. INFORMACJA O AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ

1. Wykaz zbiorczy dorobku naukowego publikacyjnego

Po doktoracie opublikowałem łącznie **25** artykułów naukowych indeksowanych przez Web of Science lub Scopus, w tym **20** artykułów w czasopismach naukowych oraz **5** w indeksowanych materiałach z konferencji. W repozytorium Web of Science znajdują się **24** pozycje, a w bazie Scopus **23** (kwiecień 2023). Opublikowałem również **5** książek autorskich, **13** rozdziałów w monografiach (w tym **10** przed doktoratem), **8** punktowanych artykułów z listy MNiSW oraz **4** w innych czasopismach branżowych (w tym **3** przed doktoratem). Według Bazy Wiedzy Politechniki Warszawskiej sumaryczna liczba punktów MNiSW uzyskanych za moje publikacje wynosi **1 399** pkt (w tym **27** pkt za publikacje przed doktoratem). Sumaryczny IF wynosi **54,664**. Łączne zestawienie mojego dorobku publikacyjnego przedstawiono w Tabeli 1. Sumaryczna liczba pozycji bibliograficznych po doktoracie wynosi **42**. Wszystkie dane bibliometryczne podane w wykazie osiągnięć zgodne są z informacją zawartą w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej (stan na kwiecień 2023). Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia posiadają dodatkowe oznaczenie [A...], natomiast powiązane z osiągnięciem [B...].

Tabela 1. Zbiorcze zestawienie dorobku publikacyjnego

Lp.	Rodzaj publikacji	Przed doktoratem	Po doktoracie	Razem
1	Publikacje w czasopismach indeksowanych w bazach Web of Science lub Scopus	0	20	20
2	Publikacje w materiałach konferencyjnych lub monografiach indeksowanych w bazach Web of Science lub Scopus	0	5	5
3	Rozdziały w monografiach	10	3	13

4	Książki autorskie inne	0	5	5
5	Publikacje w czasopismach punktowanych ujętych na liście MNiSW	0	8	8
6	Publikacje w innych czasopismach	3	1	4
	Razem	13	42	55

Tabela 2. Artykuły opublikowane po doktoracie w czasopismach znajdujących się w bazie JCR wraz z wartością współczynnika IF według daty publikacji (treść dostępna w załączniku 1 i 3); wyróżniono pozycje znajdujące się w cyklu monotematycznym osiągnięcia.

Pozycja w załączniku 1 i 3	Czasopismo	Rok wydania	IF
[A2]	Sensors	2022	3,031
[B4]	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	2022	10,588
	<i>Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme</i>	2021	1,995
	<i>Atmosphere</i>	2021	2,046
	<i>American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine</i>	2020	21,405
[A1]	Atmosphere	2020	2,046
[A3]	Sustainability	2020	2,592
	<i>Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice</i>	2020	1,952
	<i>Energies</i>	2020	2,707
[A4]	Polish Journal of Environmental Studies	2018	1,186
[A5]	Sustainability	2018	2,592
	<i>Measurement & Control</i>	2018	1,229
	<i>Polish Journal of Environmental Studies</i>	2015	0,790
	<i>Environment Protection Engineering</i>	2015	0,505
		Suma	54,664

2. Wykaz opublikowanych rozdziałów w monografiach naukowych.

Prace opublikowane przed uzyskaniem stopnia doktora zostały oznaczone symbolem gwiazdki.

Lp.	Informacje bibliograficzne	Całkowita wartość punktowa
1	Redaktorzy: Sówka Izabela, Gaj Kazimierz, Miller Urszula Autor 1: Badyda Artur Autor 2: Rogula-Kozłowska Wioletta Autor 3: Majewski Grzegorz Autor 4: Krawczyk Piotr Autor 5: Oberbek Przemysław Autor 6: Rogulski Mariusz Tytuł: „Porównanie emisji pyłów i wybranych substancji gazowych z czterech typów grilli oraz palenisk domowych”, s. 40-42 W: „Aktualne trendy w ochronie powietrza i klimatu - kontrola, monitoring, prognozowanie i ograniczanie emisji” Wydawca: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 150 s., 2020, Wrocław ISBN 978-83-7493-140-3	-
2	Redaktorzy: Sówka Izabela, Gaj Kazimierz, Miller Urszula Autorzy: Owczarek Tomasz, Rogulski Mariusz, Czechowski Piotr Oskar Tytuł: „Ocena równoważności czujników niskokosztowych z metodą referencyjną w pomiarze stężeń pyłu PM10 z zastosowaniem wybranych funkcji korekcyjnych”,	-

	<p>s. 107-109 W: „Aktualne trendy w ochronie powietrza i klimatu - kontrola, monitoring, prognozowanie i ograniczanie emisji” Wydawca: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 150 s., 2020, Wrocław ISBN 978-83-7493-140-3</p>	
3	<p>Redaktorzy: Ragia LEMONIA , Laurini Robert Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Dziadak Bogdan Tytuł: „Application of SensorML in the Description of the Prototype Air Monitoring Network”, s. 307-314 W: „Proceedings of the 3rd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management” Wydawca: SCITEPRESS, 377 s., 2017, Porto (Portugalia) ISBN 978-989-758-252-3</p>	-
4*	<p>Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: „Balancing Real and Reactive Power with Real and Reactive Regulation Reserves in Power Systems”, s. 193-224 W: „Proceedings of the 13th IEEE IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics”, 2007, Szczecin, Poland, IEEE</p>	3
5*	<p>Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: „Balancing electric power with regulation and transmission reserves in power systems”, s. 293-298 W: „12th IEEE Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2006”</p>	3
6*	<p>Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: „Zapewnienie warunków bezpieczeństwa w systemie elektromagnetycznym przez łączne bilansowanie rezerw regulacyjnych i przesyłowych”, s. 67-76 W: VI Konferencja Naukowo-Techniczna OPE '05 Optymalizacja w elektroenergetyce, 2005, Jachranka</p>	3
7*	<p>Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: „Ekonomiczny rozdział obciążeń w sieci elektroenergetycznej z uwzględnieniem strat przesyłowych przy wykorzystaniu metody cen węzłowych”, s. 7-14 W: „Konferencja Naukowo-Techniczna Optymalizacja w elektroenergetyce OPE'03”, 2003, Jachranka, Poland</p>	3
8*	<p>Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „The problem of lines power flow changes caused by using reserves” W: International Workshop Control and Information Technology IWCIT, Technical University of Ostrava, Ostrava, 2005</p>	3
9*	<p>Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: “Wpływ ograniczeń elektrownianych na wartość dobrobytu ekonomicznego w modelu DC metody cen węzłowych” W: Polioptymalizacja i komputerowe wspomaganie projektowania, WNT, 2003</p>	3
10*	<p>Redaktorzy: Tarnowski Wojciech, Kiczkowiak Tomasz Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Szwed Cezary Tytuł: „Optymalizacja doboru jednostek wytwórczych do pracy na rynku energii elektrycznej”, s. 191-198 W: Polioptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania, WNT, 2002</p>	3
11*	<p>Autor 1: Fleszar Krzysztof</p>	3

	<p>Autor 2: Kaleta Mariusz Autor 3: Pieńkosz Krzysztof Autor 4: Rogulski Mariusz Autor 5: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: "Uwzględnianie energii i kosztów rozruchów jednostek wytwórczych na godzinowym rynku bilansującym energii elektrycznej w Polsce", s. 111-118 Materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej Rynek Energii Elektrycznej: Osiągnięcia, Doświadczenia, Wyzwania, REE'2002, Kazimierz Dolny, Polska, 13-15 maja 2002, Katedra Elektrowni i Gospodarki Energetycznej Politechniki Lubelskiej, 2002</p>	
12*	<p>Autor 1: Fleszar Krzysztof Autor 2: Kaleta Mariusz Autor 3: Pieńkosz Krzysztof Autor 4: Rogulski Mariusz Autor 5: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: „Analiza systemu rozliczeń na Rynku Bilansującym”, s. 103-110 Materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej Rynek Energii Elektrycznej: Osiągnięcia, Doświadczenia, Wyzwania, vol. II, 2002, Pektor</p>	-
13*	<p>Autor 1: Fleszar Krzysztof Autor 2: Kaleta Mariusz Autor 3: Pieńkosz Krzysztof Autor 4: Rogulski Mariusz Autor 5: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: "Analiza struktury podmiotowej i obiektowej na rynku bilansującym", Materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej Rynek Energii Elektrycznej: Osiągnięcia, Doświadczenia, Wyzwania, REE'2002, Kazimierz Dolny, Katedra Elektrowni i Gospodarki Energetycznej Politechniki Lubelskiej, 2002</p>	3

3. Książki autorskie

Lp.	Informacje bibliograficzne	Całkowita wartość punktowa
1	<p>Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „AutoCAD 2016. Wprowadzenie do programu, ćwiczenia praktyczne” Wydawca: WITKOM (Salma Press), 180 s., 2016, Warszawa</p>	25
2	<p>Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „Podstawy korzystania z programu AutoCAD” Wydawca: Salma Press, 176 s., 2013, Warszawa</p>	25
3	<p>Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „Bazy danych dla studentów. Podstawy projektowania i języka SQL” Wydawca: Salma Press, 156 s., 2012, Warszawa</p>	20
4	<p>Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „AutoCAD dla studentów: podstawy korzystania z programu” Wydawca: Salma Press, 172 s., 2011, Warszawa</p>	20
5	<p>Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „ECDL CAD” Wydawca: Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 143 s., 2009, Warszawa</p>	12

