

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
Wydział Inżynierii Lądowej
Katedra Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu

Rozprawa doktorska:

**Ocena wykorzystania danych GPS z systemu rowerów
miejskich w analizach ruchu rowerowego i jego
bezpieczeństwa**

Autor: mgr inż. Sylwia Pazdan
Promotor: dr hab. inż. Mariusz Kieć, prof. PK

Kraków, luty 2022r.

*Składam serdeczne podziękowania promotorowi
Panu dr hab. inż. Mariuszowi Kieciowi, prof. PK
za opiekę naukową, poświęcony czas oraz
wartościowe uwagi merytoryczne.*

*Pragnę również podziękować
Panu prof. dr hab. inż. Stanisławowi Gacy,
za bezinteresowną pomoc oraz cenne wskazówki.*

Streszczenie

W pracy podjęto badania nad możliwością wykorzystania danych GPS z systemu rowerów miejskich do szacowania parametrów ruchu rowerowego, oceny bezpieczeństwa w ruchu rowerowym oraz identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów w skali makro.

Na podstawie analizy wariancji ANOVA oraz przy wykorzystaniu uogólnionych modeli liniowych wykonano analizę porównawczą zmienności sezonowej oraz wpływu warunków pogodowych na natężenia ruchu rowerowego i liczbę wypożyczeń rowerów miejskich. Uogólnione modele liniowe były również podstawą badań nad udziałem rowerów miejskich w natężeniu dobowym ruchu rowerowego i związkiem pomiędzy prędkościami chwilowymi rowerzystów korzystających z rowerów miejskich, a prędkościami ogółu rowerzystów wyznaczonymi w badaniach empirycznych. Zaprezentowane wyniki badań wskazują, że parametry ruchu ogółu rowerzystów pozostają w ścisłym związku z charakterystykami ruchu rowerzystów korzystających z systemu rowerów miejskich i mogą być szacowane na ich podstawie.

W ramach oceny bezpieczeństwa ruchu rowerowego zidentyfikowano miarę pośrednią wyznaczoną na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich, która wykazywała najsilniejszy związek z liczbą rejestrowanych zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów, oceniony na podstawie wartości kryterium informacyjnego Akaike uogólnionych modeli liniowych. Wybrana miara pośrednia była podstawą budowy modelu bezpieczeństwa ruchu rowerowego, umożliwiającego ocenę poziomu bezpieczeństwa ruchu rowerowego reprezentowanego poprzez liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów na przejazdach rowerowych z uwzględnieniem wpływu czynników drogowo-ruchowych. Ponadto w skali makro w sposób ilościowy oszacowano wpływ czynników infrastrukturalnych zidentyfikowanych na podstawie baz danych OpenStreetMap oraz CARTO na zagrożenie zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów (ocenione w oparciu o wytypowaną miarę pośrednią bezpieczeństwa ruchu rowerowego). Uzyskane wyniki wskazują, że dane GPS z systemu rowerów miejskich mogą stanowić uzupełnienie bazy wiedzy obok danych o zdarzeniach drogowych i być wspólnie z nimi wykorzystywane do identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów. Wykorzystując teorię wartości ekstremalnych wskazano graniczną wartość opóźnienia w ruchu rowerów systemu miejskiego, której liczba wystąpień najlepiej reprezentowała poziom bezpieczeństwa ruchu rowerowego oszacowany na podstawie liczby rejestrowanych zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów. Wskazano tym samym wartość miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego, która mogłaby być wykorzystana do identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów.

Przedstawione w pracy modele są statystycznie istotne i charakteryzują się wysokim poziomem dopasowania do danych obserwowanych.

Abstract

The thesis addresses the problem of using bike sharing system GPS data to estimate bicycle traffic parameters, assess bicycle road safety and identify locations with increased possibility of road crashes with cyclist in macro scale.

Based on ANOVA analysis of variance and generalized linear models (GLM), a comparative analysis of seasonal variability and the impact of weather conditions on daily bicycle volume and daily number of city bike rentals was performed. GLMs were also used to analyze share of city bikes in daily bicycle volume and the relationship between speeds of regular cyclists gathered during empirical research and speeds of bike sharing system users. The results show that bicycle traffic parameters are related to traffic parameters of bike sharing system users' and can be estimated on their basis.

As a part of bicycle road safety analysis, a surrogate safety measure calculated based on bike sharing system GPS data, with the strongest relationship with the number of observed road crashes with cyclists assessed based on the Akaike information criterion of GLMs, was identified. The selected surrogate safety measure was the basis of the bicycle crash prediction model, which allows to assess bicycle road safety represented by the number of road crashes with cyclists at bicycle crossings, with the inclusion of the impact of road and traffic flow conditions. In addition, on a macro scale, the impact of infrastructural factors identified based on OpenStreetMap and CARTO databases on the possibility of road crashes with cyclists was quantified (assessment on the basis of the selected surrogate safety measure). The results show that bike sharing system GPS data can be used as a complementary to the road crashes database and to identify locations with an increased possibility of road crash with cyclists. By using the extreme value theory, a threshold value of deceleration rate of the bike sharing system users', which number of occurrence the best represented the level of bicycle road safety estimated based on the number of observed road crashes with cyclists, was identified. Thus, a value of bicycle surrogate safety measure, which could be used to identify locations with increased possibility of road crashes with cyclist, was estimated.

The models presented in the dissertation are statistically significant and are characterized by a high level of goodness of fit to the observed data.

Spis podstawowych symboli i oznaczeń:

brd – bezpieczeństwa ruchu drogowego;

ŚDRR – średniodobowe natężenie ruchu rowerowego [R/24h];

ŚDRR_{wskaz} – wskaźnik dobowej zmienności natężenia ruchu rowerowego [-];

Q – dobowe natężenie ruchu rowerowego [R/24h];

Q_{Wavelo,m} – natężenie ruchu rowerów Wavelo w miesiącu [R/m-c];

Q_{Wavelo} – dobowe natężenie ruchu rowerów Wavelo [R/24h];

Q_{Wavelo,h} – godzinowe natężenie ruchu rowerów Wavelo [R/h];

V_{sr} – średnia prędkość w ruchu rowerowym [m/s];

V_{Wavelo} – średnia prędkość rowerów Wavelo [m/s]

OSM – OpenStreetMap;

a – przyspieszenie lub opóźnienie w ruchu rowerowym [m/s²];

L_{opa} – liczba opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach nie mniejszych niż a [-];

α – poziom istotności [-];

1- α – poziom ufności [-];

df – liczba stopni swobody [-];

Wybrane oznaczenia dot. testów statystycznych:

F – statystyka testu analizy wariancji ANOVA [-];

W – statystyka testu Shapiro-Wilka [-];

NIR – statystyka testu post hoc HSD Tukey'a [-];

F_L – statystyka testu Levene'a [-];

χ²_{Walda} – statystyka testu chi-kwadrat Walda [-];

u, t – statystyka testu istotności dla dwóch wartości średnich [-];

u_s – statystyka testu istotności dla dwóch wskaźników struktury [-];

Wybrane oznaczenia dot. modeli regresyjnych:

α – wyraz wolny modelu regresyjnego [-];

β, ξ, γ - współczynniki modeli regresyjnych [-];

Z_i – zmienna ilościowa [-];

Z_j – zmienna jakościowa [-];

R^2 – współczynnik determinacji [-];

VIF – czynnik wzrostu wariancji [-];

r_s – współczynnik korelacji Spearmana [-];

Wybrane oznaczenia w teorii wartości ekstremalnych:

GEV – uogólniony rozkład wartości ekstremalnych (*ang. Generalized Extreme Value*);

GPD - uogólniony rozkład Pareto (*ang. Generalized Pareto Distribution*);

α – parametr położenia rozkładu GEV [-];

β - parametr skali rozkładu GEV lub GPD [-];

ξ - parametr kształtu rozkładu GEV lub GPD [-];

u – wartość progowa zmiennej losowej;

N_u – liczba przekroczeń wartości progowej u zmiennej losowej [-];

Słownik podstawowych pojęć¹:

Zdarzenie drogowe – wypadek drogowy lub kolizja drogowa, zaistniała lub mająca początek na drodze publicznej, w strefie ruchu lub w strefie zamieszkania, w związku z ruchem przynajmniej jednego pojazdu;

Wypadek drogowy - zdarzenie drogowe, w wyniku którego wystąpiła ofiara śmiertelna lub ranna;

Kolizja drogowa - zdarzenie drogowe, w którym powstały wyłącznie straty materialne;

Konflikt w ruchu drogowym - sytuacja, w której uczestnicy ruchu zbliżają się do siebie w przestrzeni i w czasie w taki sposób, że zdarzenie drogowe jest bardzo prawdopodobne, jeżeli ich sposób poruszania się pozostanie bez zmian; sytuacja, w których przynajmniej jeden uczestnik ruchu zmuszony był zmienić zachowanie celem uniknięcia zdarzenia drogowego;

Miara pośrednia bezpieczeństwa ruchu drogowego – miernik pozwalający na ocenę zagrożenia bezpieczeństwa ruchu drogowego na podstawie zachowań uczestników ruchu, które sprzyjają powstawaniu zdarzeń drogowych;

Ryzyko – prawdopodobieństwo aktywizacji zagrożenia w zdarzeniu niepożądanym i spowodowanych w związku z tym strat. Najczęściej jest to iloczyn narażenia na ryzyko, poziomu prawdopodobieństwa aktywizacji zagrożenia w zdarzeniu niepożądanym i poziomu spowodowanych w związku z tym strat (materialnych, ekonomicznych, osobowych);

Zagrożenie - możliwość wystąpienia zdarzenia niepożądanego (konfliktu, kolizji, wypadku drogowego), które może spowodować zakłócenia funkcjonowania analizowanego systemu transportu drogowego lub straty ponoszone przez użytkowników drogi. Źródłami zagrożenia są wszelkie czynniki przyczyniające się do powstania zdarzenia niepożądanego (jak czynniki drogowe, ruchowe, przyrodnicze);

Droga dla rowerów – droga lub jej część przeznaczona do ruchu rowerów, oznaczona odpowiednimi znakami drogowymi; droga dla rowerów jest oddzielona od innych dróg lub jezdni tej samej drogi konstrukcyjnie lub za pomocą urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego;

Pas ruchu dla rowerów – część jezdni przeznaczona do ruchu rowerów w jednym kierunku, oznaczoną odpowiednimi znakami drogowymi;

Kontrapas – jednokierunkowy pas ruchu dla rowerów wyznaczony na jezdni ulicy jednokierunkowej, przeznaczony dla ruchu rowerów w kierunku przeciwnym do obowiązującego pozostałe pojazdy;

Kontraruch – dwukierunkowy ruch rowerów na jezdni drogi jednokierunkowej bez wyznaczania pasów ruchu dla rowerów; ruch rowerów w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu innych pojazdów odbywa się na zasadach ogólnych, a rowery poruszające się w przeciwnym kierunku jadą „pod prąd”;

¹ na podstawie: (Dz. U. nr 98 poz. 602, 1997; Zarządzenie nr 31 KGP, 2015; Gaca i Kieć, 2016; Jamroz, K. i in., 2018; ITS, 2019)

Spis treści

1. Wprowadzenie	1
2. Studia literatury	6
2.1 Determinanty bezpieczeństwa ruchu rowerowego.....	6
2.2 Metody oceny bezpieczeństwa ruchu rowerowego.....	8
2.3 Miary pośrednie bezpieczeństwa ruchu rowerowego.....	9
2.4 Szacowanie parametrów ruchu rowerowego	12
2.4.1 Natężenie ruchu rowerowego.....	12
2.4.2 Prędkość w ruchu rowerowym	14
2.5 Dane GPS w analizach ruchu rowerowego	15
2.6 Podsumowanie przeglądu literatury	16
3. Cel, tezy i zakres pracy	18
3.1 Cele pracy.....	18
3.2 Tezy pracy	19
3.3 Zakres pracy	19
4. Opis baz danych wykorzystywanych w analizach	24
4.1 Baza danych o zdarzeniach drogowych.....	24
4.2 Dane o natężeniu ruchu rowerowego ze stacji ciągłego automatycznego pomiaru ruchu.....	27
4.3 Dane z systemu rowerów miejskich.....	28
4.4 Baza danych OpenStreetMap	31
4.5 Baza danych CARTO o infrastrukturze ruchu rowerowego.....	34
5. Szacowanie parametrów ruchu rowerowego na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich	36
5.1 Sezonowa zmienność natężenia ruchu rowerowego.....	36
5.1.1 Przygotowanie bazy danych.....	37
5.1.2 Metoda badań.....	37
5.1.3 Wyniki badań.....	43
5.2 Wpływ warunków pogodowych na natężenie ruchu rowerowego	51
5.2.1 Baza danych	51
5.2.2 Metoda badań.....	52
5.2.3 Wyniki badań.....	55

5.2.4	Weryfikacja opracowanych zależności.....	60
5.3	Udział rowerów systemu miejskiego w całym potoku rowerzystów	61
5.3.1	Przygotowanie bazy danych	61
5.3.2	Metoda badań.....	63
5.3.3	Wyniki badań.....	64
5.4	Prędkości w ruchu rowerowym.....	65
5.4.1	Wybór poligonów badawczych	65
5.4.2	Pomiary empiryczne prędkości chwilowej w ruchu rowerowym.....	66
5.4.3	Prędkości chwilowe rowerów systemu miejskiego	67
5.4.4	Metoda badań zależności pomiędzy prędkością rowerów Wavelo a prędkościami ogółu rowerzystów.....	68
5.4.5	Wyniki badań.....	69
5.5	Wnioski.....	73
6.	Kwantyfikacja poziomu bezpieczeństwa ruchu rowerowego z wykorzystaniem miar pośrednich i modeli regresyjnych	75
6.1	Identyfikacja miar pośrednich bezpieczeństwa ruchu rowerowego	75
6.2	Przygotowanie bazy danych.....	76
6.3	Metoda badań.....	80
6.3.1	Metoda wyboru miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego.....	80
6.3.2	Metoda ilościowej oceny bezpieczeństwa ruchu rowerowego z wykorzystaniem miary pośredniej.....	81
6.3.3	Metoda weryfikacji opracowanych zależności	82
6.4	Wyniki badań	83
6.4.1	Wybór miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego	83
6.4.2	Ilościowy opis poziomu bezpieczeństwa ruchu rowerowego z wykorzystaniem miary pośredniej.....	84
6.4.3	Ocena jakości dopasowania modelu do danych empirycznych i jego weryfikacja	88
6.5	Wnioski.....	89
7.	Ocena wpływu czynników infrastrukturalnych na zagrożenie zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów	90
7.1	Przygotowanie bazy danych.....	90
7.2	Metoda badań.....	93
7.3	Wyniki badań	95
7.4	Wnioski.....	99

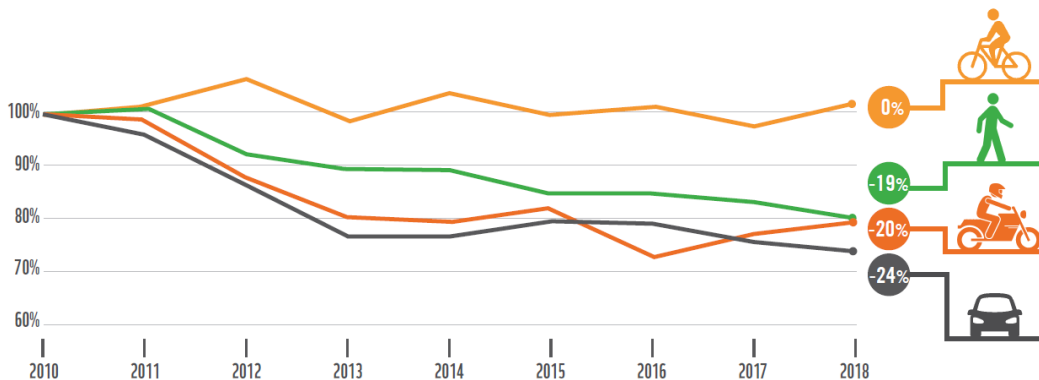
8. Identyfikacja miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów z wykorzystaniem miar pośrednich	101
8.1 Teoria wartości ekstremalnych	102
8.1.1 Metoda maksimumów blokowych	102
8.1.2 Metoda przekroczeń	105
8.1.3 Estymacja parametrów rozkładów GEV i GPD	107
8.2 Dobór próby badawczej i przygotowanie bazy danych	108
8.2.1 Metoda maksimumów blokowych	110
8.2.2 Metoda przekroczeń	110
8.3 Metoda badań	112
8.3.1 Estymacja parametrów rozkładów teorii wartości ekstremalnych	112
8.3.2 Metoda wyznaczenia granicznej wartości opóźnienia w ruchu rowerowym	113
8.4 Wyniki badań	116
8.4.1 Parametry rozkładów GEV i GPD	116
8.4.2 Graniczna wartość opóźnienia w ruchu rowerowym	122
8.5 Wnioski	126
9. Podsumowanie	127
9.1 Najważniejsze efekty pracy	128
9.2 Ocena realizacji celów pracy i weryfikacja tez badawczych	130
9.3 Ograniczenia zastosowanych metod i kierunki dalszych badań	131
Literatura:	134
Spis tabel:	145
Spis rysunków:	147
Załącznik 1 Sprawdzenie założeń analizy wariancji ANOVA – zmienność sezonowa	149
Załącznik 2 Wyniki testu post hoc Tukey’a – zmienność sezonowa	152

1. Wprowadzenie

W obliczu nieustannie rosnących natężeń ruchu pojazdów i zatłoczenia sieci ulicznej, coraz częściej podejmowane są działania mające na celu zachęcenie uczestników ruchu do podróżowania innymi niż samochód osobowy środkami transportu. Jedną z alternatyw dla indywidualnego ruchu zmotoryzowanego jest ruch rowerowy. Promocja roweru jako atrakcyjnej alternatywy dla ruchu samochodowego realizowana jest przede wszystkim poprzez budowę nowych oraz modernizację istniejących obiektów infrastruktury rowerowej, wprowadzanie systemu rowerów miejskich, organizowanie działań skierowanych do przedsiębiorstw i instytucji (np. kampania „Rowerem do pracy, czyli dom, rower, praca ... i tak w kółko” realizowana w 2021r. po raz piąty w Krakowie, możliwość ubiegania się o certyfikat „Pracodawca Przyjazny Rowerzystom”), które pomagają tworzyć wizerunek firmy będącej przedsiębiorstwem nowoczesnym, dbającym zarówno o swoich pracowników jak i środowisko. W połowie maja 2021r. na 5-tym spotkaniu wysokiego szczebla poświęconemu transportowi, zdrowiu i środowisku organizowanym przez Europejską Komisję Gospodarczą ONZ oraz WHO przyjęty został pierwszy w historii ogólnoeuropejski plan promocji ruchu rowerowego (Pan-European Master Plan for Cycling Promotion). Do podstawowych celów programu, które mają zostać zrealizowane do końca 2030r., należą m.in. podwojenie udziału ruchu rowerowego w podróżach, rozbudowa i modernizacja infrastruktury ruchu pieszego i rowerowego, rozwój i wprowadzenie krajowej polityki i strategii rowerowych, zwiększenie bezpieczeństwa ruchu rowerowego, włączenie ruchu rowerowego do polityki zdrowotnej, a także planowania przestrzennego i urbanistycznego ([THE PEP, 2021](#)).

