
Załącznik nr 4 do wniosku habilitacyjnego

Autoreferat

Przedstawiający opis osiągnięć naukowych , 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.)

dr inż. Piotr Jaskowski

Politechnika Warszawska
Wydział Transportu
Zakład Systemów Informatycznych i Mechatronicznych w Transporcie

Warszawa, 2025 r.

Spis treści

1	Imię i nazwisko	3
2	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	3
3	Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.....	3
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
4.1	Tytuł osiągnięcia habilitacyjnego.....	4
4.2	Wykaz prac stanowiących osiągnięcie	4
4.3	Omówienie merytoryczne osiągnięcia naukowego.....	9
4.3.1	Cel naukowy badań prowadzonych w ramach osiągnięć naukowych przedstawionych do oceny.....	9
4.3.2	Opis autorskiej monografii	12
4.3.3	Opis cyklu powiązanych tematycznie publikacji naukowych.....	40
4.3.4	Opis osiągnięcia konstrukcyjnego i technologicznego	46
4.3.5	Podsumowanie osiągniętych wyników badań	50
4.4	Bibliografia.....	52
5	Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.....	54
5.1	Przed doktoratem.....	54
5.2	Po doktoracie	56
6	Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę	62
6.1	Osiągnięcia dydaktyczne	62
6.1.1	Przed doktoratem	62
6.1.2	Po doktoracie.....	62
6.2	Osiągnięcia organizacyjne	64
6.2.1	Przed doktoratem	64
6.2.2	Po doktoracie.....	64
6.3	Osiągnięcia popularyzujące naukę.....	65
6.3.1	Przed doktoratem	65
6.3.2	Po doktoracie.....	66
7	Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6 wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.....	67
7.1	Realizacja prac badawczych na rzecz przemysłu	67
7.1.1	Przed doktoratem	67
7.1.2	Po doktoracie.....	68
7.2	Recenzowanie prac naukowych	69
7.2.1	Przed doktoratem	69
7.2.2	Po doktoracie.....	69
7.3	Uzyskane nagrody i wyróżnienia.....	70
7.3.1	Przed doktoratem	70
7.3.2	Po doktoracie.....	70
7.4	Inne	71

1 Imię i nazwisko

Piotr Jaskowski

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

- 11.10.2022 – **Stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk technicznych** w dyscyplinie Inżynieria Lądowa i Transport,
Tytuł rozprawy doktorskiej: „Metoda pomiaru stanu infrastruktury oświetleniowej w ruchu drogowym”
Promotor dr hab. inż. Piotr Tomczuk, prof. uczelni
Promotor pomocniczy dr hab. inż. Andrzej Czerepicki, prof. uczelni
Recenzenci: dr hab. inż. Aleksander Sobota, prof. uczelni (Politechnika Śląska),
dr hab. inż. Agnieszka Wolska (Centralny Instytut Ochrony Pracy),
Podmiot nadający: Politechnika Warszawska, Wydział Transportu.
- 05.07.2017 – **Tytuł zawodowy magistra inżyniera w specjalności Sterowanie Ruchem Drogowym**
Tytuł rozprawy dyplomowej: „Analiza wpływu oddziaływania wybranych nośników reklamowych na kierowcę z wykorzystaniem okulografii”,
Promotor dr hab. inż. Piotr Tomczuk, prof. uczelni
Podmiot nadający: Politechnika Warszawska, Wydział Transportu.
- 10.02.2016 – **Tytuł zawodowy inżyniera w specjalności Sterowanie Ruchem Drogowym**
Tytuł rozprawy dyplomowej: „Pomiary luminancji reklam świetlnych w kontekście oceny zagrożeń występujących w ruchu drogowym w Warszawie”,
Promotor dr hab. inż. Piotr Tomczuk, prof. uczelni
Podmiot nadający: Politechnika Warszawska, Wydział Transportu.

3 Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

- **1 lutego 2023 - obecnie**
Adiunkt badawczo-dydaktyczny, Zakład Systemów Informatycznych i Mechatronicznych w Transporcie, Wydział Transportu, Politechnika Warszawska,

- **1 września 2019 - 31 stycznia 2023**

Asystent badawczo-dydaktyczny, Zakład Systemów Informatycznych i Mechatronicznych w Transporcie, Wydział Transportu, Politechnika Warszawska,

- **1 kwietnia 2017 – 30 września 2022**

Samodzielny pracownik inżynierjno – techniczny, Laboratorium Badań Medioznawczych / Centrum Analiz Medialnych / Katedra Bibliografii i Dokumentacji, Wydział Dziennikarstwa i Bibliologii, Uniwersytet Warszawski

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 habilitacyjnego

Na przedstawiane osiągnięcie habilitacyjne, zgodnie z 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.), składa się **autorska monografia** pt.:

„Cyfrowy bliźniak infrastruktury jako narzędzie integracji modelowania ruchu i dynamicznego sterowania oświetleniem ulicznym”,

powiązany tematycznie cykl publikacji naukowych pod wspólnym tytułem:

„Metody i narzędzia oceny oświetlenia dróg oraz elementów emitujących światło w otoczeniu drogi”,

powiązane tematycznie jedno zrealizowane osiągnięcie konstrukcyjne oraz jedno zrealizowane osiągnięcie technologiczne, zatytułowane:

„System pomiarowy do szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego”

„Sposób szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego”.

4.2 Wykaz prac stanowiących osiągnięcie

Osiągnięciem, 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.) jest:

Autorska monografia naukowa:

- [1] Jaskowski, P. (2025). *Cyfrowy bliźniak infrastruktury jako narzędzie integracji modelowania ruchu i dynamicznego sterowania oświetleniem ulicznym*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Recenzenci: prof. dr

hab. inż. Adam Rosiński (Politechnika Warszawska), dr hab. inż. Aleksander Sobota, prof. uczelni (Politechnika Śląska):

- *Punktacja publikacji*: 80 pkt. (recenzowana monografia naukowa wydana przez wydawnictwo I-go poziomu – Oficynę Wydawniczą Politechniki Warszawskiej (48800)).
- *Wkład w przygotowanie publikacji*: opracowanie metod statystycznych oraz modeli predykcyjnych do wdrażania oświetlenia drogi w oparciu o dane o natężeniu ruchu drogowego z perspektywy zarządcy infrastruktury, opracowanie cyfrowego bliźniaka infrastruktury w celu sterowania oświetleniem drogi w czasie rzeczywistym.

**Cykl powiązanych tematycznie publikacji naukowych (układ chronologiczny)
pt. „Metody i narzędzia oceny oświetlenia dróg oraz elementów emitujących światło
w otoczeniu drogi”:**

- [2] Chrzanowicz Marcin, Tomczuk Piotr, **Jaskowski Piotr**: Metodyka pomiaru luminancji powierzchni nośnika reklamowego emitującego światło, WUT Journal of Transportation Engineering, ISSN 1230-9265, 2017, vol. 118, s.49-62.

- *Punktacja publikacji*: 7
- *Udział procentowy w przygotowaniu publikacji*: 33%
- *Wkład w przygotowanie publikacji*: opracowanie koncepcji metodyki pomiaru luminancji powierzchni mediów reklamowych emitujących światło, przeprowadzenie badań i analizy czynników wpływających na dokładność pomiaru (rozmiar pola pomiarowego, odległość pomiarowa, kierunki obserwacji, warunki meteorologiczne), opracowanie procedury pomiarowej zapewniającej uzyskanie porównywalnych wyników, przeprowadzenie badań pilotażowych na mediach reklamowych z wykorzystaniem miernika matrycowego, walidacja procedury pomiarowej, przygotowanie przykładowych pomiarów rozkładu luminancji.

- [3] **Jaskowski Piotr**, Tomczuk Piotr: Ustalenie klasy luminancyjnej jezdni z wykorzystaniem alternatywnych narzędzi pomiarowych, WUT Journal of Transportation Engineering, 2018, nr 121, s.105-113.

- *Punktacja publikacji*: 7
- *Udział procentowy w przygotowaniu publikacji*: 50%
- *Wkład w przygotowanie publikacji*: (autor korespondencyjny) opracowanie koncepcji badań porównawczych między metodą pomiaru luminancji za pomocą miernika punktowego a matrycowego, opracowanie procedury pomiarowej dla ustalenia klasy luminancyjnej jezdni, przeprowadzenie pomiarów terenowych na ekspresowej drodze z wykorzystaniem obydwu typów mierników, przetworzenie i analiza danych pomiarowych, przygotowanie wizualizacji rozkładu luminancji z transformacją do widoku z góry, interpretacja wyników w kontekście wymogów normatywnych.

- [4] Chrzanowicz Marcin, **Jaskowski Piotr**: Analysis of results of emission parameters of advertising media in field conditions, MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 231, s.1-8, Numer artykułu:04002. DOI:10.1051/matecconf /201823104002.
- *Punktacja publikacji*: 15
 - *Udział procentowy w przygotowaniu publikacji*: 50%
 - *Wkład w przygotowanie publikacji*: opracowanie koncepcji badań dotyczących parametrów emisji mediów reklamowych w warunkach terenowych, współautor w opracowaniu procedury pomiarowej do badania parametrów oświetleniowych reklam, przeprowadzenie badań terenowych na grupie 230 mediów reklamowych w trzech lokalizacjach w Polsce, walidacja metodyki pomiarowej, analiza formalna wyników pomiarów wraz z analizą statystyczną parametrów geometrycznych i oświetleniowych, przygotowanie rekomendacji dla zarządców infrastruktury drogowej.
- [5] **Jaskowski Piotr**, Tomczuk Piotr: Measurement systems used in measuring the illumination on the road, W: 2019 Second Balkan Junior Conference on Lighting (Balkan Light Junior), 2019, Institute of Electrical and Electronics Engineers, s.1-4, ISBN 978-1-7281-2098-0. DOI:10.1109/BLJ.2019.8883667.
- *Punktacja publikacji*: 20
 - *Udział procentowy w przygotowaniu publikacji*: 50%
 - *Wkład w przygotowanie publikacji*: (autor korespondencyjny) opracowanie koncepcji i metodyki mobilnego systemu pomiarowego do pomiaru oświetlenia ulicznego, omówienie różnych systemów pomiarowych stosowanych do oceny oświetlenia drogowego, zaprojektowanie systemu pomiarowego z wykorzystaniem czujników natężenia oświetlenia i GPS, przeprowadzenie badań pilotażowych na terenie Warszawy z porównaniem metody tradycyjnej i dynamicznej, implementacja procedury pomiaru w trzech wariantach (ręczna, dynamiczna, wózek pomiarowy), walidacja wyników pomiarów, analiza formalna danych.
- [6] **Jaskowski Piotr**, Tomczuk Piotr: Analysis of the measurement plane change in street illumination measurements, W: Proceedings of the 2020 Fifth Junior Conference on Lighting (Lighting 2020), 2020, Institute of Electrical and Electronics Engineers, s.1-3, ISBN 978-1-7281-9964-1. DOI:10.1109 /Lighting47792.2020.9240562.
- *Punktacja publikacji*: 20
 - *Udział procentowy w przygotowaniu publikacji*: 50%
 - *Wkład w przygotowanie publikacji*: (autor korespondencyjny) opracowanie koncepcji i metodyki badań dotyczących analizy zmiany płaszczyzny pomiaru w pomiarach oświetlenia ulicznego, opracowanie procedury wykorzystania metody odwrotnego kwadratu do interpolacji płaszczyzn pomiaru, przeprowadzenie modelowania w środowisku DIALux oraz walidacji wyników

pomiarów terenowych, implementacja systemu pomiarowego do dynamicznych pomiarów oświetlenia drogowego, przeprowadzenie analizy formalnej uzyskanych danych.

- [7] Tomczuk Piotr, Chrzanowicz Marcin, **Jaskowski Piotr**: Procedure for Measuring the Luminance of Roadway Billboards and Preliminary Results. 2020, *LEUKOS*, 18(1), 2–20. <https://doi.org/10.1080/15502724.2020.1803752>.

— *Punktacja publikacji*: 140

— *Impact Factor*: 3,389

— *Udział procentowy w przygotowaniu publikacji*: 33%

— *Wkład w przygotowanie publikacji*: (autor korespondencyjny) opracowanie koncepcji badań dotyczących pomiaru luminancji reklam przydrożnych, opracowanie metodyki i procedury pomiarowej dla parametrów oświetleniowych mediów reklamowych, opracowanie procedury pomiarów, walidacja procedury pomiarowej oraz analiza formalna uzyskanych danych, opracowanie rekomendacji praktycznych dla zarządców infrastruktury drogowej, przygotowanie wizualizacji wyników badań.

- [8] Tomczuk Piotr, Chrzanowicz Marcin, **Jaskowski Piotr**, Budzyński Marcin: Evaluation of Street Lighting Efficiency Using a Mobile Measurement System, *Energies*, 2021, vol. 14, nr 13, s.1-25. DOI:10.3390/en14133872.

— *Punktacja publikacji*: 140

— *Impact Factor*: 3,252

— *Udział procentowy w przygotowaniu publikacji*: 30%

— *Wkład w przygotowanie publikacji*: (autor korespondencyjny) opracowanie koncepcji mobilnego systemu pomiarowego do badania oświetlenia drogowego, opracowanie metodyki pomiaru parametrów efektywności energetycznej, implementacja oprogramowania dla systemu pomiarowego, walidacja wyników pomiarów z zastosowaniem metody klasycznej, zarządzanie zasobami badawczymi, analiza i przetwarzanie danych pomiarowych.

- [9] **Jaskowski Piotr**, Tomczuk Piotr, Chrzanowicz Marcin: Construction of a Measurement System with GPS RTK for Operational Control of Street Lighting, *Energies*, 2022, vol. 15, s.1-22, Numer artykułu:9106. DOI:10.3390/en15239106.

— *Punktacja publikacji*: 140

— *Impact Factor*: 3,2

— *Udział procentowy w przygotowaniu publikacji*: 34%

— *Wkład w przygotowanie publikacji*: (autor korespondencyjny) opracowanie koncepcji systemu pomiarowego z wykorzystaniem GPS RTK, opracowanie metodyki pomiaru parametrów oświetlenia drogowego, implementacja oprogramowania dla urządzenia pomiarowego, przeprowadzenie walidacji systemu pomiarowego poprzez porównanie z metodą klasyczną, prowadzenie

badan terenowych w warunkach miejskich, analiza formalną wyników pomiarów, przygotowanie wizualizacji danych za pomocą systemów GIS.

- [10] **Jaskowski Piotr**, Kozowski Edward, Tomczuk Piotr, Chrzanowicz Marcin, Matijoius Jonas, Cholewa-Wiktor Marta, Kilikevičius Artras: Application of machine learning models for evaluating the impact of roadside advertising on driver discomfort, Measurement, 2025, vol. 255, s.1-19. DOI:10.1016/j.measurement.2025.117915.

— *Punktacja publikacji*: 200

— *Impact Factor*: 5,6

— *Udział procentowy w przygotowaniu publikacji*: 17,5%

— *Wkład w przygotowanie publikacji*: (autor korespondencyjny) koncepcja opracowania metody oceny reklam, dobór metod uczenia maszynowego do opracowanych danych pomiarowych, implementację algorytmów uczenia maszynowego do klasyfikacji dyskomfortu kierowców, analizę formalną danych pomiarowych oraz przygotowanie manuskryptu publikacji.

Powiązane osiągnięcia konstrukcyjnego i technologicznego:

- [11] Osiągnięcie konstrukcyjne. **Jaskowski Piotr**, Tomczuk Piotr, Chrzanowicz Marcin: „System pomiarowy do szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego” (nr P.449983, data zgłoszenia do Urząd Patentowy RP 08.10.2024 r., zgłoszenie o patent europejski)

— *Udział procentowy w przygotowaniu wynalazku*: 33,34%

— *Wkład w przygotowanie publikacji*: (autor korespondencyjny) opracowanie koncepcji wynalazku konstrukcyjnego zawiązanego z pomiarami natężenia oświetlenia, dobór podzespołów i elementów niezbędnych do stanowiska pomiarowego, przygotowanie elementów i części do montażu, budowa finalna kompletnego stanowiska pomiarowego, przeprowadzenie terenowych pomiarów weryfikacyjnych system pomiarowy, opracowanie zgłoszenia patentu.

- [12] Osiągnięcie technologiczne. **Jaskowski Piotr**, Tomczuk Piotr, Chrzanowicz Marcin: „Sposób szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego”. (nr P.449984 data zgłoszenia do Urząd Patentowy RP 08.10.2024 r., zgłoszenie o patent europejski).

— *Udział procentowy w przygotowaniu wynalazku*: 33,34%

— *Wkład w przygotowanie publikacji*: (autor korespondencyjny) opracowanie koncepcji wynalazku technologicznego związanego z zmianą płaszczyzny pomiaru oświetlenia z uwzględnieniem przeliczania do wymogów normatywnych, opracowanie hipotezy badawczej oraz koncepcji pracy, opracowanie metodologii realizacji pomiaru, współpraca na etapie prac informatycznych, przeprowadzenie analizy statystycznej badań, opracowanie wyników badań i ich analizy, opracowanie zgłoszenia patentu.

4.3 Omówienie merytoryczne osiągnięcia naukowego

4.3.1 Cel naukowy badań prowadzonych w ramach osiągnięć naukowych przedstawionych do oceny

Istotny wkład wskazanych do oceny osiągnięć:

- **monografii pt.** „Cyfrowy bliźniak infrastruktury jako narzędzie integracji modelowania ruchu i dynamicznego sterowania oświetleniem ulicznym”, zawierającej treść **1-go osiągnięcia naukowego**,
- cyklu powiązanych tematycznie publikacji pt. „Metody i narzędzia oceny oświetlenia dróg i elementów emitujących światło w otoczeniu drogi” - **treść 2-go osiągnięcia naukowego**,
- oraz powiązanych **osiągnięć: konstrukcyjnego i technologicznego** zawierające **treść 3-go osiągnięcia naukowego**,

w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, stanowi opracowanie autorskich metod sterowania oświetleniem dróg, badań oddziaływania emisji światła niezawiązanego z potrzebami drogi na kierowcę oraz zastosowania szybkiej metody pomiaru oświetlenia drogowego.

Celem przeprowadzonych badań było opracowanie:

- Metody sterowania oświetlenia drogowego w zależności od natężenia ruchu drogowego w polu pomiarowym zgodnie z wymaganiami normy oświetlenia dróg PN-EN 13201-2016 przy użyciu bliźniaka cyfrowego infrastruktury.
- Metod sterowania oświetleniem drogi na podstawie predykcji natężenia ruchu drogowego.
- Nowego rozwiązania konstrukcyjnego, przeznaczonego do szybkich pomiarów natężenia oświetlenia na drodze.
- Nowego rozwiązania technologicznego związanego z metodą przeliczania punktów pomiarowych pomiędzy płaszczyzną rejestracji i wymaganiami normy PN-EN 13201-2016 Oświetlenie dróg.
- Szybkiej metody pomiaru natężenia oświetlenia drogi, która umożliwia rejestrację danych oświetleniowych z prędkością poruszania się pojazdu.
- Metody do kompleksowej oceny efektywności energetycznej oświetlenia dróg.
- Metodyki pomiaru oświetlenia emitowanego przez elementy niewiązane z funkcjonowaniem drogi oraz określenie ich wpływu na kierującego pojazdem.
- Narzędzia do oceny reklam świetlnych na dyskomfort uczestników ruchu drogowego.

Jako cele przedstawionych osiągnięć naukowych przedłożonych do oceny wskazano:

- 1) Dla **osiągnięcia 1 przedstawionego w monografii** pt. „Cyfrowy bliźniak infrastruktury jako narzędzie integracji modelowania ruchu i dynamicznego sterowania oświetleniem ulicznym” [1] jako cel wskazano **opracowanie holistycznej metody wspomagania decyzji sterowania dynamicznego oświetleniem dróg dla zwiększenia efektywności energetycznej działania**

instalacji oświetlania poprzez dostosowanie poziomu oświetlenia do bieżących warunków ruchu,

uwzględniając opracowanie koncepcji tworzenia harmonogramów sterowania oświetleniem dróg na podstawie analizy statystycznej natężenia ruchu drogowego, modeli predykcyjnych natężenia ruchu drogowego przy użyciu modelu SARIMA, infrastruktury cyfrowego bliźniaka integrującego dane oświetlenia z natężeniem pól z danymi o natężeniu ruchu drogowym oraz formalnego zapisu algorytmu sterowania dynamicznego oświetleniem dróg dla pól zdefiniowanych zgodnie z standardami oświetlenia przy użyciu automatów komórkowych i metody sterowania oświetlenia drogą w zależności od natężenia ruchu drogowego w polu pomiarowym zgodnie z wymaganiami normy oświetlenia dróg PN-EN 13201-2016 przy użyciu bliźniaka cyfrowego infrastruktury.

- 2) Dla **osiągnięcia 2**, przedstawionego w cyklu powiązanych tematycznie dziewięciu publikacji pt. „*Metody i narzędzia oceny oświetlenia dróg i elementów emitujących światło w otoczeniu drogi*” [2-10] jako cel wskazano ***opracowanie metodyki oceny oświetlenia dróg i elementów emitujących światło w otoczeniu drogi***, na którą się składa: weryfikacja narzędzi pomiarowych do wykonania pomiarów oświetlenia dróg oraz otoczenia, opracowanie koncepcji mobilnych pomiarów natężenia oświetlania, które umożliwiają szybką, efektywną ocenę parametrów oświetlenia całych odcinków ulic bez konieczności zamknięcia drogi, pozwalającą na szczegółowe mapowanie wyników pomiaru oraz wyznaczenia efektywności energetycznej ulic, dzielnic lub całych miast poprzez integrację z systemami GIS i dokumentacją infrastruktury, oraz stanowią praktyczne narzędzie do identyfikacji sekcji wymagających modernizacji, redukcji kosztów eksploatacyjnych, zwiększenia bezpieczeństwa ruchu, weryfikacja zagrożeń wynikających z lokalizowania reklam świetlnych w polu obserwacji kierowcy w zależności od typu pojazdu, opracowanie parametrów geometrycznych, fotometrycznych i lokalizacyjnych, które wpływają na dyskomfort uczestników ruchu drogowego, opracowanie metodyki pomiaru oświetlenia emitowanego przez elementy niewiązane z funkcjonowaniem drogi oraz określenie ich wpływu na kierującego pojazdem, opracowanie procedury pomiaru oświetlenia emitowanego przez elementy niewiązane z funkcjonowaniem drogi dla zarządców infrastruktury, opracowanie narzędzia oceny reklam świetlnych na dyskomfort uczestników ruchu drogowego.
- 3) Dla **osiągnięcia 3**, będących powiązanymi wynalazkami: konstrukcyjnym „System pomiarowy do szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego” oraz technologicznym „Sposób szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego” jest opracowanie nowego rozwiązania konstrukcyjnego, przeznaczonego do pomiarów natężenia oświetlenia na drodze oraz opracowanie nowego rozwiązania technologicznego związanego z metodą przeliczania punktów pomiarowych pomiędzy płaszczyzną rejestracji i wymaganiami normy PN-EN 13201-2016.

Tak przedstawione zagadnienia naukowe mają charakter użyteczny i wynikają z potrzeb zarządców infrastruktury, którzy nie posiadali narzędzi do efektywnego zarządzania drogą w kontekście oświetlenia dróg i zagrożeń wynikających z oddziaływania światła obcego na uczestników ruchu drogowego. Istotne aspekty to:

- Oświetlenie uliczne jest jednym z elementów infrastruktury transportowej, który wpływa na poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego, komfort życia mieszkańców oraz estetykę miasta [13][14]. Współczesne zarządzanie infrastrukturą oświetleniową wymaga odpowiedzi na złożone wyzwania polityczne, ekonomiczne i środowiskowe. Transformacja funkcjonalności miast, rosnące koszty instalacji oświetleniowych i wymogi dekarbonizacji transportu wraz z redukcją energochłonności oświetlenia generują potrzebę innowacyjnych rozwiązań.
- Niezbędnym do właściwego zarządzania bezpieczeństwem ruchu drogowego w porze nocnej jest identyfikacja zagrożeń związanych z emisją światła obcego, pochodzącego z źródeł niezwiązanych bezpośrednio z potrzebami oświetlenia drogi, takich jak reklamy świetlne, oświetlenie budynków czy innych elementów infrastruktury miejskiej. Światło obce wpływa na percepcję kierowcy poprzez zmianę kontrastu między elementami drogi a otoczeniem, może wywoływać zjawisko olśnienia lub osłabienie zdolności dostosowania się oka do panujących warunków oświetleniowych. Istotnym problemem badawczym jest określenie, w jakim zakresie emisja od poszczególnych źródeł światła wpływa na komfort widzenia, zmęczenie kierowcy oraz ostatecznie na jego zdolność do podejmowania prawidłowych decyzji w ruchu drogowym. Problem ten nabiera szczególnego znaczenia w miastach o dużym zagęszczeniu obiektów generujących światło, gdzie oświetlenie drogowe stanowi zaledwie część całego spektrum emisji światła. Brak ustandaryzowanych metod oceny wpływu światła obcego na bezpieczeństwo sprawia, że zagadnienie to jest często pomijane w procedurach planowania i zarządzania infrastrukturą transportową.
- Stosowane obecnie klasyczne, statyczne metody pomiarów parametrów oświetleniowych (realizowane zgodnie z normą PN-EN 13201-2016) przez lata nie ulegały zmianom, przez co nie odpowiadają współczesnym potrzebom, ograniczeniom i wyzwaniom. W szczególności w zakresie szybkiego pozyskiwania danych i ich przetwarzania. Wskazane ograniczenia wiążą się między innymi z warunkami, jakie muszą być spełnione podczas pomiarów (w tym koniecznością zamknięcia drogi), przekładają się na niską efektywność statycznych metod pomiarowych. W związku z tym proces weryfikacji stanu oświetlenia drogowego jest często zaniedbywany w procedurze systematycznych pomiarów elektrycznych ulicznych instalacji oświetleniowych. Dlatego istotnym zadaniem jest podejmowanie prac badawczo-rozwojowych, których efektem będą nowe rozwiązania techniczne pozwalające na efektywny pomiar niezależnie od warunków ruchu na drodze. Jednocześnie konieczne jest uwzględnienie

cyfryzacji transportu i agregowanie danych gotowych do ich szybkiej wizualizacji i integracji z systemami informacyjnymi.

- Sterowanie oświetleniem w zależności od rzeczywistych warunków panujących na drodze stanowi kluczową strategię dla zwiększenia efektywności czasu działania instalacji oświetlenia, przy jednoczesnym zachowaniu najwyższych standardów bezpieczeństwa. Tradycyjne podejście polegające na utrzymywaniu stałych poziomów oświetlenia przez całą noc, niezależnie od natężenia ruchu drogowego, prowadzi do zmarnowania energii w godzinach o niskim natężeniu ruchu drogowego. Nowoczesne rozwiązania powinny umożliwiać dynamiczną regulację poziomów oświetlenia w odpowiedzi na zmieniające się warunki na drodze, pod warunkiem, że ich zmniejszenie nie będzie stanowić zagrożenia dla bezpieczeństwa użytkowników drogi. Konieczne jest zatem opracowanie metodyki pozwalającej na ustalenie minimalnych akceptowalnych poziomów oświetlenia dla różnych scenariuszy natężenia ruchu drogowego oraz algorytmów sterowania, które będą działać w ramach tych bezpiecznych granic, maksymalizując jednocześnie oszczędności energetyczne.