4. Wykaz opublikowanych artykułów w czasopismach naukowych (z zaznaczeniem pozycji niewymienionych w pkt I.2)

4.1. Wykaz opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora artykułów indeksowanych z bazy WoS i Scopus

Lp.	Informacje bibliograficzne	Całkowita wartość punktowa	IF
1 [B4]	<p>1. Badyda Artur 2. Rogula-Kozłowska Wioletta 3. Majewski Grzegorz 4. Bralewska Karolina 5. Widziewicz-Rzońca Kamila 6. Piekarska Barbara 7. Rogulski Mariusz 8. Bihałowicz Jan</p> <p>“Inhalation risk to PAHs and BTEX during barbecuing: the role of fuel/food type and route of exposure” w: <i>Journal of Hazardous Materials</i>, 2022, vol. 440, s. 1-11. ISSN 0304-3894 DOI DOI:10.1016/j.jhazmat.2022.129635 IF: 10,588; WoS: tak; Scopus: tak</p>	200	10,588
2 [A2]	<p>1. Rogulski Mariusz (autor korespondencyjny) 2. Badyda Artur 3. Gayer Anna 4. Reis Johnny</p> <p>“Improving the Quality of Measurements Made by Alphasense NO₂ Non-Reference Sensors Using the Mathematical Methods” w: <i>Sensors</i>, 2022, vol. 22, s. 1-17. ISSN 1424-8220 DOI 10.3390/s22103619 IF: 3,031; WoS: tak; Scopus: tak</p>	100	3,031
3	<p>1. Malesińska Agnieszka 2. Kubrak Michał 3. Rogulski Mariusz 4. Puntorieri Pierfabrizio 5. Fiamma Vincenzo 6. Barbaro Giuseppe</p> <p>“Water Hammer Simulation in a Steel Pipeline System With a Sudden Cross Section Change” w: <i>Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme</i>, 2021, vol. 143, s. 1-8. ISSN 0098-2202 DOI 10.1115/1.4050728 IF: 1,995; WoS: tak; Scopus: tak</p>	100	1,995
4	<p>1. Rogulski Mariusz (autor korespondencyjny) 2. Badyda Artur</p> <p>“Air Pollution Observations in Selected Locations in Poland during the Lockdown Related to COVID-19” w: <i>Atmosphere</i>, 2021, vol. 12, s. 1-22. ISSN 2073-4433 DOI 10.3390/atmos12070806</p>	70	2,046

	IF: 2,046; WoS: tak; Scopus: tak		
5	1. Rogulski Mariusz (autor korespondencyjny) 2. Badyda Artur 3. Firląg Szymon “The Share of Pollution from Land Sources in PM Levels in the Region of Danish Straits, North and Baltic Seas” w: <i>Environmental and Climate Technologies</i> , 2021, vol. 25, s. 764-773. ISSN 1691-5208 DOI 10.2478/rtuct-2021-0057 WoS: tak; Scopus: tak	100	-
6	1. Badyda Artur 2. Krawczyk Piotr 3. Bihałowicz Jan Stefan 4. Bralewska Karolina 5. Rogula-Kozłowska Wioletta 6. Majewski Grzegorz 7. Oberbek Przemysław 8. Marciniak Andrzej 9. Rogulski Mariusz “Are BBQs Significantly Polluting Air in Poland? A Simple Comparison of Barbecues vs. Domestic Stoves and Boilers Emissions” w: <i>Energies</i> , 2020, vol. 13, s. 1-16. ISSN 1996-1073 DOI 10.3390/en13236245 IF: 2,707; WoS: tak; Scopus: tak	140	2,707
7	1. Malesińska Agnieszka 2. Rogulski Mariusz 3. Puntorieri Pierfabrizio 4. Barbaro Giuseppe 5. Kowalska Beata Elżbieta “Equivalent Celerity in Water Hammer for Serially Connected Pipelines” w: <i>Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice</i> , 2020, vol. 11, s. 1-11. ISSN 1949-1190 DOI 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000411 IF: 1,952; WoS: tak; Scopus: tak	70	1,952
8 [A3]	1. Owczarek Tomasz 2. Rogulski Mariusz 3. Czechowski Piotr Oskar “Assessment of the Equivalence of Low-Cost Sensors with the Reference Method in Measuring PM10 Concentration Using Selected Correction Functions” w: <i>Sustainability</i> , 2020, vol. 12, s. 1-17. ISSN 2071-1050 DOI 10.3390/su12135368 IF: 2,592; WoS: tak; Scopus: tak	100	2,592
9 [A1]	1. Rogulski Mariusz (autor korespondencyjny) 2. Badyda Artur “Investigation of Low-Cost and Optical Particulate Matter Sensors for Ambient Monitoring” w: <i>Atmosphere</i> , 2020, vol. 11, s. 1-18. ISSN 2073-4433 DOI 10.3390/atmos11101040 IF: 2,046; WoS: tak; Scopus: tak	70	2,046

10	<p>1. Badyda Artur 2. Rogula-Kozłowska Wioletta 3. Majewski Grzegorz 4. Oberbek Przemysław 5. Widziewicz Kamila 6. Jureczko Izabela 7. Rogulski Mariusz 8. Dąbrowiecki Piotr</p> <p>“Lung Cancer Risk Due to Exposure to PM-Bound PAHs from the Grilling Process” w: <i>American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine</i>, 2020, vol. 201, s. A2893-A2893. ISSN 1073-449X DOI 10.1164/ajrccm-conference.2020.201.1_MeetingAbstracts.A2893 IF: 21,405; WoS: tak</p>	-	21,405
11	<p>1. Malesińska Agnieszka 2. Rogulski Mariusz 3. Puntorieri Pierfabrizio 4. Barbaro Giuseppe 5. Kowalska Beata</p> <p>“Use of equivalent celerity to estimate maximum pressure increase in serial pipes during water hammer - numerical simulations in MATLAB” w: <i>The International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements</i>, 2019, vol. 7, s. 22-32. ISSN 2046-0546 DOI 10.2495/CMEM-V7-N1-22-32 Scopus: tak</p>	20	-
12	<p>1. Owczarek Tomasz 2. Rogulski Mariusz 3. Czechowski Piotr Oskar</p> <p>“Verification of equivalence with reference method for measurements of PM10 concentrations using low-cost devices” w: <i>Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin</i>, 2019, vol. 60, s. 84-99. ISSN 1733-8670 DOI 10.17402/375 WoS: tak</p>	70	-
13	<p>1. Rogulski Mariusz (autor korespondencyjny) 2. Badyda Artur</p> <p>„Current trends in network based air quality monitoring systems” w: „IOP Conference Series: Earth and Environmental Science”, s. 1-11, e-ISSN 1755-1315 WoS: tak; Scopus: tak</p>	5	-
14 [A4]	<p>1. Rogulski Mariusz</p> <p>“Using Low-Cost PM Monitors to Detect Local Changes of Air Quality” w: <i>Polish Journal of Environmental Studies</i>, 2018, vol. 27, s.1699-1705. ISSN 1230-1485 DOI 10.15244/pjoes/77075 IF: 1,186; WoS: tak; Scopus: tak</p>	15	1,186
15	<p>1. Malesińska Agnieszka 2. Rogulski Mariusz 3. Puntorieri Pierfabrizio 4. Barbaro Giuseppe 5. Kowalska Beata</p> <p>“Displacements of the pipe system caused by a transient phenomenon using the dynamic forces measured in the laboratory”</p>	15	1,229

	w: <i>Measurement & Control</i> , 2018, vol. 51, s.443-452. ISSN 0020-2940 DOI 10.1177/0020294018799370 IF: 1,229; WoS: tak; Scopus: tak		
16 [A5]	1. Firląg Szymon (autor korespondencyjny) 2. Rogulski Mariusz 3. Badyda Artur Jerzy “The Influence of Marine Traffic on Particulate Matter (PM) Levels in the Region of Danish Straits, North and Baltic Seas” w: <i>Sustainability</i> , 2018, vol. 10, nr 11, s. 1-19. ISSN 2071-1050 DOI 10.3390/su10114231 IF: 2,592; WoS: tak; Scopus: tak	20	2,592
17 [B1]	1. Rogulski Mariusz „Low-cost PM monitors as an opportunity to increase the spatiotemporal resolution of measurements of air quality” w: <i>Energy Procedia</i> , 2017, 128, s. 437-444 WoS: tak; Scopus: tak	15	-
18	1. Rogulski Mariusz (autor korespondencyjny) 2. Badyda Artur “Analysis of Data on Emissions on Example of Opolskie Voivodship Within Context of Fees for Use of the Environment” w: <i>Polish Journal of Environmental Studies</i> , 2015, vol. 24, s.675-681. ISSN 1230-1485 DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.04.024 IF: 0,790; WoS: tak; Scopus: tak	15	0,790
19	1. Rogulski Mariusz “Environmental Fees. Polish Case Study” w: <i>Environment Protection Engineering</i> , 2015, vol. 41, s. 81-97. ISSN 0324-8828 DOI DOI:10.5277/epe150207 IF: 0,505; WoS: tak; Scopus: tak	15	0,505
20	1. Rogulski Mariusz (autor korespondencyjny) 2. Rossa Maciej “The applicability of SWE in Polish spatial data infrastructures - the example of the SENSORML language” w: <i>Foundations of Computing & Decision Sciences</i> 2015, vol.40, s. 81-97 ISSN 0867-6356 DOI 10.1515/fcds-2015-0012 WoS: tak; Scopus: tak	15	-