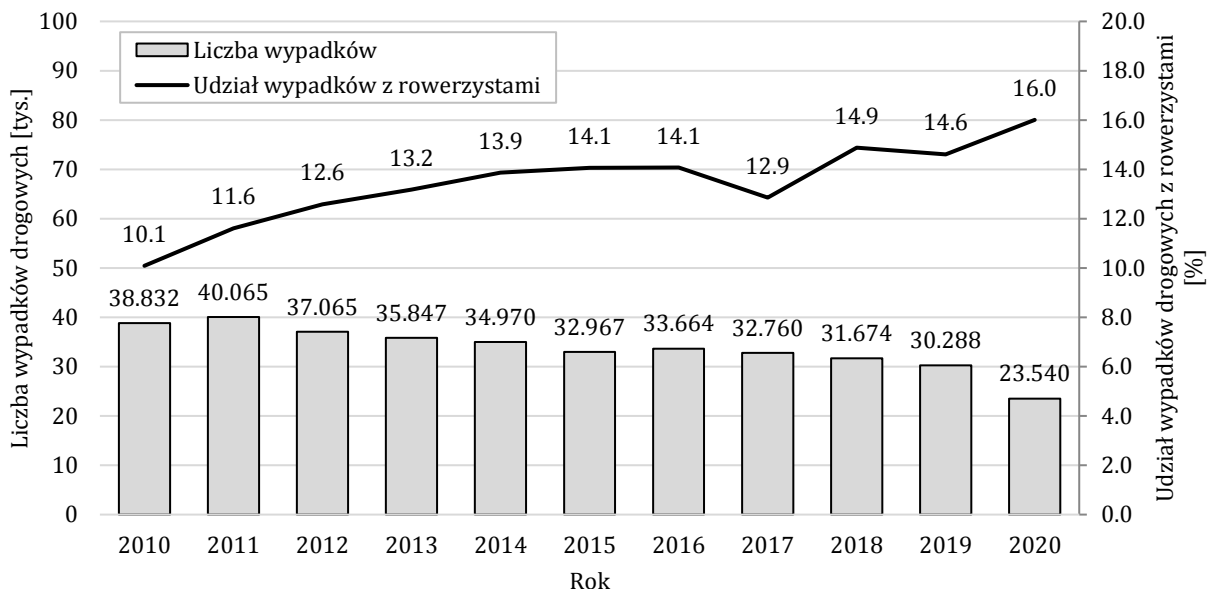
Działania służące popularyzacji ruchu rowerowego są podejmowane w szerokim zakresie również w Polsce, w efekcie czego obserwować można systematyczny wzrost natężeń ruchu rowerowego. Na podstawie danych ze stacji ciągłego automatycznego pomiaru ruchu rowerowego można stwierdzić, że natężenie ruchu rowerowego w latach 2017-2020 wzrosło w Krakowie i Gdańsku średnio odpowiednio o 34% ([ZTP Kraków, 2017](#)) i 32% ([UM Gdańsk, 2020](#)). W Warszawie w 2020r. zarejestrowano wzrost natężenia ruchu rowerowego o 17.4% w stosunku do roku poprzedniego ([Dudek i Ostaszewski, 2020](#)). Wzrost natężenia ruchu rowerowego pociąga za sobą szereg korzyści zarówno społecznych (zmniejszenie emisji spalin i hałasu, zatłoczenia w sieci drogowo-ulicznej), jak i indywidualnych (poprawa zdrowia, zmniejszenie kosztów codziennych podróży, redukcja czasu podróży w szczególności w godzinach szczytu). Niestety związany jest on również ze zwiększeniem wystawienia na ryzyko, a w konsekwencji wzrostem zagrożenia bezpieczeństwa rowerzystów w ruchu drogowym. Raport European Transport Safety Council z 2020r. wskazuje, że pomimo znaczącego spadku liczby ofiar śmiertelnych wśród kierowców i pasażerów samochodów osobowych w Europie w latach 2010-2018 wynoszącego aż 24%, liczba ofiar śmiertelnych wśród rowerzystów pozostała na tym samym poziomie (Rys. 1.1) ([ETSC, 2020](#)). Dane krajowe dotyczące liczby wypadków drogowych w Polsce z ostatnich 10-ciu lat pokazują, że pomimo spadku liczby wypadków w roku 2019 w stosunku do roku 2010 o 22%, udział wypadków z rowerzystami wzrósł o 4.5% (Rys. 1.2). Podobny trend zaobserwować można również w 2020 roku, kiedy to odnotowano znaczący spadek liczby wypadków drogowych w stosunku do roku poprzedniego wynoszący ok. 22.3% i jednoczesny wzrost udziału wypadków

z rowerzystami o 2.4%. Mniejsza liczba zdarzeń drogowych obserwowana w 2020r. może być jednak częściowo związana z ograniczoną możliwością przemieszczania się ludności w czasie trwającej w tym roku światowej pandemii.



Rys. 1.1 Redukcja liczby ofiar śmiertelnych wypadków drogowych względem 2010r.

Źródło: (ETSC, 2020)



Rys. 1.2 Liczba wypadków drogowych i udział wypadków z rowerzystami w Polsce w latach 2010-2020.

Źródło: opracowanie własne

Postępujący wzrost natężenia ruchu rowerowego w polskich miastach powoduje, że problem bezpieczeństwa rowerzystów w ruchu drogowym jest jak najbardziej aktualny. W klasycznym podejściu analizy bezpieczeństwa ruchu drogowego prowadzi się na podstawie miar bezpośrednich, tj. liczby zdarzeń drogowych. Jedną z głównych wad tej metody jest długość okresu analizy (zalecane min. 3 lata (Gaca, Suchorzewski i Tracz, 2008)) oraz fakt nieraportowania części zdarzeń drogowych. Problem ten jest szczególnie istotny w odniesieniu do niechronionych uczestników ruchu drogowego. W pracy (Meuleners i in., 2020) wskazano, że tylko 40% zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów jest zgłaszanych policji. Udział ten zależy jednak od kraju i został oszacowane średnio na poziomie 10% (Shinar i in., 2018). Z uwagi na ograniczenia podejścia klasycznego, obecnie coraz częściej ocenę bezpieczeństwa ruchu prowadzi się na podstawie tzw. pośrednich miar brd. Miary pośrednie pozwalają na

ocenę zagrożenia bezpieczeństwa ruchu drogowego na podstawie zachowań uczestników ruchu, które sprzyjają powstawaniu zdarzeń drogowych. Zachowania te, reprezentowane m.in. przez prędkość pojazdów, odstęp czasu między pojazdami, przejazd przez skrzyżowanie podczas trwania sygnału czerwonego, mogą prowadzić do konfliktów w ruchu drogowym, czyli sytuacji, w których przynajmniej jeden uczestnik ruchu zmuszony był zmienić swoje zachowanie celem uniknięcia zdarzenia. Najpopularniejszymi miarami pośrednimi wykorzystywanymi w analizach bezpieczeństwa ruchu drogowego (w tym rowerowego), pozwalającymi na identyfikację potencjalnych konfliktów w ruchu, są czas do kolizji (*ang. Time to Collision, TTC*) oraz czas po opuszczeniu punktu kolizji (*ang. Post Encroachment Time, PET*) (Sayed, Zaki i Autey, 2013; St-Aubin, Saunier i Miranda-Moreno, 2015; Zangenehpour i in., 2016; Laureshyn i in., 2017; Madsen i Lahrman, 2017). Miary te mogą być jednak wykorzystane do oceny bezpieczeństwa ruchu dla wcześniej wytypowanych lokalizacji.

Niezależnie od sposobu prowadzenia oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego (klasycznie lub z wykorzystaniem miar pośrednich) podstawowymi parametrami ruchu, determinującymi wystawienie na ryzyko oraz ciężkość zdarzeń drogowych, są natężenie ruchu oraz prędkość. Studia literatury zagranicznej wskazują na trudności w pozyskiwaniu reprezentatywnych parametrów ruchu w szczególności w odniesieniu do ruchu rowerowego (Minikel, 2012; Gates i in., 2016; Kröyer, 2016). Tradycyjne metody wyznaczania natężenia czy prędkości rowerzystów (tj. pomiary empiryczne) mają wiele ograniczeń. Należą do nich przede wszystkim czasochłonność i kosztochłonność tych metod, a także brak danych o reprezentatywnych warunkach, w których te pomiary należałoby prowadzić.

Szerokie możliwości w zakresie oceny bezpieczeństwa oraz szacowania parametrów ruchu rowerowego dają nowe technologie, w tym system GPS. Dane GPS o ruchu rowerowym mogą pochodzić np. z dedykowanych aplikacji na telefon komórkowy (takich jak np. Strava) lub z systemu rowerów miejskich. Systemy rowerów miejskich wprowadzane są w coraz większej liczbie miast w Polsce i na świecie. Codziennie za ich pomocą gromadzone są ogromne ilości danych o ruchu rowerowym, które mogłyby być wykorzystane np. w badaniach rozkładu ruchu rowerowego w sieci ulicznej, analizach bezpieczeństwa rowerzystów w tym identyfikacji miejsc niebezpiecznych, badaniach czasu podróży rowerem na wybranych odcinkach drogowych. Metoda oparta na danych GPS pochodzących z systemu rowerów miejskich, na tle innych wykorzystujących dane geolokalizacyjne, wyróżnia się stosunkowo niskim nakładem finansowym ograniczonym przez brak konieczności zakupu danych GPS, które, aby obejmowały dużą próbę badawczą w skali całego miasta, muszą pochodzić z dużych i popularnych serwisów takich jak np. Strava, Endomondo. Wykorzystanie miar pośrednich wyznaczonych na podstawie danych GPS umożliwiłoby ocenę bezpieczeństwa ruchu rowerowego nie tylko w wybranych lokalizacjach, ale również w skali całego miasta czy regionu oraz jego bieżące monitorowanie. Aby tego typu działania mogły być prowadzone w praktyce, konieczne jest zidentyfikowanie miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego, która mogłaby być wyznaczona z danych GPS, oraz jej granicznej wartości, na podstawie której możliwa byłaby ilościowa ocena zagrożenia zdarzeniami drogowymi. Ponadto zastosowanie danych GPS do szacowania natężenia i prędkości w ruchu rowerowym wymaga określenia związku pomiędzy parametrami grupy rowerzystów, od których te dane pochodzą, a parametrami ruchu ogółu rowerzystów.

Zaprezentowane uwarunkowania były przesłanką do podjęcia problematyki wykorzystania danych GPS z systemu rowerów miejskich do szacowania parametrów ruchu rowerowego (natężenia i prędkości), w analizach bezpieczeństwa rowerzystów w ruchu drogowym oraz identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów. Znalezienie związku pomiędzy parametrami ruchu ogółu rowerzystów i rowerzystów korzystających z systemu rowerów miejskich przyczyni się do rozwoju narzędzi pozyskiwania reprezentatywnych danych o ruchu rowerowym. Wykazanie możliwości wykorzystania danych GPS w analizach bezpieczeństwa rowerzystów w ruchu drogowym i identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów w sieci ulicznej umożliwi zarządcom dróg, którzy dysponujący danymi GPS o ruchu rowerowym z systemu rowerów miejskich, prowadzenie monitoringu stanu bezpieczeństwa ruchu i w efekcie podejmowanie działań interwencyjnych w miejscach zwiększonego zagrożenia przed wystąpieniem zdarzeń drogowych w tych lokalizacjach. Pozwoli to na realizację proaktywnego podejścia do bezpieczeństwa ruchu rowerowego.

W rozdziale 2 rozprawy w sposób syntetyczny zaprezentowano wyniki studiów literatury. Przegląd literatury ukierunkowany był na identyfikację determinant bezpieczeństwa ruchu rowerowego, dotychczas stosowane metod oceny bezpieczeństwa rowerzystów w ruchu drogowym oraz wykorzystywane w tym celu miary pośrednie. Przedstawiono również stosowane metody szacowania natężeń i prędkości w ruchu rowerowym oraz czynniki wpływające na wartości tych parametrów, a także rodzaje badań wykorzystujących dane GPS o ruchu rowerowym pochodzące z różnych źródeł.

Wnioski z przeglądu literatury umożliwiły identyfikację luk badawczych, a w konsekwencji sprecyzowanie celów i tez rozprawy doktorskiej oraz jej szczegółowego zakresu, które opisano w rozdziale 3.

W rozdziale 4 szczegółowo opisano bazy danych wykorzystanych w badaniach, tj. dane o zdarzeniach drogowych z udziałem rowerzystów, dane o natężeniu ruchu rowerowego ze stacji ciągłego pomiaru automatycznego, dane GPS z systemu rowerów miejskich, dane o infrastrukturze i zagospodarowaniu terenu z OpenStreetMap, dane o infrastrukturze ruchu rowerowego z platformy CARTO.

W rozdziale 5 podjęto problematykę szacowania parametrów ruchu rowerowego na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich. Badania podzielono na 4 części. W części 1 porównano zmienność sezonową natężenia ruchu rowerowego ze zmiennością liczby wypożyczeń rowerów publicznych. Wpływ warunków pogodowych na natężenie ruchu rowerowego i liczbę wypożyczeń rowerów systemu miejskiego został przeanalizowany w części 2. Część 3 stanowiły badania nad udziałem natężenia rowerów miejskich w całym potoku rowerzystów. Ostatnia część poświęcona była badaniom związku pomiędzy prędkościami chwilowymi rowerzystów korzystających z rowerów miejskich i prędkościami ogółu rowerzystów. Rozdział 5 zakończony jest zestawieniem wniosków zaprezentowanych badań.

W rozdziale 6 w pierwszej kolejności zidentyfikowano miary pośrednie bezpieczeństwa ruchu drogowego, które mogą być wyznaczone na podstawie danych GPS z systemu rowerów

miejskich. Wskazano miarę pośrednią tj. opóźnienie w ruchu rowerowym o wartościach nie mniejszych niż 0.6m/s^2 , która wykazywała najsilniejszy związek z liczbą rejestrowanych zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów, oceniony z wykorzystaniem modeli regresyjnych. Przedstawiono opracowany model bezpieczeństwa ruchu rowerowego, umożliwiający szacowanie liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów na przejazdach rowerowych na podstawie przyjętej miary pośredniej oraz z uwzględnieniem wpływu czynników drogowo-ruchowych.

W rozdziale 7 w sposób ilościowy oszacowano wpływ czynników infrastrukturalnych na zagrożenie zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów w skali makro. Zagrożenie oceniono w oparciu o wytypowaną w rozdziale 6 miarę pośrednią bezpieczeństwa ruchu rowerowego tj. opóźnienie w ruchu rowerowym o wartościach nie mniejszych niż 0.6m/s^2 , zaś czynniki infrastrukturalne zostały zidentyfikowane na podstawie baz danych OpenStreetMap oraz CARTO. Wskazano czynniki infrastrukturalne mające negatywny wpływ na bezpieczeństwo ruchu rowerowego.

Przedmiotem badań zaprezentowanych w rozdziale 8 była ocena możliwości identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów na podstawie prawdopodobieństwa wystąpienia ekstremalnych wartości miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego, jaką było opóźnienie w ruchu rowerowym. Badania wykonano z zastosowaniem teorii wartości ekstremalnych. Przedstawiono podstawy teoretyczne metody maksimów blokowych i metody przekroczeń definiowania wartości ekstremalnych. Zaprezentowano estymowane wartości parametrów rozkładów wartości ekstremalnych dla wybranych poligonów badawczych. Na ich podstawie oszacowano liczbę wystąpień poszczególnych wartości opóźnienia w ruchu rowerowym na wybranych przejazdach rowerowych w przyjętym okresie analizy. Jako graniczną wartość opóźnienia w ruchu rowerowym, która mogłaby być wykorzystywana do identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów, wskazano tę wartość, której liczba wystąpień była najlepiej powiązana z liczbą zarejestrowanych zdarzeń drogowych.

Rozdział 9 stanowi podsumowanie najważniejszych efektów pracy. Określono stopień realizacji celów pracy oraz zweryfikowano postawione tezy. Rozdział zakończony jest prezentacją ograniczeń zastosowanych metod badawczych z jednoczesnym sformułowaniem kierunków dalszych badań.

2. Studia literatury

2.1 Determinanty bezpieczeństwa ruchu rowerowego

Na bezpieczeństwo ruchu drogowego ma wpływ kompleks czynników, które podzielić można na trzy podstawowe grupy czynników: drogowe (typ skrzyżowania, szerokości pasów ruchu, przebieg drogi w planie i profilu podłużnym, itp.), ruchowe (m.in. natężenie ruchu i jego zmienność w czasie, prędkości pojazdów, struktura rodzajowa ruchu), inne (np. warunki pogodowe, indywidualne cechy kierujących pojazdami) (Gaca, Suchorzewski i Tracz, 2008).

Studia literatury wskazują, że do największej liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów dochodzi na skrzyżowaniach (Wang i Nihan, 2004). Autorzy badań (Wachtel i Lewiston, 1994) wykazali, że 64% wszystkich zdarzeń z udziałem rowerzystów oraz 74% zderzeń rowerzysty – pojazd silnikowy miało miejsce na skrzyżowaniach. Liczba i ciężkość tych zdarzeń zależą od liczby wlotów skrzyżowania i sposobu organizacji ruchu (Schepers i in., 2011; Liggett i in., 2016), a także liczby pasów dla relacji skrajnych (Wang i Nihan, 2004). Według (Vandenbulcke, Thomas i Int Panis, 2014) zagrożenie wypadkami drogowymi z rowerzystami rośnie na skrzyżowaniach z pierwszeństwem przejazdu i infrastrukturą ruchu rowerowego. Wyniki pracy (Strauss, Miranda-Moreno i Morency, 2014) sugerują, że na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną maleje liczba rowerzystów będących ofiarami wypadków. Badania opisane w (Anysz i in., 2021) wskazują jednak na znikomy wpływ sygnalizacji świetlnej na ciężkość wypadków z udziałem rowerzystów w obszarach miejskich. W pracy (Mukoko i Pulugurtha, 2020) wzrost liczby skrzyżowań z sygnalizacją świetlną w analizowanym obszarze powiązany był ze wzrostem liczby zdarzeń rowerzysty – pojazd silnikowy. Wpływ skrzyżowań o ruchu okrężnym na bezpieczeństwo rowerzystów jest niejednoznaczny. Zgodnie z wynikami badań (Schoon i Van Minnen, 1994) wprowadzenie ronda wpływa na zmniejszenie liczby zdarzeń drogowych z rowerzystami i ich ciężkości. Z kolei w pracy (Meuleners i in., 2019) wykazano, że wypadki z udziałem rowerzystów występują częściej na rondach niż na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Obecność wyniesionych wysp dzielących i przejazdów rowerowych, jak również zastosowanie kolorowej nawierzchni na przejazdach rowerowych wpływa na poprawę bezpieczeństwa rowerzystów na skrzyżowaniach (Oh i in., 2008; Schepers i in., 2011; Strauss, Miranda-Moreno i Morency, 2013; Strauss, Miranda-Moreno i Morency, 2014).