4.3.2 Opis autorskiej monografii

Jak wskazano w pkt. 4.3.1. celem naukowym monografii pt. *„Cyfrowy bliźniak infrastruktury jako narzędzie integracji modelowania ruchu i dynamicznego sterowania oświetleniem ulicznym”*, jest **opracowanie holistycznej metody wspomagania decyzji sterowania dynamicznego oświetleniem dróg dla zwiększenia efektywności energetycznej działania instalacji oświetlania poprzez dostosowanie poziomu oświetlenia do bieżących warunków ruchu**, uwzględniającej opracowanie:

- koncepcji tworzenia harmonogramów sterowania oświetleniem dróg na podstawie analizy statystycznej natężenia ruchu drogowego,
- koncepcji tworzenia harmonogramów sterowania oświetleniem dróg na podstawie modeli predykcyjnych natężenia ruchu drogowego przy użyciu modelu SARIMA,
- koncepcji infrastruktury cyfrowego bliźniaka integrującego dane oświetlenia z natężeniem pól z danymi o natężeniu ruchu drogowym,
- formalnego zapisu algorytmu sterowania dynamicznego oświetleniem dróg dla pól zdefiniowanych zgodnie z standardami oświetlenia przy użyciu automatów komórkowych,
- metody sterowania oświetleniem drogą w zależności od natężenia ruchu drogowego w polu pomiarowym zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 13201-2016 oświetlenie dróg przy użyciu bliźniaka cyfrowego infrastruktury.

Jako cele cząstkowe wskazano:

- analizę bezpieczeństwa ruchu drogowego w porze nocnej dla wybranego poligonu badawczego,

- analizę literatury w zakresie problematyki widoczności użytkowników dróg w porze nocnej, wpływu oświetlenia dróg na bezpieczeństwo ruchu drogowego, potencjału oświetlenia w dekarbonizacji transportu,
- określenie problemów decyzyjnych w zakresie integracji modelowania ruchu drogowego i oświetlenia dróg,
- przegląd rozwiązań technicznych oraz literatury w tematyce wykorzystania bliźniaka cyfrowego do integracji infrastruktury drogowej,
- przegląd rozwiązań technicznych oraz literatury w tematyce dynamicznego sterowania oświetleniem ulicznym,
- opracowanie analizy statystycznej natężenia ruchu drogowego w porze nocnej dla wybranego odcinka drogi,
- analizy wahań i sezonowości natężenia ruchu drogowego dla wybranego odcinka drogi,
- opracowanie modeli predykcyjnych dla wybranej ulicy z wykorzystaniem modelu: SARIMA, Holta-Wintersa, analizy harmonicznej,
- opracowanie koncepcji tworzenia harmonogramów sterowania oświetleniem dróg na podstawie analizy statystycznej natężenia ruchu drogowego,
- opracowanie koncepcji tworzenia harmonogramów sterowania oświetleniem dróg na podstawie modeli predykcyjnych natężenia ruchu drogowego przy użyciu modelu SARIMA,
- zamodelowanie ruchu drogowego w specjalistycznym oprogramowaniu,
- przeprowadzenie pomiarów natężenia oświetlenia drogi w celu weryfikacji stanu infrastruktury,
- opracowanie koncepcji infrastruktury cyfrowego bliźniaka integrującego dane oświetlenia z natężeniem pól z danymi o natężeniu ruchu drogowym,
- opracowanie formalnego zapisu algorytmu sterowania dynamicznego oświetleniem dróg dla pól zdefiniowanych zgodnie z standardami oświetlenia przy użyciu automatów komórkowych,
- opracowanie metody sterowania oświetlenia drogą w zależności od natężenia ruchu drogowego w polu pomiarowym zgodnie z wymaganiami normy oświetlenia dróg PN-EN 13201-2016 przy użyciu bliźniaka cyfrowego infrastruktury,
- określenie potencjału redukcji emisji szkodliwych dla przyjętych scenariuszy badawczych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury stwierdzono brak:

- koncepcji tworzenia harmonogramów sterowania oświetleniem dróg na podstawie modeli predykcyjnych natężenia ruchu drogowego,
- metody sterowania oświetlenia drogą w zależności od natężenia ruchu drogowego w polu pomiarowym zgodnie z wymaganiami normy oświetlenia dróg PN-EN 13201-2016 przy użyciu bliźniaka cyfrowego infrastruktury.

Współczesne systemy infrastruktury transportowej stoją przed rosnącymi wyzwaniami związanymi z koniecznością optymalizacji zarówno bezpieczeństwa, efektywności energetycznej, jak i wydajności ruchu drogowego. Tradycyjne podejście do sterowania oświetleniem dróg charakteryzuje się statyczną konfiguracją opartą na ustalonych harmonogramach czasowych, co prowadzi do nieefektywnego wykorzystania energii elektrycznej w okresach niskiego natężenia ruchu lub jego braku. Podejście to wiąże się również z wysokimi kosztami utrzymania infrastruktury spowodowanej ciągłą pracą instalacji oświetlenia z pełną mocą przez okres około 4000 godzin w skali roku. Dlatego w swoich badaniach zająłem się poszukiwaniem rozwiązań mających na celu redukcję okresów działania oświetlenia, co przełoży się na wymierne efekty z uwagi na liczbę opraw tworzących sieć oświetlenia dróg (np. ponad 122 tys. w Warszawie [15]). Presja zmian technologicznych i organizacyjnych w obszarze infrastruktury publicznej wzrasta w związku z koniecznością realizacji celów klimatycznych Unii Europejskiej (UE), zakładających znaczną redukcję emisji gazów szkodliwych. Ograniczenie czasu działania instalacji oświetlenia dróg oraz dynamiczna regulacja mocy opraw oświetleniowych stanowią potencjalne sposoby wspierania tych założeń, ponieważ umożliwiają redukcję zużycia energii elektrycznej, a tym samym redukcję emisji związanych z jej wytwarzaniem. W obliczu rosnących wyzwań wynikających z wdrażania polityki dekarbonizacji konieczne staje się zatem opracowanie i wdrażanie rozwiązań polegających na inteligentnym sterowaniu infrastrukturą oświetlenia dróg.

Wprowadzenie algorytmów sterowania oświetleniem drogowym wymaga pozyskania danych dotyczących natężenia ruchu wszystkich uczestników ruchu. Informacje te umożliwiają zamianę dotychczasowego paradygmatu zarządzania infrastrukturą oświetleniową poprzez dostosowywanie harmonogramów pracy instalacji do rzeczywistych potrzeb użytkowników dróg. Przy projektowaniu takich rozwiązań należy jednak uwzględnić zróżnicowanie zasobów technicznych i organizacyjnych zarządców infrastruktury, zróżnicowanych w skali kraju. Z tego względu w ramach tego nurtu badań przyjęto koncepcję wykorzystania pojedynczego punktu pomiarowego natężenia ruchu drogowego jako podstawy do dostosowywania poziomu oświetlenia, w oparciu o analizę statystyczną lub modele predykcyjne. Podejście to umożliwia generowanie oszczędności i wdrażanie scenariuszy sterowania dla poszczególnych odcinków dróg, co w szerszej skali może przełożyć się na znaczące korzyści ekonomiczne. W konsekwencji przełoży się to na zwiększenie świadomości zarządzających infrastrukturą i będzie stanowiło bodziec dalszego rozwoju rozwiązań technicznych związanych z sterowaniem infrastrukturą oświetlenia.

Wdrożenie takich systemów napotyka jednak istotne bariery. Najważniejszą z nich są wysokie nakłady inwestycyjne związane z koniecznością budowy szerokiej sieci czujników pomiarowych oraz doposażenia opraw oświetlenia w indywidualne sterowniki umożliwiające płynną regulację strumienia świetlnego opraw oświetleniowych (z zachowaniem parametrów jakościowych zasilania tj. mocy, współczynnika mocy, harmonicznych prądu i napięcia, itd.). Niezbędne do spełnienia są również wymagania

w zakresie budowy rozwiązań teleinformatycznych, umożliwiających optymalizację oświetlenia przy jednoczesnym zachowaniu odporności i cyberbezpieczeństwa systemu. Dodatkowym wyzwaniem jest brak jednolitych standardów i wytycznych dotyczących implementacji dynamicznego sterowania, a także nieprecyzyjne regulacje prawne odnoszące się do odpowiedzialności w przypadku wystąpienia zdarzeń drogowych. Równolegle problemem pozostaje ograniczona integracja systemów sterowania oświetleniem z rzeczywistymi danymi dotyczącymi uczestników ruchu, obejmującymi zarówno pojazdy, rowerzystów jak i pieszych. Istotne znaczenie mają również informacje o warunkach atmosferycznych, takich jak opady atmosferyczne lub zdarzenia występujące na sąsiednich drogach, które mogą wpływać na zachowania użytkowników dróg. Dopiero kompleksowa integracja różnorodnych danych umożliwi skuteczne wdrażanie adaptacyjnych algorytmów sterowania, które będą potrafiły optymalnie dostosowywać poziom oświetlenia do dynamicznie zmieniających się potrzeb na drodze w ujęciu zarządzania całym oświetlanym obszarem.

Przedmiotem badań realizowanych w ramach przedstawionej do oceny monografii było opracowanie adaptacyjnego sposobu sterowania oświetleniem, który na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych umożliwia dynamiczną regulację poziomu oświetlenia i jego bieżące dostosowanie do aktualnych warunków na drodze. Przyjąłem, że rozważania prowadzone w niniejszej pracy zostały zrealizowane na podstawie koncepcji bliźniaka cyfrowego (ang. *digital twins*). W obszarze zarządzania oświetleniem drogowym, zdefiniowano bliźniak cyfrowy funkcjonuje jako wielowarstwowa architektura integrująca dane rzeczywiste pozyskiwane z czujników, modele symulacyjne ruchu, algorytmy optymalizacyjne oraz systemy wspomagania decyzji dla operatorów infrastruktury. Przeprowadzona analiza dostępnych badań i publikacji wskazuje, że technologia cyfrowego bliźniaka, nie była dotychczas wprost wykorzystana do sterowania oświetleniem w obrębie pojedynczego pola pomiarowego zgodnie z wymaganiami norm oświetleniowych dla dróg [16].

Oświetlenie uliczne w Polsce stanowi zadanie własne gminy zgodnie z art. 18 Prawa energetycznego [17]. Z reguły zadanie to jest podejmowane przez pracowników samorządowych, odpowiedzialnych za wydatki energetyczne. Wyłącznie duże samorządy, takie jak m. in. Warszawa, Kraków, Poznań, posiadają dedykowaną komórkę organizacyjną i są tworzone przez osoby o wykształceniu związanym z techniką świetlną. Dlatego w perspektywie krajowej, sterowanie oświetleniem sprowadza się do ręcznego lub czasowego włączania opraw. W tym celu wykorzystuje się również fotodetektora reagujące na poziom oświetlenia otoczenia, które umożliwiają automatyczne włączanie opraw o zmierzchu oraz wyłączanie o świcie, zgodnie z zaprogramowanym progiem natężenia oświetlenia. Wymusza to rozgraniczenie typów systemów sterowania z uwagi na uwarunkowania techniczne jego praktycznego wdrożenia:

- Oświetlenie statyczne wykorzystujące prosty system sterowania związany z wprowadzaniem czasowych harmonogramów, które można wdrożyć niskim kosztem początkowym. Oprawy oświetlenia działają z takim samym zadaniem

poziomem mocy. Minusem rozwiązania jest nieefektywne zużycie energii i brak elastyczności w kontekście zmieniających się potrzeb użytkowników dróg. Systemy statyczne są mniej wydajne i wykorzystują poziomy stałe w czasie.

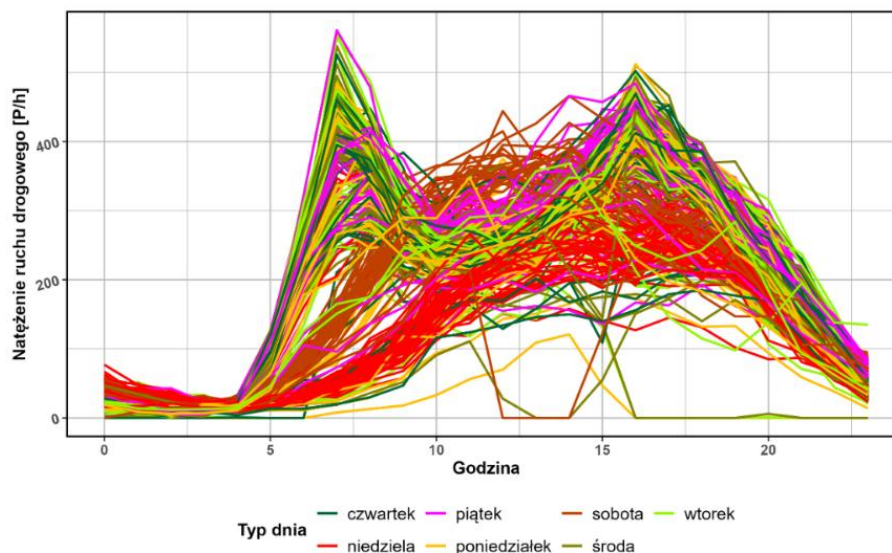
- Hybrydowe oświetlenie adaptacyjne uzupełniające statyczne sterowanie o dostarczane dane pomiarowe związane np. z natężeniem ruchu drogowego, pogodą. Wskazane systemy poprawiają efektywność energetyczną, natomiast wymagają wyższych nakładów inwestycyjnych i utrzymaniowych.
- Adaptacyjne oświetlenie wykorzystujące zaawansowane czujniki i dane pomiarowe z wielu źródeł. W efekcie za dostosowanie poziomów oświetlenia odpowiadają algorytmy sterowania optymalizujące oświetlenie w czasie rzeczywistym. System umożliwia sterowanie pojedynczą oprawą i dynamiczną redukcję w polach pomiarowych. Wdrożenie rozwiązania wymaga uwzględnienia nakładów pracy na etapie modernizacji jednostkowych opraw oświetlenia. Wysokie koszty i brak jednoznacznie ustalonych standardów powoduje ograniczenie wykorzystania do pojedynczych ulic.

Obecnie w Polsce nie funkcjonuje w pełni adaptacyjny system sterowania oświetleniem na dużym obszarze miasta, który steruje indywidualnymi polami w rozumieniu podziału drogi na pola pomiarowe zgodnie z normą oświetlenia dróg [2]. Wynika to przede wszystkim z braku uregulowań prawnych i nieokreślonego zakresu odpowiedzialności zarządcy drogi za utrzymanie bezpieczeństwa. W praktyce oznaczałoby to, że zarządca drogi mógłby ponosić odpowiedzialność za potencjalne zdarzenia drogowe na odcinkach objętych dynamiczną regulacją poziomu oświetlenia. W efekcie prowadzi to do rezygnacji z wdrażania zaawansowanych systemów sterowania, pomimo ich potencjalnych korzyści ekonomicznych. Należy bowiem podkreślić, że wprowadzenie takiego rozwiązania wymaga uprzednio przemyślanych nakładów inwestycyjnych, w tym doposażenia opraw oświetleniowych w odpowiednie sterowniki oraz modernizacji infrastruktury towarzyszącej.

Klasyczne podejście do sterownia oświetleniem obejmuje wszystkie systemy działające w oparciu o z góry ustalony harmonogram. Systemy te mogą być wyposażone w czujniki regulujące moment załączenia i wyłączenia opraw oświetlenia na podstawie żądanych poziomów natężenia oświetlenia ulicznego. Często jednak rozwiązania te nie są spójne w obrębie jednego obszaru. Sterowanie odbywa się poprzez grupy opraw przypisane do konkretnej szafy sterowniczej. W efekcie może dochodzić do paradoksalnych sytuacji, w których oświetlenie na drogach niższej kategorii jest załączane znacznie wcześniej niż na drodze głównej. W swoich badaniach podejmuję się opracowywania rozwiązań, które spowodują zwiększenie efektywności energetycznej instalacji oświetlenia.

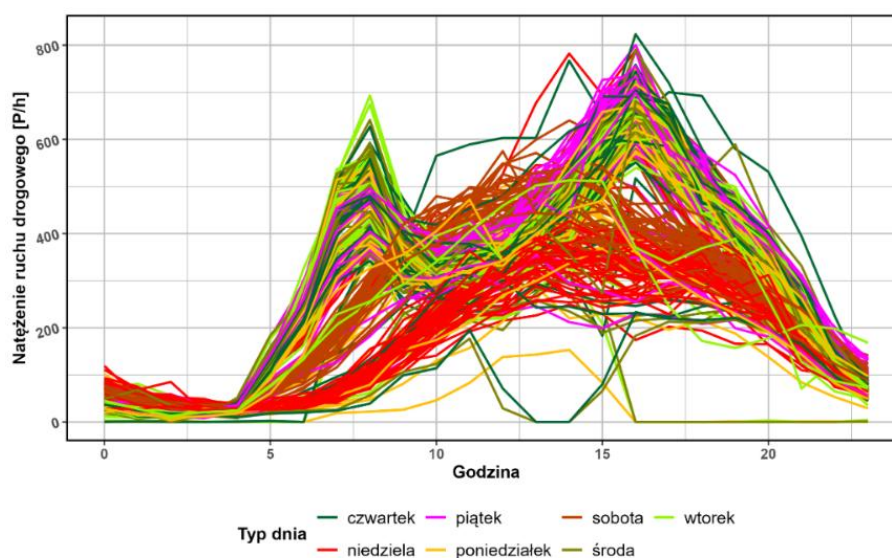
Na potrzeby realizacji badań będących przedmiotem przedstawionej do oceny monografii wykonałem dla wybranej drogi analizę statystyczną związaną z określeniem sezonowości natężenia ruchu drogowego. Wymagało to ode mnie pozyskanie danych o średnim godzinowym natężeniu ruchu drogowego punktu pomiarowego nr 1378 (ul.

Lawendów) w ramach Automatycznego Pomiaru Ruchu (APR) realizowanego przez Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie. Na rysunkach 1-2 zaprezentowano charakterystykę natężenia ruchu drogowego dla wybranego punktu pomiarowego, w podziale na kierunek ruchu do i od centrum miasta (Warszawy). Na potrzeby badań przyjąłem rok 2024, który liczył 366 dni (rok przestępny).



Rys. 1. Natężenie ruchu drogowego w podziale na dni tygodnia w 2024 roku, kierunek do Centrum

Źródło: opracowanie własne.



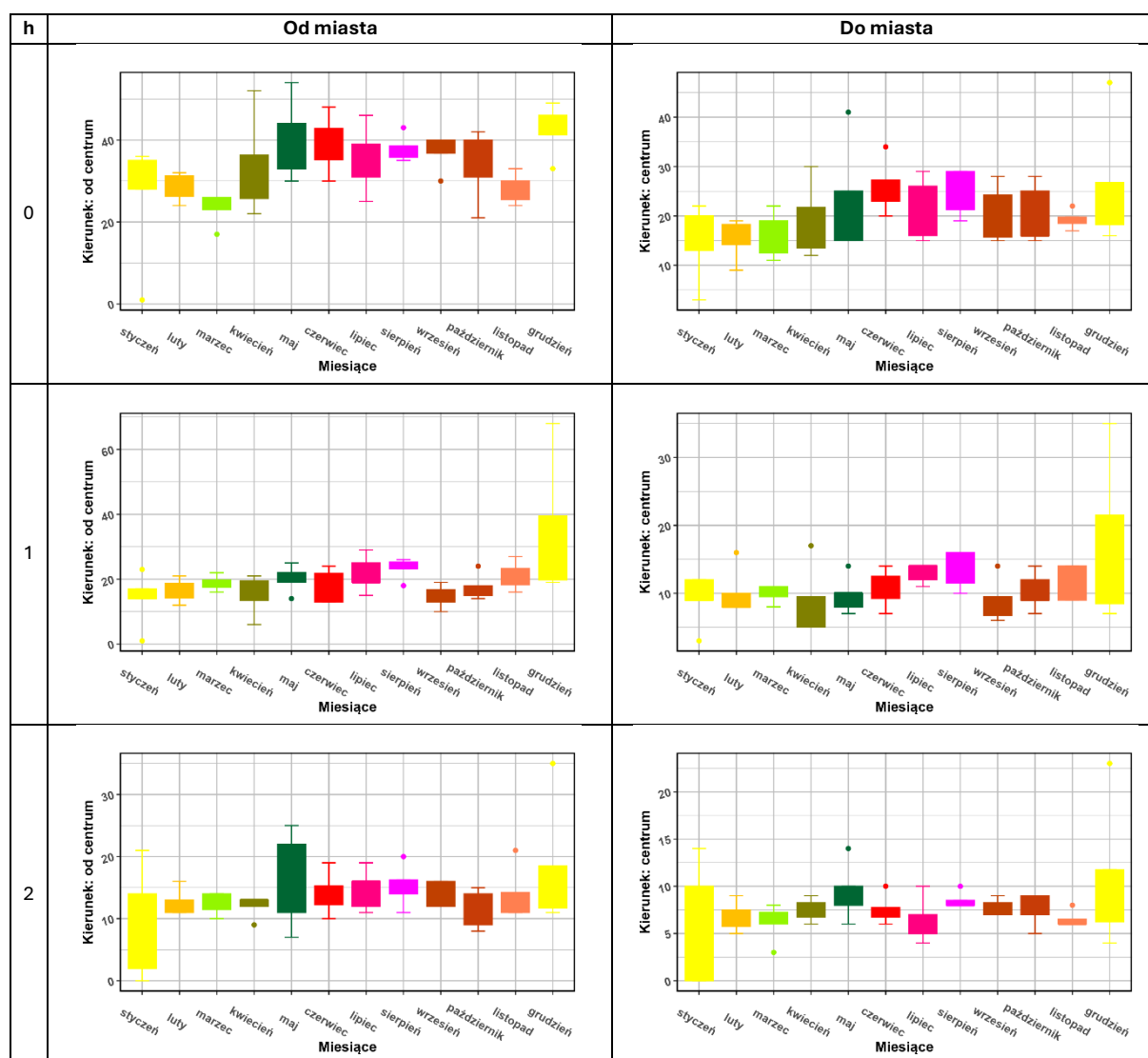
Rys. 2. Natężenie ruchu drogowego w podziale na dni tygodnia w 2024 roku, kierunek od Centrum

Źródło: opracowanie własne.

Przed przystąpieniem do analizy statystycznej wykorzystałem metody wizualizacji danych o natężeniu ruchu drogowego. Narzędzie to jest szczególnie przydatne w perspektywie dalszych analiz statystycznych przy ocenie zmienności czasowej natężenia ruchu

drogowego i oszacowaniu potencjału dynamicznego sterowania oświetlaniem [18], [19]. Do tego celu zastosowałem wykresy „ramka-wąsy” wygenerowane w języku programowania R dla obu kierunków pomiaru (przykład wybranych godzin w Tabeli 1.).

Tabela 1. Godzinowy rozkład natężenia ruchu drogowego dla kierunku od i do miasta na przestrzeni roku (dzień tygodnia środa), oś rzędnych przedstawia przedział zmienności natężenia ruchu drogowego [P/h] w danej godzinie



Źródło: opracowanie własne.

Następnie wykonałem analizy wahań i sezonowości natężenia ruchu drogowego w obrębie dobowych okresów działania oświetlenia drogowego. Celem analiz było ograniczenie liczby potencjalnych scenariuszy sterowania oświetleniem, co jest istotne w kontekście możliwości wdrożeniowych przy ograniczonych środkach inwestycyjnych. Na potrzeby weryfikacji wykorzystałem test Kruskala-Wallisa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ do weryfikacji hipotezy roboczej:

- *hipoteza robocza* (H_0): mediany natężenia ruchu są równe dla wszystkich dni tygodnia w danym miesiącu. Równoważnie – wszystkie grupy pochodzą z populacji

o identycznym rozkładzie (tzw. równość stochastyczna). Innymi słowy, nie ma istotnych statystycznie różnic w natężeniu ruchu między dniami tygodnia.

- *hipoteza alternatywna* (H_1): co najmniej dla jednej pary dni tygodnia mediany natężenia ruchu istotnie się różnią. Przynajmniej jeden dzień tygodnia wykazuje inne natężenie ruchu drogowego w porównaniu z pozostałymi dniami.

Na podstawie wyników wyznaczyłem okresy w dobie, w których systemy sterowania ruchem lub oświetleniem mogą działać na stałych ustawieniach, bez konieczności dostosowania do różnic między dniami tygodnia. Dla kierunku od miasta brak istotnej różnicy obejmuje przede wszystkim środy w godz. 1:00-3:00 oraz 4:00-5:00, czwartki w godz. 22:00-24:00 oraz 1:00-5:00, piątki w godz. 0:00-7:00. Z kolei kierunek do miasta pozwala na wskazanie dłuższych okresów w wtorki w przedziale 0:00-1:00 oraz 2:00-4:00, środy od 23:00-5:00, czwartki między 22:00-5:00, piątki w godz. 0:00-1:00 oraz 2:00-5:00.

W toku przeprowadzanych analiz modeli predykcji natężenia ruchu drogowego w okresie nocnym użyłem modeli: a) SARIMA, b) Holta-Wintersa, c) analizy harmonicznej. Modele te mogą być wykorzystane do prognozowania natężenia ruchu w krótkim horyzoncie czasowym, co jest istotne dla systemów dynamicznego sterowania oświetleniem drogowym oraz zarządzania ruchem. Na podstawie otrzymanych wyników miar oceny modelu, najlepsze rezultaty uzyskano dla modelu SARIMA (Tabela 2), który wykorzystałem do opracowania predykcji natężenia ruchu drogowego.

Tabela 2. Porównanie opracowanych modeli predykcji

Model	Kierunek	R	MAE	RMSE	MAPE
SARIMA	Od miasta	0,9701	32,70504	46,7381	0,2439
SARIMA	Do miasta	0,9604	25,6865	38,0968	0,2698
Holta-Wintersa	Od miasta	0,9629	37,9448	52,0860	0,3134
Holta-Wintersa	Do miasta	0,9528	28,9806	41,6923	0,3713
Analiza harmoniczna	Od miasta	0,9664	33,9295	49,4231	0,3545
Analiza harmoniczna	Do miasta	0,9415	29,5506	45,9667	0,4199

Źródło: opracowanie własne.

W kontekście analizy ruchu drogowego SARIMA znajduje zastosowanie w prognozowaniu natężenia ruchu na kolejne dni, uczestnicząc w procesie decyzyjnym przy planowaniu infrastruktury drogowej i logistyce transportu [20][21]. Model ten stanowi rozszerzenie tradycyjnego podejścia ARIMA, umożliwiając uwzględnienie zarówno krótkoterminowych trendów, jak i wzorców sezonowych charakterystycznych dla ruchu drogowego. Natężenie ruchu drogowego wykazuje wyraźną sezonowość na wielu skalach czasowych – sezonowość dobową (szczyty w godzinach porannych i wieczornych), sezonowość tygodniową (różnica między dniami roboczymi a weekendem) oraz sezonowość miesięczną i roczną. Model SARIMA umożliwia modelowanie wszystkich tych struktur jednocześnie, stanowiąc tym samym bardziej adekwatne narzędzie w porównaniu z klasycznym ARIMA, które ignoruje sezonowość.