4.2. Publikacje w materiałach konferencyjnych lub monografiach indeksowanych w bazach Web of Science lub Scopus po uzyskaniu stopnia doktora

Lp.	Informacje bibliograficzne	Całkowita wartość punktowa
1 [B2]	Rodzaj: Materiały konferencyjne Autor: Mariusz Rogulski Tytuł: „Indoor PM ₁₀ concentration measurements using low-cost monitors in selected locations in Warsaw” w: Energy Procedia, 2018, 147, s. 137–144 Konferencja: International Scientific Conference on Environmental and Climate Technologies 2018 (CONNECT 2018)	15
2 [B3]	Rodzaj: Materiały konferencyjne Autor: Mariusz Rogulski Tytuł: „The use of low-cost measuring devices for testing air quality in hard-to-reach locations”, s. 1-7 W: „ 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK 2018” Wydawca: EDP Sciences, 2018 ISBN 9781510865945	15
3	Rodzaj: Materiały konferencyjne Autor: Owczarek Tomasz, Rogulski Mariusz, Badyda Artur Tytuł: „Preliminary comparative assessment and elements of equivalence of air pollution measurement results of portable monitoring stations with using stochastic models”, s. 1-8 W: „10th Scientific Conference Air Protection in Theory and Practice 2017” Wydawca: EDP Sciences, 2018 ISBN 978-1-5108-5570-0	15
4	Rodzaj: Materiały konferencyjne Autor: Czechowski Piotr Oskar, Owczarek Tomasz, Badyda Artur, Majewski Grzegorz, Rogulski Mariusz, Ogrodnik Paweł Tytuł: „Preliminary comparative assessment of PM ₁₀ hourly measurement results from new monitoring stations type using stochastic and exploratory methodology and models”, s. 1-8 W: „10th Scientific Conference Air Protection in Theory and Practice 2017” Wydawca: EDP Sciences, 2018 ISBN 978-1-5108-5570-0	15
5	Rodzaj: Rozdział z monografii Autorzy: Rogulski Mariusz, Dziadak Bogdan Tytuł: „Application of SensorML in the Description of the Prototype Air Monitoring Network”, s. 307-314 W: „Proceedings of the 3rd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management” Wydawca: SCITEPRESS, 377 s., 2017, Porto (Portugalia) ISBN 978-989-758-252-3	-

4.3. Publikacje w czasopismach punktowanych ujętych na liście MNiSW po uzyskaniu stopnia doktora

Lp.	Informacje bibliograficzne	Całkowita wartość punktowa
1	Autor 1. Owczarek Tomasz Autor 2. Rogulski Mariusz "Uncertainty of PM ₁₀ concentration measurement on the example of an optical measuring device" w: SHS Web of Conferences, 2018, vol. 57, s. 1-10, Numer artykułu:02008. DOI:10.1051/shsconf/20185702008	1
2	Autor 1. Rogulski Mariusz Autor 2. Badyda Artur "Application of the Correction Function to Improve the Quality of PM Measurements with Low-Cost Devices", SHS Web of Conferences, 2018, nr 57, s. 1-6, Numer artykułu: 02009. DOI:10.1051/shsconf/20185702009	1
3	Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „The concept of a mobile air quality monitoring system for Warsaw” W: Challenges of Modern Technology, ISSN 2082-2863, nr 1 (7), 2016, s. 32-39	8
4	Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „Wpływ wielkości granicznej kwoty opłaty za korzystanie ze środowiska na wielkość przychodów administracji państwowej i liczbę raportujących podmiotów” W: Optimum. Studia Ekonomiczne, ISSN 1506-7637, nr 2 (68), 2014, s. 167-182	10
5	Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „System opłat za korzystanie ze środowiska w Polsce” W: Ekonomia. Rynek, gospodarka, społeczeństwo, ISSN 0137-3056, nr 39, 2014, s. 125-145	13
6	Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „Gromadzenie danych o zakresie korzystania ze środowiska oraz o wysokości należnych opłat na przykładzie emisji” W: Człowiek i Środowisko, ISSN 0137-3617, nr 38, 2014, s. 63-78	7
7	Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „The system of reports and financial charges related to the use of the environment – some proposals for improvement” W: Economic and Environmental Studies, ISSN 1642-2597, nr 3 (13), 2013, s. 425-439	13
8	Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „The concept of a central system collecting data on the use of the environment” W: Challenges of Modern Technology, ISSN 2082-2863, nr 2 (3), 2012, s. 32-36	2

4.4. Publikacje w innych czasopismach

Prace opublikowane przed uzyskaniem stopnia doktora zostały oznaczone symbolem gwiazdki.

1	Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „The methods of solving the multiscenario model of joint balancing energy and power reserves” W: Challenges of Modern Technology, ISSN 2082-2863, nr 1 (2), 2011, s. 3-7
2*	Autor 1: Kaleta Mariusz Autor 2: Rogulski Mariusz Tytuł: „Wyznaczanie minimalnego pasma przepustowości sieci przesyłowej związanego z przesyłem energii z rezerw mocy” W: Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej, nr 38, 2006, s. 86-92

3*	Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: „Algorytm poprawy dokładności zintegrowanego bilansowania energii i rezerw” W: Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Organizacja i Zarządzanie, 2006, s. 71-78
4*	Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Smolira Kamil Tytuł: „Korekta programów jednostek wytwórczych na przykładzie rynku z rozproszonym zapotrzebowaniem na energię elektryczną” W: SYSTEMS Journal of Transdisciplinary Systems Science, Special Issue 2/2, vol. 9, s. 863–872, 2004

5. Wykaz wystąpień na krajowych lub międzynarodowych konferencjach naukowych lub artystycznych, z wyszczególnieniem przedstawionych wykładów na zaproszenie i wykładów plenarnych

Wystąpienia przed uzyskaniem stopnia doktora zostały oznaczone symbolem gwiazdki.

Lp.	Informacje o konferencjach
1	Autor 1: Firląg Szymon Autor 2: Rogulski Mariusz Tytuł: „Audyt energetyczny żaglowca STS Fryderyk Chopin” Konferencja: XIV Konferencja Naukowo-Techniczna Energodom 2022, Problemy projektowania, realizacji i eksploatacji budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię, Politechnika Krakowska, 15-17 września 2022
2	Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Artur Badyda Autor 3: Firląg Szymon Tytuł: „The share of pollution from land sources in PM levels in the region of Danish straits, North and Baltic Seas” Konferencja: The Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2021, Riga Technical University, Riga, Latvia, 12–14 May 2021
3	Autor 1: Badyda Artur Autor 2: Rogula-Kozłowska Wioletta Autor 3: Majewski Grzegorz Autor 4: Krawczyk Piotr Autor 5: Oberbek Przemysław Autor 6: Rogulski Mariusz Tytuł: „Porównanie emisji pyłów i wybranych substancji gazowych z czterech typów grilli oraz palenisk domowych” Konferencja: Aktualne trendy w ochronie powietrza i klimatu - kontrola, monitoring, prognozowanie i ograniczanie emisji, XV Konferencja Naukowa POL-EMIS 2021, 29–31.03.2021 r., Wrocław
4	Autor 1: Owczarek Tomasz Autor 2: Rogulski Mariusz Autor 3: Czechowski Piotr Oskar Tytuł: „Ocena równoważności czujników niskokosztowych z metodą referencyjną w pomiarze stężeń pyłu PM ₁₀ z zastosowaniem wybranych funkcji korekcyjnych” Konferencja: Aktualne trendy w ochronie powietrza i klimatu - kontrola, monitoring, prognozowanie i ograniczanie emisji, XV Konferencja Naukowa POL-EMIS 2021, 29–31.03.2021 r., Wrocław