W badaniach (Meuleners i in., 2020) oraz (Turner, Roozenburg i Francis, 2006) wskazano, że około połowa wypadków z udziałem rowerzystów miała miejsce na odcinkach drogowych pomiędzy skrzyżowaniami lub na wydzielonych ciągach. Wykazano również, że w blisko 50% zdarzeń z rowerzystami nie uczestniczyły pojazdy silnikowe. Typ infrastruktury rowerowej (np. pas rowerowy, droga dla rowerów, kontrapas) determinuje możliwość wystąpienia i ciężkość zdarzeń drogowych na odcinkach dróg (Wachtel i Lewiston, 1994; Schepers i in., 2011; Nosal i Miranda-Moreno, 2012; Liggett i in., 2016). W ogólności wprowadzenie infrastruktury ruchu rowerowego prowadzi do zmniejszenia liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów (Lusk i in., 2011; Teschke i in., 2012; Vandenbulcke, Thomas i Int Panis, 2014; Kaplan i Prato, 2015; Mukoko i Pulugurtha, 2020). Wyjątek stanowią wyniki pracy (Jensen, 2008), gdzie wskazywano na wzrost liczby wypadków z rowerzystami i liczby ich ofiar

po wprowadzeniu pasów rowerowych. Wpływ poszczególnych typów infrastruktury ruchu rowerowego na bezpieczeństwo rowerzystów jest jednak niejednoznaczny i zależy od uwarunkowań lokalnych. Przykładem mogą być wyniki pracy (Reynolds i in., 2009), gdzie wskazano, że w porównaniu do innych typów infrastruktury rowerowej, największe zagrożenie bezpieczeństwa ruchu towarzyszy rowerzystom na chodnikach i ciągach pieszo-rowerowych, czego nie potwierdziły wyniki badań (Oh i in., 2008) oraz (Teschke i in., 2012). Pozytywnie na bezpieczeństwo rowerzystów wpływa jednokierunkowa infrastruktura ruchu rowerowego, odseparowana w przestrzeni względem innych grup użytkowników dróg (Nosal i Miranda-Moreno, 2012; Thomas i DeRobertis, 2013). Bezpieczeństwo ruchu rowerowego determinują również kierunek jazdy rowerzystów (zgodny lub przeciwny do ruchu pojazdów) (Wachtel i Lewiston, 1994) oraz odsunięcie infrastruktury rowerowej od krawędzi jezdni (Schepers i in., 2011).

Na bezpieczeństwo rowerzystów wpływ mają natężenie ruchu rowerowego (Schepers i in., 2011, Włodarek i Olszewski, 2020), cechy rowerzysty, m.in.: wiek (Wachtel i Lewiston, 1994; Chimba, Emaasit i Kutela, 2012) i płeć (Wachtel i Lewiston, 1994), a także parametry ruchu pojazdów silnikowych, tj. natężenie (Hels i Orozova-Bekkevold, 2007; Oh i in., 2008; Reynolds i in., 2009; Schepers i in., 2011; Chimba, Emaasit i Kutela, 2012; Strauss, Miranda-Moreno i Morency, 2014; Liggett i in., 2016, Włodarek i Olszewski, 2020), udział pojazdów ciężkich (Chimba, Emaasit i Kutela, 2012), prędkość pojazdów (Hels i Orozova-Bekkevold, 2007; Kim i in., 2007) i powiązana z nią obecność środków uspokojenia ruchu (Summala i in., 1996; Oh i in., 2008). W pracach (Chimba, Emaasit i Kutela, 2012; Liggett i in., 2016) wpływ na bezpieczeństwo ruchu rowerowego miały również lokalne limity prędkości, czego nie potwierdziły badania (Wang i Nihan, 2004). Autorzy pracy (Teschke i in., 2012) wykazali, że zagrożenie wypadkami z udziałem rowerzystów jest mniejsze na drogach lokalnych w porównaniu do dróg wyższych klas, co może być efektem niższych prędkości i natężeń ruchu pojazdów silnikowych.

Pogorszenie bezpieczeństwa ruchu rowerowego obserwowane jest wraz ze wzrostem liczby punktów dostępu do drogi (Oh i in., 2008; Chimba, Emaasit i Kutela, 2012), przy występowaniu parkowania (Wachtel i Lewiston, 1994; Nosal i Miranda-Moreno, 2012; Teschke i in., 2012; Vandenbulcke, Thomas i Int Panis, 2014) i ograniczeń widoczności (Schepers i in., 2011; Chimba, Emaasit i Kutela, 2012), wraz z obecnością przystanków komunikacji zbiorowej (Oh i in., 2008; Strauss, Miranda-Moreno i Morency, 2013; Strauss, Miranda-Moreno i Morency, 2014; Liggett i in., 2016) i wzrostem liczby pasów ruchu (Brüde i Larsson, 2000; Daniels i in., 2009; Schepers i in., 2011; Chimba, Emaasit i Kutela, 2012; Liggett i in., 2016). W literaturze wykazano również, że na liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów wpływ mają warunki pogodowe i oświetlenia (Chimba, Emaasit i Kutela, 2012; Osama, Sayed i Board, 2017) oraz zagospodarowanie otoczenia drogi, tj. obecność obszarów handlowych (Vandenbulcke, Thomas i Int Panis, 2014; Osama, Sayed i Board, 2017; Mukoko i Pulugurtha, 2020) i przemysłowych (Oh i in., 2008; Mukoko i Pulugurtha, 2020).

2.2 Metody oceny bezpieczeństwa ruchu rowerowego

Wśród metod oceny wpływu poszczególnych rozwiązań na bezpieczeństwo ruchu rowerowego do najczęściej stosowanych w literaturze należą badania: ankietowe, „przed” i „po”, z wykorzystaniem modeli regresyjnych oraz miar pośrednich.

Badania ankietowe prowadzone są najczęściej na grupie rowerzystów, ewentualnie ekspertów w zakresie bezpieczeństwa ruchu drogowego. Umożliwiają subiektywną ocenę zagrożeń bezpieczeństwa ruchu i komfortu jazdy dla poszczególnych rozwiązań infrastrukturalnych. Taka metoda została zastosowana m.in. w pracach (Aultman-Hall i Kaltenecker, 1999; Hunter i in., 1999; Leden, Gårder i Pulkkinen, 2000; Turner, Roozenburg i Francis, 2006; Parkin, Wardman i Page, 2007; Tilahun, Levinson i Krizek, 2007; Teschke i in., 2012; Ng, Kumar i Heesch, 2017; Meuleners i in., 2019; Meuleners i in., 2020). Badania ankietowe były prowadzone również w większych miastach w Polsce (np. Krakowie, Gdańsku) (Wawrzonek, 2009; Kowalski, Miłosz i Peek, 2014).

Istotą badań „przed” i „po” jest porównanie poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego w okresach „przed” i „po” wprowadzeniu danego rozwiązania. W celu uwzględnienia zmiany trendów wypadkowych w obszarze oraz zmian natężenia ruchu w okresach „przed” i „po”, wyniki badań odnosi się najczęściej do zmian poziomu brd w tzw. grupie kontrolnej, czyli obiektów o podobnych charakterystykach, na których analizowane rozwiązanie nie zostało wprowadzone (Jensen, 2008; Rothenberg, Goodman i Sundstrom, 2016). Bezpieczeństwo ruchu rowerowego oceniane jest za pomocą miar bezwzględnych (liczby wypadków i/lub kolizji) i względnych, czyli wskaźników wypadkowych, w których liczba zdarzeń drogowych odnoszona jest do np. natężenia ruchu pojazdów (Minikel, 2012) czy długości odcinka drogi (Pulugurtha i Thakur, 2015).

Badania z wykorzystaniem modeli regresyjnych umożliwiają kwantyfikację wpływu poszczególnych czynników na bezpieczeństwo ruchu rowerowego. Poziom bezpieczeństwa ruchu rowerowego zależy od parametrów ruchu rowerowego i innych grup użytkowników dróg (m.in. natężenia ruchu i prędkości rowerzystów oraz pojazdów silnikowych) oraz czynników infrastrukturalnych (np. typu infrastruktury rowerowej, gęstości zjazdów na długości danego odcinka drogowego) (wz. 2.1):

$$BR = f(R, P, \text{inf}, \text{los}) \quad (2.1)$$

gdzie: BR – poziom bezpieczeństwa ruchu rowerowego, określany za pomocą miar bezpośrednich lub pośrednich;

R – parametry ruchu rowerowego (natężenie, prędkość i jej parametry, itp.);

P – parametry ruchu uczestników ruchu drogowego innych niż rowerzyści (piesi, pojazdy; natężenie, prędkość i jej parametry, struktura rodzajowa, itp.);

inf – czynniki infrastrukturalne (np. gęstość zjazdów, odsunięcie infrastruktury ruchu rowerowego od krawędzi jezdni);

los – zbiór czynników losowych.

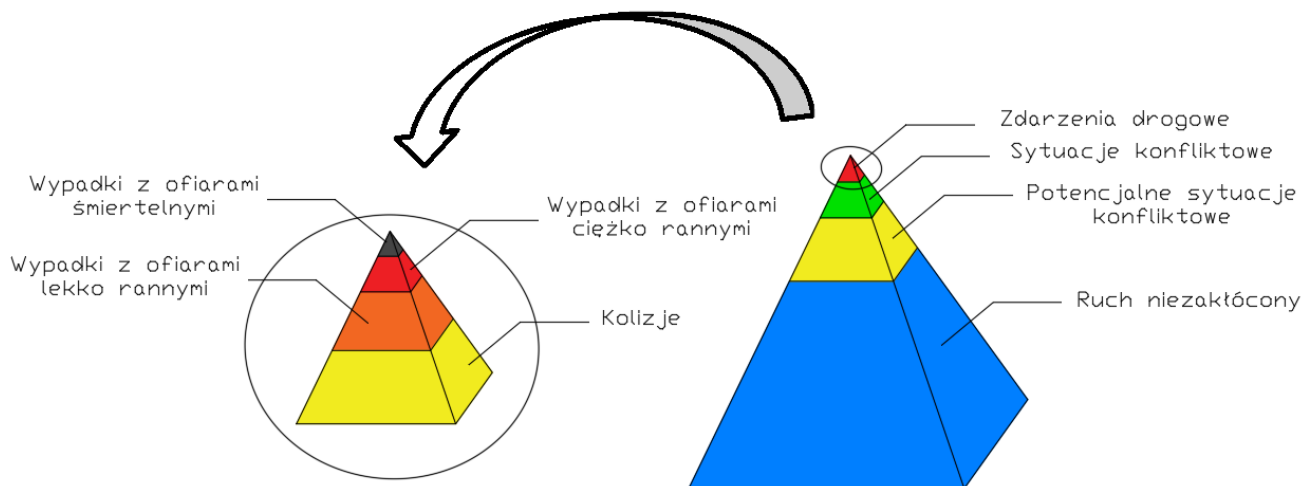
Poziom bezpieczeństwa ruchu opisywany jest najczęściej za pomocą miar bezpośrednich, czyli liczby zdarzeń drogowych. Takie podejście zastosowano m.in. w pracach (Schoon i Van Minnen, 1994; Schepers i in., 2011; Strauss, Miranda-Moreno i Morency, 2014; Anysz i in., 2021). Zdecydowanie rzadziej do opisu poziomu bezpieczeństwa ruchu rowerowego wykorzystywane są miary pośrednie, które opisano w sposób bardziej szczegółowy w rozdziale 2.3. W literaturze znaleźć można również przykłady badań z wykorzystaniem symulatora jazdy, które pozwalają na ocenę zachowania uczestników ruchu drogowego (kierujących pojazdami silnikowymi i rowerami) na zamodelowanym w środowisku symulatora rozwiązaniu przed jego wprowadzeniem w warunkach rzeczywistych (Suzuki i in., 2011; Bella i Silvestri, 2017; O'Hern, Oxley i Stevenson, 2017).

Analizy efektywności poszczególnych rozwiązań infrastruktury ruchu rowerowego prowadzone są osobno w odniesieniu do odcinków drogowych i skrzyżowań (z podziałem na ronda, skrzyżowania z i bez sygnalizacji świetlnej). Część badań wykonywana jest również w odniesieniu do tzw. obszarów analiz ruchu (*ang. Traffic Analysis Zone, TAZ*) (Osama, Sayed i Board, 2017; Popescu i Sayed, 2017; Fournier, Christofa i Knodler, 2019), które powstają zwykle poprzez podział badanego terenu siatką elementów kwadratowych lub heksagonalnych o różnych wielkościach oczek tej siatki.

2.3 Miary pośrednie bezpieczeństwa ruchu rowerowego

W klasycznym podejściu analizy bezpieczeństwa ruchu drogowego prowadzi się w oparciu o miary bezpośrednie, tj. liczbę zdarzeń drogowych (wypadków i/lub kolizji), które miały miejsce w danej lokalizacji. Liczba zdarzeń drogowych jest jednak stosunkowo nieduża w porównaniu do całkowitego natężenia ruchu (Rys. 2.1), a ich występowanie uzależnione jest od kompleksu czynników, takich jak parametry ruchu (przede wszystkim natężenia ruchu i prędkości pojazdów), czynników infrastrukturalnych (np. sposobu organizacji ruchu) oraz zbioru czynników losowych (np. zmęczenie kierującego pojazdem) (patrz rozdział 2.1). Aby w sposób rzetelny ocenić poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego na podstawie miar bezpośrednich, analizę brd należy wykonać na podstawie danych o zdarzeniach drogowych pochodzących z okresu co najmniej 3 lat (Gaca, Suchorzewski i Tracz, 2008). Długi okres zbierania danych pozwala na ocenę trendu wypadkowego i częściowe wyeliminowanie wpływu czynników losowych oraz mało licznych prób badawczych. Konieczne jest zatem „oczekiwanie” na wystąpienie zdarzeń drogowych (w tym z ofiarami rannymi i śmiertelnymi), co z etycznego punktu widzenia jest niedopuszczalne. Ponadto część zdarzeń drogowych (zwłaszcza kolizji oraz zdarzeń z niechronionymi uczestnikami ruchu drogowego np. rower-pieszcy) nie jest zgłaszana policji, a tym samym nie figuruje w statystykach wypadkowych. W pracy (Meuleners i in., 2020) wskazano, że tylko 40% zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów jest zgłaszanych policji. Udział ten zależy od kraju i został oszacowany średnio na poziomie 10% (Shinar i in., 2018). Według (Vandenbulcke, Thomas i Int Panis, 2014) w Belgii wynosi ok. 15%. Podczas gdy większość zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów nie jest raportowana przez policję, ocena bezpieczeństwa ruchu rowerowego oraz wpływu poszczególnych czynników infrastrukturalnych na zagrożenie zdarzeniami drogowymi prowadzona tylko na podstawie danych wypadkowych może nie odzwierciedlać ich

rzeczywistego wpływu na bezpieczeństwo rowerzystów. Stąd też, oraz z uwagi na ograniczenia podejścia klasycznego, analizy bezpieczeństwa ruchu rowerowego coraz częściej prowadzone są z wykorzystaniem tzw. miar pośrednich, czyli wielkości pozwalających m.in. na wytypowanie w ruchu sytuacji konfliktowych. Sytuacje konfliktowe to takie, podczas których przynajmniej jeden uczestnik zmuszony był zmienić zachowanie celem uniknięcia zdarzenia. Występują one znacznie częściej niż zdarzenia drogowe (Rys. 2.1), co skraca wymagany okres analizy oraz zwiększa wielkość próby badawczej. Miary pośrednie mogą być wykorzystane do oceny bezpieczeństwa ruchu, jak również identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów (w szczególności miejsc, których identyfikacja z uwagi na nieraportowanie części zdarzeń drogowych, nie byłaby możliwa wyłącznie na podstawie danych wypadkowych). Zastosowanie miar pośrednich w tym celu wymaga jednak określenia, która z miar oraz jaka graniczna wartość tej miary powinny być wykorzystane w analizach.



Rys. 2.1 Piramida bezpieczeństwa ruchu drogowego.
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Hyden, 1987)

Dobór miary pośredniej brd powinien być prowadzony z uwzględnieniem następujących kryteriów (Songchitruksa i Tarko, 2004):

- a) miara pośrednia powinna być dobrana do rodzaju zdarzeń drogowych, które podlegają analizie;
- b) miara pośrednia musi być wyznaczana w sposób obiektywny;
- c) miara pośrednia powinna być podatna na automatyzację procedury jej pomiaru;
- d) wartość miary pośredniej powinna umożliwiać identyfikację zarówno ruchu niezaktóconego jak i sytuacji konfliktowych;
- e) musi istnieć wartość miary pośredniej będąca wyraźną granicą pomiędzy zdarzeniem drogowym i jego brakiem.

W literaturze podaje się, że częstość występowania wypadków drogowych powinna być związana z częstością występowania wybranej miary pośredniej (Songchitruksa i Tarko, 2004) (wz. 2.2).

$$C = k \cdot E \quad [\text{wyp./rok}] \quad (2.2)$$

gdzie: C – częstość występowania wypadków drogowych [wyp./rok];

k – współczynnik (zwykle wyznaczony na podstawie modeli regresyjnych) [-];

E – miara pośrednia (czasem nazywana wystawieniem na ryzyko) [ryzyko/rok].

Jeżeli wybrana miara pośrednia ma być wykorzystywana do oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego i w jego zarządzaniu, musi istnieć związek tej miary z liczbą zdarzeń drogowych. W przeciwnym wypadku wykorzystanie jej w analizach brd jest wątpliwe.