Model SARIMA, który bazuje na danych historycznych, można wykorzystać do oszacowania prognoz natężenia ruchu na kolejne dni. Procedura prognozowania wygląda następująco:

1. Prognoza jednokrokowa – model przewiduje wartość dla bezpośrednio następnego dnia, wykorzystując ostatnie zaobserwowane wartości i strukturę autoregresywną modelu.
2. Prognoza wielokrokowa – aby przewidzieć natężenie ruchu drogowego dla wielu dni do przodu (np. na następne 7 dni), można zastosować dwie strategie:
 - prognoza bezpośrednia: model generuje wszystkie przyszłe wartości jednocześnie;
 - prognoza iteracyjna: każda nowa prognoza wykorzystuje poprzednie prognozy jako dane wejściowe, co może prowadzić do akumulacji błędów.
3. Za pomocą modeli SARIMA szacuje się nie tylko oczekiwaną prognozę, ale również przedziały ufności (zazwyczaj 95%), pozwalające na ocenę niepewności prognoz.

Rozpatrując analizowany dane o natężeniu ruchu drogowego, niech $\{x_t\}_{1 \leq t \leq 24 \cdot 366}$ oznacza ciąg określający liczbę przejechanych samochodów w ciągu godziny dla kierunku od miasta. Ciąg identyfikujemy za pomocą modeli klasy SARIMA(5,0,1)(2,1,0)[24] postaci (Rys. 3):

$$(1 - 1,7533F_- + 0,9454F_-^2 - 0,0787F_-^3 + 0,0256F_-^4 - 0,1004F_-^5)(1 + 0,387F_-^{24} + 0,2804F_-^{48})(1 - F_-^{24})x_t = (1 + 0,7124F_-)\varepsilon_t$$

gdzie $\{\varepsilon_t\}_{1 \leq t \leq 24 \cdot 366}$ jest ciągiem niezależnych zmiennych losowych o rozkładzie normalnym $N(0,2192)$.

Część nie sezonowa wykazuje silną zależność od wartości z najbliższej przeszłości. Współczynnik 1,7533 dla pierwszego opóźnienia jest wysoki i dodatni, podczas gdy współczynnik drugiego rzędu 0,9454 również jest znaczący. Mniejsze współczynniki dla wyższych opóźnień (−0,0787; 0,0256; −0,1004) wskazują na słabnący wpływ bardziej odległych realizacji szeregu.

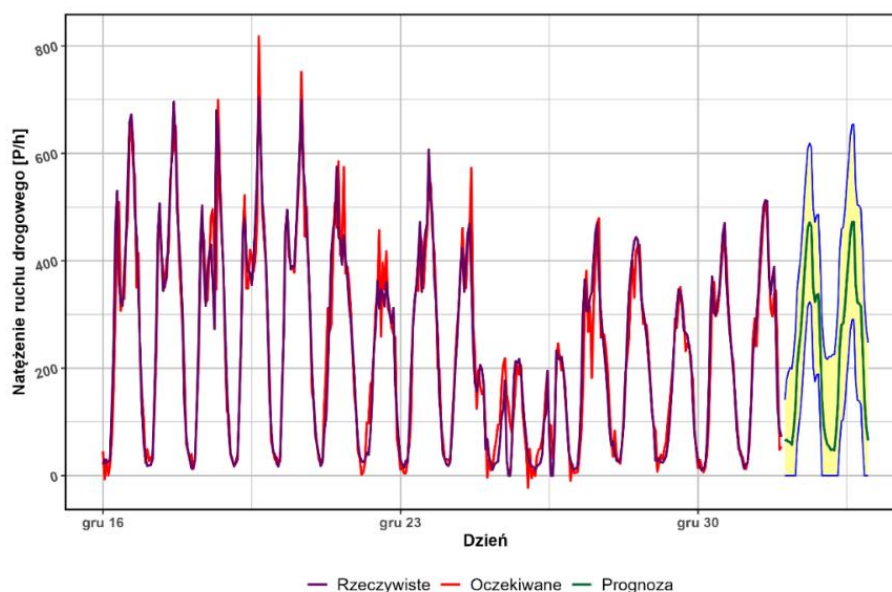
Część sezonowa z dodatnimi współczynnikami (0,387 dla 24h i 0,2804 dla 48h) sugeruje, że natężenie ruchu drogowego w danej godzinie jest dodatnio skorelowane z natężeniem w tej samej godzinie poprzedniego dnia i dwa dni wcześniej.

Współczynnik średniej ruchomej (MA): Wartość 0,7124 wskazuje, że błędy prognozowania z poprzedniej godziny wpływają na bieżące wartości, co może odzwierciedlać nieprzewidywalne zdarzenia drogowe.

Wariancja błędu $\sigma^2 = 2192$ jest stosunkowo wysoka, co sugeruje większą zmienność natężenia ruchu w kierunku od miasta, a mianowicie odchylenie standardowe zmiennej losowej opisujące zaburzenia zewnętrzne wyników. Dokładność prognozy:

- RMSE = 46,73 pojazdów/godz.: średnia wielkość błędu wartości rzeczywistych a prognozowanymi;

- MAE = 32,7 pojazdów/godz.: średnie bezwzględne odchylenie prognozy od wartości rzeczywistych.



Rys. 3. Przykład prognozy z wykorzystaniem opracowanego modelu SARIMA dla kierunku od miasta

Źródło: opracowanie własne.

Analogicznie dla kierunku do miasta, niech $\{y_t\}_{1 \leq t \leq 24 \cdot 366}$ oznacza ciąg określający liczbę samochodów w ciągu godziny, dla którego identyfikujemy za pomocą modeli klasy SARIMA(5,0,1)(2,1,0)[24] postaci (Rys. 4):

$$(1 - 1,7545F_- + 0,954F_-^2 - 0,0922F_-^3 + 0,0122F_-^4 - 0,0502F_-^5)(1 + 0,3368F_-^{24} + 0,2944F_-^{48})(1 - F_-^{24})y_t = (1 + 0,7292F_-)\varepsilon_t$$

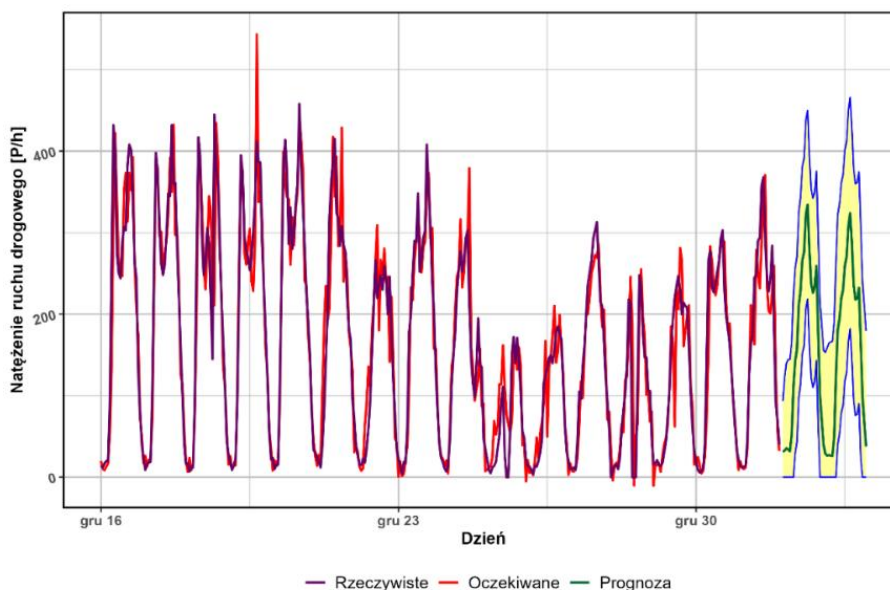
gdzie $\{\varepsilon_t\}_{1 \leq t \leq 24 \cdot 366}$ jest ciągiem niezależnych zmiennych losowych o rozkładzie normalnym $N(0,1457)$.

Przedstawiona struktura kierunku od miasta, charakteryzuje się niemal identycznymi dwoma pierwszymi współczynnikami (1,7545 i 0,954), co wskazuje na podobną dynamikę krótkookresową do kierunku do miasta. Różnice w wyższych opóźnieniach (−0,0922; 0,0122; −0,0502) sugerują nieco odmienne wzorce w dłuższym horyzoncie czasowym. Z kolei współczynniki sezonowe (0,3368 i 0,2944) są nieznacznie niższe niż dla kierunku od miasta, ale nadal istotne, wskazując na silną dobową cykliczność. Wartość współczynnika średniej ruchomej (MA) jest 0,7292 i jest nieco wyższa niż dla kierunku przeciwnego, sugerując silniejszy wpływ niedawnych błędów prognozowania.

Wariancja błędu $\sigma^2 = 1457$ jest wyraźnie niższa niż dla kierunku od miasta (różnica o ~33%), co wskazuje na bardziej przewidywalny wzorec ruchu w kierunku do miasta. Odchylenie standardowe zmiennej losowej E_t wynosi 38,17. Dokładność prognozy:

- RMSE = 38,09 pojazdów/godz.: średnia wielkość błędu wartości rzeczywistych a prognozowanymi jest niższa niż dla kierunku od miasta;

- MAE = 25,69 pojazdów/godz.: średnie bezwzględne odchylenie prognozy od wartości rzeczywistych, również lepsze niż dla kierunku przeciwnego.



Rys. 4. Przykład prognozy z wykorzystaniem opracowanego modelu SARIMA dla kierunku do miasta

Źródło: opracowanie własne.

Oba kierunki zostały opisane modelem SARIMA(5,0,1)(2,1,0), co oznacza:

- część niesezonowo: AR(5) – 5 opóźnień autoregresyjnych, brak różnicowania ($d=0$), MA(1) – 1 opóźnienie średniej ruchomej;
- część sezonowa: SAR(2) – 2 sezonowe opóźnienia autoregresyjne, różnicowanie sezonowe rzędu 1 ($D=1$), brak sezonowej średniej ruchomej;
- okres sezonowości: 24 godziny – co odzwierciedla dobowy cykl natężenia ruchu.

Obecność różnicowania sezonowego ($D=1$) wskazuje, że dane wykazują niestacjonarność sezonową, mianowicie zmiany spowodowane m.in. dniem tygodnia, miesiącem i uwarunkowaniami kalendarzowymi.

Kolejnym zagadnieniem w ramach monografii przedstawionej do oceny, było wykonanie modelowania rzeczywistych warunków ruchowych i scenariuszy transportowych przy wykorzystaniu oprogramowania AIMSUN. Na podstawie inwentaryzacji oraz danych udostępnionych przez zarządcę drogi, odwzorowałem wybrany ciąg uliczny od ul. Lawendów (Warszawa) do ul. Kościuszki (Marki), o długości 1684,22 metrów (Rys. 5).

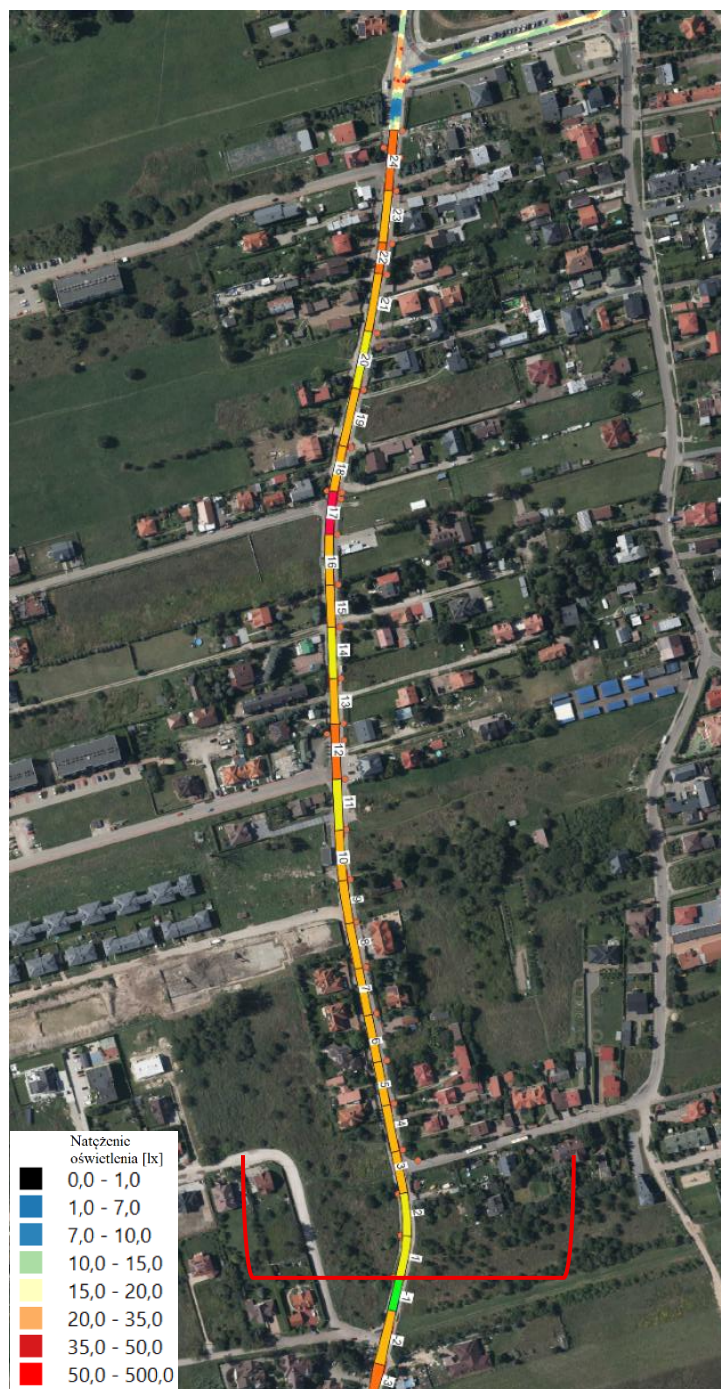


Rys. 5. Widok odtworzonego poligonu w programie AIMSUN (numer – nr pola, kolor fioletowy – detektor, kolor pomarańczowy – oprawa oświetlenia)

Źródło: opracowanie własne.

W kontekście sterownia oświetleniem zaproponowana metoda ma istotne znaczenie praktyczne, ponieważ wprowadzenie zmian związanych z redukcją mocy opraw powinno być każdorazowo poprzedzone inspekcją całej infrastruktury oświetleniowej. Aktualne prace dotyczące z określenia potencjału oszczędności energii wynikającego ze sterowania oświetleniem pomijają istotny aspekt weryfikacji rzeczywistych warunków oświetleniowych. Autorzy skupiają się głównie na analizie teoretycznych wartości wynikających z projektów oświetlenia drogi [22][23], co generuje potencjalną niespójność wynikającą z różnic związanych z odstępstwami pomiędzy założeniami projektu i realizacją terenową, np. niezainwentaryzowaniem innych sieci. Dodatkowo, przyjmując wyłącznie ramy teoretyczne projektu, nie uwzględnia się procesu eksploatacji i degradacji opraw oświetlenia. W konsekwencji opracowany algorytm sterowania może nie spełniać zakładanych poziomów oświetlenia, generując przy tym większe ryzyko zagrożeń bezpieczeństwa ruchu drogowego. W opracowanej monografii wykorzystano przedstawione do oceny osiągnięcie konstrukcyjne oraz technologiczne, którego główną przewagą technologiczną jest określenie rzeczywistych poziomów oświetlenia dla całej drogi.

Rysunki 6 przedstawiają średnią wartość natężenia oświetlenia w danym polu pomiarowym, zdefiniowaną zgodnie z standardami oświetlenia dróg. Pola o numeracji dodatkowo odnoszą się do ul. Lawendów, znajdującej się w zarządzie ZDM. Wstępna analiza uzyskanych rezultatów potwierdza konieczność przeprowadzenia inspekcji oświetlenia drogi przed wdrożeniem jakichkolwiek zmian związanych z dynamicznymi systemami sterowania oświetleniem drogowym.



Rys. 6. Średnia wartość natężenia oświetlenia w polach pomiarowych na ul. Lawendów (na rysunku zaznaczono granicę administracyjną drogi, poniżej zaznaczenia znajduje się ul. Kościuszki)

Źródło: opracowanie własne.

Większość pól (55,6%) zalicza się do klasy oświetleniowej C2, która jest typową klasą dla oświetlenia ulic zbiorczych. Rozkład klas wygląda następująco: C0 – 3 pola (5,6%), C1 – 5 pól (9,3%), C2 – 30 pól (55,6%), C3 – 15 pól (27,8%), C4 – 1 pole (1,9%). Wysokie poziomy dla pól o klasie C0 i C1 wynikają z instalacji dedykowanego oświetlenia przejść dla pieszych. Szczegółowe wyniki pomiarów z określeniem podstawowych parametrów oceny ($E_{\min}$ – luminancja minimalna, $E_{\max}$ – luminancja maksymalna, E_{avg} – luminancja

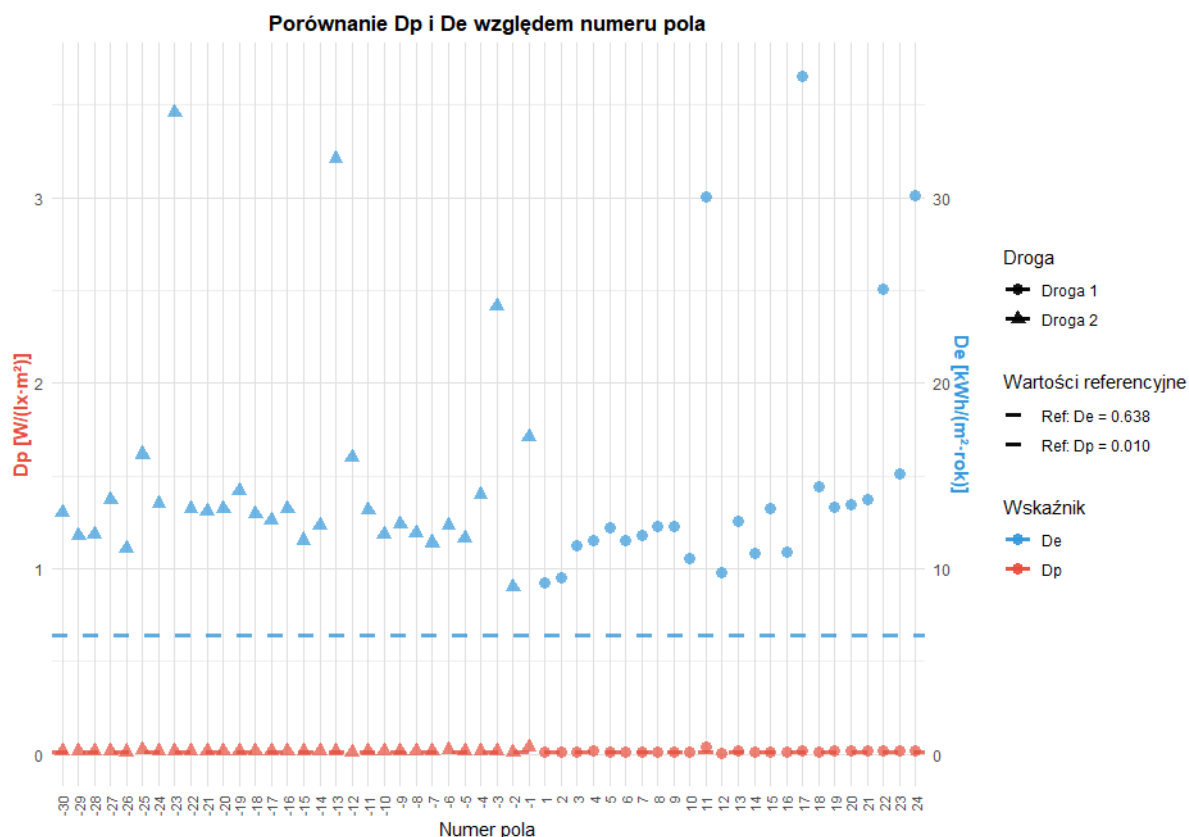
średnie, U_o – równomierność oświetlenia), przedstawiono w Tabeli 3. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na brak spójności poziomów oświetlenia w analizowanych polach, co uzasadnia zmianę paradygmatu przeprowadzenia pomiarów oświetlenia i weryfikację całej infrastruktury a nie pól przyjętych za miarodajne.

Tabela 3. Wyniki pomiarów natężenia oświetlenia dla badanego ciągu drogi

Numer pola	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	E_{avg} [lx]	U_o [-]	Liczba punktów pomiaru	Powierzchnia [m ²]	Klasa oświetlenia
1	7,68	41,3	19,34	0,4	150	177,9	C3
2	7,62	41,95	19,74	0,39	165	172,73	C3
3	7	54,33	23,41	0,3	165	172,09	C2
4	4,9	53,47	20,13	0,24	201	194,94	C2
5	9,74	52,82	23,69	0,41	585	183,07	C2
6	7,12	57,13	21,12	0,34	227	194,21	C2
7	8,06	57,09	23,84	0,34	162	190,14	C2
8	9,21	56,52	24,19	0,38	171	182,43	C2
9	8,12	55,84	24,74	0,33	162	182,61	C2
10	7,89	56,4	22,06	0,36	201	211,85	C2
11	5,86	52,64	19,93	0,29	296	215,65	C3
12	6,14	168,79	38,33	0,16	240	229,43	C1
13	8,92	50,39	22,13	0,4	168	178,83	C2
14	6,61	55,65	19,57	0,34	174	206,8	C3
15	11,56	54,57	25,18	0,46	147	168,76	C2
16	8,44	52,79	21,96	0,38	171	204,98	C2
17	11,72	192,49	53,19	0,22	141	177,42	C0
18	9,61	149,23	29,07	0,33	162	184,64	C2
19	5,74	57,4	20,28	0,28	192	231,75	C2
20	3,96	57,35	19,78	0,2	201	228,48	C3
21	4,58	69,1	20,87	0,22	201	224,49	C2
22	20,38	67,82	38,75	0,53	114	122,69	C1
23	5,42	62,21	21,25	0,26	174	203,65	C2
24	8,42	170,83	35,95	0,23	222	243,23	C1

Źródło: opracowanie własne.

Dla ul. Kościuszki znajdującej się w gminie Marki nie udało się pozyskać dokładnych danych inwentaryzacyjnych, natomiast analiza przeprowadzona w terenie oraz uzyskane poziomy oświetlenia wskazują że użyto opraw analogicznych do ul. Lawendów tj. modelu SAVA L LEDx24 8450lm 770mA MK-20D (o przedziale mocy od 41 do 77 W), a w przypadku oświetlenia dedykowanego na przejściach dla pieszych wykorzystano model URBINO/53/LED (o mocy 53 W). Na podstawie przyjętego założenia oraz danych, wyznaczono wskaźniki efektywności energetycznej dla 54 pól pomiarowych. Wysokie wartości wskaźnika D_e dla pól nr 24, 17, 12, -3, -13, -23 wynikają z zastosowanego dedykowanego oświetlenia przejść dla pieszych, co przedstawia Rys. 7.



Rys. 7. Wskaźniki efektywności energetycznej wybranego ciągu ulicznego

Źródło: opracowanie własne.

Wartości wskaźników efektywności energii oświetlenia, przyjęte w aplikacjach DIALux (rys. 25) ($D_p = 0,01$ oraz $D_e = 0,638$), są znacząco niższe od wyników rzeczywistych pomiarów terenowych. Analiza statystyczna z rzeczywistych pól pomiarowych wykazała, że praktycznie żadne pole nie osiąga tych wartości (średnie $D_p \approx 0,015$, $D_e \approx 1,5$). Różnica ta jest rezultatem kumulacji czynników praktycznych, eksploatacyjnych i metodologicznych, które powodują rozbieżności pomiędzy modelem obliczeniowym a rzeczywistością. W oprogramowaniu DIALux oraz normatywne wskaźniki efektywności bazują na warunkach idealnych:

- założenie jednolitego, czystego tła oraz braku przeszkód zakłócających rozsył strumienia świetlnego;
- symetryczna, idealna charakterystyka fotometryczna źródeł światła – w praktyce nawet nowoczesne oprawy wykazują rozproszenie promieniowania poza strefą projektową;
- stała wartość odbicia i czystości powierzchni drogi (np. dla nowych asfaltów czy bruku);
- nie uwzględniają zanieczyszczenia opraw (kurz, pył, owady), które ogranicza efektywność świetlną, powodując spadek intensywności na powierzchni drogi i nieregularność rozsyłu światła;

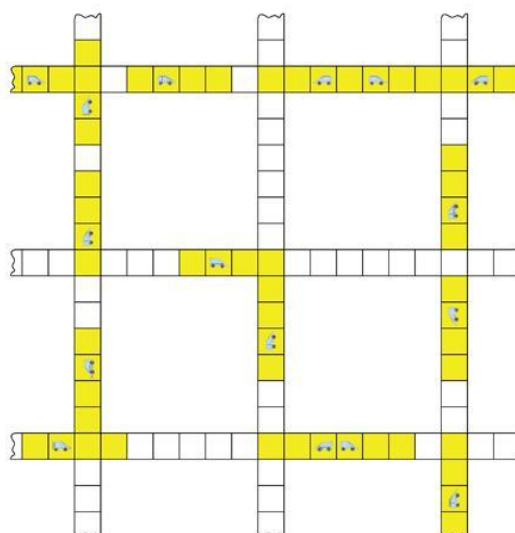
- nie uwzględniają przeszkód dla rozsyłu światła; w warunkach rzeczywistych w pasie drogowym znajdują się np. drzewa czy oznakowanie pionowe, mogące zaburzać oświetlenie.

W warunkach rzeczywistej eksploatacji założenia projektowe rzadko są w pełni spełnione, co powoduje, że uzyskiwane w praktyce wskaźniki efektywności różnią się od tych przewidywanych na etapie projektowania. Przeprowadzone pomiary terenowe potwierdzają znaczne rozbieżności pomiędzy podejściem teoretycznym, opartym wyłącznie na dokumentacji projektowej, a rzeczywistymi poziomami oświetlenia występującymi na drodze.

Na potrzeby integracji danych ruchowych z warstwą oświetlenia opracowano koncepcję wykorzystującą sześciowarstwową architekturę SLADTA (ang. *Six-Layer Architecture for Digital Twins with Aggregation*) zaproponowana przez Redelinghuys [24]. W ramach założeń wskazanej architektury każda warstwa odpowiada za konkretny aspekt funkcjonowania systemu. Warstwy 1-2 zajmują się wyłącznie zbieraniem danych fizycznych i sterowaniem urządzeniami, w warstwa 3 odpowiada za neutralną konwersję protokołów komunikacyjnych. Warstwa 4 (brama IoT) z kolei transformuje surowe dane w informacje przystosowane do serwerów, a warstwa 5 przechowuje dane i udostępnia usługi. Ostatnia, 6 warstwa zajmuje się analizą, optymalizacją i ma ułatwić podejmowanie decyzji. Przykładem zastosowania architektury jest projekt SCALS (ang. *Smart Cities Adaptive Lighting System*), który wykazał potencjał wdrażania koncepcji adaptacyjnego oświetlenia w miastach poprzez architekturę podobną do 6-warstwowej [25].

Zachodzi zatem konieczność opracowania modelu matematycznego, który umożliwiłby generowanie wielu wariantów podziału przestrzennego dla jednego odcinka o dowolnej długości. Model taki powinien zapewniać elastyczność oraz dawać możliwość skalowania do poziomu całej analizowanej sieci drogowej, co w perspektywie dalszych prac pozwala na spójny opis dowolnie dużego obszaru transportowego. Przykładem rozwiązania przedstawionego powyżej problemu jest wykorzystanie automatów komórkowych (ang. *cellular automata* CA) [26].