5	<p>Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „Niskokosztowe czujniki w badaniu jakości powietrza” Konferencja: II Konferencja Naukowo - Techniczna „Technologie informatyczne w ochronie i kształtowaniu środowiska”, Centrum Zarządzania Innowacjami i Transferem Technologii Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 14.06.2018 r.</p>
6	<p>Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „Indoor PM₁₀ measurements using low-cost monitors in selected locations in Warsaw” Konferencja: The Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2018, Riga Technical University, Riga, Latvia, 16–18 May 2018</p>
7	<p>Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „The use of low-cost measuring devices for testing air quality in hard-to-reach locations” Konferencja: "Interdyscyplinarne Zagadnienia w Inżynierii i Ochronie Środowiska" EKO-DOK 2018, Polanica-Zdrój, 16-18 kwietnia 2018 r.</p>
8	<p>Autor 1: Rogulski Mariusz Tytuł: „Unconventional carriers to conduct air quality measurements” Konferencja: Air Quality Conference, Barcelona, 12-16 March 2018 r.</p>
9	<p>Autor 1: Rogulski Mariusz Tytuł: „ Current trends in network based air quality monitoring systems” Konferencja: 2nd International Conference on the Sustainable Energy and Environmental Development (SEED'17), Kraków, 15 listopad 2017 r.</p>
10	<p>Autor 1: Owczarek Tomasz Autor 2: Rogulski Mariusz Autor 3: Badyda Artur Tytuł: „Preliminary comparative assessment and elements of equivalence of air pollution measurement results of portable monitoring stations with using stochastic models” Konferencja: X Konferencja Naukowa Ochrona Powietrza w Teorii i Praktyce, Zakopane, 18-21 październik 2017 r.</p>
11	<p>Autor 1: Czechowski Piotr Oskar Autor 2: Owczarek Tomasz Autor 3: Badyda Artur Autor 4: Majewski Grzegorz Autor 5: Rogulski Mariusz Autor 6: Ogrodnik Paweł Tytuł: „Preliminary comparative assessment of PM₁₀ hourly measurement results from new monitoring stations type using stochastic and exploratory methodology and models” Konferencja: X Konferencja Naukowa Ochrona Powietrza w Teorii i Praktyce, Zakopane, 18-21 październik 2017 r.</p>
12	<p>Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „Low-cost PM monitors as an opportunity to increase the spatiotemporal resolution of measurements of air quality” Konferencja: The Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2017, Riga Technical University, Riga, Latvia, 10–12 May 2017</p>
13	<p>Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „Using low-cost PM monitors to detect local changes of air quality” Konferencja: II Konferencja Naukowa „Jakość powietrza a zdrowie”, Wrocław, 12-14 czerwiec 2017 r.</p>
14	<p>Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „Application of SensorML in the Description of the Prototype Air Monitoring Network”</p>

	Konferencja: 3rd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management, Porto, 27-28 April 2017 r.
15	Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „Zastosowanie wybranych standardów OGC do opisu procesu pomiarowego w zakresie monitoringu jakości powietrza” Konferencja: IX Interdyscyplinarna Konferencja Naukowa TYGIEL 2017, „Interdyscyplinarność kluczem do rozwoju”, Lublin, 19 marca 2017 r.
16	Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „Zastosowanie standardów OGC do opisu danych dotyczących jakości środowiska” Konferencja: I Konferencja Naukowo - Techniczna "Technologie informatyczne w ochronie i kształtowaniu środowiska", Centrum Zarządzania Innowacjami i Transferem Technologii Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 17.01.2017 r.
17	Autor 1: Badyda Artur Autor 2: Rogulski Mariusz Tytuł: „Air quality monitoring in urban areas as a tool to reduce the risk of selected diseases of the respiratory and cardiovascular systems” Konferencja: World Engineering Conference and Convention (WECC2015), Japan, 28.11-4.12.2015.
18*	Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: „Balancing Real and Reactive Power with Real and Reactive Regulation Reserves in Power Systems” Konferencja: “13th IEEE IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics”, 2007, Szczecin, Poland, IEEE
19*	Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: „Balancing electric power with regulation and transmission reserves in power systems” Konferencja: „12th IEEE Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR 2006”
20*	Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: „Algorytm poprawy dokładności zintegrowanego bilansowania energii i rezerw” Krajowa Konferencja Automatyzacji Procesów Dyskretnych, Zakopane, wrzesień 2006
21*	Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: „Zapewnienie warunków bezpieczeństwa w systemie elektromagnetycznym przez łączne bilansowanie rezerw regulacyjnych i przesyłowych”, s. 67-76 VI Konferencja Naukowo-Techniczna OPE '05 Optymalizacja w elektroenergetyce, 2005, Jachranka
22*	Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „The problem of lines power flow changes caused by using reserves” Konferencja: International Workshop Control and Information Technology IWCIT, Ostrava, 2005
23*	Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: “Wybrane metody modelowania strat przesyłowych mocy w wariacie DC metody cen węzłowych” Konferencja: Polioptymalizacja i komputerowe wspomaganie projektowania, Mielno, czerwiec 2004
24*	Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: „Ekonomiczny rozdział obciążeń w sieci elektroenergetycznej z uwzględnieniem strat przesyłowych przy wykorzystaniu metody cen węzłowych”, s. 7-14

	Konferencja Naukowo-Techniczna „Optymalizacja w elektroenergetyce OPE'03”, 2003, Jachranka, Poland
25*	Autor: Rogulski Mariusz Tytuł: „Wpływ ograniczeń elektrownianych na wartość dobrobytu ekonomicznego w modelu DC metody cen węzłowych” Konferencja: Polioptymalizacja i komputerowe wspomaganie projektowania, Mielno, czerwiec 2003
26*	Autor 1: Rogulski Mariusz Autor 2: Szwed Cezary Tytuł: „Optymalizacja doboru jednostek wytwórczych do pracy na rynku energii elektrycznej” Konferencja: Polioptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania, Mielno, 2002
27*	Autor 1: Fleszar Krzysztof Autor 2: Kaleta Mariusz Autor 3: Pieńkosz Krzysztof Autor 4: Rogulski Mariusz Autor 5: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: „Analiza struktury podmiotowej i obiektowej na rynku bilansującym”, Materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej Rynek Energii Elektrycznej: Osiągnięcia, Doświadczenia, Wyzwania, REE'2002, Kazimierz Dolny, Poland, 13-15 maja 2002, s. 95-110, Katedra Elektrowni i Gospodarki Energetycznej Politechniki Lubelskiej, 2002
28*	Autor 1: Fleszar Krzysztof Autor 2: Kaleta Mariusz Autor 3: Pieńkosz Krzysztof Autor 4: Rogulski Mariusz Autor 5: Toczyłowski Eugeniusz Tytuł: „Uwzględnianie energii i kosztów rozruchów jednostek wytwórczych na godzinowym rynku bilansującym energii elektrycznej w Polsce” Materiały IX Konferencji Naukowo-Technicznej Rynek Energii Elektrycznej: Osiągnięcia, Doświadczenia, Wyzwania, REE'2002, Kazimierz Dolny, Poland, 13-15 maja 2002, s. 111-118, Katedra Elektrowni i Gospodarki Energetycznej Politechniki Lubelskiej, 2002

6. Informacja o udziale w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji krajowych lub międzynarodowych, z podaniem pełnionej funkcji.

Byłem głównym współorganizatorem **dwóch krajowych konferencji naukowo-technicznych:**

- I Konferencja Naukowo-Techniczna „Technologie informatyczne w ochronie i kształtowaniu środowiska”, Centrum Zarządzania Innowacjami i Transferem Technologii Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 17.01.2017 r. Organizatorem Konferencji było Polskie Stowarzyszenie Informatyki Środowiska, Instytut Ochrony Środowiska - Państwowy Instytut Badawczy oraz Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej przy współudziale CZliTT PW.
- II Konferencja Naukowo-Techniczna „Technologie informatyczne w ochronie i kształtowaniu środowiska”, Centrum Zarządzania Innowacjami i Transferem Technologii Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 14.06.2018 r. Organizatorem Konferencji było Polskie Stowarzyszenie Informatyki Środowiska, Instytut Ochrony Środowiska - Państwowy Instytut Badawczy oraz Wydział Instalacji Budowlanych,

Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej przy współudziale firmy inFAIR oraz CZliTT PW.

Należałem również do komitetu organizacyjnego **trzech edycji międzynarodowej konferencji** (w latach 2012-2014) pod nazwą *Young scientists towards the challenges of modern technology* (Młodzi naukowcy wobec wyzwań współczesnej techniki) organizowanej przez Radę Doktorantów Politechniki Warszawskiej oraz Fundację na rzecz Młodych Naukowców.

7. Informacja o uczestnictwie w pracach zespołów badawczych realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych, z podziałem na projekty zrealizowane i będące w toku realizacji, oraz z uwzględnieniem informacji o pełnionej funkcji w ramach prac zespołów.

Nazwa projektu: **K-HEALTHinAIR: Knowledge for improving indoor AIR quality and HEALTH**

Program badawczy: HORIZON-HLTH-2021-ENVHLTH-02-02: Indoor air quality and health

Czas trwania projektu: 2022-2026 (projekt realizowany)

Budżet projektu: ok. milion euro

Opis projektu: K-HEALTHinAIR na podstawie przeprowadzonej szeroko zakrojonej kampanii monitorowania chemicznych i biologicznych zanieczyszczeń powietrza w pomieszczeniach w kilku reprezentatywnych lokalizacjach w UE (typu szpital, stacja metra, market, mieszkanie, szkoła, itp.) ma na celu naukową ocenę wpływu jakości powietrza w pomieszczeniach na zdrowie. Ponadto, projekt K-HEALTHinAIR ma zapewnić przystępne cenowo i łatwe do wdrożenia narzędzia do monitorowania i poprawy jakości powietrza wewnętrznego. Celem projektu jest również zaoferowanie obywatelom, jako głównym użytkownikom końcowym, innowacyjnych rozwiązań i dodatkowych narzędzi, które umożliwią im monitorowanie jakości powietrza wewnętrznego w celu identyfikacji zagrożeń dla zdrowia i proponowanie odpowiednich rozwiązań w celu złagodzenia tego typu niebezpieczeństw.