Najpopularniejszymi miarami pośrednimi wykorzystywanymi w analizach bezpieczeństwa ruchu drogowego (w tym rowerowego) są:

- a) czas do kolizji (*ang. Time to Collision, TTC*), czyli odstęp czasu do wystąpienia kolizji, w sytuacji gdyby pojazdy utrzymały swoją prędkość (Sayed, Zaki i Autey, 2013; St-Aubin, Saunier i Miranda-Moreno, 2015; Laureshyn i in., 2017; Madsen i Lahrman, 2017);
- b) czas po opuszczeniu punktu kolizji (*ang. Post Encroachment Time, PET*), czyli odstęp czasu między opuszczeniem strefy konfliktowej przez jeden pojazd, a pojawieniem się w niej kolejnego pojazdu (Zangenehpour i in., 2016; Laureshyn i in., 2017; Madsen i Lahrman, 2017).

Bezpieczeństwo ruchu rowerowego oceniane było również na podstawie liczby interakcji między uczestnikami ruchu drogowego (kiedy przynajmniej jeden z nich musiał zmienić prędkość bądź trajektorię jazdy celem uniknięcia zderzenia) (Hunter i in., 1999), średniej różnicy prędkości pomiędzy dwoma rowerzystami jadącymi kolejno po sobie (Xu i in., 2016), odchylenia standardowego prędkości w ruchu rowerowym (Xu i in., 2016). W badaniach (Włodarek i Olszewski, 2020) wyróżniono 6 typów konfliktów w ruchu drogowym pomiędzy rowerzystą i pojazdem silnikowym na przejazdach rowerowych z sygnalizacją świetlną, które identyfikowano na podstawie zmiany trajektorii ruchu i wykonywania manewru hamowania przez rowerzystę. Ww. miary pośrednie stosowano jednak dla wcześniej wytypowanych lokalizacji. W przypadku większych obszarów, czy całego miasta, gdzie lokalizacja miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów nie jest znana, należy zidentyfikować inne miary pośrednie i metody ich wyznaczania. Nowe możliwości w tym zakresie daje wykorzystanie w badaniach danych GPS pochodzących np. z systemu rowerów miejskich. Miarą pośrednią, która może być w stosunkowo prosty sposób wyznaczona na podstawie danych GPS, jest opóźnienie w ruchu rowerowym. Wystąpienie gwałtownego opóźnienia sugeruje, że rowerzysta znalazł się w sytuacji konfliktowej, która wymagała od niego szybkiej reakcji w postaci hamowania celem uniknięcia zderzenia z innym uczestnikiem ruchu. Analizy prowadzone w oparciu o tego typu zachowania wymagają wskazania wartości opóźnienia, będącej granicą pomiędzy naturalny, typowym hamowaniem np. na dojeździe do skrzyżowania, a hamowaniem w sytuacji zagrożenia. W pracy (Strauss i in., 2017) analizowano związek pomiędzy liczbą zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów, a opóźnieniem w ruchu rowerowym na odcinkach drogowych i skrzyżowaniach (z podziałem na skrzyżowania z sygnalizacją świetlną i bez niej). Za wspomnianą graniczną wartość opóźnienia przyjęto 3.3m/s^2 . Dużo niższe wartości graniczne opóźnienia zaproponowano

w (CROW, 2006) tj. 1.5m/s^2 oraz 2.6m/s^2 odpowiednio przy komfortowym i gwałtownym hamowaniu. W pracy (Famiglietti i in., 2020) wskazano, że wartość opóźnienia przy której możemy mówić o gwałtownym hamowaniu jest uzależniona od typu roweru i sposobu hamowania (hamulcami przednimi i tylnymi, tylko tylnymi, hamulcami nożnymi) i waha się w granicach $2.45\text{-}3.63\text{m/s}^2$, przy czym przy hamowaniu zarówno hamulcami przednimi jak i tylnymi wyraźnie wzrasta do ok. $3.9\text{-}6.95\text{m/s}^2$. Badany w pracy (Strauss i in., 2017) współczynnik korelacji osiągnął wartość $0.53\text{-}0.60$. Oznacza to, że duże opóźnienia w ruchu rowerowym nie zawsze występują w miejscach koncentracji zdarzeń drogowych. Bardziej szczegółowe analizy dotyczące wpływu infrastruktury drogowej na wartość opóźnienia w ruchu rowerowym oraz słuszność wykorzystania opóźnienia jako miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerzystów nie były jednak prowadzone.

2.4 Szacowanie parametrów ruchu rowerowego

Podstawowymi parametrami ruchu wykorzystywanymi m.in. w pracach planistycznych, projektowych, ocenach wpływu danej inwestycji na środowisko, analizach bezpieczeństwa ruchu drogowego, są natężenie ruchu oraz prędkość. Natężenie ruchu opisuje wystawienie na ryzyko, rozumiane jako prawdopodobieństwo poniesienia określonych strat w wyniku uczestniczenia w zdarzeniu drogowym. Prędkość determinuje ciężkość zdarzeń drogowych oraz możliwość popełnienia błędu przez kierującego. W odróżnieniu od ruchu zmotoryzowanego, pozyskanie danych o natężeniu i prędkości ruchu rowerowego oraz ich prognozowanie nie jest zagadnieniem prostym i może nastroczać wiele problemów. Przyczyną jest silna zależność parametrów ruchu rowerowego m.in. od obecności i typu infrastruktury rowerowej (droga dla rowerów, pas rowerowy, kontrapas i inne), jej standardu (np. odsunięcie od krawędzi jezdni, szerokość, rodzaj nawierzchni, sposób organizacji ruchu w miejscach przecięć z ruchem pieszym i samochodowym, liczba tych przecięć), parametrów ruchu pojazdów poruszających się po danej drodze (m.in. natężenia ruchu, prędkości pojazdów, udziału pojazdów ciężkich), funkcji i zagospodarowania otoczenia drogi, cech rowerzysty (płeć, wiek, doświadczenie), rodzaju roweru (w tym miejski, elektryczny), warunków atmosferycznych. Oznacza to trudności w przyjmowaniu takich samych charakterystyk ruchu rowerowego w różnych lokalizacjach. Ponadto ruch rowerowy może odbywać się po jezdni, chodniku lub po dedykowanej infrastrukturze, co stanowi przeszkodę w stosowaniu automatycznych technik pomiaru ruchu. Gęsto zlokalizowane stacje ciągłego pomiaru ruchu rowerowego wciąż są niestety rzadkością. Z kolei trudnością w stosowaniu technik manualnych i wrywkowych pomiarów automatycznych jest określenie reprezentatywnych warunków prowadzenia pomiarów ruchu oraz kosztochłonność i czasochłonność tychże metod.

2.4.1 Natężenie ruchu rowerowego

Studia literatury wskazują, że miarodajne natężenie ruchu rowerowego jest najczęściej szacowane na podstawie pomiarów krótkotrwałych, których wyniki przemnażane są przez odpowiednie wskaźniki dobowej, tygodniowej i sezonowej zmienności ruchu. Wskaźniki wyznaczane są zwykle na podstawie danych ze stacji ciągłego pomiaru automatycznego

(Strauss, Miranda-Moreno i Morency, 2013; Liggett i in., 2016; Lu i in., 2017), krajowych badań ruchu rowerowego (Schepers i in., 2011; Kröyer, 2016), a niekiedy z badań wykonanych w innych krajach (Beca, 2013). W pracy (Amoh-Gyimah, Saberi i Sarvi, 2016) wartości średniodobowego natężenia ruchu rowerowego obliczono na podstawie danych socjoekonomicznych, tj. udziału podróży wykonywanych rowerem do pracy w całkowitej liczbie podróży realizowanych w tym celu. Z kolei w (Minikel, 2012), ze względu na brak szczegółowych danych o ruchu rowerowym, autor posłużył się w obliczeniach wynikami 2-godzinnych manualnych pomiarów natężenia rowerzystów prowadzonych w czasie szczytu popołudniowego. Podobną metodę zastosowano w badaniach (Kröyer, 2016). W pracy (Gates i in., 2016), z uwagi na brak danych o natężeniach ruchu rowerowego, funkcję wystawienia na ryzyko dla rowerzystów zbudowano jedynie w oparciu o dane o natężeniu ruchu pojazdów silnikowych. W analizach bezpieczeństwa ruchu rowerowego opisanych w (Strauss, Miranda-Moreno i Morency, 2015) natężenie ruchu rowerowego oszacowano na podstawie danych GPS pochodzących z aplikacji na telefon komórkowy.

Wśród wielu czynników mających wpływ na natężenie ruchu rowerowego wymienić można m.in. strukturę wieku i płci podróżujących (Flynn i in., 2012; Saneinejad, Roorda i Kennedy, 2012), typ infrastruktury ruchu rowerowego (Hood, Sall i Charlton, 2011), subiektywną ocenę możliwości wystąpienia zdarzenia drogowego (Bergström i Magnusson, 2003), długość, czas i motywację podróży (Brandenburg, Matzarakis i Arnberger, 2007; Sabir, 2011), dostępność do miejsc parkingowych i związane z tym opłaty (Bergström i Magnusson, 2003; Saneinejad, Roorda i Kennedy, 2012), występowanie dni wolnych od pracy, weekendów oraz wakacji szkolnych (Ma i in., 2019; Zhao i in., 2019), zagospodarowanie terenu (Imani i in., 2014). Jednym z czynników mających decydujący wpływ na liczbę podróży wykonywanych rowerem są również warunki pogodowe.

Rowerzyści są bardziej wrażliwi na oddziaływanie warunków atmosferycznych w porównaniu do np. kierujących samochodami osobowymi (Miranda-Moreno i Nosal, 2011; Sabir, 2011). Dobowa zmienność natężenia ruchu rowerowego może być nawet w 80% opisywana przez zmienność warunków atmosferycznych (Thomas, Jaarsma i Tutert, 2013). Ponad połowa rowerzystów (58%) bierze pod uwagę warunki pogodowe podczas podejmowania decyzji a podróży rowerem, a 77% z nich decyduje o podróży na podstawie obecnych, a nie prognozowanych warunków atmosferycznych (Gallop, Tse i Zhao, 2012). Parametrami pogodowymi mającymi statystycznie istotny wpływ na natężenie ruchu rowerowego są: temperatura powietrza i wielkość opadów (Noland i Ishaque, 2006; Miranda-Moreno i Nosal, 2011; Flynn i in., 2012; Gallop, Tse i Zhao, 2012; Tin Tin i in., 2012; Gebhart i Noland, 2014; Mathisen, Annema i Kroesen, 2015; An i in., 2019), zachmurzenie (Gallop, Tse i Zhao, 2012; Tin Tin i in., 2012), wilgotność powietrza (Miranda-Moreno i Nosal, 2011; Gallop, Tse i Zhao, 2012; Gebhart i Noland, 2014; An i in., 2019), prędkość wiatru (Flynn i in., 2012; Tin Tin i in., 2012; Gebhart i Noland, 2014; Mathisen, Annema i Kroesen, 2015; An i in., 2019). Wyniki dotychczasowych badań wskazują na nieliniowy wpływ temperatury powietrza na natężenie ruchu rowerowego (Richardson, 2000; Phung i Rose, 2007; Lewin, 2011; Miranda-Moreno i Nosal, 2011; Corcoran i in., 2014; Gebhart i Noland, 2014). Obserwuje się wzrost natężenia ruchu rowerowego wraz ze wzrostem temperatury powietrza, jednak gdy temperatura powietrza przekracza pewną graniczną wartość, natężenie ruchu maleje. Tę

graniczną wartość temperatury wyznaczono na poziomie 25°C (Richardson, 2000), 28°C (Phung i Rose, 2007; Miranda-Moreno i Nosal, 2011) i 32.2°C (Lewin, 2011; Gebhart i Noland, 2014). Studia literatury wskazują również na nieliniowy wpływ opadów deszczu na natężenie ruchu rowerowego (Richardson, 2000; Phung i Rose, 2007), jednak jest on niejednoznaczny. W pracy (Richardson, 2000) zaobserwowano, że niewielkie opady deszczu (do 5mm w ciągu dnia) nie mają istotnego wpływu na ruch rowerowy, jednak wystąpienie większych opadów powoduje znaczący spadek natężenia ruchu rowerowego. Z kolei rezultaty badań (Phung i Rose, 2007) wskazują na gwałtowny spadek natężenia ruchu przy mniejszych opadach deszczu (do 10mm w ciągu dnia) i łagodniejszy powyżej tej wartości.

2.4.2 Prędkość w ruchu rowerowym

Tradycyjną metoda estymacji chwilowej prędkości rowerzystów są pomiary empiryczne ruchu rowerowego. Prędkość chwilowa wyznaczana jest w sposób bezpośredni za pomocą radarów prędkości lub pośredni, jako iloraz długości bazy pomiarowej i czasu jej przejazdu wyznaczonego z wykorzystaniem stoperów (Liu, Shen i Ren, 1993; Thompson i in., 1997; Virkler i Balasubramanian, 1998; Hunter, Srinivasan i Martell, 2009; Bernardi i Rupi, 2015). Powszechnie stosowana jest również technika video, gdzie na podstawie analizy zarejestrowanych nagrań i przy użyciu dodatkowego oprogramowania możliwy jest nie tylko pomiar czasu przejazdu roweru wzdłuż bazy pomiarowej poprzez wyznaczenie czasu zgłoszeń w wybranych przekrojach pomiarowych, ale również rejestracja dokładnej trajektorii przejazdu rowerzysty na danym odcinku drogi czy przez skrzyżowanie (Khan i Raksuntorn, 2001; Ling i Wu, 2004; Zaki, Sayed i Cheung, 2013). Od kilkunastu lat pomiary prędkości rowerzystów coraz częściej prowadzone są z wykorzystaniem techniki GPS. Dane GPS pochodzą najczęściej z urządzeń zamontowanych w rowerach (El-Geneidy, Krizek i Iacono, 2007; Parkin i Rotheram, 2010), jednak tego typu badania prowadzone są zwykle dla bardzo małych prób badawczych tj. kilku bądź kilkunastu rowerzystów. Wykorzystanie danych GPS o ruchu rowerowym pochodzących z aplikacji na telefon komórkowy umożliwia znaczne zwiększenie próby badawczej. Przykładem mogą być badania (Strauss i Miranda-Moreno, 2017), w których wykorzystano dane ponad 10 000 podróży zrealizowanych przez ok. 1000 użytkowników aplikacji *Mon RésoVélo*.

Jak wynika z badań (Allen i in., 1998) prędkości rowerzystów w ruchu swobodnym wahają się w granicach 10–28km/h, przy czym większość obserwacji wskazuje na prędkość z zakresu 12–20km/h. Prędkość uzależniona jest od typu infrastruktury ruchu rowerowego. Wyższe prędkości (ok. 24.8km/h) obserwuje się zwykle na drogach dla rowerów, niższe (ok. 21km/h) na ciągach pieszo-rowerowych, a najniższe (ok. 15.6km/h) na pasach rowerowych i przy braku infrastruktury ruchu rowerowego (Virkler i Balasubramanian, 1998; Khan i Raksuntorn, 2001; El-Geneidy, Krizek i Iacono, 2007). Przeciwnie wyniki badań uzyskano w pracy (Bernardi i Rupi, 2015) gdzie wykazano, że rowerzyści jadący wspólnie z pojazdami silnikowymi poruszali się z prędkością 17–22km/h, czyli o 1–3.1km/h szybciej niż rowerzyści korzystający z dedykowanej infrastruktury. Wpływ na prędkość w ruchu rowerowym mają również wiek rowerzysty (Thompson i in., 1997; Strauss i Miranda-Moreno, 2017), płeć rowerzysty (Thompson i in., 1997; El-Geneidy, Krizek i Iacono, 2007; Parkin i Rotheram, 2010; Strauss

i Miranda-Moreno, 2017), klasa drogi, motywacja podróży i temperatura powietrza (Strauss i Miranda-Moreno, 2017), pochylenie niwelety drogi (Parkin i Rotheram, 2010), wyniesienie przejazdu rowerowego (Leden, 1997).

2.5 Dane GPS w analizach ruchu rowerowego

Opisane w pkt. 2.4 trudności w pozyskiwaniu reprezentatywnych danych o ruchu rowerowym skłaniają do poszukiwania nowych, bardziej efektywnych sposobów wyznaczania jego parametrów. Obecnie coraz częściej odchodzi się od tradycyjnych metod pomiaru ruchu na rzecz metod opartych na technice GPS. Technologia GPS umożliwia gromadzenie dużych ilości danych o ruchu, nie tylko w pojedynczych przekrojach lub na krótkich odcinkach, ale w ciągu całej podróży i to w stosunkowo krótkim czasie. Dane geolokalizacyjne wykorzystywane w badaniach ruchu rowerowego pochodzą głównie z rejestratorów GPS zamontowanych w rowerach lub z dedykowanych aplikacji na telefon komórkowy.

Dane GPS w analizach ruchu rowerowego zostały po raz pierwszy wykorzystane w 2007r., w procesie modelowania wyboru trasy przejazdu przez rowerzystów z uwzględnieniem wpływu infrastruktury rowerowej (Harvey i Krizek, 2007). Podobne badania opisano również m.in. w (Menghini i in., 2010; Broach, Gliebe i Dill, 2011; Broach, Dill i Gliebe, 2012; Zimmermann, Mai i Frejinger, 2017). W pracy (Jónasson i in., 2013) dane geolokalizacyjne z serwisu Strava wykorzystano do utworzenia tzw. heat mapy, czyli mapy rozkładu ruchu rowerowego w sieci ulicznej. W badaniach (Chen i in., 2017) dane ze Stravy były podstawą badań zależności pomiędzy poziomem stresu komunikacyjnego (*ang. Level of Traffic Stress, LTS*), a częstością występowania i ciężkością wypadków drogowych z udziałem rowerzystów. Dane GPS o ruchu rowerowym wykorzystywane były również m.in. w analizach bezpieczeństwa i identyfikacji parametrów ruchu rowerowego (takich jak prędkość, przyspieszenia, opóźnienia) (El-Geneidy, Krizek i Iacono, 2007; Parkin i Rotheram, 2010; Luo i Ma, 2016; Ma i Luo, 2016; Strauss i in., 2017; Strauss i Miranda-Moreno, 2017), do oszacowania natężenia ruchu rowerowego (Strauss, Miranda-Moreno i Morency, 2015), w analizach możliwości zastosowania modeli symulacji mikroskopowej ruchu pojazdów silnikowych w badaniach ruchu rowerowego (Manar i Cao, 2015), analizach wpływu infrastruktury rowerowej na stopień aktywności fizycznej ludności (Dill, 2009). Liczba zarejestrowanych podróży uwzględnianych w ww. badaniach wynosiła od kilkunastu do nieco ponad 10 000.