Głównym założeniem metody jest idea zastąpienia zbioru równań opisującego zachowanie się wielu układów fizycznych, poprzez przestrzeń komórek opisujących dany układ. Układ ten posiada jednoznacznie określone reguły interakcji między komórkami i możliwe jest jego wykorzystanie w sterowaniu np. sygnalizacją świetlną [27]. Podejście to pozwala na opracowanie modelu matematycznego fizycznego systemu, przy założeniu że czas i przestrzeń mają charakter dyskretny, przyjmując wartości z skończonego zbioru [28]. Odnosząc to założenie do sterowania oświetleniem drogi, uzyskujemy problem 1-D lub w przypadku obszaru 2-D zgodnie z Rys. 8.



Rys. 8. Idea sterowania przy użyciu automatu komórkowego dla obszaru

Źródło: opracowanie własne.

Przechodząc do formalnego zapisu matematycznej reprezentacji drogi dla potrzeb oświetlenia, definiujemy automat jako (1.1):

$$CA = (S, \Sigma, N, \sigma_i, c_0) \quad (1.1)$$

gdzie:

- S – przestrzeń komórek (ang. *Road Space*),
- Σ – zbiór możliwych stanów każdej komórki,
- N – funkcja sąsiedztwa (ang. *Neighborhood function*),
- σ_i – funkcja przejścia (ang. *Transition function / Update rules*),
- c_0 – konfiguracja początkowa (ang. *Initial configuration*).

Parametrem opisu drogi jest liczba komórek odpowiadająca liczbie pól pomiarowych, zatem przestrzeń komórek to zbiór (1.2):

$$S = \{0, 1, 2, \dots, L - 1\} \quad (1.2)$$

gdzie:

- L – liczba komórek,
 - każda komórka reprezentuje odcinek drogi równy rozstawowi opraw (typowo 25-40 m).
- W przypadku rozpatrywania algorytmu sterowania obszarem należy wskazać na pozycję komórek, które mogą być źródłem ruchu lub wskazują na istotny element infrastruktury (np. przejście dla pieszych, przejazd drogowo-kolejowy, tunel itd.). Przyjmijmy zatem, że pozycja skrzyżowania określona jest zgodnie z:

$$x_{\text{int}} \in S$$

W algorytmie sterowania duże znaczenie ma informacja o odległości pojazdu od konkretnych lokalizacji skrzyżowań i innych istotnych obszarów. Pozwala to uwzględnić w procesie sterowania klasę oświetlenia miejsca o podwyższonym poziomie ryzyka zdarzeń drogowych. Odległość komórki od x_{int} lokalizacji określona jest poprzez:

$$d_i = |i - x_{int}| \quad (1.3)$$

Zbiór stanów automatu komórkowego przyjmuje wartości dyskretne. W kontekście omawianego problemu, kluczowym pytaniem jest *Czy S_i pole wymaga załączenia oświetlenia?* Głównym wymaganiem do uzyskania prawidłowej odpowiedzi jest informacja o sposobie przemieszczania się pojazdu w czasie t , na co bezpośrednio wpływa jego prędkość. Przyjmuje się zatem, że każda komórka i w czasie t ma stan (1.4):

$$\sigma_i(t) = (n_i(t), v_i(t), l_i(t)) \quad 1.4$$

gdzie poszczególnymi komponentami są:

a) Zajętość komórki – informacja identyfikująca pojazd w danym polu pomiarowym realizowana poprzez sygnał z detektora zajętości (np. pętli indukcyjnej) lub czujnika ruchu. Możliwe są dwa stany dla opisanego komponentu (1.5):

$$n_i(t) \in \{0,1\} \quad (1.5)$$

gdzie:

$n_i(t) = 1$ – w komórce znajduje się pojazd,

$n_i(t) = 0$ – komórka pusta.

a) Prędkość poruszania się pojazdu – określa, z jaką szybkością pojazd przemieszcza się pomiędzy komórkami. Teoretycznie jest to prędkość zgodnie z przyjętymi zasadami zarządzania prędkością przez zarządcę drogi (v_{max}). Przyjmuje się możliwy zbiór rozwiązań tworzą wartości całkowite. Możliwym zbiorem rozwiązań jest (1.6):

$$v_i(t) \in V = \{0,1,2, \dots, v_{max}\} \quad (1.6)$$

b) Sterowanie oświetleniem drogi – przypisuje aktualną klasę oświetlenia drogi w oparciu o warunki ruchu. Przyjmując wymagania dla klas C, otrzymujemy możliwy zbiór rozwiązań (1.7):

$$l_i(t) \in L = \{C0, C1, C2, C3, C4, C5\} \quad (1.7)$$

lub numerycznie na potrzeby analizy (1.8):

$$l_i(t) \in \{1,2,3,4,5,6\} \quad (1.8)$$

Dla tak zdefiniowanych komponentów, zbiór możliwych stanów każdej komórki tworzy przestrzeń (1.9):

$$\Sigma = \{0,1\} \times V \times L \quad (1.9)$$

o możliwym rozmiarze przestrzeni stanów (1.10):

$$|\Sigma| = 2 \times (v_{\max}) \times 6 \quad (1.10)$$

Realizując cel sterowania oświetleniem dróg, wskazałem na możliwe przypadki testowe, które różnią się złożonością oraz możliwościami wdrożenia. Wynika to z zasobów, jakimi dysponuje zarządca infrastruktury oraz jego wiedzy na temat oświetlenia. Zestawienie przypadków testowych obejmuje więc warianty, które do wdrożenia bliźniaka cyfrowego nie potrzebują dodatkowej infrastruktury. Należy mieć na uwadze, że nawet nieznaczące usprawnienia będą kumulowane poprzez liczbę oprav oświetleniowych i mogą przynieść znaczne korzyści ekonomiczne. Przyjąłem w ramach analiz, warianty:

- I. Stały harmonogram, który zakłada redukcję oświetlenia w całym ciągu ulicznym o jedną klasę oświetlenia w godzinach 23:00-2:00 i 4:00-5:00, natomiast w godzinach 2:00-4:00 redukcję o dwie klasy.
- II. Stały harmonogram działania infrastruktury oświetlenia, wyznaczony na podstawie pomiarów natężenia ruchu drogowego i analizy statystycznej dla poszczególnych dni tygodnia. Założeniem jest redukcja o 1 klasę oświetlenia dla okresu, w którym średnie natężenie ruchu drogowego z okresu nocy jest poniżej kwantylu Q_{75} oraz o 2 klasy oświetlenia dla przedziałów godzinowych, w których wartość natężenia ruchu spada poniżej Q_{50} . Harmonogram jest wyznaczony na podstawie całorocznej analizy statystycznej natężenia ruchu. Przykład harmonogramu dla poniedziałków zgodnie z założeniami działania przedstawiono w Tabeli 4. W analogiczny sposób wyznaczono pozostałe dni tygodnia.

Tabela 4. Przykład harmonogramu oświetlenia dla poniedziałków zgodnie z wariantem II

godzina	styczeń	luty	marzec	kwiecień	maj	czerwiec	lipiec	sierpień	wrzesień	październik	listopad	grudzień
0.00 - 1.00	50%	50%	70%	50%	50%	50%	70%	50%	50%	50%	50%	50%
1.00 - 2.00	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
2.00 - 3.00	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
3.00 - 4.00	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
4.00 - 5.00	50%	50%	50%	50%	70%	70%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
5.00 - 6.00	50%	50%	50%	100%				100%	100%	100%	50%	50%
6.00 - 7.00	70%	70%							100%	100%	100%	100%
7.00 - 8.00	100%											

godzina	styczeń	luty	marzec	kwiecień	maj	czerwiec	lipiec	sierpień	wrzesień	październik	listopad	grudzień
15.00 - 16.00											100%	100%
16.00 - 17.00	100%										100%	100%
17.00 - 18.00	100%	100%									100%	100%
18.00 - 19.00	100%	100%	100%							100%	100%	100%
19.00 - 20.00	100%	100%	100%						100%	100%	100%	100%
20.00 - 21.00	100%	100%	100%	100%				100%	100%	100%	100%	100%
21.00 - 22.00	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
22.00 - 23.00	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	50%	70%
23.00 - 24.00	70%	70%	50%	70%	100%	100%	100%	70%	50%	50%	50%	50%

Źródło: opracowanie własne.

- III. Zmienny harmonogram, w którym klasa oświetlenia jest dobierana zgodnie z założeniami wariantu II. System jest sterowany na podstawie godzinowej predykcji wykonywanej w oparciu o model SARIMA. Wymagany jest automatyczny pomiar ruchu drogowego oraz możliwość dynamicznego sterowania infrastrukturą oświetleniową. W Tabeli 5. wyznaczono harmonogram zgodnie z predykcją modelu SARIMA dla poniedziałków.

Tabela 5. Harmonogram na podstawie prognozy modelu SARIMA dla poniedziałków zgodnie z wariantem III

godzina	styczeń	luty	marzec	kwiecień	maj	czerwiec	lipiec	sierpień	wrzesień	październik	listopad	grudzień
0.00 - 1.00	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
1.00 - 2.00	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
2.00 - 3.00	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
3.00 - 4.00	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
4.00 - 5.00	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
5.00 - 6.00	70%	100%	70%	100%				70%	50%	50%	50%	50%
6.00 - 7.00	100%	100%							100%	100%	100%	100%
7.00 - 8.00	100%											
15.00 - 16.00											100%	100%
16.00 - 17.00	100%										100%	100%
17.00 - 18.00	100%	100%									100%	100%
18.00 - 19.00	100%	100%	100%							100%	100%	100%
19.00 - 20.00	100%	100%	100%						100%	100%	100%	100%
20.00 - 21.00	100%	100%	100%	100%				100%	100%	100%	100%	100%
21.00 - 22.00	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
22.00 - 23.00	70%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	70%	70%
23.00 - 24.00	50%	50%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	70%	70%	50%	50%

Źródło: opracowanie własne.

- IV. Częściowo adaptacyjny system sterowania oświetleniem przy wykorzystaniu bliźniaka cyfrowego. System działa zgodnie z założeniami wariantu II w czasie rzeczywistym. Sterowanie odbywa się dla całej drogi, przy czym w momencie braku pojazdu na drodze, oświetlenie redukowane jest do najniższej klasy oświetlenia

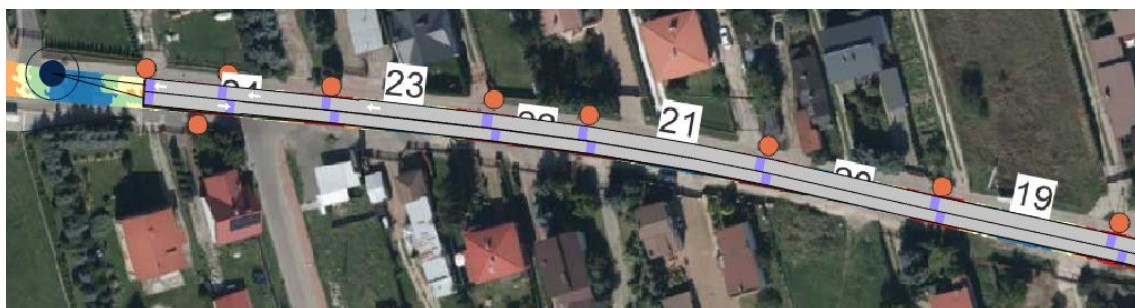
(C5). Wymagany jest automatyczny pomiar ruchu drogowego oraz czujniki na wlotach ciągu ulicznego, które pozwalają określić pojawienie i opuszczenie drogi przez pojazd. Wymagane jest stałe połączenie pomiędzy bliźniakiem cyfrowym i infrastrukturą.

- V. Pełne adaptacyjne sterowanie oświetleniem pozwalające na sterowanie pojedynczą oprawą oświetleniową w zależności od warunków ruchu. Zakłada sieć czujników, która pozwala przypisać pojazd do pola pomiarowego i na tej podstawie zaimplementować algorytm sterowania przedstawiony w poprzednim podrozdziale przez bliźniaka cyfrowego. W momencie pojawienia się pojazdu załączane są bazowe wartości oświetlenia zgodnie z założeniami w wariancie II. Załączanie oświetlenia dotyczy pola, w którym znajduje się pojazd oraz dwóch następnych pól. Przyjęta liczba pól wynika z założenia obserwacji przez kierowcę do 60 metrów, co jest tożsame z długością dwóch pól pomiarowych w analizowanym przypadku. Dla pola opuszczanego przez pojazd następuje podtrzymanie oświetlenia przez 5 sekund, co pozwala ograniczyć zbyt częste załączanie i wyłączenie opraw.

Wariant IV i V zakłada wykorzystanie bliźniaka cyfrowego do sterowania oświetleniem drogi na podstawie rzeczywistych warunków ruchu. Do tego celu odtworzono geometrię wybranego ciągu ulicznego w oprogramowaniu AIMSUN. Przyjąłem realizację symulacji dla interwału godziny z krokiem symulacji jedna sekunda. Do symulowanego scenariusza każdorazowo przygotowywano macierz OD, przypisując rzeczywiste dane natężenia ruchu drogowego w analizowanym interwale czasu. Łącznie wykonano 147 symulacji dla następujących okresów czasu:

- miesiąc {październik, listopad, grudzień};
- wszystkie dni tygodnia;
- godziny nocne od 22:00 do 5:00 (siedem przedziałów godzinowych).

W przypadku wariantu IV przeprowadzone symulacje dostarczyły informacji na temat pojawienia się pojazdu w analizowanym ciągu ulicznym. Dane pozyskiwane były z detektorów umieszczonych na obu pasach ruchu rozpoczynających skrajne pola pomiarowe do których ustawione zostały. Połączone warstwy oświetlenia (lokalizacji opraw), podziału na pola pomiarowe oraz układ detektorów przedstawiono na Rys. 9.



Rys. 9. Odtworzony droga w programie AIMSUN z układem detektorów

Źródło: opracowanie własne.

W wyniku przeprowadzonych symulacji uzyskano znaczniki czasu (ang. *timestamp*) związane z pojawieniem się pojazdu na drodze w zależności od kierunku (wartość 1 oznacza pojawienie się pojazdu) (Tabela. 6).

Tabela. 6. Przykładowa ramka danych dla symulacji wariantu IV

Godzina	Kierunek od Miasta		Kierunek do Miasta	
	Początek drogi	Koniec drogi	Początek drogi	Koniec drogi
23:02:48	0	0	0	0
23:02:49	0	0	1	0
23:02:50	0	0	0	0
23:02:51	0	0	0	0
23:02:52	0	0	0	0
23:02:53	0	0	0	0
23:02:54	0	0	0	0
23:02:55	0	0	0	0
23:02:56	0	1	0	0
23:02:57	0	0	1	0
23:02:58	0	0	0	0
23:02:59	0	0	0	0
23:03:00	0	0	0	0
23:03:01	0	0	0	0

Źródło: opracowanie własne.

Pozwoliło to na obliczenie luk czasowych, w których można maksymalnie zredukować moc oprav z uwagi na brak samochodów na drodze. Szczegółowe wyniki przedstawiające średnią wartość luk czasowych w danym dniu tygodnia z podziałem na miesiące i godziny przedstawiono w Tabeli 7. Należy zwrócić uwagę, że liczba dni tygodnia jest różna w zależności od miesiąca (analizowano rok 2024), co może powodować znaczne różnice pomiędzy powstałymi lukami czasowymi. Przykładowo, w październiku środa występowała pięć razy, a w listopadzie i grudniu po cztery.

Tabela. 7. Luki czasowe bez samochodów na drodze dla symulacji wariantu IV

Dzień tygodnia	Miesiąc	0:00-1:00	1:00-2:00	2:00-3:00	3:00-4:00	4:00-5:00	22:00-23:00	23:00-0:00	suma
		luki czasowe [minuty]							
poniedziałek	październik	18,51252	67,892	90,0034	115,884	61,35511	1,642432	18,73789	374,0274
	listopad	15,72359	66,94833	90,01873	116,0983	138,6345	2,287652	11,66986	441,381
	grudzień	47,27383	99,17575	81,645	95,3125	86,615	2,06	18,84836	430,9304
wtorek	październik	133,167	163,4473	162,9555	162,3282	84,25927	2,279561	6,37503	714,8119
	listopad	159,9108	207,8683	197,6107	208,2657	177,8628	4,40995	12,20185	968,1301
	grudzień	88,65083	137,5394	215,9674	145,7276	136,8013	0,91843	9,332008	734,9369
środa	październik	123,6338	232,9743	190,818	228,3173	126,5348	1,000247	15,34993	918,6283
	listopad	82,58053	112,5243	158,7513	127,6362	59,37637	1,578399	16,64329	559,0903
	grudzień	55,70452	108,6727	180,6492	124,4795	124,4795	0,770489	4,354801	599,1107
czwartek	październik	108,1977	160,3047	183,6336	230,3739	135,5397	1,288075	3,646069	822,9836
	listopad	95,58973	178,6503	150,1478	171,8343	148,5539	1,339479	4,581712	750,6971
	grudzień	77,70867	65,20958	189,3737	161,7828	146,3409	1,435672	3,055698	644,907
piątek	październik	77,92487	173,6369	170,5888	136,3145	84,7874	0,552733	2,076203	645,8814
	listopad	70,16973	103,439	151,4816	156,5837	102,9508	1,698236	2,603263	588,9262
	grudzień	88,37447	68,32987	174,292	99,79427	116,7662	0,34808	1,473648	549,3785
sobota	październik	12,31079	21,86309	107,6369	111,7471	111,7471	1,433131	3,572792	370,3109
	listopad	14,32307	59,19283	137,3866	137,3866	138,262	1,795423	2,499033	490,8455
	grudzień	8,327278	9,833453	83,7162	102,0177	123,5726	0	4,908288	332,3755
niedziela	październik	2,959901	13,36486	15,72413	82,86133	115,9185	10,17738	15,133	256,1391
	listopad	2,404709	22,03867	81,0572	67,86787	69,97713	6,299967	10,31078	259,9563
	grudzień	8,195996	44,20523	34,88218	120,8648	152,1703	9,704903	18,32746	388,3509

Źródło: opracowanie własne.

Najdłuższy okres występowania luk czasowych i potencjału oszczędności uzyskano dla października (około 68,4 godzin). Uwzględniając stosunek potencjalnej redukcji poziomu oświetlenia do liczby analizowanych godzin, najlepszy wynik uzyskano w listopadzie – około 32,2% tego okresu pozwalało na pracę oświetlenia w najniższej klasie.

W wyniku analizy otrzymałem zestawienie o sumarycznym czasie luk czasowych dla każdego typu dnia w miesiącu (Tabela 8). Przykładowo dla poniedziałków w październiku (cztery dni) otrzymano średnio 6776,66 minut świecenia instalacji na 1680 minut analizowanego scenariusza (4 dni x 7 godzin). W Tabeli 40. przedstawiono dane w przedziałach czasowych. Dla pola 24, które rozpoczyna analizowany odcinek drogi, widoczna jest różnica (większa) w luce czasowej. Wynika to z uproszczenia związanego z działaniem oświetlenia, gdy pojazd pojawia się na drodze (kierunek od miasta), a nie jak w pozostałych przypadkach na około 60 metrów od pola. Wskazane uproszczenie dotyczy również pola nr 23, które działa od momentu pojawienia się pojazdu w polu 24, czyli na około 30 metrów od powierzchni oświetlanej.

Tabela 8. Okres występowania luk czasowych w minutach dla poszczególnych pól pomiarowych

Nr pola	0:00-1:00	1:00-2:00	2:00-3:00	3:00-4:00	4:00-5:00	22:00-23:00	23:00-0:00	Suma
1	126,5078	159,9465	174,4876	186,1776	168,7563	33,69934	110,6016	960,1767
2	126,8826	160,2005	174,6901	186,3606	169,0119	34,50119	111,0671	962,714
3	127,3681	160,4692	174,8714	186,6283	169,4612	36,24236	111,8924	966,9329
4	128,6846	161,2485	175,4311	187,3283	170,58	40,3725	113,9431	977,5881
5	129,012	161,6128	175,7989	187,416	170,5244	39,41635	113,8255	977,6059
6	130,2327	162,7044	176,8127	187,878	170,8393	38,95306	114,3685	981,7886
7	128,3837	161,5872	175,9962	186,9063	169,3121	33,41472	111,5714	967,1716
8	128,8022	161,69	175,9798	187,2023	169,9516	36,41415	112,7569	972,797
9	126,8901	160,0844	174,5315	186,4257	169,2545	35,92789	111,5228	964,6368
10	128,6158	161,3503	175,593	187,2194	170,2423	38,49781	113,3109	974,8296
11	129,0479	161,6174	175,7918	187,4435	170,5875	39,72248	113,9426	978,1532
12	130,0353	162,3714	176,4389	187,8826	171,0947	40,84813	114,8566	983,5276
13	130,5319	162,7645	176,783	188,0964	171,3227	41,25325	115,2654	986,0172
14	130,5332	162,8538	176,9023	188,0522	171,1503	40,22626	114,9411	984,6592
15	130,1695	162,6853	176,8104	187,8351	170,7495	38,54087	114,2024	980,9931
16	129,8581	162,3929	176,5332	187,7243	170,6965	38,82102	114,1151	980,1411
17	130,0015	162,2795	176,3281	187,9011	171,2069	41,57899	115,0688	984,3649
18	129,7937	162,2195	176,3244	187,7585	170,9066	40,19239	114,5126	981,7077
19	130,9943	163,1908	177,1842	188,2649	171,4167	40,92798	115,4237	987,4027
20	129,154	162,0524	176,3361	187,3112	169,9486	35,72392	112,7372	973,2634
21	129,5658	162,3008	176,5174	187,5278	170,2896	36,96255	113,3619	976,5259
22	127,4729	160,64	175,0617	186,6289	169,3374	35,30617	111,6554	966,1025
23	143,4303	169,2493	180,7241	195,538	184,5375	95,10612	139,5933	1108,179
24	158,624	177,2232	185,8158	204,134	199,4481	154,6455	167,0174	1246,908

Źródło: opracowanie własne.

Analogicznie wyznaczono dane dla pozostałych dni tygodnia oraz miesięcy w danych przedziałach czasowych. Tabela 9. przedstawia sumaryczny czas świecenia opraw przypisanych do danego pola pomiarowego w poszczególnych miesiącach, dla wybranego dnia tygodnia.

Tabela 9. Przykład wyników okresów luk czasowych w minutach dla pól przypisanych do ul. Lawendów w miesiącu październik

Październik							
Numer pola	poniedziałek	wtorek	środa	czwartek	piątek	sobota	niedziela
1	960,1767	1083,772	1059,051	1038,687	967,4578	785,5834	794,474
2	962,714	1085,046	1060,413	1040,118	969,15	787,0546	797,6241
3	966,9329	1087,266	1062,779	1042,588	972,1087	789,5579	803,0191
4	977,5881	1092,807	1068,687	1048,766	979,4861	795,8428	816,5416
5	977,6059	1092,577	1068,456	1048,563	979,1561	795,7187	816,1934
6	981,7886	1094,234	1070,253	1050,528	981,3111	797,8943	820,6988
7	967,1716	1086,665	1062,18	1042,081	971,2359	789,2904	802,1974
8	972,797	1089,794	1065,504	1045,524	975,4219	792,7231	809,652
9	964,6368	1086,215	1061,649	1041,383	970,7235	788,2841	800,3268
10	974,8296	1091,172	1066,956	1046,988	977,2898	794,1031	812,7306
11	978,1532	1092,885	1068,783	1048,902	979,5684	796,0546	816,9241
12	983,5276	1095,441	1071,523	1051,806	982,9492	799,0908	823,376
13	986,0172	1096,597	1072,764	1053,126	984,4739	800,481	826,3199
14	984,6592	1095,766	1071,885	1052,228	983,3557	799,61	824,4037
15	980,9931	1093,794	1069,786	1050,044	980,7234	797,4106	819,6493
16	980,1411	1093,503	1069,467	1049,685	980,3505	796,9934	818,8031
17	984,3649	1095,978	1072,089	1052,382	983,6733	799,6415	824,5951
18	981,7077	1094,507	1070,527	1050,762	981,7068	798,0243	821,0855
19	987,4027	1097,103	1073,316	1053,739	985,1266	801,1776	827,7461
20	973,2634	1089,82	1065,545	1045,601	975,4352	792,8764	809,9084
21	976,5259	1091,51	1067,348	1047,487	977,6849	794,7971	814,0389
22	966,1025	1086,682	1062,164	1041,97	971,3153	788,9822	801,7286
23	1108,179	1161,733	1142,13	1125,397	1071,367	902,1176	983,8595
24	1246,908	1277,118	1251,703	1226,034	1192,715	1069,926	1162,142

Źródło: opracowanie własne.

W Tabeli 10. przedstawiłem porównanie działania systemu sterowania w wariancie IV i V. Do właściwego zestawienia danych przyjęto określenie procentowego okresu działania instalacji oświetleniowej, aby zniwelować różnicę jednego dnia symulacji pomiędzy listopadem, a październikiem i grudniem.

Tabela 10. Porównanie działania instalacji dla wariantu IV i V

miesiąc	nominalna liczba godzin w miesiącu	Wariant V		Wariant IV	
		Wł.	Wyt.	Wł.	Wyt.
październik	217	7,44%	92,56%	68,49%	31,51%
listopad	210	7,80%	92,20%	67,79%	32,21%
grudzień	217	7,18%	92,82%	71,74%	28,26%

Źródło: opracowanie własne.

Wdrożenie wariantu V przekłada się na większy potencjał oszczędności energii elektrycznej. Dla października różnica to około 36 godzin, dla listopada i grudnia odpowiednio 31 i 47 godzin. Pokazuje to znaczną przewagę pełnej adaptacji w przypadku okresów o większym natężeniu ruchu drogowego (grudzień vs październik/listopad).

Na podstawie danych w Tabeli 7 i 8, które odnoszą się do okresów luk czasowych bez pojazdu na drodze (Tabela 7) lub w danym polu pomiarowym (Tabela 8), sporządziłem zestawienie średniego wykorzystania mocy oprawy względem potencjalnego

maksymalnego czasu działania w analizowanym okresie (Tabela 11). W przypadku wariantów I–IV , średnia wykorzystana moc jest niezależna od pola pomiarowego. Dla wariantu V zauważalne są nieznaczne różnice dla poszczególnych pól, co związane jest z różną geometrią obszarów. W Tabeli 9, oprócz zdefiniowanych wcześniej wariantów uwzględniono dodatkowe dla zobrazowania efektywności sterowania oświetleniem przy użyciu bliźniaka cyfrowego w sposób w pełni adaptacyjny. Rozbudowano wariant IV i V o dodatkowy scenariusz :

- a) wyłączenia instalacji oświetlenia w przypadku braku pojazdów na drodze / analizowanym polu.
- b) założenie utrzymania 15% mocy w celu zapewnienia spełnienia minimalnej klasy oświetlenia na drodze.