Rola w projekcie: Wsparcie w zakresie prowadzenia pomiarów stężeń zanieczyszczeń powietrza.

Nazwa projektu: **Podkowa Leśna = Human Smart Town**

Program badawczy: projekt o charakterze badawczym finansowany w ramach programu operacyjnego „Human Smart Cities. Inteligentne Miasta współtworzone przez mieszkańców”

Czas trwania projektu: 2019-2021 (projekt zrealizowany)

Budżet projektu: 1,32 miliona PLN

Opis projektu: W ramach przedsięwzięcia Miasto Podkowa Leśna realizowało zadania związane z niskoemisyjnością. Podstawowym był zakup urządzeń pomiarowych oraz uruchomienie systemu monitoringu jakości powietrza, a także stworzenie platformy informacyjnej m.in. do:

- gromadzenia i analizy danych z czujników mierzących jakość powietrza.
- monitoringu wizyjnego przepompowni ścieków, pozwalający kontrolować stan przepompowni, rodzaj odprowadzanych ścieków, ich ilość.

Rola w projekcie: Kierownik części informatycznej projektu: nadzór nad budową i wdrożeniem produktów software'owych (platformy informacyjnej) do gromadzenia i

prezentacji danych m.in. z czujników jakości powietrza; doradztwo w zakresie określenia wymaganych parametrów urządzeń do pomiaru jakości powietrza.

Nazwa projektu: **Pilotażowe wdrożenie inteligentnych i innowacyjnych rozwiązań Human Smart City dla miasta Rawicza z uwzględnieniem założeń Strategii Zrównoważonego Rozwoju Gminy Rawicz.**

Program badawczy: projekt o charakterze badawczym finansowany w ramach programu operacyjnego „Human Smart Cities. Inteligentne Miasta współtworzone przez mieszkańców”
Czas trwania projektu: 2020-2022 (projekt zrealizowany)

Budżet projektu: 1,26 miliona PLN

Opis projektu: Celem projektu było uruchomienie środowiska pilotażowego obejmującego system kamer cyfrowych, urządzeń do pomiaru jakości powietrza i inteligentnego oświetlenia oraz opracowanie i wdrożenie systemu integrującego dane o mieście oraz aplikacji do komunikacji z mieszkańcami. Na podstawie zgromadzonych danych z poszczególnych podsystemów zostanie w przyszłości zbudowany innowacyjny wielowymiarowy model zarządzania miastem, oparty na danych operacyjnych z różnych warstw sensorycznych, co umożliwi podejmowanie krótko- i długoterminowych decyzji oraz zwiększy bezpieczeństwo w mieście. Zbierane dane posłużą do wyznaczania prognoz określających m.in. przewidywaną jakość powietrza w mieście, czy zajętość miejsc parkingowych.

Rola w projekcie: Kierownik projektu, wykonawca niektórych elementów informatycznych w projekcie.

8. Członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych wraz z informacją o pełnionych funkcjach.

Od 2015 jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Informacji Przestrzennej.

Od 2016 jestem członkiem Polskiego Stowarzyszenia Informatyki Środowiska, którego byłem współzałożycielem.

Od 2019 jestem członkiem CEN/TC 264/WG 42 (Ambient air – Air quality sensors) z ramienia PKN.

9. Informacja o odbytych stażach w instytucjach naukowych lub artystycznych, w tym zagranicznych, z podaniem miejsca, terminu, czasu trwania stażu i jego charakteru.

W latach 2018–2019 współpracowałem z **prof. Antonio Lozano García** z Uniwersytetu w Sewilli (Hiszpania) oraz z **Agencia de Medio Ambiente y Agua de Andalucía** w Sewilli. W ramach współpracy zamontowałem i przeprowadziłem kilkumiesięczne pomiary porównawcze sensorów NO₂ i O₃ firmy SpecSensors z urządzeniami profesjonalnymi na dwóch stacjach pomiarowych (Ranilla i Santa Clara w Sewilli) należących do hiszpańskiego odpowiednika GIOŚ – Environmental Regional Government. Celem badań było sprawdzenie jakości wskazań sensorów niskokosztowych oraz wytrzymałości urządzeń pomiarowych w odmiennych (w stosunku do Polski) warunkach klimatycznych, w szczególności w warunkach wysokich, letnich temperatur oraz wysokich stężeń NO₂.

W 2022 roku odbyłem ponad miesięczny staż (końcówka stycznia – początek marca) na Uniwersytecie w Aveiro (Portugalia), w **Laboratório Associado Centro de Estudos do Ambiente e do Mar** pod opieką prof. Myriam Nunes Lopes. W trakcie pobytu zapoznałem się ze sprzętem laboratoryjnym oraz sposobami prowadzenia badań nad czujnikami niskokosztowymi prowadzonymi przez zespół prof. Lopes. W trakcie pobytu rozpocząłem również wykonywanie pomiarów porównawczych badanych przeze mnie sensorów niskokosztowych z profesjonalnymi urządzeniami pomiarowymi na stanowisku pomiarowym w Aveiro. Jeden z rezultatów współpracy stanowi artykuł Rogulski M. et al. „Improving the Quality of Measurements Made by Alphasense NO₂ Non-Reference Sensors Using the Mathematical Methods”, *Sensors*.

10. Informacja o recenzowanych pracach naukowych lub artystycznych, w szczególności publikowanych w czasopismach międzynarodowych.

Po doktoracie wykonałem **12** recenzji dla **8** czasopism naukowych, w tym **5** czasopism posiadających wskaźnik *Impact Factor* według bazy JCR (czego potwierdzeniem jest załączony certyfikat). Zestawienie wykonanych przeze mnie recenzji artykułów z podziałem na czasopisma zostało zaprezentowane w Tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie recenzji publikacji w czasopismach naukowych

Lp	Czasopismo	Liczba recenzji	Impact Factor wg JCR
1	<i>Sustainability</i>	3	3,251
2	<i>International Journal of Environmental Research and Public Health</i>	2	3,390
3	<i>Atmosphere</i>	2	2,686
4	<i>Science of the Total Environment</i>	1	10,754
5	<i>Agronomy</i>	1	3,949
6	<i>Air</i>	1	-
7	<i>Big Data and Cognitive Computing</i>	1	-
8	<i>Future Internet</i>	1	-

Certyfikaty wydawców potwierdzające działalność recenzenta:



11. Informacja o uczestnictwie w programach europejskich lub innych programach międzynarodowych.

2016–2017 – Współpracowałem z **Institute for European Environmental Policy** w zakresie opłat za korzystanie ze środowiska, uczestnicząc m.in. w warsztatach *Workshop on capacity building for water quality related economic instruments*, które odbyły się 3 kwietnia 2017 roku w Kopenhadze w Danii.

12. Informacja o udziale w zespołach badawczych, realizujących projekty inne niż określone w pkt. II.7.

a) Projekty realizowane po uzyskaniu stopnia doktora

Nazwa projektu: **System Informatyczny Inspekcji Ochrony Środowiska Ekoinfonet, Etap II. Aktualizacja Koncepcji Systemu Informacyjnego Inspekcji Ochrony Środowiska Ekoinfonet.**

Projekt realizowany na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska

Budżet projektu: ok. milion PLN

Czas trwania projektu: 2009-2011

Opis projektu: Celem projektu było określenie potrzeb urzędów Inspekcji Ochrony Środowiska w zakresie informatyzacji zadań, ze szczególnym uwzględnieniem zadań Państwowego Monitoringu Środowiska, z wykorzystaniem dostępnej, aktualnej wiedzy i dorobku naukowego w zakresie metod obliczeniowych niezbędnych do analizy, interpretacji i ekstrapolacji danych badawczo-pomiarowych.

W ramach tego projektu dokonano aktualizacji koncepcji jednego z głównych systemów informatycznych Inspekcji Ochrony Środowiska – systemu Ekoinfonet. Ponadto celem projektu było wykonanie projektów wstępnych baz danych monitoringu jakości powietrza (JPOAT), hałasu, wód powierzchniowych i promieniowania niejonizującego oraz aplikacji towarzyszących (takich jak hurtownia danych, mechanizmów przetwarzania i raportowania danych, wykorzystanie Geograficznych Systemów Informacyjnych) oraz przygotowanie części technicznej dokumentacji przetargowej w celu przygotowania do wdrożenia drugiego etapu systemu informatycznego Inspekcji Ochrony Środowiska EKOINFONET dla potrzeb PMŚ.

Produkty projektu zostały wykorzystane przez GIOŚ do stworzenia dokumentacji przetargowej związanej z implementacją systemu Ekoinfonet oraz baz danych będących przedmiotem projektu.