Poza urządzeniami geolokalizacyjnymi i aplikacjami na telefon komórkowy, źródłem danych GPS o ruchu rowerowym może być system rowerów miejskich. Dane o podróżach z systemu rowerów miejskich były podstawą badań wpływu infrastruktury rowerowej na komfort podróżowania i bezpieczeństwo rowerzystów (Joo i in., 2015; Fishman i Schepers, 2016) oraz wpływu zagospodarowania terenu na natężenie ruchu rowerowego (Imani i in., 2014). W (Buck i in., 2013) dane z rowerów miejskich zostały wykorzystane do oceny różnic demograficznych i socjoekonomicznych pomiędzy rowerzystami korzystającymi z rowerów miejskich okazjonalnie i codziennie oraz rowerzystami niekorzystającymi z systemu. Dane GPS z systemu rowerów miejskich posłużyły również do kwantyfikacji zależności natężenia ruchu rowerowego od warunków pogodowych (Fournier, Christofa i Knodler, 2017). W pracy

(Woodcock i in., 2014) system rowerów publicznych został poddany ocenie pod kątem jego wpływu na zdrowie i bezpieczeństwo rowerzystów. Dane z krakowskiego systemu rowerów miejskich wykorzystano w pracy (Łastowska i Bryniarska, 2015), gdzie analizowano zmienności liczby i czasu wypożyczeń oraz obciążenia poszczególnych stacji wypożyczeń i zwrotów, a także wskazano trasy, które są najczęściej wykorzystywane przez użytkowników systemu podczas podróży.

2.6 Podsumowanie przeglądu literatury

Problematyka bezpieczeństwa ruchu rowerowego podejmowana była w szeregu prac badawczych. Ich wyniki, niejednokrotnie rozbieżne ze sobą, sugerują, że oceniany ilościowo wpływ poszczególnych czynników i rozwiązań infrastrukturalnych na bezpieczeństwo rowerzystów i parametry ruchu rowerowego jest silnie uzależniony od uwarunkowań lokalnych. Mnogość determinant bezpieczeństwa ruchu rowerowego utrudnia ocenę efektywności wprowadzenia danego rozwiązania infrastruktury drogowej w nowej lokalizacji, a także wykorzystanie wyników badań prowadzonych zagranicą w praktyce krajowej.

Podstępujący wzrost natężenia ruchu rowerowego oraz ograniczenia klasycznej metody analiz bezpieczeństwa ruchu drogowego opartej na rejestrowanej liczbie zdarzeń drogowych wymuszają konieczność stosowania miar pośrednich brd. Dotychczas prowadzone analizy bezpieczeństwa ruchu rowerowego bazujące na TTC, PET, czy innych miar pośrednich były prowadzone dla wcześniej wybranych lokalizacji. Wykorzystanie miar pośrednich wyznaczonych z danych GPS pochodzących np. z systemu rowerów miejskich, umożliwiłoby ocenę zagrożenia zdarzeniami drogowymi nie tylko w wybranych miejscach, ale również w skali całego miasta, czy regionu i jego bieżące monitorowanie. Konieczne jest jednak zidentyfikowanie miary pośredniej, która może być wyznaczona z danych GPS oraz jej granicznej wartości, na podstawie której możliwa byłaby zarówno ocena poziomu bezpieczeństwa ruchu rowerowego jak i identyfikacja miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów. Tego typu badania, w szczególności w odniesieniu do danych GPS i to pochodzących z systemu rowerów miejskich, nie były jednak prowadzone. Spośród stosowanych dotychczas miar pośrednich, którą można w stosunkowo prosty sposób wyznaczyć z danych GPS, jest opóźnienie w ruchu rowerowym. Studia literatury wskazują jednak, że parametry ruchu rowerowego uzyskane z danych GPS są uzależnione od źródła tych danych (grupy rowerzystów, dla których były one zbierane) i nie odpowiadają bezpośrednio parametrom całego potoku rowerzystów, co wykazano m.in. w pracy (Fishman i Schepers, 2016). Proponowane w literaturze graniczne wartości opóźnień mogą być zatem nieodpowiednie przy zastosowaniu danych GPS z systemu rowerów miejskich.

W wielu dotychczasowych pracach wskazuję się na trudności w pozyskiwaniu reprezentatywnych danych o parametrach ruchu rowerowego. Stosunkowo nową metodą zbierania danych o ruchu są metody oparte na technice GPS. W badaniach prowadzonych dotychczas głównym źródłem danych GPS o ruchu rowerowym były dedykowane aplikacje na telefon komórkowy, jednak możliwość zastosowania danych GPS z systemu rowerów miejskich nie była w pełni zweryfikowana. Wykorzystanie w analizach ruchu rowerowego parametrów wyznaczonych na podstawie danych GPS wymaga określenia związku między

charakterystykami rowerzystów, od których te dane pochodzą, i całego potoku rowerzystów. Szczegółowe badania w tym zakresie, a w szczególności dotyczące możliwości szacowania natężenia i prędkości rowerzystów na podstawie parametrów ruchu użytkowników systemu rowerów miejskich, nie były jednak prowadzone.

Studia literatury wskazują, że nawet niewielka zmiana warunków pogodowych może mieć istotny wpływ na natężenie ruchu rowerowego. Warunki pogodowe mogą jednak w odmienny sposób oddziaływać na natężenie ogółu rowerzystów i tych korzystających z systemu rowerów miejskich. Użytkownicy systemu rowerów publicznych mogą być mniej wrażliwi na zmianę warunków pogodowych w ciągu dnia. Mogą wypożyczyć rower w celu wykonania podróży do pracy lub szkoły w godzinach porannych i zmienić środek transportu dla podróży powrotnej w przypadku wystąpienia opadów deszczu. Z drugiej strony prywatny rower umożliwia podróż „od drzwi do drzwi”, podczas gdy rower miejski należy często wypożyczyć i zwrócić do stacji, która może być zlokalizowana z dala od źródła bądź celu podróży. W przypadku występowania opadów deszczu lub niższych temperatur powietrza, ta dodatkowa podróż, którą należy wykonać np. pieszo, może zniechęcić do korzystania z systemu. Rowery miejskie mogą być też często wykorzystywane przez turystów. Latem, kiedy liczba turystów w mieście wzrasta, wzrost częstotliwości wypożyczania, a tym samym natężenia ruchu rowerów miejskich może być bardziej dynamiczny niż wzrost natężenia ogółu rowerzystów. Liczba rowerów publicznych jest jednak ograniczona, stąd też wzrost natężenia ruchu rowerów miejskich jest również ograniczony. Ponadto w miesiącach zimowych, liczba dostępnych rowerów publicznych może być zredukowana. Przykładem może być miasto Kraków, gdzie w okresie 01.12.2018r.-28.02.2019r. dostępnych było ok. 1/3 wszystkich rowerów systemu miejskiego. W konsekwencji, nawet w przypadku wystąpienia sprzyjających warunków atmosferycznych w tym okresie, wzrost natężenia ruchu rowerów publicznych był ograniczony. Z powyższych względów do oceny możliwości szacowania natężenia ruchu rowerowego na podstawie danych z systemu rowerów miejskich konieczna jest weryfikacja, jak warunki pogodowe wpływają na natężenie użytkowników rowerów systemu miejskiego i czy wpływ ten jest zbliżony do wpływu na cały potok rowerzystów. Takie badania nie były jednak do tej pory prowadzone.

3. Cel, tezy i zakres pracy

3.1 Cele pracy

Wnioski z przeglądu literatury przedstawione w pkt. 2.6 umożliwiły identyfikację luk badawczych, a w konsekwencji sprecyzowanie celów rozprawy doktorskiej przedstawionych poniżej.

Wyróżniono dwa podstawowe cele dysertacji doktorskiej, tj.:

Cel 1: opracowanie narzędzi umożliwiających szacowanie parametrów ruchu rowerowego (tj. natężenia ruchu i prędkości) na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich. Znalezienie tego typu zależności usprawniłoby proces wyznaczania parametrów ruchu rowerowego, bez konieczności wykonywania kosztownych i czasochłonnych pomiarów manualnych lub instalowania gęstej sieci stacji ciągłego pomiaru automatycznego, a także szacowanie parametrów ruchu rowerowego w szczególnych okresach (jak np. w trakcie trwania światowej pandemii, zmian w organizacji ruchu drogowego), kiedy opracowane wcześniej modele rozkładu ruchu mogą być nieadekwatne.

Cel 2: opracowanie narzędzi umożliwiających wykorzystanie miar pośrednich wyznaczonych na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich do identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów oraz oceny poziomu bezpieczeństwa rowerzystów w ruchu drogowym. Umożliwiłoby to zarządcom dróg, którzy dysponują tego typu danymi, realizację proaktywnego podejścia do bezpieczeństwa ruchu rowerowego, czyli podjęcie działań zapobiegawczych w miejscach o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów przed wystąpieniem zdarzeń drogowych.

Celami cząstkowymi pracy są:

- identyfikacja i wybór miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego wyznaczonej na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich, wykazującej najlepsze powiązanie z liczbą zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów na przejazdach rowerowych;
- opracowanie modelu predykcji liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów z wykorzystaniem zidentyfikowanej miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego oraz z uwzględnieniem wpływu czynników drogowo-ruchowych;
- kwantyfikacja wpływu czynników infrastrukturalnych na zagrożenie zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów;
- wyznaczenie granicznej wartości opóźnienia w ruchu rowerów systemu miejskiego, która mogłaby być wykorzystana do identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów;
- porównanie sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego z sezonową zmiennością natężenia ruchu użytkowników systemu rowerów miejskich, reprezentowaną w analizach przez liczbę wypożyczeń rowerów miejskich;
- porównanie wpływu warunków pogodowych na natężenie ruchu ogółu rowerzystów oraz rowerzystów korzystających z systemu rowerów miejskich;

- opracowanie modelu predykcji dobowego wskaźnika zmienności natężenia ruchu rowerowego z uwzględnieniem wpływu warunków pogodowych;
- opracowanie modelu predykcji dobowego natężenia ruchu rowerowego na podstawie dobowego natężenia ruchu rowerów systemu miejskiego;
- opracowanie modelu predykcji prędkości chwilowej ruchu rowerowego na podstawie prędkości użytkowników systemu rowerów miejskich.

3.2 Tezy pracy

Z przedstawionych w pkt. 3.1 celów pracy wynikają następujące tezy:

Teza 1: Dane GPS z systemu rowerów miejskich mogą być wykorzystywane do opisu charakterystyk ruchu ogółu rowerzystów i stanowią alternatywę dla bezpośrednich pomiarów ruchu rowerowego.

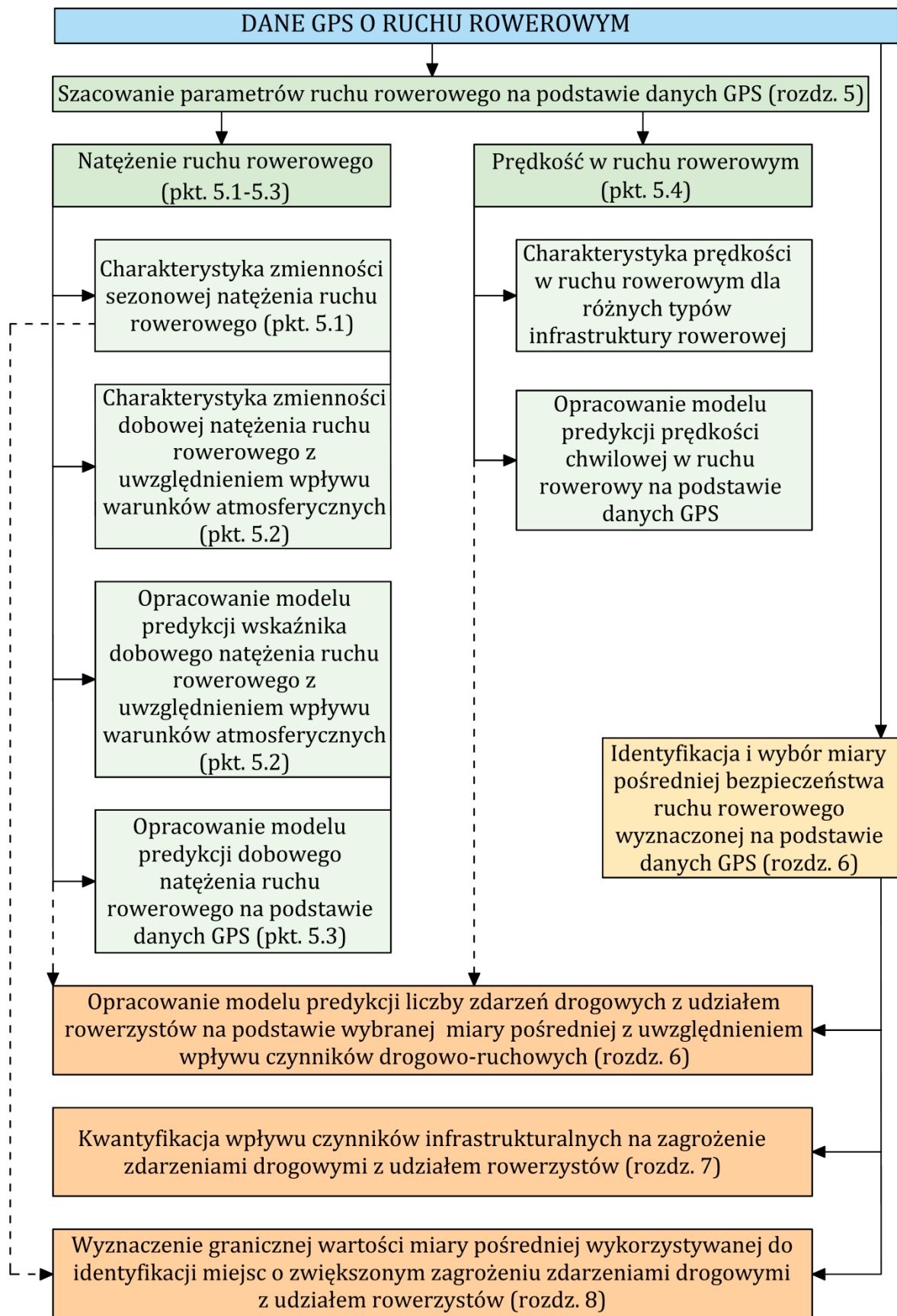
Teza 2: Miara pośrednia wyznaczona na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich umożliwia identyfikację miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów i kwantyfikację wpływu czynników infrastrukturalnych na bezpieczeństwo ruchu rowerowego oraz jest statystycznie istotnym predyktorem poziomu bezpieczeństwa ruchu rowerowego reprezentowanego przez liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów.

3.3 Zakres pracy

Problematykę badań podjętą w rozprawie i jej zakres ilustruje schemat blokowy przedstawiony na rysunku 3.1. W pracy oceniono możliwość wykorzystania danych GPS o ruchu rowerowym pochodzących z systemu rowerów miejskich (opisanych szczegółowo w pkt. 4.3) w dwóch głównych celach, tj.: do szacowania parametrów ruchu rowerowego (kolor zielony na rys. 3.1) oraz do oceny bezpieczeństwa ruchu rowerowego i identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów (kolor pomarańczowy na rys. 3.1).

Realizacja celu 1 pracy (pkt. 3.1) oraz weryfikacja tezy 1 rozprawy (pkt. 3.2) wymagały oceny możliwości oszacowania:

- a) wskaźników sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego na podstawie wskaźników zmienności sezonowej liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego (pkt. 5.1). W tym celu wymagane było:
 - zbudowanie bazy danych wskaźników sezonowej zmienności natężenia ruchu w wybranych lokalizacjach (na podstawie danych o natężeniach ruchu rowerowego ze stacji ciągłego automatycznego pomiaru ruchu (pkt. 4.2)) oraz wskaźników sezonowej zmienności liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego (na podstawie danych o dobowej liczbie wypożyczeń rowerów miejskich (pkt. 4.3));
 - porównanie wartości wskaźników zmienności sezonowej ruchu rowerowego w miejscach lokalizacji stacji pomiaru ruchu ze wskaźnikami sezonowej zmienności liczby wypożyczeń rowerów miejskich z uwzględnieniem wpływu lokalizacji stacji pomiaru ruchu i z wykorzystaniem analizy wariancji ANOVA;



Rys. 3.1 Schemat blokowy rozprawy doktorskiej
Źródło: opracowanie własne

- b) wpływu warunków atmosferycznych na dobowe natężenie ruchu rowerowego na podstawie ich wpływu na dobową liczbę wypożyczeń rowerów miejskich (pkt. 5.2). W tym celu konieczne było:
- zbudowanie bazy danych o warunkach atmosferycznych oraz wskaźnikach zmienności dobowego natężenia ruchu rowerowego w wybranych lokalizacjach (na podstawie danych o natężeniach ruchu rowerowego ze stacji ciągłego automatycznego pomiaru ruchu (pkt. 4.2)) oraz wskaźnikach zmienności dobowej liczby wypożyczeń rowerów miejskich (na podstawie danych o dobowej liczbie wypożyczeń rowerów miejskich (pkt. 4.3)) w poszczególnych dniach okresu analizy;
 - opracowanie uogólnionych modeli liniowych umożliwiających oszacowanie wskaźnika dobowej zmienności natężenia ruchu rowerowego i wskaźnika dobowej zmienności liczby wypożyczeń rowerów miejskich z uwzględnieniem wpływu warunków pogodowych;
 - porównanie wpływu warunków atmosferycznych na wskaźnik dobowego natężenia ruchu rowerowego oraz wskaźnik dobowej liczby wypożyczeń rowerów miejskich;
- c) dobowego natężenia ruchu rowerowego na podstawie natężenia dobowego użytkowników systemu rowerów miejskich (pkt. 5.3). W tym celu wymagane było:
- zbudowanie bazy danych o dobowych natężeniach ruchu rowerowego w wybranych lokalizacjach (na podstawie danych ze stacji ciągłego automatycznego pomiaru ruchu rowerowego (pkt. 4.2) oraz szczegółowych danych GPS o ruchu rowerów systemu miejskiego (pkt. 4.3));
 - opracowanie uogólnionego modelu liniowego umożliwiającego oszacowanie dobowego natężenia ruchu rowerowego na podstawie natężenia użytkowników systemu rowerów miejskich z uwzględnieniem wpływu lokalizacji przekroju pomiarowego, dnia tygodnia oraz wakacji szkolnych;
- d) prędkości w ruchu rowerowym na podstawie prędkości użytkowników systemu rowerów miejskich (pkt. 5.4). W tym celu konieczne było:
- zbudowanie bazy danych o prędkościach chwilowych rowerów systemu miejskiego (oszacowanych na podstawie szczegółowych danych GPS (pkt. 4.3)) oraz prędkościach ogółu rowerzystów wyznaczonych na podstawie pomiarów empirycznych na wybranych poligonach badawczych;
 - porównanie prędkości ogółu rowerzystów oraz prędkości użytkowników systemu rowerów miejskich na podstawie testu istotności dla dwóch wartości średnich;
 - opracowanie uogólnionego modelu liniowego umożliwiającego oszacowanie prędkości chwilowej w ruchu rowerowym na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich z uwzględnieniem wpływu typu infrastruktury rowerowej oraz elementu infrastruktury drogowej.