Tabela 11. Zestawienie mocy instalacji oświetlenia w zależności od wariantu sterowania

Numer pola	Wariant I	Wariant II	Wariant III	Wariant IVa	Wariant IVb	Wariant Va	Wariant Vb
1	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,3428%	18,2419%
2	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,3512%	18,2481%
3	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,3656%	18,2589%
4	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,4016%	18,2858%
5	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,4006%	18,2851%
6	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,4126%	18,2940%
7	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,3633%	18,2572%
8	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,3832%	18,2720%
9	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,3584%	18,2535%
10	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,3914%	18,2782%
11	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,4026%	18,2865%
12	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,4197%	18,2993%
13	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,4276%	18,3052%
14	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,4225%	18,3014%
15	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,4098%	18,2919%
16	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,4076%	18,2902%
17	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,4230%	18,3017%
18	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,4137%	18,2948%
19	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,4314%	18,3080%
20	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,3839%	18,2725%
21	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,3949%	18,2807%
22	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,3621%	18,2563%
23	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	4,8658%	18,6323%
24	68,5714%	59,1705%	58,2488%	40,5251%	45,2518%	5,4707%	19,0839%
średnia	69%	59%	58%	41%	45%	4%	18%

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane dane posłużyły do określenia potencjału redukcji mocy wykorzystywanej przez instalację oświetlenia drogowego dla wcześniej zdefiniowanych wariantów sterowania. Do analizy przyjęto czas działania instalacji w godzinach od 22:00 do 5:00, który odpowiada założonemu okresowi dla przeprowadzonych symulacji. W skali roku odpowiada to maksymalnemu okres działania instalacji 2555 godzin. Rozpatrując zatem poligon badawczy i maksymalną moc 3760W dla instalacji oświetlenia, otrzymujemy zużycie energii na poziomie 9,6068 MWh w skali roku w przypadku nieuwzględnienia sterowania oświetleniem (wariant I). W Tabeli 12. przedstawiono kształtowanie się

oszczędności w skali roku w zależności od przyjętego wariantu. Założono opłatę za energię elektryczną, zgodnie z podaną przez ZDM Warszawa stawką 1285 zł za 1MWh [1].

Tabela 12. Roczny koszt utrzymania instalacji w zależności od wariantu sterowania

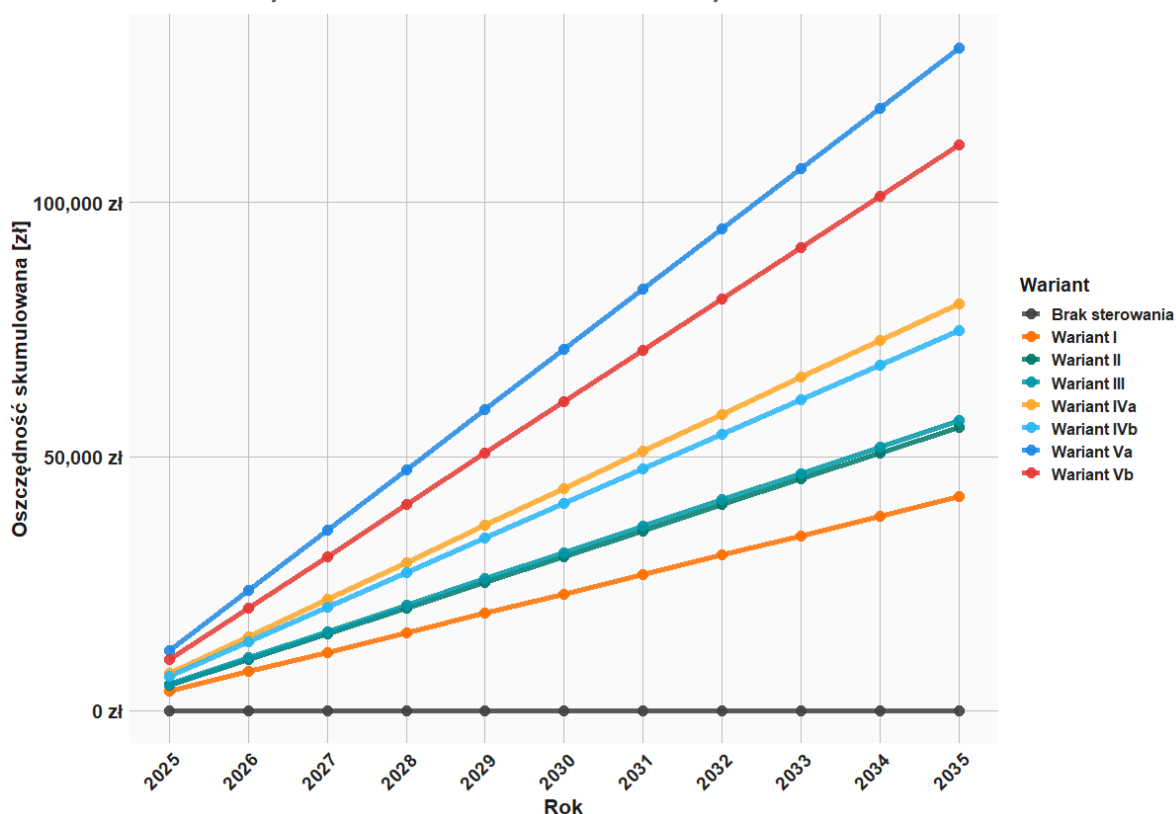
Wariant	Moc [%]	Roczny koszt [zł]	Oszczędność [zł/rok]
Brak sterowania	100%	12344,74	0,00
Wariant I	69%	8517,87	3826,87
Wariant II	59%	7283,40	5061,34
Wariant III	58%	7159,95	5184,79
Wariant IVa	41%	5061,34	7283,40
Wariant IVb	45%	5555,13	6789,61
Wariant Va	4%	493,79	11850,95
Wariant Vb	18%	2222,05	10122,69

Źródło: opracowanie własne.

W perspektywie długofalowego działania poszczególnych wariantów sterowania oświetleniem na wybranym ciągu ulicznym, można wskazać na istotny potencjał oszczędności generowanych przez adaptacyjne systemy sterowania oświetleniem. Przy założeniu niezmienną się ceny energii na Rys. 10 przedstawiono jak kształtuje się zysk na przestrzeni 10 lat.

Skumulowane oszczędności w latach 2025-2035

Porównanie wszystkich 8 wariantów sterowania oświetleniem ulicznym



Rys. 10. Prognoza korzyści ekonomicznych związanych z wprowadzeniem poszczególnych wariantów sterowania oświetleniem drogi

Źródło: opracowanie własne.

W kontekście potencjału dekarbonizacji zaproponowanych wariantów sterowania, należy wykorzystać wskaźniki emisji, które są związane z wykorzystywanymi źródłami energii dla danego kraju. W Polsce jednostką odpowiedzialną za przygotowanie informacji określającej zakres emisji poszczególnych zanieczyszczeń przypadających na jednostkę produkcji energii elektrycznej jest Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE) (Tabela 13) [29].

Tabela 13. Wskaźniki emisji w [kg/MWh] dla odbiorców końcowych energii elektrycznej

Emisja	[kg/MWh]
Dwutlenek węgla (CO ₂)	597
Tlenki azotu (NOX/NO ₂)	0,392
Pył całkowity	0,014
Tlenki siarki (SOX/SO ₂)	0,363
Tlenek węgla (CO)	0,222

Źródło: opracowano na podstawie [29].

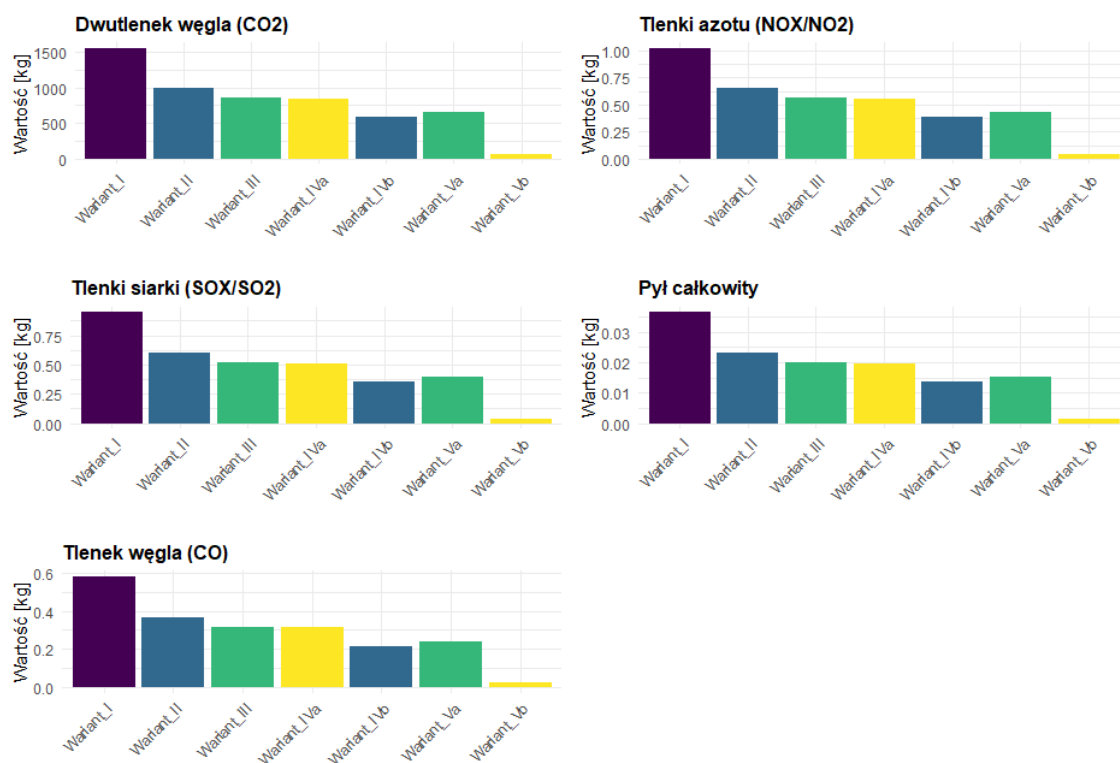
Opracowane dane pozwalają na ocenę proponowanych rozwiązań zgodnie z krajowymi uwarunkowaniami. Odnosząc je do opracowanych wariantów sterowania, uzyskalem wielkość poszczególnych emisji zgodnie z Tabelą 14.

Tabela 14. Wielkość emisji gazów szkodliwych dla poszczególnych wariantów sterowania oświetleniem

Emisja	Wariant I	Wariant II	Wariant III	Wariant IVa	Wariant IVb	Wariant Va	Wariant Vb
Dwutlenek węgla (CO ₂)	1557,413	991,0047	855,1412	841,8212	585,6743	653,9854	64,0813
Tlenki azotu (NOX/NO ₂)	1,0226	0,6507	0,5615	0,5528	0,3846	0,4294	0,0421
Pył całkowity	0,0365	0,0232	0,0201	0,0197	0,0137	0,0153	0,0015
Tlenki siarki (SOX/SO ₂)	0,9470	0,6026	0,5200	0,5119	0,3561	0,3976	0,0390
Tlenek węgla (CO)	0,5791	0,3685	0,3180	0,3130	0,2178	0,2431	0,0238

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane wyniki wskazują na potencjał dekarbonizacji infrastruktury oświetlenia w kontekście systemów sterowania. Brak uwzględnienia redukcji mocy opraw reprezentowany przez wariant I, przedstawia maksymalne emisje zanieczyszczeń dla analizowanego okresu działania instalacji oświetlenia. Warianty II i III związane z harmonogramami stałymi na podstawie danych statystycznych lub modeli predykcyjnych uzyskują redukcję emisji na poziomie 36–45%. W przypadku zastosowania bliźniaka cyfrowego do uproszczonego sterowania całą instalacją, poziomy redukcji emisji mieszczą się w przedziale 46–62%. Natomiast zastosowanie podejścia związanego z sterowaniem poszczególnymi oprawami oświetlenia przekłada się na potencjał dekarbonizacji rzędu 58–96%. Porównanie poszczególnych emisji w zależności od przyjętego wariantu sterowania przedstawiono na Rys. 11.



Rys. 11. Porównanie emisji gazów szkodliwych dla opracowanych wariantów sterowania.
Źródło: opracowanie własne.

Przeprowadzone analizy potwierdziły znaczne ekonomiczne i ekologiczne korzyści z wdrożenia proponowanych rozwiązań. Nawet na niewielkim terenie testowym obejmującym kilkadziesiąt opraw zaobserwowano pozytywne efekty, które można uzyskać na pozostałych drogach w zależności od natężenia ruchu drogowego. Biorąc pod uwagę skalę całej warszawskiej infrastruktury oświetlenia (ponad 120 tys. opraw), potencjał redukcji emisji i oszczędności ekonomicznych nabiera znacznie większego znaczenia. Ujawnia to dotychczas niewykorzystany potencjał modernizacji systemów oświetlenia w aspekcie dla dekarbonizacji transportu.

Opisana koncepcja dynamicznego sterowania oświetleniem oraz wstępne wyniki prac zostały przedstawione podczas międzynarodowych konferencji naukowych:

- Międzynarodowa Konferencja Naukowa Transport XXI Wieku, Ryn 2-5 września 2025r. Tytuł wystąpienia: "Dynamic street lighting management strategy as a component of transport decarbonisation".
- 9th POLISH-GEORGIAN INTERNATIONAL SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE "TRANSPORT BRIDGE EUROPE-ASIA, Kutaisi (Gruzja) 9-11 września, 2025 r. Tytuł wystąpienia: "Using a digital twin of infrastructure to assess the decarbonisation of lighting infrastructure"
- 16th International Scientific Conference "Transbaltica 2025: Transportation Science and Technology", Wilno (Litwa) 18-19 września 2025 r. Tytuł wystąpienia: "Decarbonisation potential of road lighting infrastructure".

Podstawowym ograniczeniem przedstawionej do oceny monografii było nieuwzględnienie ruchu pieszego, który w odróżnieniu od pojazdu nie posiada własnego źródła światła umożliwiającego bezpieczne przemieszczanie się. Fakt ten wymaga uzupełnienia opracowanej koncepcji o dodatkową warstwę czujników wykrywających niechronionych uczestników ruchu drogowego, pieszych i rowerzystów, stanowiących podstawę aktywacji opraw oświetleniowych. Wprowadza to ograniczenie w stosowaniu wariantów sterowania polegających na całkowitym wyłączeniu oświetlenia w przypadku braku pojazdów. Konieczne jest zatem utrzymanie minimalnych parametrów oświetleniowych do oświetlenia chodników.

Przyszłe prace będą skupiać się nad opracowaniem standaryzacji, która umożliwi wdrożenie adaptacyjnego sterowania oświetleniem. Niezbędnym jest opracowanie protokołów gromadzenia danych i oceny ich wydajności, jak również określenie ram cyberbezpieczeństwa dla projektowanych rozwiązań technicznych. Dynamiczny rozwój technologiczny i wzrost cen energii elektrycznej sprawiają, że przedstawiona koncepcja sterowania jest uzasadniona ekonomicznie i gotowa do wdrożenia. Istotne zatem jest rozpoczęcie prac związanych m.in. z opracowaniem wytycznym dla dróg publicznych w ramach interdyscyplinarnego zespołu badawczego, mającego na celu przygotowanie zarządców dróg do zmiany paradygmatu w stosowanych obecnie formach sterowania infrastrukturą oświetleniową.

Podsumowując istotnym wkładem w rozwój dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, opisanych w przedmiotowej do oceny monografii, jest:

- Opracowanie koncepcji tworzenia harmonogramów sterowania oświetleniem dróg na podstawie analizy statystycznej natężenia ruchu drogowego.
- Opracowanie koncepcji tworzenia harmonogramów sterowania oświetleniem dróg na podstawie modeli predykcyjnych natężenia ruchu drogowego przy użyciu modelu SARIMA.
- Opracowanie koncepcji infrastruktury cyfrowego bliźniaka integrującego dane oświetlenia z natężeniem pól z danymi o natężeniu ruchu drogowym.
- Opracowanie formalnego zapisu algorytmu sterowania dynamicznego oświetleniem dróg dla pól zdefiniowanych zgodnie z standardami oświetlenia przy użyciu automatów komórkowych.
- Opracowanie metody sterowania oświetlenia drogą w zależności od natężenia ruchu drogowego w polu pomiarowym zgodnie z wymaganiami normy oświetlenia dróg PN-EN 13201-2016 przy użyciu bliźniaka cyfrowego infrastruktury.

4.3.3 Opis cyklu powiązanych tematycznie publikacji naukowych

Cel naukowy poruszony w cyklu powiązanych tematycznie publikacji naukowych, które zostały przedstawione do oceny, są zagadnienia badań oświetlenia dróg i elementów emitujących światło w otoczeniu drogi, uwzględniając:

- Weryfikację narzędzi pomiarowych do wykonania pomiarów oświetlenia dróg.

- Opracowanie koncepcji mobilnych pomiarów natężenia oświetlenia, które umożliwiają szybką, efektywną i nieszkodliwą dla przepływu ruchu ocenę parametrów oświetlenia całych odcinków ulic bez konieczności zamknięcia drogi, pozwalają na szczegółowe mapowanie efektywności energetycznej dzielnic lub całych miast poprzez integrację z systemami GIS i dokumentacją infrastruktury, oraz stanowią praktyczne narzędzie do identyfikacji sekcji wymagających modernizacji, redukcji kosztów eksploatacyjnych, zwiększenia bezpieczeństwa ruchu.
- Walidację metody w kontekście oceny efektywności energetycznej oświetlenia dróg.
- Weryfikacja zagrożeń wynikających z lokalizowania reklam świetlnych w polu obserwacji kierowcy w zależności od typu pojazdu.
- Opracowanie parametrów geometrycznych, fotometrycznych i lokalizacyjnych, które wpływają na dyskomfort uczestników ruchu drogowego.
- Opracowanie metodyki pomiaru oświetlenia emitowanego przez elementy niewiązane z funkcjonowaniem drogi oraz określenie ich wpływu na kierującego pojazdem.
- Opracowanie procedury pomiaru oświetlenia emitowanego przez elementy niewiązane z funkcjonowaniem drogi dla zarządców infrastruktury.
- Opracowanie narzędzia oceny reklam świetlnych na dyskomfort uczestników ruchu drogowego.

Tematyka ta jest podejmowana przeze mnie od momentu rozpoczęcia pracy naukowej. Jako cele cząstkowe wskazałem:

- Określenie wpływu parametrów geometrycznych reklam na rozpraszanie uwagi kierowcy.
- Kryteria instalowania reklam świetlnych, przegląd wymagań prawnych w kraju i zagranicą.
- Opracowanie metodyki pomiaru luminancji powierzchni nośnika reklamowego emitującego światło.
- Pomiary luminancji reklam świetlnych.
- Analiza emisji nośników reklamowych.
- Opracowanie procedury pomiarów oświetlenia nośników reklamowych.
- Opracowanie narzędzia oceny dyskomfortu kierowcy z zastosowaniem uczenia maszynowego.
- Zagadnienia bezpieczeństwa i wymagania w zakresie oświetlenia dróg.
- Ustalenie klas iluminacyjnej jezdni z wykorzystaniem alternatywnych narzędzi pomiarowych.
- Modelowanie zmian powierzchni pomiarowej oświetlenia.
- Ocenę efektywności energetycznej oświetlenia ulicznego przy użyciu mobilnego systemu pomiarowego.

— Budowę systemu pomiarowego z GPS RTK do sterowania oświetleniem ulicznym. Na podstawie przeprowadzonej literatury dotyczącej oddziaływania światła obecnego na kierującego oraz metod pomiaru oświetlania dróg stwierdziłem brak:

- Efektywnych metod pomiaru oświetlenia światła emitowanego w kierunku kierującego, które może powodować zjawisko olśnienia lub zagrożenia bezpieczeństwa ruchu drogowego.
- Brak procedury pomiaru oświetlenia ww. elementów niezwiązanych z potrzebami drogi.
- Brak metod pomiaru oświetlenia dróg, które umożliwiają weryfikację stanu oświetlania dla całego ciągu ulicznego, wraz z oceną efektywności energetycznej zastosowanych rozwiązań.

Pierwszym problemem badawczym, który był przeze mnie rozpatrywany w ramach jego pracy naukowej były pomiary oświetlenia reklam świetlnych i ich oddziaływania na kierującego pojazdem. Badania te zostały zaprezentowane w publikacjach [2], [4], [7],[10] (patrz podrozdział 4.2). Przedstawione do oceny rezultaty związane są z moim udziałem w projekcie „Wpływ reklam na poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego”, umowa numer: DZP/RID-I-33/4/NCBR/2016 (Rozwój Innowacji Drogowych), finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną, w charakterze wykonawcy. Zakres podjętych prac obejmował opracowanie metodyki pomiaru parametrów fotometrycznych reklam. Opracowana metodyka pozwala uzyskiwać porównywalne wyniki niezależnie od zespołu wykonującego pomiary oraz zastosowanego sprzętu pomiarowego. Praca wypełniła krytyczną lukę w literaturze naukowej i regulacjach prawnych, pomimo że polska ustawa z 2015 roku definiowała maksymalne wartości luminancji dla reklam (4000 cd/m^2 w dzień i 600 cd/m^2 w nocy w obszarze zabudowanym), nie określono precyzyjnie metodyki ich pomiaru. Opracowana metodyka została walidowana i wdrożona w warunkach rzeczywistych [4]. Głównym osiągnięciem było przeprowadzenie kompleksowych pomiarów fotometrycznych i geometrycznych dla 230 reklam zlokalizowanych w trzech różnych regionach Polski (trasie Gdańsk-Tczew, Warszawa-Marki i Łomianki) zgodnie z metodyką [2]. Pozwoliło to na zebranie wiarygodnych danych empirycznych o rzeczywistych poziomach parametrów fotometrycznych obserwowanych z pozycji kierowcy. Kluczowa obserwacja z analizy danych pomiarowych wskazuje, że mimo wartości maksymalnej luminancji poniżej 250 cd/m^2 (znacznie poniżej limitów 600 cd/m^2 w nocy w terenie zabudowanym i 400 cd/m^2 poza nim, określonych w ustawie o ochronie krajobrazu), niektóre nośniki reklamowe stanowiły zagrożenie dla kierowców ze względu na wysoki kontrast luminancji względem ciemnego otoczenia oraz dużą wielkość kątową obiektu. Wykonałem wraz z współautorem zaproponował wprowadzenie bardziej precyzyjnych wytycznych uwzględniających nie tylko maksymalną luminancję, ale także parametry geometryczne (wielkość powierzchni, kąt ustawienia względem drogi) oraz warunki oświetlenia tła (luminancję otoczenia). Praca jednoznacznie dowiodła, że skuteczne ograniczenie negatywnego wpływu reklam

na bezpieczeństwo ruchu wymaga zintegrowanego podejścia łączącego parametry fotometryczne, geometryczne i lokalizacyjne, a nie wyłącznie limitowanie maksymalnej luminancji. Indywidualny wkład w realizację badań można ocenić na 50%. Opisane efekty badań zostały przedstawiony w postaci współautorskich artykułów [2][4], które powstawał w zespole naukowców z Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (Marcin Chrzanowicz) oraz Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej (Piotr Jaskowski, Piotr Tomczuk). Wyniki prac zostały przedstawione na:

- Międzynarodowa Konferencja Naukowa Transportu XXI Wieku, Arłamów, 30 sierpnia – 2 września 2016 r.,
- IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna Systemy Logistyczne Teoria i Praktyka, Jachranka, 4-7 września 2017 r.,
- XII Międzynarodowa Konferencja Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego GAMBIT 2018 „Rozwój innowacji drogowych na rzecz bezpieczeństwa – perspektywa krajowa i regionalna”, Gdańsk, 12-13 kwietnia 2018 r.

Opracowana metodyka [2] oraz jej weryfikacja [4], umożliwiły na opracowanie procedury pomiaru luminancji reklam świetlnych [7]. W ramach której przedstawiono kompleksowe wytyczne związane z przygotowaniem i przeprowadzeniem pomiaru, co umożliwia jej wykorzystanie przez zarządców infrastruktury. Analiza wyników badania dowiodła konieczność rozpatrywania kontrastu luminancji (poza wyłącznie maksymalną luminancją emisji), która jest mocno związana z otoczeniem reklamy. Zaproponowano wprowadzenie zróżnicowanych limitów luminancji w zależności od strefy zabudowania, rekomendując wyższe limity dla obszarów już oświetlonych, a niższe dla terenów o niskiej luminancji tła. Wkładem badań w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria lądowa, geodezja i transportu było opracowanie procedury pomiaru parametrów fotometrycznych reklam. Indywidualny wkład w realizację badań można ocenić na 33%. Opisany efekt badań został przedstawiony w postaci współautorskiego artykułu [7], który powstawał w zespole naukowców z Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej (Piotr Tomczuk, Piotr Jaskowski) oraz Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (Marcin Chrzanowicz).

Efektem końcowym problematyki oddziaływania reklam świetlnych na użytkowników dróg było opracowanie narzędzia do oceny dyskomfortu kierowcy, spowodowanej reklamą świetlną [10]. Praca zawiera kompleksową analizę danych empirycznych zebranych dla 227 reklam umieszczonych przy polskich drogach, z których wyodrębniono parametry fotometryczne (maksymalna luminancja, średnia luminancja, kontrast, oświetlenie) oraz infrastrukturalne (kategoria drogi, liczba pasów ruchu, konfiguracja drogi). Na podstawie powyższych danych opracowano i wytrenowano cztery modele klasyfikacyjne: regresji logistycznej, drzew decyzyjnych, lasów losowych i sieci neuronowych. Celem modeli jest przewidywanie dyskomfortu kierowcy na podstawie zmierzonych parametrów oświetlenia i luminancji reklam, w połączeniu z charakterystyką drogi. Wyniki badań wykazały, że sieć neuronowa osiągnęła najwyższą wydajność klasyfikacyjną z dokładnością 93,18%, czułością 96,97% i specyficznością 81,82%, przy

czym pole pod krzywą ROC (AUC) wyniosło 95,32%. Analiza ważności cech wykazała, że główne predyktory dyskomfortu kierowcy to maksymalna luminancja, kontrast luminancji i średnia luminancja reklamy, natomiast parametry infrastruktury drogowej (liczba pasów, kategoria drogi) wykazały znikomy wpływ na przewidywania. Publikacja wykazała, że algorytmy uczenia maszynowego, szczególnie sieci neuronowe, pozwalają na efektywną, obiektywną ocenę dyskomfortu kierowcy wywoływanego przez reklamy świetlne na podstawie zmierzonych parametrów fotometrycznych, stanowiąc znaczący postęp w kierunku automatyzacji i standaryzacji oceny bezpieczeństwa dla zarządców infrastruktury drogowej. Praca zaproponowała praktyczne zastosowania obejmujące integrację modeli z inteligentnymi systemami transportowymi umożliwiającymi optymalizację jasności reklam w czasie rzeczywistym, dostosowaną do bieżących warunków ruchu i oświetlenia otoczenia. Wkładem badań w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria lądowa, geodezja i transportu było opracowanie narzędzia do weryfikacji potencjalnego dyskomfortu spowodowanego reklamami zlokalizowanymi w otoczeniu drogi dla zarządców infrastruktury, na podstawie pomiarów przeprowadzonych zgodnie z procedurą [7]. Indywidualny wkład w realizację badań można ocenić na 17,5%. Opisany efekt badań został przedstawiony w postaci współautorskiego artykułu [10], który powstawał w zespole naukowców z Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej (Piotr Jaskowski, Piotr Tomczuk), Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (Marcin Chrzanowicz), Wydziału Zarządzania Politechniki Lubelskiej (Edward Kozłowski, Marta Cholewa-Wiktor) oraz Mechanical Science Institute Vilnius Gediminas Technical University (Jonas Matijošius, Artūras Kilikevičius). Praca została opracowana w ramach stażu na Gediminas Technical University.