Role w projekcie:

- Wykonawca aktualizacji koncepcji Systemu Informacyjnego Inspekcji Ochrony Środowiska Ekoinfonet w zakresie: sieci teletransmisji danych IOŚ, rozwiązań sprzętowych dla SI Ekoinfonet, rozwiązań softwarowych dla SI Ekoinfonet, rozwiązań dla systemu centralnego w warstwie bazy danych, rozwiązania dla systemu centralnego w warstwie pośredniej.
- Kierownik podzadania: Projekt wstępny bazy danych monitoringu powietrza (JPOAT)
- Kierownik podzadania: Projekt wstępny bazy danych monitoringu hałasu
- Kierownik podzadania: Koncepcja hurtowni danych SI Ekoinfonet

Nazwa projektu: Opracowanie i wdrożenie Warszawskiego Indeksu Powietrza oraz systemu informacyjno-analitycznego jakości powietrza (Etap I)

Projekt realizowany na zlecenie Miasta Stołecznego Warszawy

Informacje o projekcie: <https://um.warszawa.pl/-/ruszyl-warszawski-indeks-powietrza>

Budżet projektu: 0,98 miliona PLN

Czas trwania projektu: 2016-2017

Opis projektu: Przedmiotem projektu było opracowanie i wdrożenie systemu informacyjnego do wyznaczania i prezentacji Warszawskiego Indeksu Powietrza (WIP). WIP składał się z dwóch składników: Warszawskiego Zdrowotnego Indeksu Powietrza oraz Warszawskiego Ogólnego Indeksu Powietrza.

- Celem indeksu zdrowotnego była syntetyczna ocena ryzyka zdrowotnego wynikającego z narażenia na wysokie stężenia zanieczyszczeń grup szczególnie wrażliwych, do których należą zwłaszcza: dzieci chorujące na astmę oskrzelową i osoby w podeszłym wieku oraz osoby chorujące na przewlekłe schorzenia układu oddechowego i układu sercowo-naczyniowego. Warszawski Zdrowotny Indeks Powietrza był liczony i prognozowany jako wartość średnia 24-godzinna;

- Celem indeksu ogólnego było informowanie ogółu mieszkańców o jakości powietrza i jego zmianach w ciągu doby. Indeks ten był liczony i prognozowany w postaci wartości średnich 1-godzinnych. W wyniku zastosowania skali i algorytmu przyjętych przez GIOŚ, było możliwe porównanie Warszawskiego Ogólnego Indeksu Powietrza z wartościami Polskiego Indeksu Jakości Powietrza, jaki oblicza Inspekcja dla stacji PMŚ.

Rola w projekcie: Kierownik części informatycznej, odpowiedzialny m.in. za zbudowanie środowiska do gromadzenia i przetwarzania danych oraz środowiska, w którym znajduje się portal dla mieszkańców. Moim zadaniem było również zaprojektowanie i wykonanie narzędzi software'owych związanych z przepływem danych ze źródeł (danych pomiarowych ze stacji GIOŚ) poprzez mechanizm wyznaczający wartości indeksów, aż po zasilanie wyznaczonymi danymi portalu dla mieszkańców.

Nazwa projektu: **Opracowanie i wdrożenie Warszawskiego Indeksu Powietrza oraz systemu informacyjno-analitycznego jakości powietrza (Etap II, część 1 – opracowanie szczegółowego opisu przedmiotu zamówienia; oszacowanie wartości zamówienia)**

Projekt realizowany na zlecenie Miasta Stołecznego Warszawy

Budżet projektu: ok. 0,1 miliona PLN

Czas trwania projektu: 2018

Opis projektu: Opracowanie stanowiło kontynuację prac zrealizowanych w ramach Etapu I projektu. Zawierało ono m.in. wstępne wymagania, jakie powinien spełniać miejski system pomiarów jakości powietrza, stanowiący element podsystemu pomiarów jakości powietrza w ramach systemu informacyjnego nazwanego Air Varsovia. Raport zawierał szczegółowy opis warunków technicznych, jakie powinny spełniać urządzenia mające w założeniu służyć do pomiarów stężeń wybranych zanieczyszczeń, wspierających ich urządzeń do pomiaru wybranych parametrów meteorologicznych, jak również dodatkowego oprogramowania służącego do nadzorowania pracy urządzeń pomiarowych oraz pozyskiwania z nich i przetwarzania wyników pomiarów. Osobną część stanowiło wskazanie przybliżonych lokalizacji, w których w opinii autorów opracowania powinny zostać umiejscowione urządzenia stanowiące element miejskiej sieci pomiarów jakości powietrza. Całość została uzupełniona oszacowaniem wartości przedmiotu zamówienia.

Rola w projekcie: określenie warunków technicznych, jakie powinny spełniać urządzenia i sensory wykorzystywane w systemie pomiarowym, oszacowanie wartości przedmiotu zamówienia.

b) projekty realizowane przed uzyskaniem stopnia doktora

Nazwa projektu: **Analiza modeli zintegrowanego obrotu wielotowarowego w systemach rozproszonych uwzględniających obszarowe różnicowanie cen towarów i usług na przykładzie rynku energii**

Numer projektu: MNiI 3T11A004/30

Projekt realizowany na potrzeby spółki Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA

Czas trwania projektu: 31.05.2006 – 30.05.2007

Opis projektu: W ramach projektu opracowano modele zintegrowanego bilansowania wielu towarów i usług w rozproszonym systemie elektroenergetycznym. Jednym z istotnych aspektów prowadzonych analiz było uwzględnienie bezpieczeństwa sieci energetycznej. Polegało ono na takim sformułowaniu modelu bilansowania, aby w uzyskanym rozwiązaniu było możliwe dostarczenie energii nominalnej oraz dowolnej kombinacji energii pochodzącej

z rezerw, nie naruszając ograniczeń sieciowych (sieci przesyłowej). Dowolna kombinacja wykorzystanych rezerw przez odbiorców została nazwana scenariuszem. Takie sformułowanie problemu wymagało efektywnego zarezerwowania pasm w liniach przesyłowych, które stanowią zasób krytyczny. Umożliwił to model uwzględniający wszystkie możliwe kombinacje wykorzystania rezerw przez odbiorców.

Analizowany problem charakteryzował się dużą złożonością obliczeniową, toteż celem projektu było również zaproponowanie heurystycznych reguł decyzyjnych służących redukcji złożoności obliczeniowej. Ich działanie polegało na konstrukcji scenariuszy dla poszczególnych linii przesyłowych. Przy konstrukcji scenariuszy była brana pod uwagę zmiana przepływu mocy linią przesyłową w wyniku wykorzystania rezerwy w pojedynczym węźle odbiorczym lub położenie odbiorców w sieci w stosunku do analizowanej linii przesyłowej. Do oceny wyników proponowanych algorytmów (efektywność bilansowania, rezerwacja przepustowości na przesył poszczególnych towarów) zostało wykorzystanych szereg topologii sieci przesyłowych różniących się liczbą węzłów, linii przesyłowych oraz uczestników składających oferty. Ocena odbywała się poprzez porównanie uzyskanych wyników z rozwiązaniem stosowanym obecnie oraz poprzez sprawdzenie możliwości wykorzystania różnych kombinacji towarów. Analizowany model służył również do określania marginesu bezpieczeństwa przepustowości sieci przesyłowej. Dzięki niemu było możliwe wyznaczenie rzeczywistej przepustowości sieci (przeznaczonej na przesył energii nominalnej i pomniejszonej o pasmo wymagane na przesył dodatkowej energii z rezerw).

Nazwa projektu: **Energetic safety of the country**

Grant: MNiI Grant No. PBZ-MEiN-1/2/2006

Projekt realizowany na potrzeby spółki Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA

Czas trwania projektu: 28.06.2007 – 15.12.2007

Głównym celem projektu było zbadanie możliwości poprawy bezpieczeństwa energetycznego kraju w zakresie wytwarzania, przesyłu i dysponowania energią elektryczną w warunkach rynkowych. Uwzględniono szeroki zakres zagadnień bezpieczeństwa, w tym bezpieczeństwo strategiczne inwestycji, bezpieczeństwo długoterminowe związane z użytkowaniem systemu, bezpieczeństwo średnio- i krótkookresowe związane z pracą systemu w stanach normalnych i awaryjnych. Zadania realizowane w projekcie były podzielone na dwa główne obszary:

- 1) rozwój wielotowarowych mechanizmów obrotu dla bilansowania rynku energii elektrycznej oraz aukcji przepustowości transgranicznej z punktu widzenia warunków bezpieczeństwa systemu;
- 2) opracowanie standardów otwartych danych dla badań naukowych w obszarze mechanizmów rynku energii elektrycznej. Opracowane zostały warianty bilansowania systemów elektroenergetycznych, oparte na mechanizmach wielotowarowych.