Realizacja celu 2 pracy (pkt. 3.1) oraz weryfikacja tezy 2 rozprawy (pkt. 3.2) wymagały wykonania następujących prac i analiz:

- a) identyfikacja i wybór miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego, która może być wyznaczona na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich (kolor żółty na rys. 3.1, rozdz. 6). W tym celu konieczne było:
- zbudowanie bazy danych dla wybranych poligonów badawczych zawierających informację o wartościach miar pośrednich (wyznaczonych na podstawie

szczegółowych danych GPS o ruchu rowerów systemu miejskiego (pkt. 4.3)) oraz czynnikach drogowo-ruchowych (zidentyfikowanych na podstawie baz danych OpenStreetMap (pkt. 4.4), CARTO (pkt. 4.5)) wraz z przyporządkowaniem liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów (zidentyfikowanych na podstawie bazy SEWiK (pkt. 4.1));

- opracowanie uogólnionych modeli liniowych uzależniających liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów od wartości testowanych miar pośrednich wraz z wyborem miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego, której zmienność najlepiej opisuje zmienność zarejestrowanej liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów, dokonany na podstawie wartości kryterium informacyjnego Akaike zbudowanych modeli;
- b) modelowy opis związku pomiędzy wartością wybranej miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego, a liczbą rejestrowanych zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów z uwzględnieniem wpływu czynników drogowo- ruchowych (rozdz. 6);
- c) ocena wpływu czynników infrastrukturalnych na zagrożenie zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów (rozdz. 7). W tym celu konieczne było:
- zdefiniowanie sytuacji o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów na podstawie wartości wybranej miary pośredniej;
 - analiza występowania poszczególnych czynników infrastrukturalnych (zidentyfikowanych na podstawie baz danych OpenStreetMap (pkt. 4.4) i CARTO (pkt. 4.5)) w pobliżu sytuacji o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów oraz w pobliżu zarejestrowanych zdarzeń drogowych dla różnych wielkości obszaru analizy;
 - wskazanie czynników infrastrukturalnych, których wpływ na zagrożenie zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów, oceniany na podstawie testu istotności dla dwóch wskaźników, jest statystycznie istotny;
 - ilościowa ocena wpływu czynników infrastrukturalnych na zagrożenie zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów;
- d) identyfikacja granicznej wartości miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego wyznaczonej na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich, która mogłaby być wykorzystywana do identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów (rozdz. 8). W tym celu wymagane było:
- wyznaczenie parametrów rozkładów teorii wartości ekstremalnych dla modeli stacjonarnych i niestacjonarnych oraz dla dwóch metod wyboru wartości ekstremalnych tj. metody maksimów blokowych i metody przekroczeń, dla wybranych poligonów badawczych;
 - oszacowanie liczby wystąpień ekstremalnych wartości miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego wyznaczonej na podstawie danych GPS w przyjętym okresie analizy;
 - wskazanie granicznej wartości miary pośredniej jako tej, której liczba wystąpień w przyjętym okresie analizy najlepiej reprezentuje poziom bezpieczeństwa ruchu rowerowego oszacowany na podstawie liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów zarejestrowanych w tym samym okresie czasu.

Badania wykonano na przykładzie miasta Krakowa. W analizach bezpieczeństwa ruchu rowerowego celowo nie uwzględniono danych o zdarzeniach drogowych z 2020r. Ograniczona możliwość przemieszczania się ludności w czasie panującej w tym roku światowej pandemii, wpłynęła zapewne na zmianę natężenia ruchu poszczególnych grup użytkowników dróg w stosunku do typowych natężeń obserwowanych w poprzednich latach. W konsekwencji ze względu na możliwy wpływ pandemii na rejestrowaną w tym roku liczbę zdarzeń drogowych, rok 2020 został pominięty w badaniach.

Ponieważ większość zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów w Krakowie w latach 2016-2019 miała miejsce na skrzyżowaniach (ok. 51.6%) (pkt. 4.1) badania opisane w rozdziałach 6 i 8, dotyczące wyboru miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego, opracowania modelu predykcji liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów oraz identyfikacji granicznej wartości miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego, ograniczono do przejazdów rowerowych.

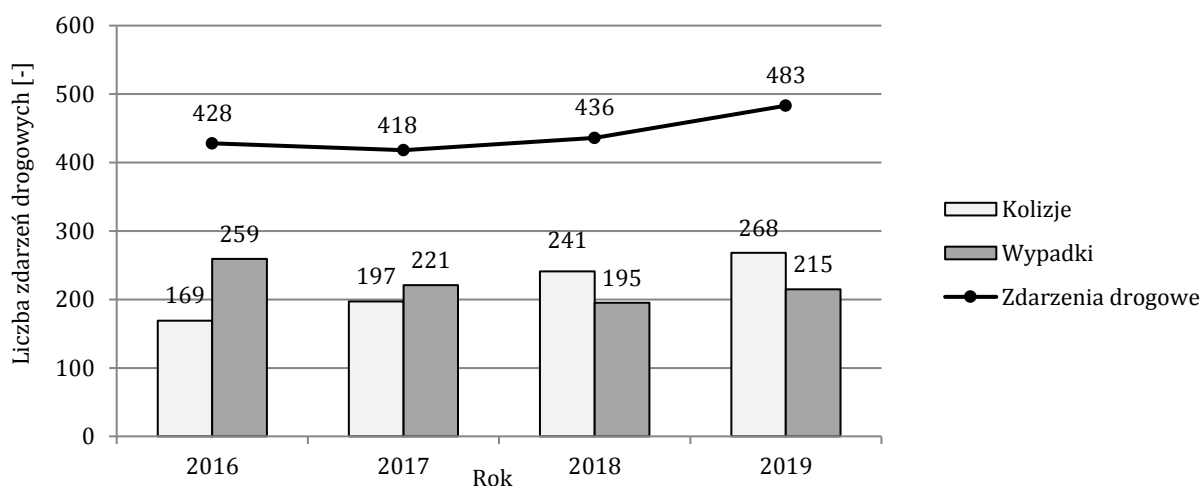
Studia literatury wskazują, że parametry ruchu pojazdów silnikowych (takie jak natężenie ruchu, prędkość, udział pojazdów ciężkich) mają zasadniczy wpływ na bezpieczeństwo rowerzystów w ruchu drogowym (pkt. 2.1). Nie mniej jednak, z uwagi na brak szczegółowych danych o charakterystykach ruchu pojazdów silnikowych, parametry ruchu tej grupy zostały uwzględnione w badaniach w sposób jakościowy poprzez klasy dróg samochodowych zdefiniowane w bazie OpenStreetMap.

4. Opis baz danych wykorzystywanych w analizach

W pracy wykorzystano szereg baz danych, tj.: dane o zdarzeniach drogowych z udziałem rowerzystów, dane o natężeniu ruchu rowerowego ze stacji ciągłego pomiaru automatycznego, dane z systemu rowerów miejskich, dane o infrastrukturze i zagospodarowaniu terenu z OpenStreetMap, dane o infrastrukturze ruchu rowerowego z platformy CARTO. Z uwagi na mnogość baz danych wykorzystanych w badaniach opisano je szczegółowo w kolejnych podrozdziałach 4.1-4.5.

4.1 Baza danych o zdarzeniach drogowych

W pracy wykorzystano bazę danych o zdarzeniach drogowych z udziałem rowerzystów, które miały miejsce w Krakowie w okresie 4 lat tj. od 01.01.2016r. do 31.12.2019r. Dane pobrane zostały z Systemu Ewidencji Wypadków i Kolizji (SEWiK).

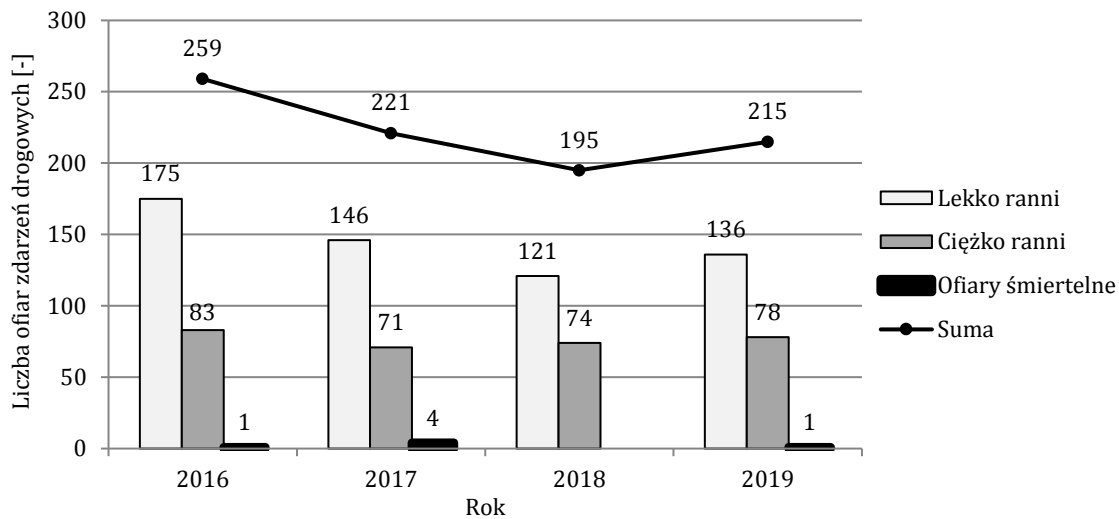


Rys. 4.1 Liczba zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów w Krakowie w latach 2016-2019.
Źródło: opracowanie własne

W latach 2016-2019 doszło w Krakowie do 1765 zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów (875 kolizji oraz 890 wypadków). W pierwszych trzech latach liczba zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów utrzymywała się na mniej więcej stałym poziomie ok. 427 zdarzeń na rok. W 2019r. zaobserwowano wzrost liczby zdarzeń drogowych o ok. 13% (do 483) (Rys. 4.1). W latach 2016 - 2017 większość zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów było zdarzeniami z ofiarami rannymi lub śmiertelnymi (odpowiednio ok. 60.5% i 52.9%). Po 2017r. zaobserwować można zmniejszenie ciężkości zdarzeń, dominowały bowiem kolizje (odpowiednio 55.3% i 55.5% wszystkich zdarzeń w latach 2018 i 2019).

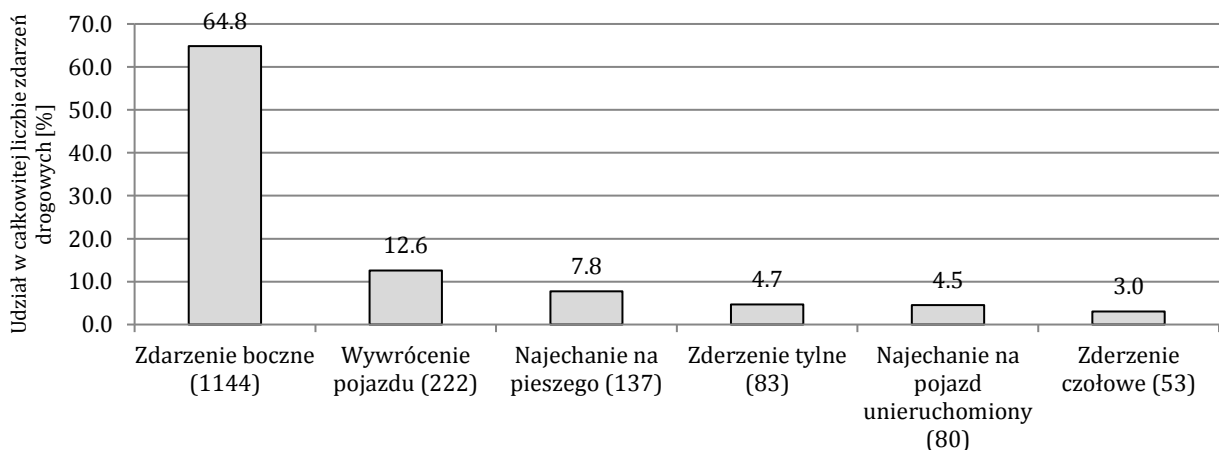
Zmniejszenie liczby wypadków i wzrost liczby kolizji znajdują swoje odzwierciedlenie w zmianie liczby ofiar zdarzeń w analizowanym okresie (Rys. 4.2). W latach 2016-2019 w zdarzeniach drogowych z udziałem rowerzystów ucierpiało 890 osób (578 lekko rannych, 306 ciężko rannych, 6 ofiar śmiertelnych). Najtragiczniejszy pod względem liczby ofiar śmiertelnych był rok 2017, kiedy to w zdarzeniach drogowych z udziałem rowerzystów śmierć poniosło aż 4 osoby. Od 2016 do 2018 roku liczba ofiar zdarzeń z udziałem

rowerzystów malała co roku średnio o ok. 13%. Wzrost liczby ofiar zaobserwowano w 2019r., wyniósł on ok. 10% względem 2018r. Należy zaznaczyć, że rowerzyści stanowili ok. 90% wszystkich ofiar zdarzeń z ich udziałem, zaś piesi 9%.



Rys. 4.2 Liczba ofiar zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów w Krakowie w latach 2016-2019.
Źródło: opracowanie własne

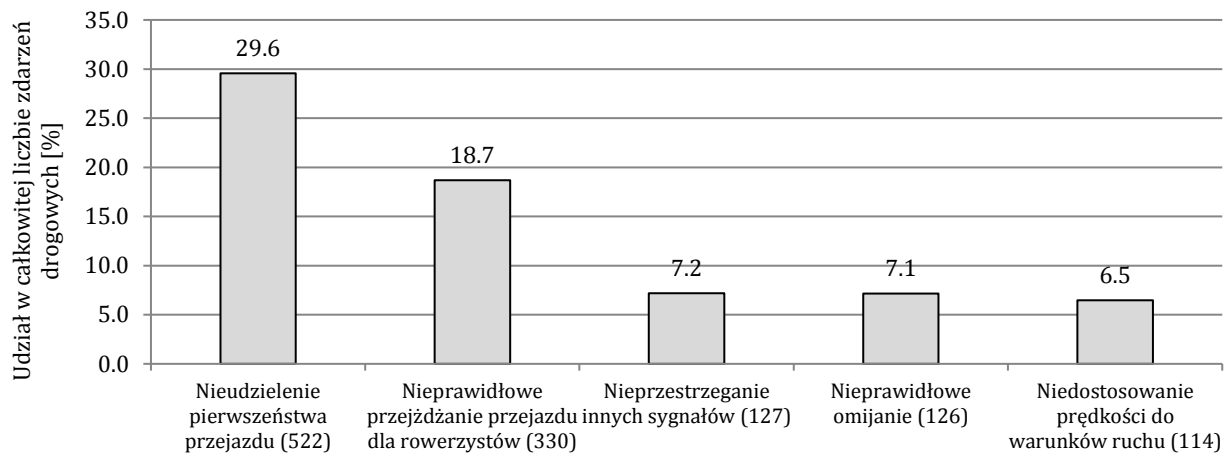
Dominującym rodzajem zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów były zderzenia boczne pojazdów, które odnotowano w 64.8% (1144) przypadków (Rys. 4.3). Były one najczęściej spowodowane nieustąpieniem pierwszeństwa przejazdu (522 zdarzeń; 29.6%) oraz nieprawidłowym przejeżdżaniem przejazdu dla rowerzystów (330 zdarzeń; 18.7%) (Rys. 4.4).



Rys. 4.3 Najczęściej występujące rodzaje zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów w Krakowie w latach 2016-2019.
Źródło: opracowanie własne

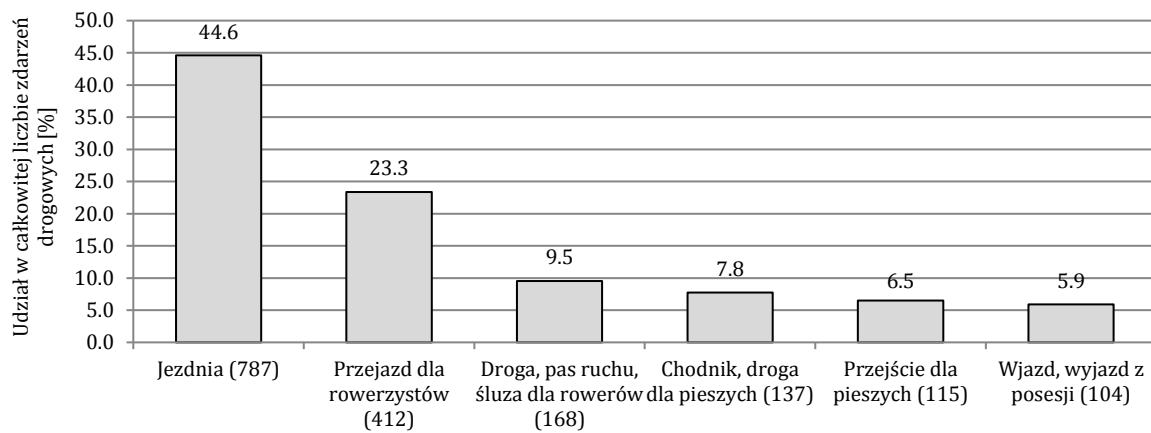
Zdarzenia drogowe z udziałem rowerzystów miały najczęściej miejsce na jezdni (787 zdarzeń; 44.6%) (Rys. 4.5a). Do nieco ponad 30% zdarzeń doszło na infrastrukturze ruchu rowerowego, tj. przejeździe rowerowym (23.3%) oraz drodze, pasie lub śluzie rowerowej (9.4%). Ponad połowa zdarzeń miała miejsce na skrzyżowaniach drogowych (911 zdarzeń; 51.6%). Były to przede wszystkim skrzyżowania z drogą z pierwszeństwem przejazdu (806

zdarzeń; 31.0%) (Rys. 4.5b). Do ok. 1/5 zdarzeń doszło na skrzyżowaniach, przejściach i przejazdach z działającą sygnalizacją świetlną (362 zdarzeń) (Rys. 4.5c).