Drugim obszar badawczy dotyczy pomiarów oświetlenia dróg. Istotnym problemem realizacji pomiarów oświetlenia jest kwestia bezpieczeństwa osób realizujących pomiar, co wymusza zamknięcie odcinka drogi na czas pomiaru. Wraz z współautorem [3] odnosi się do wyznaczania klasy luminancyjnej jezdni zgodnie z PN-EN 13201 poprzez klasyczne mierniki punktowe oraz mierniki matrycowe. Uzyskane zbliżone wyniki potwierdziły równoważność obu metod w ocenie klasy luminancyjnej. Jednocześnie wykazano istotne różnice eksploatacyjne: pomiary punktowe, mimo wysokiej dokładności i małego pola pomiarowego, są czasochłonne, mało powtarzalne (ręczne ustawianie punktów siatki) i wymagają wielogodzinnego zamknięcia odcinka drogi, podczas gdy mierniki matrycowe pozwalają uzyskać kompletną mapę luminancji w jednym lub kilku ujęciach, skracając czas zamknięcia drogi do około 10 minut. Wnioskiem pracy jest rekomendacja stosowania mierników matrycowych jako efektywnego, alternatywnego narzędzia pomiarowego w badaniach odbiorczych i kontrolnych oświetlenia drogowego, pod warunkiem zachowania wymogów kalibracyjnych i procedur normowych. Indywidualny wkład w realizację badań można ocenić na 50%. Opisany efekt badań został przedstawiony w postaci współautorskiego artykułu [6], który powstał w zespole naukowców z Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej (Piotr Jaskowski, Piotr Tomczuk). Wyniki pracy zostały przedstawione na X Międzynarodowej Konferencji

Naukowo – Technicznej Systemy Logistyczne Teoria i Praktyka w Warszawie (25 –27 czerwca 2018 r.).

Kolejnym zagadnieniem w ramach obszaru badawczego pomiaru oświetlenia dróg stanowią artykuły [5],[6]. Pierwsza z prac [5] dokonuje systematycznego przeglądu i analizy porównawczej systemów pomiarowych stosowanych do pomiaru oświetlenia na drogach, oceniając tradycyjne mierniki punktowe oraz innowacyjne, mobilne systemy pomiarowe w kontekście dokładności, efektywności czasowej i możliwości automatyzacji. Autorzy wykazali, że nowoczesne systemy mobilne umożliwiają zbieranie pełnych map parametrów oświetleniowych w znacznie krótszym czasie i przy minimalnym wpływie na ruch drogowy, demonstrując znaczenie automatyzacji pomiarów poprzez systemy montowane na pojazdach pomiarowych. Druga praca [6] poszerza tę problematykę poprzez analizę kluczowego zagadnienia transformacji płaszczyzny pomiarowej, wykazując jak przeliczać wartości natężenia oświetlania zmierzone na dachu pojazdu pomiarowego do wartości na powierzchni jezdni. Połączone wyniki obu publikacji demonstrują, że nowoczesne podejście integrujące mobilne systemy pomiarowe, automatyzację zbierania danych i precyzyjne metody przeliczania parametrów stanowi nowy standard w badaniach odbiorczych i kontrolnych oświetlenia drogowego, umożliwiając zarządom infrastruktury szybką, bezpieczną i powtarzalną ocenę stanu oświetlenia całych odcinków drogi oraz potencjalnie zmniejszający koszty operacyjne związane z przeprowadzeniem pomiarów tradycyjnymi metodami. Indywidualny wkład w realizację badań można ocenić na 50%. Opisany efekt badań został przedstawiony w postaci współautorskiego artykułu [5][6], który powstawał w zespole naukowców z Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej (Piotr Jaskowski, Piotr Tomczuk). Wyniki pracy zostały przedstawione na konferencjach:

- International Scientific Conference Transport of the 21st w Ryn (9 – 12 czerwca 2019 r.), BALKANLIGHT JUNIOR 2019 w Plovdiv (Bułgaria), (19-21 września 2019 r.),
- XLVII Zimowa Szkoła Niezawodności 2019 Niezawodność Systemów Technicznych w Szczyrk (6-12 stycznia 2019 r.),
- Fifth Junior Conference on Lighting LIGHTING 2020 w Ruse (Bułgaria) (24 – 26 września 2020 r.) w trybie zdalnym.

Kontynuacja wskazanego obszaru badawczego dotyczyła opracowania metodologii mobilnych pomiarów natężenia oświetlenia drogi i oceny efektywności energetycznej instalacji oświetlenia drogowego [8],[9]. Pierwsza praca [8] opracowuje mobilny system pomiaru natężenia oświetlenia montowany na dachu pojazdu. Praktyczną walidację przeprowadzono na rzeczywistym odcinku ulicy w Warszawie, osiągając szczegółowe dane pozwalające na obliczenie wskaźników efektywności energetycznej (D_F i D_E) zgodnie z normą EN 13201-5, oraz wykazując, że segmentacyjna analiza uwidacznia lokalne problemy w oświetleniu wymagające interwencji, których przeoczono by w tradycyjnych ocenach opierających się na pojedynczych średnich wartościach. Indywidualny wkład w realizację badań można ocenić na 30%. Opisany efekt badań został przedstawiony w postaci współautorskiego artykułu [7], który powstawał w zespole naukowców

z Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej (Piotr Tomczuk, Piotr Jaskowski), Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (Marcin Chrzanowicz), Katedry Inżynierii Transportowej Politechniki Gdańskiej (Marcin Budzyński). Wyniki pracy zostały przedstawione na konferencjach:

- International Conference on Research in Engineering, Technology and Science w Istanbul (Turkey) (10-13 czerwca 2021r.), w trybie zdalnym,
- International Scientific Conference Transport of the 21st w Józefów k. Otwocka (30.08-02.09.2022 r.),
- X Krakowskie Dni Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego w Krakowie (25-27 maja 2022r.).

Z kolei praca [9] pogłębia osiągnięcie [8] poprzez integrację opracowanego systemu z precyzyjnym systemem pozycjonowania GPS RTK (Real-Time Kinematic) z dokładnością ± 5 centymetrów, umożliwiającym jednoznaczne przypisanie zmierzonych wartości natężenia oświetlenia do konkretnych pól pomiarowych zdefiniowanych normą EN 13201 bez manualnego mapowania punktów na jezdni. Połączone wyniki obu publikacji demonstrują [8][9], że nowoczesne podejście integrujące mobilne sensory natężenia oświetlenia, automatyzację zbierania danych z wykorzystaniem GPS RTK i precyzyjne procedury przetwarzania danych stanowi nowy standard w badaniach odbiorczych i kontrolnych oświetlenia drogowego. Obydwie prace wykazały, że takie systemy umożliwiają szybką, efektywną i nieingerującą w ruch drogowy ocenę parametrów oświetlenia całych odcinków ulic bez konieczności zamknięcia drogi. Pozyskane w ten sposób wyniki pomiaru pozwalają na szczegółowe mapowanie efektywności energetycznej dzielnic lub całych miast, integrację z systemami GIS danych posiadanych przez zarządców infrastruktury, oraz stanowią praktyczne narzędzie do identyfikacji sekcji drogi wymagających modernizacji, redukcji kosztów eksploatacyjnych, zwiększenia bezpieczeństwa ruchu. Indywidualny wkład w realizację badań można ocenić na 34%. Opisany efekt badań został przedstawiony w postaci współautorskiego artykułu [9], który powstawał w zespole naukowców z Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej (Piotr Jaskowski, Piotr Tomczuk) oraz Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (Marcin Chrzanowicz).

4.3.4 Opis osiągnięcia konstrukcyjnego i technologicznego

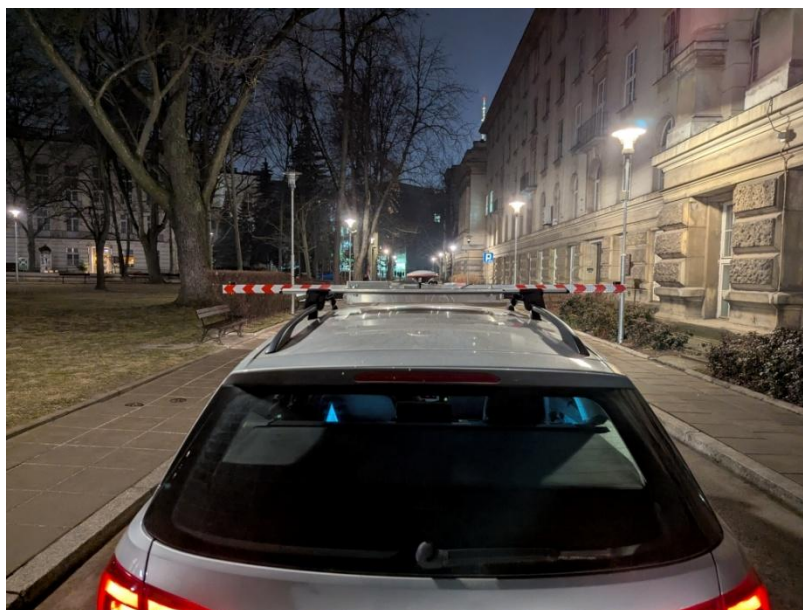
Jak wskazałem w pkt. 4.3.1. celem naukowym powiązanych wynalazków: konstrukcyjnego „System pomiarowy do szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego” oraz technologicznego „Sposób szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego” jest:

- Opracowanie nowego rozwiązania konstrukcyjnego, przeznaczonego do pomiarów natężenia oświetlenia na drodze.

- Opracowanie nowego rozwiązania technologicznego związanego z metodą przeliczania punktów pomiarowych pomiędzy płaszczyzną rejestracji i wymaganiami normy oświetlenia dróg PN-EN 13201-2016.

Osiągnięcie konstrukcyjne:

Przedmiotem wynalazku jest system pomiarowy do szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego (Rys. 12), znajdujący zastosowanie w przeprowadzaniu pomiarów natężenia oświetlenia na odcinku pomiarowym drogi, przystosowany do montażu na pojeździe.



Rys. 12. System pomiarowy do szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego

Źródło: opracowanie własne.

Znane rozwiązania charakteryzują się niską dokładnością i niskim zagęszczeniem siatki pomiarowej. Rozwiązania dotychczas użytkowane są również podatne na zakłócenia pomiaru w wyniku rejestrowania odbić od karoserii pojazdu, na którym są zamontowane. Niskie położenie płaszczyzny pomiarowej powoduje również podatność na negatywne skutki oświetlenia czujników przez światła pojazdów trzecich.

Celem wynalazku jest wyeliminowanie niedogodności wynikających ze stanu techniki, w tym podatności na zakłócenia pomiaru przez działanie oświetlenia innego niż oświetlenie drogowo, uniezależnienie dokładności pomiaru od, wysokości płaszczyzny pomiarowej względem powierzchni jezdni, a także zaproponowanie rozwiązania, które będzie charakteryzowało się dużym zagęszczeniem siatki pomiarowej oraz precyzją określenia położenia punktu pomiarowego na odcinku testowym badanej drogi.

System pomiarowy do szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego, zawierający belkę pomiarową z elementami mocującymi oraz z co najmniej jednym czujnikiem natężenia oświetlenia, geolokalizatorem, modułem zasilania i kontrolerem, a także pilotem zdalnego sterowania, charakteryzuje się tym, że belka pomiarowa zawiera co najmniej jedno spośród rozłącznie mocowanych na belce pomiarowej pierwszego czujnika poziomego natężenia oświetlenia, drugiego czujnika poziomego natężenia

oświetlenia i trzeciego czujnika poziomego natężenia oświetlenia oraz geolokalizator GNSS RTK, przy czym pierwszy czujnik poziomego natężenia oświetlenia, drugi czujnik poziomego natężenia oświetlenia, trzeci czujnik poziomego natężenia oświetlenia, geolokalizator GNSS RTK oraz moduł zasilania połączone są z kontrolerem, zaś kontroler oraz pilot zdalnego sterowania połączone są z komputerem, a komputer połączony jest także z modułem zasilania.

Przedmiot wynalazku w pełni realizuje postawiony przed nim cel. System pomiarowy równolegle realizuje pomiar za pomocą wybranej (domyślnie trzech) liczby czujników natężenia oświetlenia, rozstawionych w odległości wedle instrukcji z normy oświetlenie dróg lub też innej zadanej, prostopadłe do osi pasa jezdni. Użycie trzech czujników natężenia oświetlenia pozwala na uzyskanie minimalnej wartości liczby punktów siatki pomiarowej dla jednego pasa drogi w kierunku poprzecznym, zgodnym z wymaganiami zapisanymi w normie. W przypadku pomiarów nienormatywnych, system może działać przy innej liczbie czujników. Dodatkowo system pomiarowy wyposażony jest w czujnik zlokalizowany do pomiaru natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej, która może wskazywać na potencjalne oddziaływanie światła obcego. Współrzędne GNSS (ang. *Global Navigation Satellite Systems*) z poprawkami RTK (ang. *Real Time-Kinematic*) umożliwiają zlokalizowanie punktów pomiarowych na drodze, natomiast kontroler pozwala agregować wartości pomiarowe z czujników natężenia oświetlenia oraz informacji o lokalizacji z odbiornika satelitarnego GNSS z poprawkami RTK oraz potencjalnie innych czujników i wysyłać dane do zapisu na komputerze. Indywidualny wkład w realizację badań można ocenić na 33,34%. Opisane osiągnięcie konstrukcyjne jest przedmiotem współautorskiego zgłoszenia o patent europejski „System pomiarowy do szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego” (nr P.449983, data zgłoszenia do Urząd Patentowy RP 08.10.2024 r., zgłoszenie o patent europejski), który powstawał w zespole naukowców z Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej (Piotr Jaskowski, Piotr Tomczuk,) oraz Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (Marcin Chrzanowicz).

Osiągnięcie technologiczne:

Przedmiotem wynalazku jest sposób szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego, znajdujący zastosowanie w przeprowadzaniu szybkich pomiarów natężenia oświetlenia drogowego.

Znane rozwiązania charakteryzują się niską dokładnością i niskim zagęszczeniem siatki pomiarowej. Rozwiązania dotychczas użytkowane są również podatne na zakłócenia pomiaru w wyniku rejestrowania odbić od karoserii pojazdu. Niskie położenie płaszczyzny pomiarowej powoduje również podatność na negatywne skutki oświetlenia czujników przez światła pojazdów trzecich. Ponadto aktualnie stosowane sposoby nie pozwalają na masowe zastosowanie przy wyborze innej płaszczyzny pomiaru niż płaszczyzna powierzchni jezdni. Sposób według wynalazku umożliwia badanie całych ciągów ulicznych zgodnie z normą PN EN 13201:2016.

Celem wynalazku jest wyeliminowanie niedogodności wynikających ze stanu techniki, w tym podatności na zakłócenia pomiaru przez działanie oświetlenia innego niż oświetlenie drogowe, uniezależnienie dokładności pomiaru od wysokości płaszczyzny pomiarowej względem powierzchni jezdni, a także zaproponowanie rozwiązania, które będzie charakteryzowało się dużym zagęszczeniem siatki pomiarowej oraz precyzją określenia położenia punktu pomiarowego na odcinku testowym badanej drogi. Przewagą sposobu jest szybkość i ilość pozyskiwanych danych, która umożliwia tworzenie map oświetleniowych w skali miast i kraju dając po przeliczeniach wyniki adekwatne do powolnych i punktowych pomiarów zgodnych z kryteriami zawartymi w normie PN-EN13201.

Sposób szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego, wykorzystujący co najmniej jeden czujnik poziomego natężenia oświetlenia zamocowany na belce pomiarowej osadzonej na pojeździe, obraz z kamery, dane geolokalizacyjne oraz komputer wraz z oprogramowaniem sterującym, charakteryzuje się tym, że belka pomiarowa zawiera osadzone suwliwie we wzajemnych odstępach od jednego do trzech czujników poziomego natężenia oświetlenia w płaszczyźnie równoległej do powierzchni jezdni, pierwszy przyrząd pomiarowy w postaci kamery nagrywającej obraz zsynchronizowany z czasem, przy czym nagranie wykorzystuje się do identyfikacji anomalii w trakcie pomiaru, drugi przyrząd pomiarowy w postaci lidar, określający położenie opraw oświetleniowych wysokość opraw oświetleniowych w odcinku pomiarowym, geolokalizator, kontroler oraz radiomodem, przy czym geolokalizator określa położenie słupów oświetlenia drogowego oraz określa położenie odcinka pomiarowego wykorzystując przynajmniej jedno spośród danych pomiarowych GNSS, danych pomiarowych GNSS z poprawkami RTK, danych pozycjonowania inercyjnego (IMU), danych pozycjonowania przy użyciu łączności bezprzewodowej SG, 6G i wyższych standardów albo danych z pozycjonowania opartych na danych komunikacji satelitarnej. Następnie do oprogramowania sterującego poprzez komputer wprowadza się wysokość opraw oświetleniowych oraz wysokość lokalizacji czujników poziomego natężenia oświetlenia względem powierzchni jezdni. Oprogramowanie na podstawie lokalizacji słupów oświetlenia drogowego określa parametry geolokalizacyjne odcinków pomiarowych zdefiniowanych zgodnie z normą oświetlenia drogowego PN-EN 13201, do których przyporządkowane są następnie pojedyncze próbki pomiarowe zgodnie z geolokalizacją. Oprogramowanie przetwarza dane pomiarowe poprzez interpolację geodatowych punktów pomiarów do poziomu nawierzchni jezdni, a wygenerowane wyniki dla każdego odcinka pomiarowego są przedstawiane w formacie tabelarycznym oraz gotowe do zwizualizowania na mapach cyfrowych. Indywidualny wkład w realizację badań można ocenić na 33,34%. Opisane osiągnięcie konstrukcyjne jest przedmiotem współautorskiego zgłoszenia o patent europejski „Sposób szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego”. (nr P.449984 data zgłoszenia do Urząd Patentowy RP 08.10.2024 r., zgłoszenie o patent europejski), który powstawał w zespole

naukowców z Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej (Piotr Jaskowski, Piotr Tomczuk) oraz Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (Marcin Chrzanowicz).

Opracowana technologia związana z osiągnięciem konstrukcyjnym i technologicznym była przedmiotem moich wystąpień na konferencjach branżowych:

- Kongres Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego 2025, Kraków, 12-14 marca 2025 r.,
- Konferencja „Przyszłość Branży TSL – Synergia Nauki, Technologii i Biznesu”, Targi MT TSL, Warsaw Ptak Expo, Nadarzyn, 9 kwietnia 2025 r.,
- Konferencja Naukowo - Techniczna Miasto i Transport 2025, Warszawa, 8-9 maja 2025 r.,
- LightFlow 2025 Konferencja "Oświetlenia przestrzeni publicznej", Warszawa, 20 listopada 2025 r.

Opracowana technologia była rozwijana w ramach projektu rozwoju prototypu projektu biznesowego biorącego udział w programie Preinkubacji (program „Grant na prototyp”) realizowanego w ramach działania Akcelerator PW STRATEGIA PW R5.1 // IDUB D.5 w ramach programu „Inicjatywa doskonałości – uczelnia badawcza”. Centrum Innowacji Politechniki Warszawskiej. Porozumienie o współpracy CINN-ININ-GnP-2/2024, kwota projektu 149 999,10 zł. Okres realizacji 01.10.2024 r. - 31.01.2025 r. Pełniłem rolę kierownika projektu.

Aktualnie technologia jest rozwijana i komercjalizowana w ramach spółki spin-off Politechniki Warszawskiej o nazwie MobiLight Lighting Research sp. z o. o., w której pełnię rolę prezesa zarządu i współwłaściciela.

4.3.5 Podsumowanie osiągniętych wyników badań

Podsumowując przeprowadzone powyżej rozważania, przedstawione do oceny osiągnięcie naukowe (autorska monografia, cykl powiązanych tematycznie publikacji naukowych oraz powiązane osiągnięcie konstrukcyjno – technologiczne), pozwalają na wskazanie istotnego wkładu w rozwój dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport:

- 1) Dla **osiągnięcia 1** przedstawionego w monografii pt. *„Cyfrowy bliźniak infrastruktury jako narzędzie integracji modelowania ruchu i dynamicznego sterowania oświetleniem ulicznym”* [1]:
 - Opracowanie koncepcji tworzenia harmonogramów sterowania oświetleniem dróg na podstawie analizy statystycznej natężenia ruchu drogowego.
 - Opracowanie koncepcji tworzenia harmonogramów sterowania oświetleniem dróg na podstawie modeli predykcyjnych natężenia ruchu drogowego przy użyciu modelu SARIMA.
 - Opracowanie koncepcji infrastruktury cyfrowego bliźniaka integrującego dane oświetlenia z natężeniem pól z danymi o natężeniu ruchu drogowym.

- Opracowanie formalnego zapisu algorytmu sterowania dynamicznego oświetleniem dróg dla pól zdefiniowanych zgodnie z standardami oświetlenia przy użyciu automatów komórkowych.
 - Opracowanie metody sterowania oświetlenia drogą w zależności od natężenia ruchu drogowego w polu pomiarowym zgodnie z wymaganiami normy oświetlenia dróg PN-EN 13201-2016 przy użyciu bliźniaka cyfrowego infrastruktury.
- 2) Dla **osiągnięcia 2**, przedstawionego w cyklu powiązanych tematycznie dziewięciu publikacji dotyczących badań oświetlenia drogowego i elementów emitujących światło w otoczeniu drogi [2-10]:
- Weryfikację narzędzi pomiarowych do wykonania pomiarów oświetlenia dróg.
 - Opracowanie koncepcji mobilnych pomiarów natężenia oświetlenia, które umożliwiają szybką, efektywną i nieszkodliwą dla przepływu ruchu ocenę parametrów oświetlenia całych odcinków ulic bez konieczności zamknięcia drogi, pozwalają na szczegółowe mapowanie efektywności energetycznej dzielnic lub całych miast poprzez integrację z systemami GIS i dokumentacją infrastruktury, oraz stanowią praktyczne narzędzie do identyfikacji sekcji wymagających modernizacji, redukcji kosztów eksploatacyjnych, zwiększenia bezpieczeństwa ruchu.
 - Walidację metody w kontekście oceny efektywności energetycznej oświetlenia dróg.
 - Weryfikacja zagrożeń wynikających z lokalizowania reklam świetlnych w polu obserwacji kierowcy w zależności od typu pojazdu.
 - Opracowanie parametrów geometrycznych, fotometrycznych i lokalizacyjnych, które wpływają na dyskomfort uczestników ruchu drogowego.
 - Opracowanie metodyki pomiaru oświetlenia emitowanego przez elementy niewiązane z funkcjonowaniem drogi oraz określenie ich wpływu na kierującego pojazdem.
 - Opracowanie procedury pomiaru oświetlenia emitowanego przez elementy niewiązane z funkcjonowaniem drogi dla zarządców infrastruktury.
 - Opracowanie narzędzia oceny reklam świetlnych na dyskomfort uczestników ruchu drogowego.
- 3) Dla **osiągnięcia 3**, będących powiązanymi wynalazkami: konstrukcyjnym „System pomiarowy do szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego” oraz technologicznym „Sposób szybkiego pomiaru natężenia oświetlenia drogowego” jest:
- Opracowanie nowego rozwiązania konstrukcyjnego, przeznaczonego do pomiarów natężenia oświetlenia na drodze.

- Opracowanie nowego rozwiązania technologicznego związanego z metodą przeliczania punktów pomiarowych pomiędzy płaszczyzną rejestracji i wymaganiami normy oświetlenia dróg PN-EN 13201-2016.

Jako kierunki dalszych badań upatruję w:

- opracowaniu standardów i wytycznych dla prawnych aspektów wdrażania dynamicznego sterowania oświetleniem, w szczególności w zakresie odpowiedzialności zarządcy drogi za bezpieczeństwo w warunkach zmiennego oświetlenia,
- rozszerzeniu modelu adaptacyjnego sterowania o dodatkowe źródła danych, takie jak warunki atmosferyczne (opady, mgła), zdarzenia losowe na drogach sąsiednich oraz dane o ruchu pieszych i rowerzystów, w celu stworzenia bardziej kompleksowego systemu zarządzania,
- dalszym rozwoju technologii „bliźniaka cyfrowego” dla infrastruktury miejskiej, w kierunku pełnej automatyzacji procesów decyzyjnych i integracji z innymi systemami Smart City (np. sterowaniem sygnalizacją świetlną),
- doskonaleniu metod mobilnych pomiarów oświetleniowych poprzez zastosowanie zaawansowanych algorytmów uczenia maszynowego do automatycznej detekcji i klasyfikacji usterek infrastruktury oświetleniowej na podstawie analizy obrazu,
- przeprowadzeniu holistycznej oceny wpływu zanieczyszczenia światłem na ekosystem miejski i zdrowie mieszkańców, w celu opracowania zintegrowanych strategii minimalizacji emisji światła niepożądanego przy zachowaniu wymogów bezpieczeństwa transportowego.

4.4 Bibliografia

(kontynuacja numeracji z podrozdziału 4.2)

- [13] Fotios S, Monteiro AL, Uttley J (2019) Evaluation of pedestrian reassurance gained by higher illuminances in residential streets using the day–dark approach. *Lighting Research and Technology* vol. 51, s.557–575.
- [14] Fotios S, Unwin J, Farrall S (2015) Road lighting and pedestrian reassurance after dark: A review. *Lighting Research and Technology* vol. 47, s.449–469.
- [15] „Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie”, Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie. Dostęp: 31 grudnia 2025. [Online]. Dostępne na: <https://zdm.waw.pl/>
- [16] Europejski Komitet Normalizacyjny, „PKN-CEN/TR 13201-1 Oświetlenie dróg Część 1: Wybór klas oświetlenia.”, 2015.
- [17] Prawo energetyczne, nr 2024.266. *Dziennik Ustaw*, 1997. Dostęp: 31 grudnia 2025. [Online]. Dostępne na: <https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzu-dziennik-ustaw/prawo-energetyczne-16798478>.
- [18] Y. Li, Q. Zhao, i M. Wang, „High-resolution traffic flow data from the urban traffic control system in Glasgow”, *Sci Data*, t. 12, nr 1, s. 253, luty 2025, doi: 10.1038/s41597-025-04494-y.