Oprócz powyższych dwóch tematów, w trakcie doktoratu brałem udział w wielu innych projektach, realizowanych głównie na zamówienie i potrzeby spółki Polskie Sieci Elektroenergetyczne, czego przykładem są raporty:

- Rekomendacje proponowanych zmian i poprawek do rozwiązań dobowo-godzinowego Rynku Bilansującego. Wykonawcy: Toczyłowski Eugeniusz, Fleszar Krzysztof, Kaleta Mariusz, Nowosad Katarzyna, Pieńkosz Krzysztof, Rogulski Mariusz,

Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Politechnika Warszawska

- Ocena poprawności i spójności rozwiązań rynku dobowo-godzinowego oraz wstępne rekomendacje. Wykonawcy: Toczyłowski Eugeniusz, Fleszar Krzysztof, Kaleta Mariusz, Nowosad Katarzyna, Pieńkosz Krzysztof, Rogulski Mariusz, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Politechnika Warszawska.

III. INFORMACJA O WSPÓŁPRACY Z OTOCZENIEM SPOŁECZNYM I GOSPODARCZYM

1. Wykaz dorobku technologicznego.

W celu badania czujników niskokosztowych skonstruowałem wiele **instrumentów pomiarowych**, które umożliwiały m.in. wieloletnie badania porównawcze sensorów niskokosztowych. Urządzenia zawierały czujniki będące przedmiotem badań, jak również inne elementy umożliwiające pracę urządzenia oraz zbieranie i przesyłanie w czasie rzeczywistym wyników pomiarów na serwer. Urządzenia pomiarowe często były integrowane z profesjonalnym bądź półprofesjonalnym sprzętem meteorologicznym (np. wiatromierzami GILL). Projekt i wykonanie urządzeń obejmował zatem zarówno aspekty elektroniczne (projekt układu), telekomunikacyjne (komunikacja z serwerem poprzez sieć GSM) oraz informatyczne (serwer oraz narzędzia do gromadzenia i analizy nadsyłanych wyników pomiarów).

Zbudowane urządzenia pomiarowe posłużyły m.in. do badania czujników pyłów różnych producentów (m.in. DFRobot, Plantower, Alphasense), do badania czujników zanieczyszczeń gazowych (m.in. firm SpecSensors i Alphasense) oraz do badania stężeń innych substancji (m.in. formaldehydu). Urządzenia pomiarowe występowały najczęściej w wersji stacjonarnej, zasilanej z sieci 230 V AC, ale także w wersji przenośnej zasilanej z akumulatorów bądź z akumulatora żelowego. W wersji mobilnej zostały one użyte m.in. na żaglowcu STS „Fryderyk Chopin” (do zbadania stężeń pyłów na Morzu Północnym i Bałtyckim), w balonie na ogrzane powietrze oraz zintegrowane z dronem.

2. Informacja o współpracy z sektorem gospodarczym.

Moja współpraca z sektorem gospodarczym po uzyskaniu stopnia doktora obejmuje głównie zagadnienia informatyczne oraz związane z sensorami i systemami do pomiaru jakości powietrza.

W zakresie informatyki środowiska brałem udział w projekcie „System Informatyczny Inspekcji Ochrony Środowiska Ekoinfonet. Wykonanie projektów wstępnych w zakresie baz danych monitoringu powietrza, hałasu, wód powierzchniowych i promieniowania niejonizującego oraz aplikacji towarzyszących, przygotowanie części technicznej dokumentacji przetargowej w celu przygotowania do wdrożenia drugiego etapu systemu informatycznego Inspekcji Ochrony Środowiska EKOINFONET dla potrzeb PMŚ” realizowanym przez Politechnikę Warszawską na zlecenie **Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska**. W projekcie pełniłem funkcję kierownika zespołu odpowiedzialnego za przygotowanie projektu wstępnego bazy danych monitoringu powietrza (JPOAT 2.0), kierownika zespołu odpowiedzialnego za

przygotowanie projektu wstępnego bazy danych monitoringu hałasu (JHAŁAS 2.0), kierownika zespołu odpowiedzialnego za przygotowanie koncepcji hurtowni danych SI Ekoinfonet oraz członka zespołu odpowiedzialnego za aktualizację koncepcji Systemu Informacyjnego Inspekcji Ochrony Środowiska Ekoinfonet.

Kolejnym, prestiżowym tematem związanym z informatyką środowiska był udział w projekcie stworzenia Warszawskiego Indeksu Powietrza, realizowanym przez Politechnikę Warszawską na zlecenie **Urzędu Miasta Stołecznego Warszawy**, gdzie byłem odpowiedzialny oraz tworzyłem narzędzia informatyczne do przetwarzania danych i prezentacji wyników dla użytkowników portalu.

W zakresie niskokosztowych sensorów do badania jakości powietrza współpracowałem m.in. z **Miastem Nowy Sącz**, gdzie na mocy zawartego Porozumienia między Miastem, Politechniką Warszawską oraz Akademią Morską w Gdyni, byłem współtwórcą niskokosztowych urządzeń do pomiaru jakości powietrza oraz w 2016 roku zbudowałem pionierską, prototypową sieć do pomiaru zanieczyszczeń (składającą się z 10 urządzeń pomiarowych zlokalizowanych w różnych punktach miasta).

Wspierałem inicjatywy związane z promowaniem czystego powietrza, czego przykładem może być kampania Balon.Lab prowadzona przez **Forum Rozwoju Efektywnej Energii** we współpracy z **Gaspol Energy**, na potrzeby której skonstruowałem urządzenie pomiarowe za pomocą którego odbywały się pomiary jakości powietrza na różnych wysokościach z użyciem balonu na ogrzane powietrze. Podobny przykład stanowi współpraca z **Polską Spółką Gazownictwa sp. z o.o.** w kampanii „Przyłącz się, liczy się każdy oddech”, w której dostarczałem skonstruowane przeze mnie urządzenia pomiarowe oraz wyświetlacze zewnętrzne w celu informowania społeczeństwa o aktualnej jakości powietrza oraz promocji innych niż węgiel źródeł energii.

Wraz z firmami **Kapitech, Integrated Solutions, Weather Force** w ramach projektu Polair stworzyłem sieć monitoringu jakości powietrza, oferującą również prognozowanie stężeń wybranych zanieczyszczeń powietrza dla Tuchowa i Zduńskiej Woli.

W zakresie pomiarów jakości powietrza oraz budowy sieci pomiarowych współpracuję z jednostkami budżetowymi miasta stołecznego Warszawy. Efektem współpracy z **Urzędem Dzielnicy Bielany** jest budowa urządzeń pomiarowych oraz sieci pomiarowej do mierzenia wybranych substancji wchodzących w skład odorów (pomiar stężeń m.in. amoniaku, siarkowodoru, lotnych związków organicznych). W skład tej sieci, rozmieszczonej na terenie dzielnicy Bielany, wchodzi 9 urządzeń pomiarowych działających od 2020 roku. Zaprojektowane przeze mnie urządzenia pomiarowe (trzy urządzenia mierzące stężenia pyłów zawieszonych oraz ditlenek azotu) wykorzystałem również podczas współpracy z **Zarządem Dróg Miejskich** w trakcie badań zmienności stężeń zanieczyszczeń powietrza w otoczeniu wybranych szkół podstawowych w Warszawie (SP nr 381, SP nr 375 i SP nr 204) w powiązaniu z natężeniem ruchu pojazdów.

Przed uzyskaniem stopnia doktora, w ramach zespołu badawczego w mojej ówczesnej macierzystej jednostce (Zespół Badań Operacyjnych i Systemów Zarządzania, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Warszawska) przez kilka lat współpracowałem z operatorem elektroenergetycznego systemu przesyłowego – spółką **Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.** Współpraca obejmowała zarówno zagadnienia i analizy związane z bieżącym

funkcjonowaniem i zasadami obrotu towarami na Rynku Bilansującym energii elektrycznej, jak również formułowanie propozycji kierunku rozwoju mechanizmów handlowych przy uwzględnieniu ograniczeń związanych z bezpieczeństwem systemu oraz z fizycznymi własnościami przesyłu energii elektrycznej w sieci przesyłowej najwyższych napięć. Rezultatem współpracy były, wspomniane w innych punktach, zrealizowane projekty i ekspertyzy oraz obroniona z wyróżnieniem rozprawa doktorska pt. „Analiza wybranych modeli zintegrowanego obrotu wielotowarowego w systemach rozproszonych na przykładzie rynku energii” napisana pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Eugeniusza Toczyłowskiego.

3. Informacja o wdrożonych technologiach.

Do znaczących osiągnięć w tym zakresie mogę zaliczyć to, iż do tej pory zbudowałem ponad 100 urządzeń pomiarowych wykorzystujących niskokosztowe sensory, głównie stężeń pyłu zawieszonego, ale także ditlenku azotu, często zintegrowanych z półprofesjonalnym oraz profesjonalnym sprzętem meteorologicznym (np. z anemometrami firmy GILL). Przykładowo – w ramach współpracy z **Polską Spółką Gazownictwa Sp. z o.o.** w kampanii „Przyłącz się, liczy się każdy oddech”, wykonałem ponad 70 urządzeń pomiarowych, które wraz z portalem oraz kolorowymi wyświetlaczami zewnętrznymi (fot. 1) służą do informowania społeczeństwa o aktualnej jakości powietrza oraz promocji innych niż węgiel źródeł energii. Dane z urządzeń są prezentowane na stronie <https://psg-meteo.psgaz.pl/>



Fotografia 1. Po lewej – urządzenie do pomiaru stężeń pyłów (projekt i realizacja własna) wraz z głowicą meteorologiczną, po prawej – wyświetlacz prezentujący w trybie rzeczywistym dane z urządzenia pomiarowego. Fotografia własna.