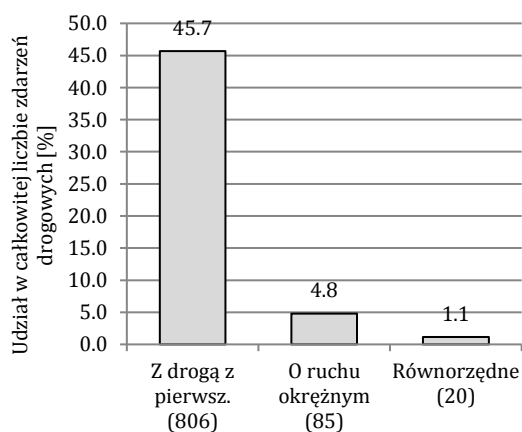


Rys. 4.4 Główne przyczyny zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów w Krakowie w latach 2016-2019.

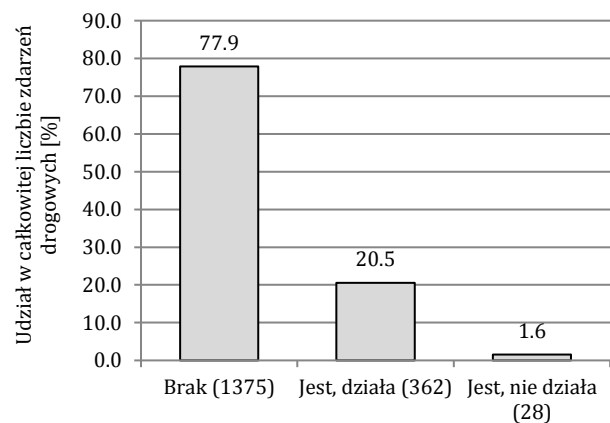
Źródło: opracowanie własne



a)



b)



c)

Rys. 4.5 Główne miejsca występowania zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów w Krakowie w latach 2016-2019 a) element infrastruktury drogowej; b) rodzaj skrzyżowania; c) występowanie sygnalizacji świetlnej.

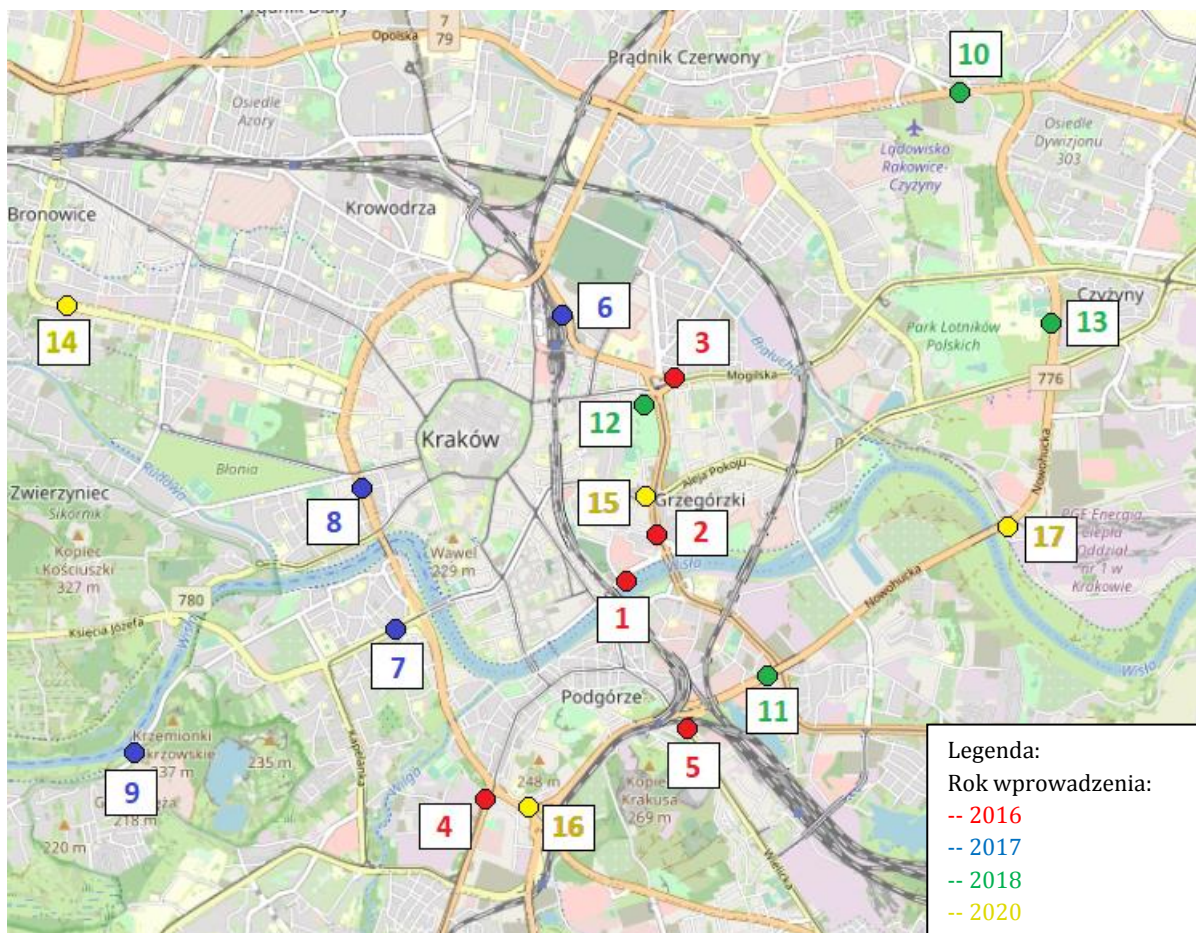
Źródło: opracowanie własne

Baza danych o zdarzeniach drogowych, poza informacjami o czasie, miejscu, rodzaju i przyczynie zdarzenia, zawierała również dokładne współrzędne geograficzne wszystkich zdarzeń, co umożliwiło ich lokalizację w sposób precyzyjny na mapie.

4.2 Dane o natężeniu ruchu rowerowego ze stacji ciągłego automatycznego pomiaru ruchu

Na obszarze Krakowa działa obecnie 17 stacji automatycznego pomiaru ruchu rowerowego (dane na dzień 07.07.2021r.), których lokalizację pokazano na rysunku 4.6.

Pierwsze 5 stacji, tj. na Bulwarach Wiślanych, ul. Kotlarskiej, ul. Mogiłskiej, ul. Wadowickiej i ul. Wileckiej (oznaczone na Rys. 4.6 kolorem czerwonym), funkcjonuje od 18 listopada 2016r. Kolejne 4 (na Dworcu Głównym, ul. Monte Casino, ul. Smoleńsk i ul. Tynieckiej) wprowadzono rok później w listopadzie 2017r. (kolor niebieski). Na początku lipca 2018r. uruchomiono następne 4 stacje na ulicach Bora-Komorowskiego, Klimeckiego, Kopernika i Nowohuckiej (kolor zielony). Stacje na ul. Armii Krajowej, Grzegórzeckiej, Kamieńskiego i Niepołomskiej (oznaczone na Rys. 4.6 kolorem żółtym) działają od grudnia 2020r.



Rys. 4.6 Lokalizacja stacji ciągłego automatycznego pomiaru natężenia ruchu rowerowego 1) Bulwary Wiślane, 2) ul. Kotlarska, 3) ul. Mogiłska, 4) ul. Wadowicka, 5) ul. Wilecka, 6) Dworzec Główny, 7) ul. Monte Casino, 8) ul. Smoleńsk, 9) ul. Tyniecka, 10) ul. Bora-Komorowskiego, 11) ul. Klimeckiego, 12) ul. Kopernika, 13) ul. Nowohucka, 14) ul. Armii Krajowej, 15) ul. Grzegórzecka, 16) ul. Kamieńskiego, 17) ul. Niepołomska.

Źródło: opracowanie własne na podstawie OpenStreetMap

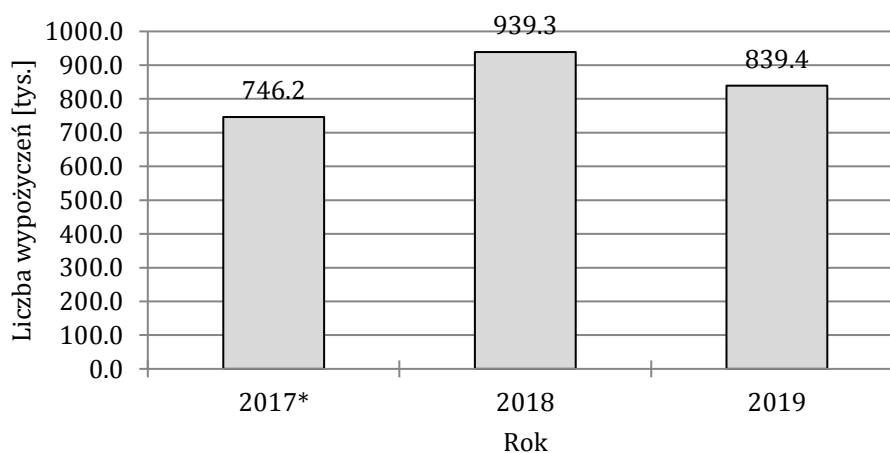
Dane o natężeniu ruchu rowerowego z poszczególnych stacji pomiaru ruchu są dostępne na stronie internetowej Zarządu Transportu Publicznego w Krakowie. Zestawione są w ujęciu dobowym. Obejmują okres od 18 listopada 2016 r. i są na bieżąco aktualizowane. Można je pobrać w formacie *csv* bez ograniczeń.

4.3 Dane z systemu rowerów miejskich

System rowerów miejskich funkcjonował w Krakowie w latach 2008-2019. Od października 2016r. nosił nazwę Wavelo (wcześniej BikeOne oraz KMK Bike), a jego operatorem była firma BikeU. Pod koniec funkcjonowania system obejmował 169 stacji wypożyczeń i zwrotów oraz ok. 1500 rowerów.

Na stronie internetowej Zarządu Transportu Publicznego w Krakowie dostępne były codzienne statystyki dotyczące wypożyczeń rowerów Wavelo. Obejmowały one informacje o liczbie wypożyczeń, całkowitym czasie wypożyczeń oraz całkowitej długości wszystkich podróży zrealizowanych w danym dniu. Dane były ogólnodostępne i można było je pobrać bez ograniczeń w formacie *csv*. Dane z okresu od 1.03.2017r. do 31.12.2019r. pobrano w styczniu 2020r. Niestety obecnie dane te nie są już udostępniane.

W przeciągu niespełna 3 lat liczba wypożyczeń rowerów Wavelo przekroczyła 2.5mln. Największą popularnością system cieszył się w 2018r. (Rys. 4.7). Rower Wavelo wypożyczano w tym czasie średnio na 22 minuty, do pokonania dystansu ok. 3.6km.



Rys. 4.7 Całkowita liczba wypożyczeń rowerów miejskich Wavelo w latach 2017-2019.

(*) - dane z roku 2017 obejmują okres od 1 marca do 31 grudnia

Źródło: opracowanie własne

Szczegółowe dane GPS z systemu Wavelo z czerwca 2017r. zostały udostępnione przez Zarząd Transportu Publicznego w Krakowie. Długość przyjętego okresu analizy wynikała ze znacznej ilości danych GPS rejestrowanych przez system. Ponadto miesiąc czerwiec został wybrany ze względu na dobre warunki pogodowe panujące w tym okresie oraz stosunkowo wysokie natężenie ruchu rowerowego. Liczba stacji wypożyczeń i zwrotów w tym czasie wynosiła 150.

Dane udostępniono w formacie *gpx*. Każda z zarejestrowanych podróży to ciąg punktów GPS o określonych współrzędnych geograficznych (długości i szerokości geograficznej) oraz

czasie rejestracji roweru Wavelo w danym punkcie. Czas określony był z dokładnością do 1 sekundy, zaś współrzędne do centymetra. Udostępnione dane nie zawierały żadnych informacji na temat użytkowników systemu (wieku, płci, statystyk wypożyczeń, itp.). Łącznie obejmowały prawie 150 000 podróży i ponad 25 000 000 punktów GPS. Na rysunku 4.8 przedstawiono fragment pliku danych.

```
<trk>
<trkseg>
<trkpt lat="50.06317333333333" lon="19.933743333333332">
  <time>2017-05-31T22:03:41Z</time>
</trkpt>
<trkpt lat="50.06317333333333" lon="19.933743333333332">
  <time>2017-05-31T22:04:01Z</time>
</trkpt>
<trkpt lat="50.063231666666667" lon="19.933571666666666">
  <time>2017-05-31T22:04:11Z</time>
</trkpt>
<trkpt lat="50.063253333333336" lon="19.9335216666666667">
  <time>2017-05-31T22:04:16Z</time>
</trkpt>
<trkpt lat="50.06327" lon="19.933478333333333">
  <time>2017-05-31T22:04:26Z</time>
</trkpt>
<trkpt lat="50.063213333333333" lon="19.933578333333333">
  <time>2017-05-31T22:04:31Z</time>
</trkpt>
<trkpt lat="50.063133333333333" lon="19.933685">
  <time>2017-05-31T22:04:36Z</time>
```

Rys. 4.8 Fragment pliku danych GPS z systemu rowerów miejskich Wavelo.
Źródło: dane udostępnione przez ZTP Kraków

Dla każdego z punktów GPS wyznaczona została prędkość v_{i+1} oraz przyspieszenie a_{i+1} w ruchu rowerowym (wz. 4.1-4.3). Prędkość obliczono jako iloraz odległości pomiędzy kolejnymi punktami GPS i różnicy czasu pojawienia się roweru w tych punktach. Odległość pomiędzy kolejnymi punktami GPS obliczono na podstawie współrzędnych geograficznych z uwzględnieniem kulistości Ziemi.

$$d_{i,i+1} = \{\cos[\sin(Lat_i) \cdot \sin(Lat_{i+1})] + \cos(Lat_i) \cdot \cos(Lat_{i+1}) \cdot \cos(Lon_i - Lon_{i+1})\} \cdot 6371000 [m] \quad (4.1)$$

$$v_{i,i+1} = \frac{d_{i,i+1}}{t_{i+1} - t_i} [m/s] \quad (4.2)$$

$$a_{i,i+1} = \frac{v_{i+1} - v_i}{t_{i+1} - t_i} [m/s^2] \quad (4.3)$$

gdzie: $d_{i,i+1}$ – odległość pomiędzy kolejnymi punktami GPS i oraz $i+1$ [m];

Lat_i, Lat_{i+1} – długość geograficzna punktu i oraz $i+1$ [-];

Lon_i, Lon_{i+1} - szerokość geograficzna punktu i oraz $i+1$ [-];

t_i, t_{i+1} – czas rejestracji roweru w punkcie i oraz $i+1$ [s];

$v_{i,i+1}$ – prędkość roweru na odcinku pomiędzy punktami i oraz $i+1$ [m/s];

$a_{i,i+1}$ – przyspieszenie roweru na odcinku pomiędzy punktami i oraz $i+1$ [m/s²].

Na tej podstawie utworzono bazę danych punktów GPS, której fragment przedstawiono w tabeli 4-1. Zawierała ona kolejno następujące informacje: numer podróży, datę podróży, godzinę rejestracji *i-tego* punktu, szerokość i długość geograficzną *i-tego* punktu, odległość pomiędzy punktami *i-1* oraz *i*, czas przejazdu odcinka pomiędzy punktami *i-1* oraz *i*, prędkość na poprzednim odcinku, prędkość na odcinku pomiędzy punktami *i-1* oraz *i*, przyspieszenie na odcinku pomiędzy punktami *i-1* oraz *i*. Zgodnie z informacją uzyskaną u operatora systemu rowerów miejskich (firma Social Bicycles) odpowiedzialnej za obsługę informatyczną urządzeń GPS zamontowanych w rowerach Wavelo, rejestracja współrzędnych geograficznych położenia roweru następowała w przypadku istotnej zmiany trajektorii przejazdu lub rejestracji przez akcelerometr urządzenia GPS odpowiednio wysokiej wartości przyspieszenia lub opóźnienia. Jeżeli żadna z tych dwóch sytuacji nie miała miejsca, położenie roweru rejestrowane było w stałych odstępach czasowych, w większości przypadków co 5s, co znajduje swoje odzwierciedlenie w zaprezentowanym poniżej fragmencie bazy danych (Tab. 4-1).

Tab. 4-1 Fragment bazy danych punktów GPS z systemu Wavelo.