- [19] C. Bachechi, L. Po, i F. Rollo, „Big Data Analytics and Visualization in Traffic Monitoring”, *Big Data Research*, t. 27, s. 100292, luty 2022, doi: 10.1016/j.bdr.2021.100292.
- [20] H. Huang, J. Chen, R. Sun, i S. Wang, „Short-term traffic prediction based on time series decomposition”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, t. 585, s. 126441, sty. 2022, doi: 10.1016/j.physa.2021.126441.
- [21] E. F. Agyemang, J. A. Mensah, E. Ocran, E. Opoku, i E. N. N. Nortey, „Time series based road traffic accidents forecasting via SARIMA and Facebook Prophet model with potential changepoints”, *Heliyon*, t. 9, nr 12, s. e22544, grudz. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22544.
- [22] D. Gómez-Lorente, O. Rabaza, A. Espín Estrella, i A. Peña-García, „A new methodology for calculating roadway lighting design based on a multi-objective evolutionary algorithm”, *Expert Systems with Applications*, t. 40, nr 6, s. 2156–2164, 2013. doi: 10.1016/j.eswa.2012.10.026.
- [23] H. Rocha, I. S. Peretta, G. F. M. Lima, L. G. Marques, i K. Yamanaka, „Exterior lighting computer-automated design based on multi-criteria parallel evolutionary algorithm: Optimized designs for illumination quality and energy efficiency”, *Expert Systems with Applications*, t. 45, s. 208–222, 2016. doi: 10.1016/j.eswa.2015.09.046.
- [24] A. Redelinghuys, A. Basson, i K. Kruger, „A Six-Layer Digital Twin Architecture for a Manufacturing Cell”, w *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*, t. 803, T. Borangiu, D. Trentesaux, A. Thomas, i S. Cavalieri, Red., w *Studies in Computational Intelligence*, vol. 803., Cham: Springer International Publishing, 2019, s. 412–423. doi: 10.1007/978-3-030-03003-2_32.
- [25] G. Gagliardi et al., „Advanced Adaptive Street Lighting Systems for Smart Cities”, *Smart Cities*, t. 3, nr 4, s. 1495–1512, grudz. 2020, doi: 10.3390/smartcities3040071.
- [26] I. Santé, A. M. García, D. Miranda, i R. Crecente, „Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis”, *Landscape and Urban Planning*, t. 96, nr 2, s. 108–122, 2010, doi: 10.1016/j.landurbplan.2010.03.001.
- [27] S. Carrasco, P. Medina, J. Rogan, i J. A. Valdivia, „Simulating the city traffic complexity induced by traffic light periods”, *Chaos*, t. 31, nr 4, 2021, doi: 10.1063/5.0041028.
- [28] S. Wolfram, „Statistical mechanics of cellular automata”, *Rev. Mod. Phys.*, t. 55, s. 601–644, 1983.
- [29] National KOBiZE Database Management Team, „CO₂, SO₂, NO_x, CO and total dust emission factors for electricity based on information contained in the National Database on Greenhouse Gas Emissions and Other Substances for 2023”, *National Database on Greenhouse Gas Emissions and Other Substances*, 2024. Dostęp: 31 grudnia 2025. [Online].

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

5.1 Przed doktoratem

Realizacja projektów naukowych w ramach współpracy z innymi jednostkami naukowymi (informacje: tytuł projektu, rok rozpoczęcia i (ewentualnie) zakończenia realizacji, nazwa organu przyznającego fundusze na realizację projektu, charakter udziału habilitanta w projekcie):

- Projekt międzynarodowy pod tytułem: Innowacyjny jacht z hybrydowym napędem zasilanym z odnawialnych źródeł energii (REP SAIL), umowa numer: ERA-NET-TRANSPORT-III/5/2014, finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Środków Komisji Europejskiej, kierownik projektu na Politechnice Warszawskiej: dr inż. Marcin Koniak. Okres realizacji 01.09.2014 – 31.12.2017 r. Budżet projektu Politechniki Warszawskiej: 805 382,98 zł. Pełniłem rolę wykonawcy grantu, realizując zadania: - pomiarów parametrów ogniw litowo jonowych; - przeglądu literatury wraz z przygotowaniem dokumentacji.
- Projekt krajowy pod tytułem: Wpływ reklam na poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego, umowa numer: DZP/RID-I-33/4/NCBR/2016 (Rozwój Innowacji Drogowych), finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad, kierownik projektu: dr hab. Adam Tarnowski, prof. UW, kierownik w Instytucji PW: dr hab. inż. Piotr Tomczuk. Okres realizacji 01.01.2016 – 31.06.2018 r. Całkowity budżet projektu: 2431000 zł, Politechnika Warszawska: 545625 zł. Pełniłem rolę wykonawcy, mając współudział w zadaniach: - przeglądu literatury oddziaływania reklam świetlnych na kierującego; - analiza norm i aktów prawnych w zakresie lokalizowania reklam świetlnych; - opracowanie raportu na temat wiedzy; - współautor opracowania metodyki oceny treści reklam w kontekście bezpieczeństwa ruchu drogowego; - przeprowadzenie pomiarów terenowych; - opracowanie danych okulograficznych z badania terenowego oraz badań przy użyciu symulatora pojazdu; - uczestnictwo w spotkaniach zespołu; - prezentowanie opracowanych treści na seminariach zespołu oraz konferencjach o zasięgu krajowym i międzynarodowym.
- Odbycie praktyk przez udział w projekcie badawczym dotyczącym zagadnienia wirtualnych rynków predykcyjnych (Projekt Badawczy) w Centrum Zastosowań Matematyki i Inżynierii Systemów we współpracy z Instytutem Matematycznym Polskiej Akademii Nauk w Warszawie w okresie od 29 lutego 2016 r. do 27 maja 2016 r. W czasie trwania Projektu Badawczego wykonałem następujące zadania: zapoznanie się z tematyką rynków predykcyjnych na bazie literatury przedmiotu; zapoznanie się z możliwością praktycznego wykorzystania narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji; udział w uruchomionym rynku

predykcyjnym dotyczącym tematyki edukacyjnej/rynku pracy oraz tematyki nanotechnologii ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań grafenu; przewidywanie zaszeregowania pewnych zdarzeń w przyszłości na bazie posiadanej oraz zdobywanej w trakcie trwania projektu wiedzy, wykonywanie obowiązków brokera informacji w zakresie tematyki nanotechnologii oraz rynków predykcyjnych; opracowanie przykładowych zagadnień i informacji o nich, celem przedstawienia ich jako zdarzeń na działającym rynku predykcyjnym; opracowanie materiałów na temat wybranych rynków predykcyjnych. Kierownikiem projektu był dr Kamil Kulesza.

Realizacja publikacji naukowych w ramach współpracy z innymi jednostkami naukowymi:

Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej (Marcin Chrzanowicz), Instytut Elektrotechniki (Sadowski Paweł)

- Tomczuk Piotr, Czerepicki Andrzej , Sadowski Paweł, **Jaskowski Piotr**, Chrzanowicz Marcin: Modelowanie wpływu reklam świetlnych na bezpieczeństwo ruchu drogowego, WUT Journal of Transportation Engineering, ISSN 1230-9265, 2016, nr 114, s.369-382 (7 pkt. MNiSW).
- Chrzanowicz Marcin, Tomczuk Piotr, **Jaskowski Piotr**, Czerepicki Andrzej, Sadowski Paweł: Wpływ parametrów geometrycznych reklamy na oślepianie oraz rozpraszanie uwagi kierowcy, WUT Journal of Transportation Engineering, ISSN 1230-9265, 2016 nr 114, s.49-60 (7 pkt. MNiSW).
- Tomczuk Piotr, **Jaskowski Piotr**, Chrzanowicz Marcin, Czerepicki Andrzej, Sadowski Paweł: Luminancja reklam LED w otoczeniu dróg, WUT Journal of Transportation Engineering, ISSN 1230-9265, 2016, nr 114, s.359-368 (7 pkt. MNiSW).
- Tomczuk Piotr, Koniak Marcin, Chrzanowicz Marcin, **Jaskowski Piotr**: Ocena możliwości badania parametrów oświetleniowych nośników reklamowych w symulatorach pojazdu osobowego, WUT Journal of Transportation Engineering, ISSN 1230-9265, 2017 nr 118, s. 301-312 (7 pkt. MNiSW).
- Chrzanowicz Marcin, Tomczuk Piotr, **Jaskowski Piotr**: Metodyka pomiaru luminancji powierzchni nośnika reklamowego emitującego światło, WUT Journal of Transportation Engineering, ISSN 1230-9265, 2017 nr 2018, s. 49-62 (7 pkt. MNiSW).
- Chrzanowicz Marcin , **Jaskowski Piotr** : Analysis of results of emission parameters of advertising media in field conditions, MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 231, s.1-8, Numer artykułu:04002. DOI:10.1051/matecconf /201823104002 (15 pkt. MNiSW).

Państwowa Akademia Nauk Stosowanych im. Ignacego Mościckiego w Ciechanowie
(Tomasz Dzik, Renta Dzik, Rafał Górski)

- Frydrychowicz Wacław, Dzik Tomasz (red.): Informatyka i technika w dobie XXI wieku, 2014, Ciechanów, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Ciechanowie, 270 s., ISBN 978-83-936260-7-6. Rozdział w monografii Tomasz Dzik, Renta Dzik, Rafał Górski, **Piotr Jaskowski**, Karolina Dobrowolska: „Świadectwa efektywności energetycznej jako narzędzie wspierające inwestycje proekologiczne”, s. 243-255 (0 pkt. MNiSW).

Politechnika Gdańska (Budzyński Marcin)

- Tomczuk, Piotr, Marcin Chrzanowicz, **Piotr Jaskowski**, and Marcin Budzynski. 2021. "Evaluation of Street Lighting Efficiency Using a Mobile Measurement System" *Energies* 14, no. 13: 3872 (140 pkt. MNiSW, IF 3,252).

Tabela 15. Podsumowanie aktywności naukowej z innymi instytucjami naukowymi przed doktoratem

Osiągnięcie	Liczba	Liczba instytucji naukowych
Publikacje	8	4
Projekty	2	6

Sumaryczna liczba punktów za publikacje naukowe zgodnie z wykazem MNiSW: 182.
Sumaryczny Impact Factor publikacji 3,252.

5.2 Po doktoracie

Realizacja projektów naukowych w ramach współpracy z innymi jednostkami naukowymi (informacje: tytuł projektu, rok rozpoczęcia i (ewentualnie) zakończenia realizacji, nazwa organu przyznającego fundusze na realizację projektu, charakter udziału habilitanta w projekcie):

- Udział w realizacji projektu badawczego w ramach „Badania i Rozwój w Infrastrukturze Kolejowej BRIK II”. Numer wniosku dofinansowanego „BRIK-II/0036/2022” pt.: Energooszczędny System Elektrycznego Ogrzewania Rozjazdów z adaptacyjną dystrybucją mocy grzewczej, 2023, Konsorcjum Instytut Kolejnictwa, Zakład Automatyki i Urządzeń Pomiarowych AREX sp. z o.o., Politechnika Warszawska. Wartość projektu: 6 536 444,17 zł. Czas trwania projektu: 1.12.2022 – 30.11.2025 r. Brałem udział w roli wykonawcy przy realizacji zadań:
- o Zadanie 3 Badanie termograficzne dystrybucji ciepła na rozjazdach kolejowych w obecnych systemach EOR (podzadanie: Opracowanie metodyki i analiza wyników pomiarów termowizyjnych).

- Zadanie 10 Badania terenowe dystrybucji mocy grzewczej elementów systemu ESAR na podstawie obrazu termowizyjnego rozjazdu kolejowego. (podzadanie: Analiza wyników pomiarów termowizyjnych).
- Grant w programie Preinkubacji (program „Grant na prototyp”) realizowanego w ramach działania Akcelerator PW STRATEGIA PW R5.1 // IDUB D.5 w ramach programu „Inicjatywa doskonałości – uczelnia badawcza”. Centrum Innowacji Politechniki Warszawskiej. Porozumienie o współpracy CINN-ININ-GnP-2/2024, kwota projektu 149 999,10 zł. Okres realizacji 01.10.2024 r. - 31.01.2025 r. Pełniłem rolę kierownika projektu oraz był jednym z głównych wykonawców. Grant rozwinął opracowaną technologię do poziomu TRL 7 (ang. *Technology Readiness Level*) i był podstawą do utworzenia spółki spin-off Politechniki Warszawskiej (MobiLight Lighting Research sp. z o. o.) w której pełnię funkcję prezesa zarządu oraz współwłaściciela.
- Uczestnictwo w pracach badawczych realizowanych w Laboratorium Badań Medioznawczych Uniwersytetu Warszawskiego (LBM UW) w ramach projektu badawczego pt. „Wpływ narzędzi AI na pracę specjalistów ds. informacji. Eksperyment dotyczący wyszukiwania informacji i sztucznej inteligencji.”. Projekt realizowany w okresie marzec 2025 – marzec 2026. Wykonywałem zadania związane z analizą wyników działania różnych narzędzi wykorzystujących sztuczną inteligencję, w szczególności w kontekście porównywania sposobów wyszukiwania informacji oraz oceny rezultatów uzyskiwanych przy użyciu narzędzi AI.
- Grant dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej „Metoda określenia współczynnika odbicia nawierzchni drogowej do doboru klasy oświetlenia drogowego”, nr grantu: 504/05036/1042/43.022502, budżet 60 tys. zł. Okres realizacji od 26.06.2025 do obecnie. Kierownik projektu : dr inż. Marcin Chrzanowicz (Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej). Wykonuje zadania związane z przeglądem literatury dotyczącej wpływu współczynnika odbicia na oświetlenie dróg oraz opracowuje koncepcje nowej alternatywnej technologii związanej z badaniem współczynnika odbicia nawierzchni drogowej.

Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych (informacje: Nazwa programu i organu finansującego jego realizację, okres trwania projektu, tytuł projektu, charakter uczestnictwa habilitanta):

Saże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich (informacje: Nazwa ośrodka, termin odbycia stażu, charakter stażu):

Vilnius Gediminas Technical University - Litwa, staż zagraniczny 20.01 - 19.02.2025 r.,
Opiekun merytoryczny stażu:

Assoc Prof. Jonas Matijošius (<https://orcid.org/0000-0001-6006-9470>)

W ramach stażu zrealizowałem zadania: - zapoznanie się z zakresem badań naukowych prowadzonych w jednostce badawczej,- wymiana doświadczeń naukowych w zakresie badań, projektów i publikacji naukowych,- udział w badaniach naukowych prowadzonych przez jednostkę przyjmującą,- prezentacja własnych osiągnięć naukowych oraz osiągnięć reprezentowanej jednostki w kontekście współpracy naukowej,- pozyskanie materiałów do dalszych prac naukowych w dziedzinie metod analizy numerycznej oraz opis wyników badań dotyczących oświetlenia infrastruktury drogowej dla kierowców i innych użytkowników dróg,- analiza specyfiki oświetlenia przestrzeni publicznych i transportowych na Litwie,- przegląd rozwiązań oświetleniowych w zakresie opraw oświetleniowych, słupów, systemów zasilania i systemów sterowania oświetleniem,- analiza specyfiki ruchu drogowego i jego wpływu na kontrolę poziomu oświetlenia (ograniczenie mocy),- analiza strategii ograniczania zużycia energii elektrycznej i emisji szkodliwych związków do atmosfery pod kątem podejmowanych działań,- zapoznanie się z rozważanymi źródłami zasilania pojazdów drogowych i ich wpływem na zanieczyszczenie środowiska i natężenie ruchu,- przegląd specyfiki nawierzchni dróg na Litwie.

Efekt stażu:

- **Piotr Jaskowski**, Edward Kozłowski, Piotr Tomczuk, Marcin Chrzanowicz, Jonas Matijošius, Marta Cholewa-Wiktor, Artūras Kilikevičius, Application of machine learning models for evaluating the impact of roadside advertising on driver discomfort, Measurement, Volume 255,2025,117915,ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117915>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224125012746>) (200 pkt.)
- Aydin, Metin Mutlu, Edgar Sokolovskij, **Piotr Jaskowski**, and Jonas Matijošius. 2025. "Service Management of Employee Shuttle Service Under Inhomogeneous Fleet Constraints Using Dynamic Linear Programming: A Case Study" Applied Sciences 15, no. 9: 4604. <https://doi.org/10.3390/app15094604> (100 pkt.)
- Złożenie wniosku w ramach projektu stypendiów podoktoranckich ogłoszonego przez Radę ds. Badań Naukowych Litwy, Piotr Jaskowski (opiekun po stronie litewskiej Jonas Matijošius). Tytuł wniosku: „Ocena wpływu dekarbonizacji transportu na środowisko przy użyciu modelowania mikroskopowego i cyfrowych bliźniaków”, nr wniosku P-PD-25-043, czerwiec 2025 r. Wniosek otrzymał 26/30 punktów na liście wniosków o dofinansowanie (dofinansowano wnioski z 27-28 punktami).

Instytut Badawczy Dróg i Mostów, staż krajowy, 10.03.2025 r. - 13.06.2025 r.,
Opiekun merytoryczny stażu:

dr hab. inż. Janusz Bohatkiewicz, prof. IBDiM (<https://orcid.org/0000-0002-9659-2666>)

Celem stażu naukowego było: prowadzenie badań naukowych, pozyskanie materiałów do pracy naukowej, pozyskanie wiedzy i umiejętności dotyczących metod i narzędzi

badawczych stosowanych w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów, które bezpośrednio lub pośrednio dotyczą obszaru oświetlenia drogowego. Zakres merytoryczny stażu obejmował: zapoznanie się z zakresem naukowym badań prowadzonych w Instytucie; wymiana doświadczeń naukowych z pracownikami Instytutu; uczestnictwo w badaniach naukowych prowadzonych z Instytucie; pozyskanie materiałów do dalszej pracy naukowej, w zakresie prowadzenia badań naukowych dotyczących metod badań stanu oświetlenia infrastruktury drogowej; współudział merytoryczny w konferencjach naukowych organizowanych przez Instytut.

Efekt stażu:

- Tomczuk, P., Chrzanowicz, M., **Jaskowski, P.**, Skierczyński, P., & Mechowski, T. (2025). Bicycle road lighting – requirements and recommendations. *Roads and Bridges – Drogi I Mosty*, 24(3), 331–340, <https://doi.org/10.7409/rabdim.025.019> (70 pkt.).
- **Jaskowski P.**, Tomczuk P., Chrzanowicz M., Skerczyński P., Sakowski A. (2025). Analysis of optical parameters of materials used for road markings. *Roads and Bridges – Drogi I Mosty*, 24(4), 597–606. <https://doi.org/10.7409/rabdim.025.040> (70 pkt.).
- Prace organizacyjne oraz naukowe w zakresie konferencji naukowej: I Konferencja naukowo-techniczna "Oświetlenie przestrzeni publicznej" LIGHTFLOW 2025, 20 listopada 2025r., Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Byłem członkiem komitetu naukowego oraz organizacyjnego, w trakcie konferencji współprowadził sesję wraz z dr hab. inż. Henrykiem Wachtą (Politechnika Rzeszowska) „SESJA 3 Oświetlenie drogowe w dobie zmian klimatycznych”.

National Technical University of Athens (NTUA) – Grecja, wizyta studyjna, 24.06.2025 - 04.07.2025 r.

Opiekun merytoryczny:

Professor George Yannis (<https://orcid.org/0000-0002-7017-0756>)

Podstawową część wizyty stanowiło zapoznanie się z zakresem badań prowadzonych na Uniwersytecie NTUA, obejmujących inżynierię ruchu drogowego i bezpieczeństwo ruchu. Szczególną uwagę zwrócono na analizę wypadków drogowych, zachowania kierowców w warunkach rozproszenia uwagi i wpływu alkoholu, bezpieczeństwo użytkowników drogi (pieszych, motocyklistów, kierowców młodych i starszych) oraz nowoczesne systemy telematyczne i symulatory jazdy. Ponadto omówiono strategię międzynarodowe poprawy bezpieczeństwa w ruchu drogowym. Drugi nurt badań dotyczył planowania i zarządzania transportem, z naciskiem na mobilność miejską, zarządzanie ruchem przy wykorzystaniu symulacji, transport multimodalny oraz koncepcje miast zrównoważonych. Program uwzględnił również nowe technologie i innowacje, takie jak sztuczna inteligencja w analizie zachowań kierowców czy wpływ automatyzacji i pojazdów autonomicznych na bezpieczeństwo systemów transportu.

Część praktyczną wizyta obejmowała wizytę techniczną w Centrum Zarządzania Ruchem (TMC) operatora Nea Attiki Odos oraz uczestnictwo w międzynarodowym symposium „Navigating the Future of Traffic Management”. Symposium poruszało pięć kluczowych obszarów: zarządzanie i wyzwania organizacyjne w systemach transportu, strategię operacyjną i efektywność sieci drogowych, nową generację systemów zarządzania ruchem, modele finansowania utrzymania sieci drogowych (w tym partnerstwa publiczno-prywatne) oraz wymianę danych w cyfrowym ekosystemie transportu. Wizytę uzupełniła wizyta studyjna do Centrum Eksploatacji i Utrzymania (OMC) w Megara, umożliwiającą obserwację praktycznych aspektów operacyjnego zarządzania infrastrukturą transportową.

Efekt wizyty studyjnej:

- Doświadczenie w zakresie aplikowania o fundusze europejskie oraz prowadzenia projektów międzynarodowych.
- Rozszerzenie zakresu tematycznego o międzynarodowe perspektywy w zarządzaniu ruchem i bezpieczeństwie.
- Dostęp do bazy danych greckiego odpowiednika Obserwatorium Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego.
- Opracowanie nowego przedmiotu w ramach oferty dydaktycznej programu Erasmus+ na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej: Intelligent Measurement and Modelling Systems in Transport.

Realizacja publikacji naukowych w ramach współpracy z innymi jednostkami naukowymi:

- **Vilnius Gediminas Technical University (Litwa)** (Edgar Sokolovskij, Jonas Matijošius), **Ondokuz Mayıs University (Turcja)** (Aydin Metin Mutlu)
 - Aydin Metin Mutlu, Edgar Sokolovskij, **Piotr Jaskowski** and Jonas Matijošius. 2025. "Service Management of Employee Shuttle Service Under Inhomogeneous Fleet Constraints Using Dynamic Linear Programming: A Case Study" *Applied Sciences* 15, no. 9: 4604. <https://doi.org/10.3390/app15094604>, (100 pkt. MNiSW, IF 2,5).
- **Vilnius Gediminas Technical University (Litwa)** (Jonas Matijošius, Artūras Kilikevičius), **Politechnika Lubelska** (Edward Kozłowski, Marta Cholewa-Wiktor)
 - **Piotr Jaskowski**, Edward Kozłowski, Piotr Tomczuk, Marcin Chrzanowicz, Jonas Matijošius, Marta Cholewa-Wiktor, Artūras Kilikevičius, Application of machine learning models for evaluating the impact of roadside advertising on driver discomfort, *Measurement*, Volume 255, 2025, 117915, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117915> (200 pkt. MNiSW, IF 5,6).
- **University of Zilina (Słowacja)** (Madleniak Radovan), **Vilnius Gediminas Technical University (Litwa)** (Zaranka Jurijus)

- Koniak, M., **Jaskowski, P.**, Madleniak, R., & Zaranka, J. (2025). Analysis of real-time energy transfer possibilities at intersections with consideration of energy storage. *Archives of Transport*, 73(1), 195–206. <https://doi.org/10.61089/aot2025.5dtybt57> (100 pkt. MNiSW, IF 0).
- **Vilnius Gediminas Technical University (Litwa)** (Jonas Matijošius, Artūras Kiliukevičius)
 - **Jaskowski, Piotr**, Marcin Koniak, Jonas Matijošius, Artūras Kiliukevičius. 2025. "Mapping Noise from Motorised Transport in the Context of Infrastructure Management" *Applied Sciences* 15, no. 3: 1277. <https://doi.org/10.3390/app15031277> (100 pkt. MNiSW, IF 2,5).
- **Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie** (Tomczuk Krzysztof)
 - Koniak, Marcin, **Piotr Jaskowski**, and Krzysztof Tomczuk. 2024. "Review of Economic, Technical and Environmental Aspects of Electric Vehicles" *Sustainability* 16, no. 22: 9849. <https://doi.org/10.3390/su16229849> (100 pkt. MNiSW, IF 3,3).
- **Instytut Badawczy Dróg i Mostów** (Skierczyński Paweł, Mechowski Tomasz, Sakowski Artur)
 - *Tomczuk Piotr, Chrzanowicz Marcin, Jaskowski Piotr, Skierczyński Paweł, Mechowski Tomasz: Bicycle road lighting – requirements and recommendations. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 2025, vol. 24, nr 3, s.331-340. DOI:10.7409/rabdim.025.019* (70 pkt. MNiSW, IF 0,6).
 - **Jaskowski P.**, Tomczuk P., Chrzanowicz M., Skierczyński P., Sakowski A. (2025). Analysis of optical parameters of materials used for road markings. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 24(4), 597–606. <https://doi.org/10.7409/rabdim.025.040> (70 pkt. MNiSW, IF 0,6).
- **Instytut Transportu Samochodowego** (Skoczyński Przemysław)
 - **Jaskowski Piotr**, Welcz-Jędra Ewa, Skoczyński Przemysław: "Inspection of road traffic safety at road-rail crossings of the Warsaw Commuter Railway". *Journal of Konbin* 55, 2 (2025): 141-156. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.1561> (40 pkt. MNiSW, IF 0).

Tabela 16. Podsumowanie aktywności naukowej z innymi instytucjami naukowymi po doktorcie

Osiągnięcie	Liczba	Liczba instytucji naukowych
Publikacje	7	8
Projekty	4	3
Staż/wizyta studyjna	3	3

Sumaryczna liczba punktów za publikacje naukowe zgodnie z wykazem MNiSW: 780.

Sumaryczny Impact Factor publikacji: 15,1.

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

6.1 Osiągnięcia dydaktyczne

6.1.1 Przed doktoratem

Aktywność dydaktyczna przed doktoratem dotyczy prowadzenia zajęć:

- Technologia Informacyjna (I stopień) – laboratorium;
- Elektrotechnika III (I stopień) – laboratorium;
- Elektrotechnika I (I stopień) – laboratorium;
- Informatyka I (I stopień) – laboratorium;
- Informatyka II (I stopień) – laboratorium;
- Probabilistyka I (I stopień) – ćwiczenia;
- Probabilistyka II (I stopień) – laboratorium;
- Systemy transportu elektrycznego, ekologicznego i autonomicznego (I stopień) – projekt;
- Teoria Niezawodności i Bezpieczeństwa (II stopień) –zajęcia komputerowe;
- Procesy Stochastyczne (II stopień) –zajęcia komputerowe;
- Systemy pomiarowe w praktyce transportowej (II stopień) –zajęcia komputerowe;
- Theory of Reliability and Safety (Full-Time Degree Programs in English) – laboratorium;
- Stochastic Processes (Full-Time Degree Programs in English) – laboratorium;
- Selected Sections of the Applied Informatics (Full-Time Degree Programs in English) – laboratorium ;
- Stochastic Processes (Full-Time Degree Programs in English) – wykład/zajęcia komputerowe;
- Measurement Systems in Transportation Practise (Full-Time Degree Programs in English) – wykład/laboratorium;

W celu zwiększania kompetencji w zakresie prowadzeni zajęć w języku angielskim, odbył kurs pn. prowadzenie dydaktyki w języku obcym - język angielski na poziomie biegłości językowej C1 (operational proficiency - Advanced) . 9.03.-17.06.2021.

6.1.2 Po doktoracie

Aktywność dydaktyczna po doktoracie dotyczy prowadzenia zajęć:

- Badanie urządzeń i układów elektrycznych (I stopień) – laboratorium;
- Probabilistyka I (I stopień) – ćwiczenia;
- Probabilistyka II (I stopień) – laboratorium;
- Systemy transportu elektrycznego, ekologicznego i autonomicznego (I stopień) – projekt;

- Teoria Niezawodności i Bezpieczeństwa (II stopień) –zajęcia komputerowe;
- Procesy Stochastyczne (II stopień) – wykład/zajęcia komputerowe;
- Systemy pomiarowe w praktyce transportowej (II stopień) – wykład/zajęcia komputerowe;
- Theory of Reliability and Safety (Full-Time Degree Programs in English) – laboratorium;
- Stochastic Processes (Full-Time Degree Programs in English) – laboratorium;
- Selected Sections of the Applied Informatics (Full-Time Degree Programs in English) – laboratorium ;
- Stochastic Processes (Full-Time Degree Programs in English) – wykład/zajęcia komputerowe;
- Measurement Systems in Transportation Practise (Full-Time Degree Programs in English) – wykład/laboratorium;
- Intelligent Measurement and Modelling Systems in Transport (Erasmus Plus) – wykład/laboratorium/project.