Zdobyta w powyższych projektach wiedza i doświadczenie dotyczące możliwości i ograniczeń niskokosztowych sensorów badających stężenia zanieczyszczeń powietrza oraz budowanych z ich użyciem instrumentach pomiarowych pozwoliła mi na doradztwo w projektach związanych z budową sieci pomiarowych opartych na tego rodzaju narzędziach –

na przykład w realizowanym na zlecenie **Miasta Stołecznego Warszawy** projekcie: „Opracowanie i wdrożenie Warszawskiego Indeksu Powietrza oraz systemu informacyjno-analitycznego jakości powietrza (Etap II, część 1 – opracowanie szczegółowego opisu przedmiotu zamówienia; oszacowanie wartości zamówienia)”.

4. Informacja o wykonanych ekspertyzach lub innych opracowaniach wykonanych na zamówienie instytucji publicznych lub przedsiębiorców.

Po uzyskaniu stopnia doktora byłem autorem/współautorem **5** ekspertyz naukowo-technicznych, opracowań poświęconych zagadnieniom pomiarów jakości powietrza oraz niskokosztowych czujników jakości powietrza wykonywanych na zamówienie organów administracji państwowej a także przedsiębiorców:

2022 – Analiza zmienności stężeń zanieczyszczeń powietrza w otoczeniu wybranych szkół podstawowych w Warszawie (SP nr 381, SP nr 375 i SP nr 204) na tle zmian natężenia ruchu pojazdów. Zleceniodawca: Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie. Zleceniobiorca: Instytut Badań Stosowanych Politechniki Warszawskiej Sp. z o.o. Wykonawcy: Artur Badyda, Mariusz Rogulski.

2021 – Analiza jakości zapachowej powietrza na obszarach przyległych do zakładów: Miejskiego Przedsiębiorstwa Oczyszczania w m.st. Warszawie, Byś Wojciech Byśkiniewicz oraz ArcelorMittal Warszawa. Zleceniodawca: Miasto Stołeczne Warszawa – Dzielnica Bielany, ul. Żeromskiego 29, 01-882 Warszawa. Zleceniobiorca: Instytut Badań Stosowanych Politechniki Warszawskiej Sp. z o.o. Wykonawcy: Artur Badyda, Mariusz Rogulski, Małgorzata Kawala.

2018 - Opracowanie i wdrożenie Warszawskiego Indeksu Powietrza oraz systemu informacyjno-analitycznego jakości powietrza (Etap II, część 1 – opracowanie szczegółowego opisu przedmiotu zamówienia; oszacowanie wartości zamówienia). Zleceniodawca: Urząd Miasta Stołecznego Warszawa, zlecenie OŚ/C/OM/III/P4/48/U-63/18. Zleceniobiorca: Politechnika Warszawska. Wykonawcy: Artur Badyda, Mariusz Rogulski, Dominika Mucha.

2018 - Opinia dotycząca urządzeń pomiarowych wyposażonych w czujniki stężenia pyłów zawieszonych Alphasense OPC-N2. Zleceniodawca: Solutions for Technology Sp. z o.o. Zleceniobiorca: Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska. Wykonawca: Mariusz Rogulski.

2017 - Sprawozdanie z realizacji pomiarów stężeń pyłu PM₁₀ w budynkach biurowych i placówkach edukacyjnych. Zleceniodawca: Skanska Property Poland Sp. z o.o. Zleceniobiorca: Instytut Badań Stosowanych Politechniki Warszawskiej Sp. z o.o. Wykonawcy: Artur Badyda, Mariusz Rogulski.

Przed uzyskaniem stopnia doktora byłem współautorem **2** ekspertyz naukowo-badawczych związanych z mechanizmami bilansowania towarów na rynku energii:

2002 – Rekomendacje proponowanych zmian i poprawek do rozwiązań dobowo-godzinowego Rynku Bilansującego. Projekt realizowany na potrzeby spółki Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA. Wykonawcy: Eugeniusz Toczyłowski, Krzysztof Fleszar, Mariusz Krzysztof, Katarzyna Nowosad, Krzysztof Pieńkosz, Mariusz Rogulski, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Warszawska.

2002 – **Ocena poprawności i spójności rozwiązań rynku dobowo-godzinowego oraz wstępne rekomendacje.** Projekt realizowany na potrzeby spółki Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA. Wykonawcy: Eugeniusz Toczyłowski, Krzysztof Fleszar, Mariusz Kaleta, Katarzyna Nowosad, Krzysztof Pieńkosz, Mariusz Rogulski, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Warszawska.

5. Informacja o udziale w zespołach eksperckich lub konkursowych.

W latach 2010–2011 pełniłem rolę eksperta w gabinecie politycznym **Ministra Środowiska** prof. PW dra hab. inż. Andrzeja Kraszewskiego, realizując projekt „Budowa Centrum Informatyki Ministerstwa Środowiska”. Cele projektu były następujące:

- harmonizacja baz danych służących gromadzeniu danych o środowisku w instytucjach skupionych wokół MŚ;
- inwentaryzacja posiadanych kategorii informacji w ramach zarządzania środowiskiem przez poszczególne instytucje skupione wokół MŚ oraz zaproponowanie sposobu wyeliminowania redundancji w zakresie gromadzonych kategorii danych;
- sformułowanie propozycji zmian w sposobie zarządzania, udostępniania tych danych oraz projektowania kolejnych rejestrów;
- sformułowanie propozycji wymagań, zakresu obowiązków i kompetencji dla stanowisk odpowiedzialnych za zarządzanie i utrzymanie poprawnego działania dla sprzętu i oprogramowania.

W okresie czerwiec 2011–marzec 2012 byłem **Przewodniczącym Zespołu ds. Centralnego Systemu Ewidencyjno-Opłatowego** powołanego przez Ministra Środowiska, którego zadaniem było:

- stworzenie propozycji kierunkowych zmian w zakresie gromadzenia, raportowania i przetwarzania informacji o: podmiotach korzystających ze środowiska, wysokości należnych opłat i ich redystrybucji, zakresie emisji do powietrza, wody, ścieków oraz składowania odpadów;
- stworzenie koncepcji funkcjonalnej Centralnego Systemu Ewidencyjno-Opłatowego obsługującego dane o zakresie emisji do powietrza, wody i ścieków, składowania odpadów oraz wnoszonych za to opłatach i ich redystrybucji;
- nadzór nad wdrożeniem Centralnego Systemu Ewidencyjno-Opłatowego.

IV. INFORMACJE NAUKOMETRYCZNE

1. Informacja o punktacji Impact Factor (w dziedzinach i dyscyplinach, w których parametr ten jest powszechnie używany jako wskaźnik naukometryczny).

Sumaryczny wskaźnik **IF** moich publikacji naukowych w dziedzinie inżynieria środowiska według bazy *JCR* (zgodnie z rokiem opublikowania) wydanych po doktoracie wynosi **54,664**.

Posiadam następujące numery identyfikacyjne w bazach i repozytoriach naukowych:

- Web of Science Researcher ID: A-6891-2013
- ORCID: 0000-0001-7328-6001
- SCOPUS ID: 56803779900

2. Informacja o liczbie cytowań publikacji wnioskodawcy, z oddzielnym uwzględnieniem autocytowań.

W bazie Web of Science znajdują się **24** moje prace, a sumaryczna liczba ich cytowań wynosi **99**, przy czym **21** prac jest cytowanych. W bazie Scopus figurują **23** moje prace cytowane **116** razy, przy czym **20** prac jest cytowanych. W Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej znajduje się **57** moich pozycji bibliograficznych. W bazie Google Scholar widnieje **49** moich prac cytowanych łącznie **184** razy, przy czym **32** prac jest cytowanych. W Tabeli 4 zestawiono wskaźniki cytowań mojego dorobku publikacyjnego według trzech baz: WoS, Scopus oraz Google Scholar.

Tabela 4. Wskaźniki cytowań dorobku według wybranych baz (kwiecień 2023)

Baza	Liczba prac w bazie	Liczba cytowań	Liczba cytowań bez autocytowań	Indeks Hirscha
Web of Science	24	99	88	6
Scopus	23	118	86	6
Google Scholar	49	184	134	8

3. Informacja o posiadanym indeksie Hirscha.

Mój **indeks Hirscha** (kwiecień 2023) według bazy Web of Science wynosi **6**, według bazy Scopus **6**, natomiast według bazy Google Scholar **8**.

Mając na uwadze, że liczba cytowań moich publikacji indeksowanych przez Scopus, Web of Science oraz Google Scholar, począwszy od 2019 roku, w każdym kolejnym roku znacząco wzrasta, oczekuję również przyrostu liczby cytowań w latach kolejnych.

4. Informacja o liczbie punktów MNiSW.

Sumaryczna liczba punktów MNiSW za publikacje wg Bazy Wiedzy Politechniki Warszawskiej wynosi **1 399** pkt MNiSW.

dr inż. Mariusz Rogulski