Opracowano w czasie realizacji procesu dydaktycznego, modernizacje i nowe programy dla przedmiotów:

- Stochastyczne (II stopień) – wykład, zajęcia komputerowe, 2023, kierownik przedmiotu.
- Stochastic Processes (Full-Time Degree Programs in English) – wykład, zajęcia komputerowe, 2023, kierownik przedmiotu.
- Systemy pomiarowe w praktyce transportowej (II stopień) – wykład, laboratorium, 2023, kierownik przedmiotu.
- Systemy transportu elektrycznego, ekologicznego i autonomicznego (I stopień) – projekt;
- Measurement Systems in Transportation Practise (Full-Time Degree Programs in English) – wykład, laboratorium, 2023, kierownik przedmiotu;
- Intelligent Measurement and Modelling Systems in Transport (program Erasmus+) – wykład, zajęcia komputerowe, 2025, kierownik przedmiotu.

W ramach pracy dydaktycznej współpracowałem w zespole:

- Opracowanie w zespole nowej specjalności na studiach II stopnia „Pojazdy autonomiczne i systemy transportu autonomicznego”. Za co otrzymałem Nagrodę zespołową I stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia organizacyjne w latach 2021-2022
- Opracowanie w zespole nowej specjalności na studiach I stopnia „Zaawansowane technologie w systemach transportu drogowego”.

- Opracowanie nowego programu zajęć dydaktycznych z przedmiotu: Probabilistyka II (I stopień) – wykład, zajęcia komputerowe, 2023. Otrzymałem Nagrodę zespołową I stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia dydaktyczne w roku 2022.

Pełniłem rolę:

- Promotora 6 prac dyplomowych: 1 pracy inżynierskiej i 5 prac magisterskich (w języku angielskim);
- Opiekuna naukowego 8 studentów przebywających na wymianie w ramach programu Erasmus+.

W celu zwiększania kompetencji w zakresie modelowania ruchu drogowego, odbył kurs zakończony certyfikatem dotyczący modelowania transportu „Aimsun Next Modelowanie strategiczne – model czteroetapowy”.

6.2 Osiągnięcia organizacyjne

6.2.1 Przed doktoratem

Członkostwo w gremiach wydziałowych i uczelnianych:

- Przedstawiciel Doktorantów w Zespole d.s. Wydziałowego Systemu Zapewniania Jakości Kształcenia na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej, kadencja 2016 – 2020;
- Funkcja Komisarza Wyborczego w wyborach do Wydziałowych Rad Doktorantów Politechniki Warszawskiej 2020;
- Funkcja Komisarza Wyborczego w wyborach do Wydziałowych Rad Doktorantów oraz Rad Doktorantów Szkół Doktorskich na Politechnice Warszawskiej 2021;
- Przewodniczący Koła Naukowego Elektrotechniki w Systemach Transportowych od grudnia 2013 do maja 2017 r.

Członkostwo w komitetach organizacyjnych konferencji naukowych i seminariów naukowych:

- Współorganizator IV Konferencji Naukowej Logistyka i Zarządzanie w Mediach „Rafinacja Big Data – nowe źródło informacji” (Warszawa, 26 października 2017 r.);
- Współorganizator VIII Ogólnopolskiej Konferencji Metodologicznej Medioznawców „Komunikowanie w świecie aplikacji” (Warszawa, 16-17 listopada 2017 r.).

6.2.2 Po doktoracie

Członkostwo w gremiach wydziałowych i uczelnianych:

- Elektor do kolegium elektorów do wyboru dziekana na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej w roku 2022;

- Opiekun Studenckiego Koła Naukowego Elektrotechniki w Systemach Transportowych (KNEST) od marca 2025 r.;
- Kierownik Laboratorium Zautomatyzowanych Systemów Informatycznych;
- Przedstawiciel Wydziału Transportu w programie pilotażowym Biura Komunikacji i Promocji Politechniki Warszawskiej (program nr CPR-IDUB/148/Z11/2024), od 10 września 2025 r.

Członkostwo w komitetach organizacyjnych konferencji naukowych i seminariów naukowych:

- Członek komitetu organizacyjnego Międzynarodowej Konferencji Naukowej Transport XXI Wieku, Ryn 2-5 września 2025r.;
- Członek komitetu organizacyjnego i naukowego I Konferencji naukowo-technicznej "Oświetlenie przestrzeni publicznej" LIGHTFLOW 2025, 20 listopada 2025r., Instytut Badawczy Dróg i Mostów;
- Członek komitetu organizacyjnego i naukowego II Konferencji TRANSPORT AUTONOMICZNY, Gdynia 09 grudnia 2025 r. Wydział Nawigacyjny, Uniwersytet Morski w Gdyni.

Członkostwo w pracach czasopism naukowych:

- Early Career Editorial Board Member Sustainability, od sierpnia 2025 r.

Członkostwo w Komitecie Transportu Polskiej Akademii Nauk w Sekcji Sztucznej Inteligencji i Cyberbezpieczeństwa w Transporcie na kadencję 2024-2027

6.3 Osiągnięcia popularyzujące naukę

6.3.1 Przed doktoratem

Od początku działalności pracowałem i uczestniczyłem w działaniach promocyjnych Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej

- Prowadzenie zajęć popularyzujących wiedzę w ramach programu PW JUNIOR od grudnia 2013 do marca 2020 roku pełniłem rolę prowadzącego w ramach programu edukacyjnego Politechniki Warszawskiej skierowanego do uczniów szkół podstawowych oraz gimnazjum, mający zachęcić młodzież do wyboru kierunków technicznych i zainteresowania naukami ścisłymi. W trakcie trwania programu opracowałem trzynastcie scenariuszy zajęć.
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wydarzenia z okazji dnia dziecka na Wydziale Transportu, 01.06.2014 r.
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas pikniku i szkoleniach „Energia – korzystaj EKOlogicznie” w Markach, 28.09.2014 r.
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wystawy Kół Naukowych z okazji Świąta Politechniki Warszawskiej, 15.11.2014 r.

- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wydarzenia: Mecz siatkówki AZS PW – PGE Skra Bełchatów z okazji inauguracji 100-lecia odnowienia Tradycji Politechniki Warszawskiej, 11.01.2015.
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wydarzenia: Salon Edukacyjny PERSPEKTYWY 2016, Warszawa, 27-28.02.2015 r.
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wydarzenia: Dni Otwarte PW 28-29.03.2015 r.
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST w ramach akcji „Dziewczyny na Politechniki” w dniu 23 kwietnia 2015 r.
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wydarzenia: Piknik z okazji obchodów odnowienia tradycji Politechniki Warszawskiej 15-16.05.2015 r.
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wydarzenia: Targi Kół Naukowych i Organizacji Studenckich KONIK, 28-29.10.2015 r.
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wydarzenia: Naukowy Dzień Dziecka i Zawody Sumo Robotów, Impreza zorganizowana na Wydziale Transportu PW. 23.05.2015 r.
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wydarzenia: XXV Międzynarodowy Salon Edukacyjny PERSPEKTYWY 2016” 25-27.02.2016 r.
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wydarzenia: Dni Otwarte PW 24.04.2016 r. na Wydziale Transportu PW
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wydarzenia: Naukowy Dzień Dziecka i Zawody Sumo Robotów. 19.06.2016 r.
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wydarzenia: XIII edycja Targi Kół Naukowych i Organizacji Studentów KONIK. 20-21.10.2016 r.
- Organizacja kursu i egzaminu dla studentów Wydziału Transportu: „Uprawnienia elektryczne SEP Eksploatacja gr.1” Wykonawca: Akademia Umiejętności Inżynierskich. Data kursu: kwiecień 2017 r.
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wydarzenia: Piknik edukacyjny „Od mikro do makro”, 9-10.06.2017, Plac Politechniki
- Reprezentant Koła Naukowego KNEST podczas wydarzenia: Targi Kół Naukowych i Organizacji Studenckich KONIK 2018, Gmach Główny PW.
- Uczestnik w wydarzeniu: Drzwi Otwarte Politechniki Warszawskiej 28.05.2022 r.

6.3.2 Po doktoracie

Działania promocyjne na rzecz Wydziału:

- Udział w wydarzeniu: Drzwi Otwartych 2023 (20 maja 2023 r.).
- Udział w wydarzeniu: Drzwi Otwartych 2024 (18 maja 2024 r.).
- Udział w wydarzeniu: Drzwi Otwartych 2025 (14 czerwca 2025 r.).
- Opiekun w trakcie wydarzenia pierwszej Narodowa Sesja Model European Parliament (MEP) 16 czerwca 2025 r.).

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

7.1 Realizacja prac badawczych na rzecz przemysłu

7.1.1 Przed doktoratem

Udział w pracach naukowo badawczych na rzecz przemysłu:

- Opracowanie zewnętrzne na zlecenie Skarbu Państwa – Ministra Infrastruktury i Budownictwa, reprezentowanego przez Sekretariat Krajowej Rady BRD w ramach umowy nr SKR-V-126/17 z dnia 18 września 2017 r. w konsorcjum w składzie: Fundacja Rozwoju Inżynierii Lądowej, Politechnika Gdańska oraz Instytut Badawczy Dróg i Mostów, w Partnerstwie z Politechniką Warszawską. Na podstawie umowy FIRL/PW/23/G/2017 z dnia 18.09.2017. – kwota umowy: 156.000,00 złotych PLN netto. Liczba wykonawców 6. Kierownik w instytucji PW: Piotr Tomczuk, Zakres tematyczny: Opracowanie wytycznych organizacji bezpiecznego ruchu pieszych – wytyczne dotyczące prawidłowego oświetlenia przejść dla pieszych. Realizowałem zadania związane z przeglądem i analizą aktów prawnych w zakresie oświetlenia przejść dla pieszych.
- Opracowanie zewnętrzne pt.: Opracowanie wytycznych dotyczących projektowania dróg zamiejskich i ulic w ramach wzorców i standardów w drogownictwie, jako narzędzia do optymalizacji wydatkowania środków z budżetu Unii Europejskiej (Pakiet B). Znak sprawy: BDG-5.2511.3.2021.IO. Wartość projektu 2.901.000,00 zł netto. Zadanie realizowane na podstawie umowy DDP-POPT-U-128/21-T z dnia 6.10.2021 r. Lider Politechnika Krakowska, Zadanie PW WT: (06.10.2021 – 05.10.2022) Opracowanie dokumentu: Wytyczne projektowania, realizacji i utrzymania urządzeń do oświetlenia dróg zamiejskich i ulic, Kierownik zadania w instytucji PW i koordynator projektu: Piotr Tomczuk. Wartość zadania 400.000,00 zł netto. Zadanie realizowane w konsorcjum w składzie: Politechnika Warszawska (Wydział Transportu) - lider zadania, Politechnika Gdańska oraz Transprojekt Gdański Sp. z o.o., na podstawie umowy z dnia 18.01.2022. – kwota umowy dla WT PW: 225.000,00 złotych PLN netto. Symbol pracy: 501210102585. Opracowanie finansowane ze środków Funduszu Spójności w ramach programu Operacyjnego Pomoc Techniczna. Realizowałem zadania związane z przeglądem i analizą aktów prawnych w zakresie oświetlenia dla dróg.
- Ekspertyza dla Zarządu Dróg Miejskich w Warszawie: „Ocena poprawności działania systemu mobilnej kontroli pojazdów zaparkowanych w strefie SPPN (Strefa Płatnego Parkowania Niestrzeżonego)”. Wydział Transportu Politechnika Warszawska. Pełniłem rolę wykonawcy, będąc współautorem zadań: - opracowanie koncepcji przeprowadzenia badania; - przeprowadzenie pomiarów w

- terenie; - analiza norm i aktów prawnych w zakresie tematyki ekspertyzy wraz z sporządzeniem dokumentacji technicznej; - opracowanie raportu końcowego.
- Wykonawca: Projekt pn. „Inwestycje w zakresie zielono-niebieskiej infrastruktury w Grodzisku Mazowieckim” dofinansowane ze środków Mechanizmu Finansowego EOG 2014-2021 w ramach programu: „Środowisko, Energia i Zmiany klimatu” (Umowa nr MFEOG.07.03.0-07-0025/21-00). Realizowałem zadania związane z przygotowaniem zmian organizacji ruchu drogowego na obszarze objętym modernizacją.
 - Biuro Konsultacyjno – Projektowe Inżynierii Drogowej „TRAFIK” s. c. od maja 2016 do grudnia 2020 r. Przeprowadzenie pomiarów stanu oświetlenia przejść dla pieszych wraz z opracowaniem wyników w Warszawie – zadania pt. „Audyt BRD przejść dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej na drogach zarządzanych przez ZDM pod kątem skuteczności oświetlenia tych przejść i audytu zastosowanej organizacji ruchu”. Wykonałem: - pomiary oświetlenia łącznie dla 1202 przejść dla pieszych na terenie Warszawy w ramach audytu BRD, - analiza wyników, - propozycja rekomendacji związanych z poprawą stanu oświetlenia.
 - Udział w projekcie badawczym dotyczącym doboru typu i pojemności baterii trakcyjnej do autobusów elektrycznych eksploatowanych na określonych liniach komunikacyjnych. Projekt realizowany w ramach umowy o pracę badawczą pomiędzy Politechniką Warszawską i Miejskimi Zakładami Autobusowymi sp. z o. o. z siedzibą w Warszawie. Kierownikiem projektu był dr inż. Marcin Koniak. Realizowałem następujące zadania: - badania wskazanych technologii ogniw chemicznych pod kątem parametrów eksploatacyjnych i starzeniowych, - analiza literatury na temat wskazanych ogniw chemicznych, - opracowanie wyników pomiarów.

7.1.2 Po doktoracie

- Projekt: „Opis funkcjonalności obliczania czasów przejazdu (Travel time)”, Krajowy System Zarządzania Ruchem Drogowym na sieci TEN-T” we współpracy z podmiotem Aluvisa, w ramach projektu: Krajowy System Zarządzania Ruchem Drogowym na sieci TEN-T - etap I, realizowany przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA), projekt współfinansowanych w ramach Instrumentu „Łącząc Europę” (Connecting Europe Facility - CEF). Nr projektu” INEA/CEF/TRAN/M2015/1143713 (numer umowy o dofinansowanie: CEF/021/2015), całkowity budżet projektu 645 541 693 PLN. Wykonałem zadania związane z: - koordynacją prac związanych z opracowaniem raport, - reprezentowanie wykonawcy w spotkaniach i seminariach z zamawiającym (GDDKiA).
- Projekt: „Opracowanie dokumentacji oraz uzyskanie niezbędnych uzgodnień dla stałej organizacji ruchu w ramach KSZR.” na potrzeby Krajowy System Zarządzania Ruchem Drogowym (Oddział Katowice) zawarta w dniu 07.12.2023 r. Zamawiający

Skarb Państwa – Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad (Oddział Katowice). Zakres prac związany z opracowaniem projektów zmian stałej organizacji ruchu drogowego na autostradach i drogach szybkiego ruchu.

- Kompleksowe opracowanie zmian w organizacji ruchu, na obszarze dzielnicy Włochy i Mokotów (Służewiec) m.st. Warszawy w zakresie wszystkich dróg publicznych wraz z pełnieniem nadzoru autorskiego. Przedmiotem zamówienia jest wykonanie opracowania pn. „Kompleksowe opracowanie zmian w organizacji ruchu, na obszarze dzielnicy Włochy i Mokotów (Służewiec) m.st. Warszawy w zakresie wszystkich dróg publicznych wraz z pełnieniem nadzoru autorskiego”, na obszarze dzielnic Mokotów i Włochy. Realizuje zadania związane z: - opracowanie zmian w organizacji ruchu, w tym poprawa bezpieczeństwa ruchu, uwzględnienie zmian wynikających z kart kontroli organu zarządzającego ruchem; - uporządkowania postoju, oznakowanie wszystkich wyznaczonych miejsc parkingowych zgodnie z wymaganiami dla wprowadzenia i funkcjonowania Strefy Płatnego Parkowania Niestrzeżonego, na całym obszarze opracowania.
- Ekspertyza dla Ośrodka Certyfikacji Transportu pt. „Wykorzystanie systemów eyetracking do badania maszynisty pociągu z użyciem symulatora wysokiej klasy”, 2023 r.
- Komercjalizacja w ramach spółki spin-off Politechniki Warszawskiej o nazwie MobiLight Lighting Research sp. z o. o. w której pełnił rolę prezesa zarządu. Realizacja zleceń związanych z pomiarami oświetlenia drogowego, audytów oraz analiz wspierających rozwój nowoczesnych rozwiązań oświetleniowych. Spółka koncentruje się na komercjalizacji osiągnięcia konstrukcyjnego [11] i technologicznego [12].

7.2 Recenzowanie prac naukowych

7.2.1 Przed doktoratem

—

7.2.2 Po doktoracie

Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych (informacje: Nazwa czasopisma lub wydawnictwa (w przypadku recenzowania monografii), okres, liczba zrecenzowanych manuskryptów publikacji):

- Sustainability (MDPI), od 2022, 6 publikacji;
- Applied Sciences (MDPI), od 2022, 5 publikacji;
- Urban Science(MDPI), od 2022, 1 publikacja;
- Energies (MDPI), od 2022, 1 publikacja;
- Telecom (MDPI), od 2022, 1 publikacja;
- Machines (MDPI), od 2022, 1 publikacja;
- IJERPH (MDPI), od 2022, 1 publikacja;

- Symmetry (MDPI), od 2022, 1 publikacja;
- Smart Cities (MDPI), od 2022, 1 publikacja;
- IJGI (MDPI), od 2022, 3 publikacji;
- BDCC (MDPI), od 2022, 1 publikacja;
- Systems (MDPI), od 2022, 1 publikacja;
- AppliedMath (MDPI), od 2022, 1 publikacja;
- Scientific Review Engineering and Environmental Sciences (czasopismo Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie), od 2025, 1 publikacja.

7.3 Uzyskane nagrody i wyróżnienia

7.3.1 Przed doktoratem

Nagrody naukowe:

- Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne osiągnięcia na rok akademicki 2015/2016;
- Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne osiągnięcia na rok akademicki 2016/2017;
- Stypendium Rektora Politechniki Warszawskiej dla najlepszych studentów za osiągnięcia naukowe za rok akademicki 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016;
- Stypendium Rektora Politechniki Warszawskiej dla najlepszych studentów za wyniki w nauce za rok akademicki 2012/2013, 2013/2014, 2014/2015.

Nagrody dydaktyczne:

- Nagroda zespołowa I stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia dydaktyczne w roku 2022 (rok 2023)

Nagrody organizacyjne:

- Nagroda zespołowa I stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia organizacyjne w latach 2021-2022;
- Nagroda indywidualna III stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia organizacyjne w latach 2021-2022;
- Nagroda Rektora Politechniki Warszawskiej za wyjątkowe zaangażowanie na rzecz Uczelni w semestrze zimowym roku akademickiego 2021/2022.

7.3.2 Po doktoracie

Nagrody naukowe:

- Nagroda Prezydenta m.st. Warszawy za prace dyplomowe z zakresu rozwoju Warszawy (wyróżnienie w kategorii rozpraw doktorskich). Wydana przez Prezydent m. st. Warszawy Rafała Trzaskowskiego, grudzień 2023;

- Nagroda Uniwersytetu SWPS w kategorii Innowacyjny Naukowiec w XVI edycji konkursu Innowator Mazowsza, 2024;
- Stypendium naukowe Rektora PW dla nauczycieli akademickich z Własnego Funduszu Stypendialnego Politechniki Warszawskiej, 2024, Rektor Politechniki Warszawskiej, Konkurs prowadzony przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport.
- Nagroda Indywidualna stopnia III Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe w roku 2022.
- Wyróżnienie rozprawy doktorskiej na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej pt. „Metoda pomiaru stanu infrastruktury oświetleniowej w ruchu drogowym”.

Nagrody organizacyjne:

- Nagroda zespołowa I stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia organizacyjne w roku akademickim 2023/2024 (rok 2025)
- Nagroda indywidualna III stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia organizacyjne w latach 2021-2022 (rok 2023)

7.4 Inne

Doskonalenie umiejętności w obszarze naukowo-badawczym:

- Kurs Audyt Bezpieczeństwa Ruchu drogowego na Politechnice Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki w okresie od lutego do czerwca 2023 r., zakończony uzyskaniem certyfikatu Audytor bezpieczeństwa ruchu drogowego, nadany przez Ministerstwo Infrastruktury.
- Certyfikat szkolenia Oświetlenie Dróg nadany przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów (2025 r.).
- Certyfikat AgilePM Agile Project Management Foundation Examination.
- Certyfikat AgileBA Agile Business Analyst Foundation Examination.
- Certyfikat ukończenia kursu oprogramowania do modelowania transportu Aimsun Next Modelowanie strategiczne – model czteroetapowy.
- Członek Stowarzyszenia Forum Audytorów Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego.

Projekty naukowe pozyskane w ramach konkursu ze środków zewnętrznych:

Otrzymał grant Narodowego Centrum Nauki w ramach konkursu MINIATURA 7 na przeprowadzenie badań pilotażowych pt. „Wpływ kongestii na zachowania kierowcy.”, nr grantu [2023/07/X/ST8/00244], kwota finansowania 33 000 zł, okres realizacji od 11 lipca 2023 r. do 10 lipca 2024 r. Projekt badawczy skupiał się na przeanalizowaniu zachowań kierowców opuszczających strefy kongestii i wjeżdżających do stref o ruchu swobodnym. Pełniłem rolę kierownika projektu, realizując zadania: - opracowanie koncepcji projektu, - opracowanie metodologii przeprowadzenia pomiarów; - nadzór nad pracą wykonawców

zbiorowych; - nadzór nad właściwym ustawieniu sprzętu pomiarowego wraz z realizacją pomiarów w terenie; - opracowanie raportu końcowego.

Projekty naukowe pozyskane w ramach konkursu ze środków własnych uczelni:

- Grant Rektorski dla Studenckiego Koła Naukowego Elektrotechniki w Systemach Transportowych: „Oprawa LED o zmiennym widmie promieniowania do oświetlenia stanowiska dyspozytora ruchu w metrze”. Kierownik projektu: Tomczuk Piotr. Numer umowy: 500C/1000/1160/541, Warszawa 2013. Pełniłem rolę lidera zespołu studenckiego i głównego wykonawcy, efekty prac zostały przedstawione w ramach konferencji naukowych.
- Duża Pula na Projekty Naukowe Rady Kół Naukowych Politechniki Warszawskiej: „Konstrukcja pojazdu elektrycznego gokart dostosowanego do współpracy z zewnętrznym źródłem sterowania”. Kierownik pracy Koniak Marcin. Warszawa 2014 r. Pełniłem rolę lidera trzech Kół Naukowych realizujących projekt i głównego wykonawcy, efekty prac zostały przedstawione w ramach konferencji naukowych.
- Grant Rektorski dla Studenckiego Koła Naukowego Elektrotechniki w Systemach Transportowych: „Budowa układu telemetry do rejestracji parametrów eksploatacyjnych pojazdów elektrycznych”. Kierownik projektu Czerepicki Andrzej. Nr pracy 540020200111, Warszawa 2015 r. Pełniłem rolę lidera zespołu studenckiego i głównego wykonawcy, efekty prac zostały przedstawione w ramach konferencji naukowych.
- Grant Rektorski dla Studenckiego Koła Naukowego Elektrotechniki w Systemach Transportowych: „Budowa symulatora przeznaczonego do celów symulacji procesów ruchu drogowego”. Kierownik projektu Koniak Marcin. Nr pracy 540020200140, Warszawa 2016 r. Pełniłem rolę lidera zespołu studenckiego i głównego wykonawcy, efekty prac zostały przedstawione w ramach konferencji naukowych.
- Grant Rektorski dla Studenckiego Koła Naukowego Elektrotechniki w Systemach Transportowych: „Budowa rejestratorów obrazu do analizy zachowań uczestników ruchu drogowego na przejściach dla pieszych”. Kierownik projektu Tomczuk Piotr. Numer umowy: 540020200214, Warszawa 2017 r. Pełniłem rolę lidera zespołu studenckiego i głównego wykonawcy, efekty prac zostały przedstawione w ramach konferencji naukowych.
- . Grant Rektorski dla Studenckiego Koła Naukowego Elektrotechniki w Systemach Transportowych: „Budowa mobilnego systemu pomiarowego do badania natężenia oświetlenia na jezdni w ruchu drogowym”. Kierownik projektu Tomczuk Piotr. Numer umowy: 540020200234, Warszawa 2018 r. Pełniłem rolę lidera zespołu studenckiego i głównego wykonawcy, efekty prac zostały przedstawione w ramach konferencji naukowych.
- Grant Rektorski dla Studenckiego Koła Naukowego Elektrotechniki w Systemach Transportowych: „ Budowa mobilnego systemu lokalizacji i wyznaczania kierunku

jazdy przy zastosowaniu skanerów lidarowych”, kierownik projektu: Kozłowski Maciej. Numer umowy: 540020200214, Warszawa 2019 r. Pełniłem rolę lidera zespołu studenckiego i głównego wykonawcy, efekty prac zostały przedstawione w ramach konferencji naukowych.

- Grant Rektorski dla Studenckiego Koła Naukowego Elektrotechniki w Systemach Transportowych: „Modernizacja stanowiska do pomiarów eksploatacyjnych ogniw chemicznych”. Kierownik projektu Marcin Koniak, Numer umowy: 504440300013, Warszawa 2020 r. Pełniłem rolę lidera zespołu studenckiego i głównego wykonawcy, efekty prac zostały przedstawione w ramach konferencji naukowych.
- Grant Dziekan Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej: „Pilotażowe badania natężenia oświetlenia ulicznego przy użyciu autorskiej metodologii”, Warszawa 2018 r., kierownik grantu.
- Grant Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa Geodezja i Transportu „Rozbudowa stanowiska laboratoryjnego do dynamicznych pomiarów oświetlania ulicznego”, Warszawa 2022 r., kierownik grantu.
- Grant Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa Geodezja i Transportu „Analiza technologii i strategii wykorzystania akumulatorów hybrydowych układach zasilania dla transportu”, Warszawa 2023 r., kierownik grantu: Koniak Marcin. Habilitant wykonywał zadania związane z analizą literatury i opracowania publikacji naukowej.
- Grant Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa Geodezja i Transportu „Dynamiczne sterowanie oświetleniem ulicznym”, Warszawa 2025 r., kierownik grantu.
- Grant Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa Geodezja i Transportu „Techniki pomiarowe w zastosowaniu dekarbonizacji i bezpieczeństwa ruchu drogowego” nr 4/A/ILGiT/202, Warszawa 2025 r., kierownik grantu.
- Grantu Dziekan Wydziału Transportu „Cyfrowy bliźniak infrastruktury drogowej jako narzędzie dekarbonizacji transportu drogowego”, Warszawa 2025 r., kierownik grantu.