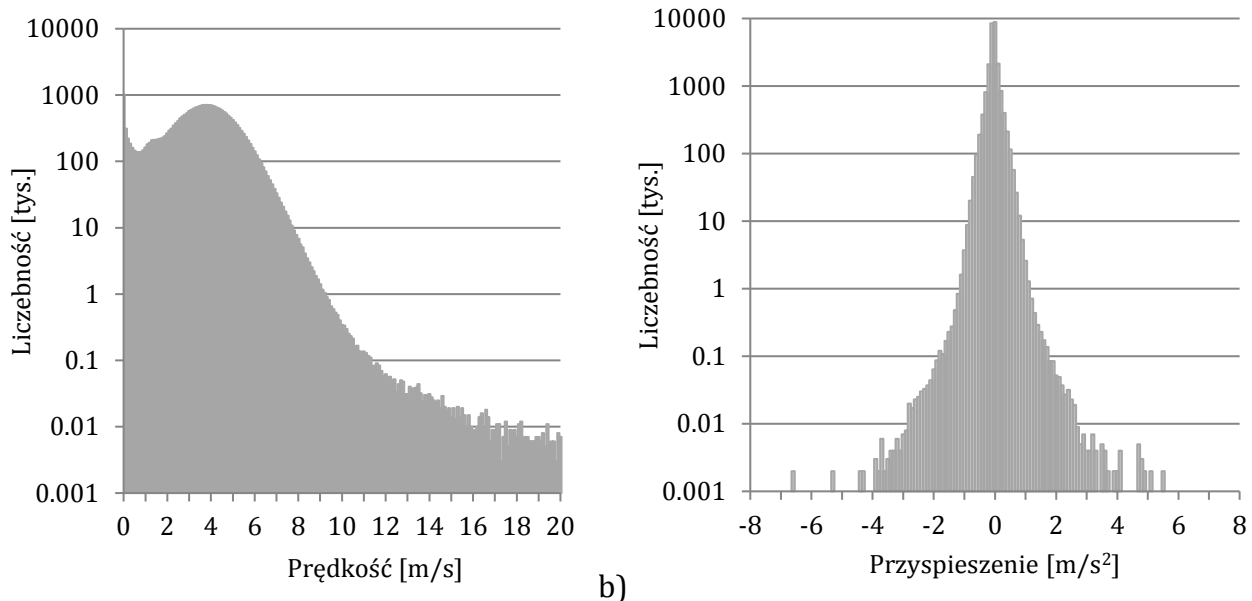
Źródło: opracowanie własne

Numer podróży	Data podróży	Godzina	Szerokość geograficzna	Długość geograficzna	Odległość [m]	Czas przejazdu odcinka [s]	V_{przed} [m/s]	V [m/s]	a^* [m/s ²]
567	01.06.2017	06:00:08	50.03437833	19.97380500	10.40	5	0.1	2.1	0.402
567	01.06.2017	06:00:18	50.03413167	19.97331833	44.28	10	2.1	4.4	0.235
567	01.06.2017	06:00:23	50.03398833	19.97302333	26.42	5	4.4	5.3	0.170
567	01.06.2017	06:00:28	50.03386333	19.97267667	28.40	5	5.3	5.7	0.080
567	01.06.2017	06:00:33	50.03374000	19.97231333	29.35	5	5.7	5.9	0.038
567	01.06.2017	06:00:38	50.03361667	19.97196667	28.30	5	5.9	5.7	-0.042
567	01.06.2017	06:00:43	50.03351500	19.97162500	26.89	5	5.7	5.4	-0.056
567	01.06.2017	06:00:48	50.03340333	19.97136667	22.24	5	5.4	4.5	-0.186
567	01.06.2017	06:01:03	50.03325667	19.97064833	53.84	15	4.5	3.6	-0.057
567	01.06.2017	06:01:08	50.03336500	19.97048500	16.77	5	3.6	3.4	-0.048
567	01.06.2017	06:01:13	50.03352667	19.97031000	21.90	5	3.4	4.4	0.206

gdzie: (*) - znak „+” i „-” przy przyspieszeniu oznaczają, że na odcinku pomiędzy danym punktem, a punktem poprzednim rowerzysta odpowiednio przyspieszał i hamował

Wykresy prędkości oraz przyspieszeń dla wszystkich punktów GPS, utworzone na podstawie przygotowanej bazy danych (kol. 9 i 10, Tab. 4-1), przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4.9a oraz 4.9b. Najczęściej rejestrowano prędkości ok. 4m/s (14.4km/h). Ze

względu na częste zatrzymania (w szczególności w rejonie skrzyżowań), prędkość 0m/s była często obserwowana. Wykres przyspieszeń w ruchu rowerowym jest symetryczny. Przez większość czasu rowerzyści poruszają ze stałą prędkością, a przyspieszenia i opóźnienia osiągają minimalne wartości. Prędkości powyżej 15m/s oraz przyspieszenie powyżej 3m/s² i poniżej -3m/s² były bardzo rzadko rejestrowane, a ich występowanie było zapewne wynikiem dokładności pracy urządzeń GPS (zakłóceń sygnału w pobliżu wysokich budynków, tuneli, itp.).



Rys. 4.9 Wykres a) prędkości b) przyspieszenia w punktach GPS.
Źródło: opracowanie własne

4.4 Baza danych OpenStreetMap

Czynniki wpływające na bezpieczeństwo ruchu drogowego, takie jak natężenie ruchu pojazdów i pieszych, prędkości pojazdów, reprezentowane mogą być w sposób pośredni przez zagospodarowanie otoczenia drogi i infrastrukturę drogową. Jako przykład można podać klasę drogi samochodowej, która w pośredni sposób opisuje poziom natężeń ruchu pojazdów silnikowych, ich prędkości oraz udział pojazdów ciężkich. Zbieranie danych o infrastrukturze i zagospodarowaniu otoczenia drogi poprzez inwentaryzację wybranych odcinków drogowych jest czasochłonne i kosztowne, w szczególności, gdy analiza obejmuje liczne lokalizacje. Tego typu dane można jednak gromadzić i analizować w sposób kompleksowy na podstawie baz danych takich jak OpenStreetMap (OSM).

OpenStreetMap to darmowa mapa świata, która może być wykorzystywana na podstawie licencji Open Data Commons Open Database License. Dane OSM mogą być swobodnie kopiowane, rozpowszechniane i przekazywane innym. Warunkiem jest podanie źródła tych danych. Mapa OSM jest edytowana i aktualizowana przez jej użytkowników. Zawiera informacje m.in. o przebiegu dróg (z podziałem na ich klasy), lokalizacji budynków (z podziałem na ich przeznaczenie tj. sklepy, szpitale, hotele, muzea), położeniu obszarów rekreacyjnych, przystanków komunikacji zbiorowej. Dane OSM wprowadzane są w formie:

- węzłów (punktów o zadanych współrzędnych GPS) - za pomocą węzłów określone jest położenie np. przystanków komunikacji zbiorowej, przejść dla pieszych, skrzyżowań drogowych;
- linii (tworzonych z ciągu węzłów) – za pomocą ciągów odwzorowywany jest przebieg dróg, rzek, granic obszarów, itp.;
- relacji (opisujących związek pomiędzy węzłami i liniami) – relacje wykorzystywane są do odwzorowania np. przebiegu trasy linii autobusowej, granic administracyjnych miasta.

Węzły, linie oraz relacje definiowane są za pomocą tzw. tagów, opisujących szczegółowa element, którego położenie przedstawiają. Przykładem może być tag linii "highway=living_street", opisujący drogę (highway) w strefie zamieszkania (living_street). Dane OSM mogą być analizowane online lub offline, po pobraniu ich np. w formacie *xml*.

Dane OpenStreetMap były wielokrotnie wykorzystywane w analizach ruchu drogowego (w tym rowerowego). Zastosowano je do wyznaczenia długości odcinków drogowych, identyfikacji prędkości w ruchu swobodnym oraz przepustowości odcinka na podstawie klasy drogi (Zilske, 2011), określenia optymalnej trasy przejazdu dla różnych środków transportu (samochodu osobowego, roweru, ruchu pieszego) (Huber i Rust, 2016), w analizie wyboru trasy przejazdu z uwzględnieniem klas dróg zdefiniowanych w OSM (Yeboah i Albanides, 2015), do stworzenia narzędzia online wyszukiwania optymalnej trasy przejazdu dla zadanych parametrów (Sik, Csorba i Ekler, 2017).

Ze względu na szczegółowość danych o infrastrukturze i zagospodarowaniu terenu dostępnych w OSM, dane zagregowano w 16 głównych kategorii przedstawionych w tabeli 4-2. Przyjęto, że wpływ elementów włączonych do jednej kategorii lub podkategorii na bezpieczeństwo ruchu rowerowego jest porównywalny. Pierwsza kategoria dotyczy dróg samochodowych, gdzie wyróżniono 6 podkategorii² (klas), tj.:

- drogi pierwszego rzędu (*primary*) – główne drogi w systemie transportowym danego kraju, najczęściej łączące większe miasta, niespełniające wymagań autostrad i dróg ekspresowych; najczęściej są to drogi krajowe, przebiegające przez kilka województw i wykorzystywane do przemieszczania się na długie dystanse;
- drogi drugiego rzędu (*secondary*) - drogi stanowiące istotne połączenia w krajowej sieci dróg, ale niebędące częścią krajowych i międzynarodowych korytarzy tranzytowych; najczęściej są to drogi wojewódzkie;
- drogi zbiorczo-rozprowadzające (*tertiary*) - drogi niewchodzące w skład głównej sieci drogowej, ale ważne w skali lokalnej, często łączące ze sobą mniejsze miasta, większe wsie lub istotne części większych miast;
- drogi lokalne (*residential*) - drogi o charakterze lokalnym, niepełniące funkcji dróg łączących miejscowości, znajdujące się najczęściej na lub w pobliżu terenów zamieszkałych nie będących strefami zamieszkania;
- drogi w strefie zamieszkania (*living street*) - drogi publiczne lub inne drogi, na których obowiązują szczególne zasady ruchu drogowego, a wjazdy i wyjazdy oznaczone są znakami D-40 „Strefa zamieszkania” oraz D-41 „Koniec strefy zamieszkania”;

² opisy dróg zaliczanych do poszczególnych klas na podstawie https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_features

- drogi serwisowe (*service*) – drogi niebędące drogami publicznymi, zapewniające dojazd do m.in. terenów przemysłowych, parkingów, stacji benzynowych.

Tab. 4-2 Wyróżnione kategorie danych o infrastrukturze i zagospodarowaniu terenu z OSM.

Źródło: opracowanie własne

Lp.	Kategoria	Podkategoria
1	Droga	Pierwszego rzędu (primary)
		Drugiego rzędu (secondary)
		Zbiorczo-rozprowadzające (tertiary)
		Lokalne (residential)
		W strefie zamieszkania (living street)
		Serwisowe (service)
2	Skrzyżowanie	Z drogą z pierwszeństwem (znak podporządkowania A-7)
		Z drogą z pierwszeństwem (znak podporządkowania B-20)
		O ruchu okrężnym
3	Przejście dla pieszych/przejazd dla rowerzystów	Z sygnalizacją świetlną
		Bez sygnalizacji świetlnej
		Z wyspą azylu
4	Przystanek autobusowy	
5	Przystanek tramwajowy	
6	Pętla autobusowa/tramwajowa	
7	Restauracja (np. restauracja, kawiarnia, bar)	
8	Szkoła wyższa (uczelnia, jednostka badawcza)	
9	Szkoła (szkoła, przedszkole)	
10	Szpital	
11	Sklep (np. odzieżowy, drogeria, apteka, kwaciarnia)	
12	Obiekt związany z rozrywką (np. kino, teatr)	
13	Obiekt związany z czasem wolnym (np. park, plac zabaw, basen)	
14	Hotel (hotel, motel, pensjonat)	
15	Obiekt o spodziewanym zwiększonym ruchu turystycznym (np. muzeum, zoo, punkt widokowy)	
16	Parking (miejsce parkingowe, postój taksówek)	

Klasa drogi w OSM może odzwierciedlać poziom natężenia ruchu pojazdów, udział pojazdów ciężkich oraz prędkości pojazdów. Kategorie 2 „Skrzyżowania” i 3 „Przejścia dla pieszych/przejazdy rowerowe” charakteryzują sposób organizacji ruchu na skrzyżowaniu i wynikające z niego możliwe konflikty w ruchu drogowym. Dla kategorii 2 „Skrzyżowania” wyróżniono 3 podkategorie, tj. skrzyżowania z drogą z pierwszeństwem przejazdu i wlotami podporządkowanymi znakami A-7 lub B-20 oraz ronda. W przypadku kategorii 3 „Przejścia dla pieszych/przejazdy dla rowerzystów” wyróżniono przejścia/przejazdy z i bez sygnalizacji świetlnej oraz z wyspą azylu. Kategorie 4, 5 i 6 dotyczące przystanków i pętli autobusowych i tramwajowych wyróżniono z uwagi na możliwość pojawiania się częstych konfliktów rower-pieszcy, do których dochodzić może w szczególności podczas wymiany pasażerów. Kategorie od 7 do 16 obejmujące restauracje, uczelnie wyższe, szkoły, szpitale, sklepy, obiekty związane z rozrywką, czasem wolnym, hotele, obiekty o spodziewanym zwiększonym ruchu

turystycznym i parkingi, odzwierciedlają zagospodarowanie terenu i poziom natężenia ruchu pieszego, oraz pozwalają scharakteryzować zachowania uczestników ruchu drogowego w obszarze (np. w pobliżu szkół prędkości pojazdów mogą być niższe niż na odcinkach dróg o tych samych parametrach jednak położonych w innej lokalizacji).

W OpenStreetMap dostępne są również dane o infrastrukturze ruchu rowerowego, jednak w pracy wykorzystano bardziej szczegółowe dane udostępniane przez Zarząd Transportu Publicznego w Krakowie, opisane szczegółowo w pkt. 4.5.

4.5 Baza danych CARTO o infrastrukturze ruchu rowerowego

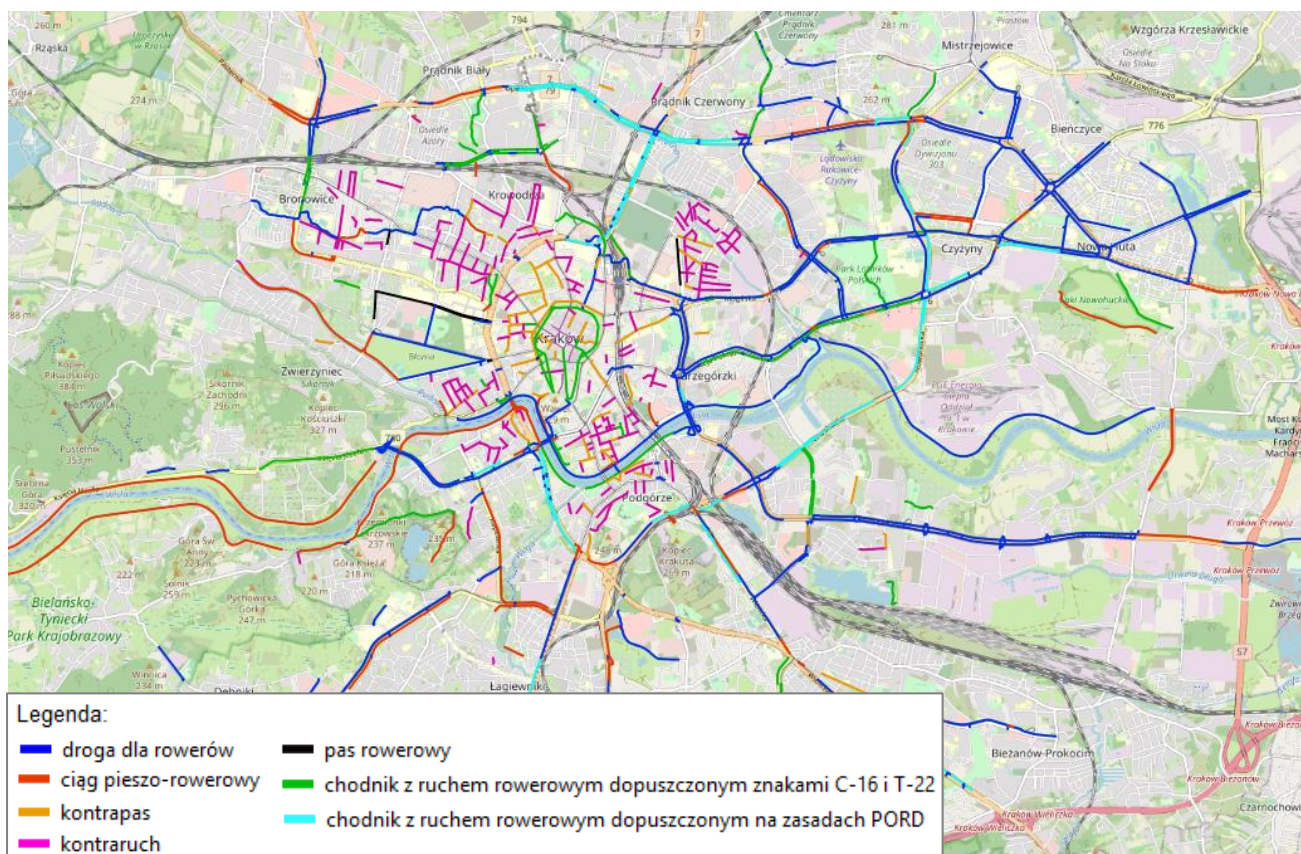
Zarząd Transportu Publicznego w Krakowie udostępnia dane o infrastrukturze ruchu rowerowego poprzez platformę CARTO. Platforma CARTO umożliwia analizę, wizualizację i dzielenie się danymi przestrzennymi. Poszczególne obiekty wprowadzane są jako punkty, linie, poligony oraz ich grupy i mogą być charakteryzowane poprzez dodatkowe parametry (np. numer identyfikacyjny, długość). Dane można pobrać w różnych formatach (tj. *shp*, *csv*, *geosjon*).

Dane o infrastrukturze ruchu rowerowego w Krakowie pobrano ze strony zikit.carto.com. Najnowsze dane pochodzą z czerwca 2018r. (dane na dzień 20.07.2021r.). W bazie wyróżnione zostały następujące typy infrastruktury rowerowej:

- droga dla rowerów (DDR);
- kontrapas;
- kontraruch;
- ciąg pieszo-rowerowy (CPR);
- pas rowerowy;
- chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym znakami C-16 „Droga dla pieszych” oraz T-22 „Nie dotyczy rowerów”;
- chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym na zasadach Prawa o Ruchu Drogowym (PORD), czyli chodnik o szerokości min. 2m, zlokalizowany wzdłuż odcinka drogi o dozwolonej prędkości powyżej 50km/h, na którym brak wydzielonej drogi lub pasa dla rowerów.

Dodatkowymi informacjami dostępnymi w bazie były data wprowadzenia i długość infrastruktury ruchu rowerowego, jej szerokość i rodzaj nawierzchni, jednak nie były one uzupełnione dla wszystkich odcinków. Lokalizację poszczególnych typów infrastruktury ruchu rowerowego w Krakowie przedstawiono na rysunku 4.10.

Łączna długość infrastruktury ruchu rowerowego w Krakowie to 281km, z czego niemal połowę stanowią drogi dla rowerów (118km). Ciągi pieszo-rowerowe występują na odcinkach o łącznej długości ok. 50km. Odcinków z kontrapasem jest o połowę mniej niż z kontraruchem, odpowiednio ok. 18km i 36km. Pasy rowerowe mają łączną długość 3.3km. Chodniki z ruchem rowerowym dopuszczonym znakami C-16 i T-22 oraz chodniki, na których ruch rowerowy dopuszczony jest na zasadach PORD mają łączną długość odpowiednio ok. 32km i 23km.



Rys. 4.10 Infrastruktura ruchu rowerowego w Krakowie.
Źródło: opracowanie własne na podstawie OpenStreetMap

5. Szacowanie parametrów ruchu rowerowego na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich

Trudności w pozyskiwaniu reprezentatywnych danych o parametrach ruchu rowerowego oraz możliwość wykorzystania w tym celu danych GPS z systemu rowerów miejskich skłoniły do podjęcia badań nad związkiem pomiędzy natężeniem i prędkościami użytkowników systemu rowerów miejskich, a ogółem rowerzystów. Innymi słowy poszukiwano odpowiedzi na pytanie, czy na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich możliwe jest szacowanie parametrów ruchu ogółu rowerzystów, będących podstawowymi determinantami bezpieczeństwa ruchu rowerowego. Szacowanie charakterystyk ruchu rowerowego na podstawie danych GPS wymaga założenia, że parametry ruchu rowerzystów korzystających z systemu rowerów miejskich pozostają w związku z parametrami ruchu ogółu rowerzystów. To założenie nie było dotychczas w pełni zweryfikowane w literaturze.

Analizę podzielono na cztery części. W części pierwszej (pkt. 5.1) zbadano związek pomiędzy sezonową zmiennością natężenia ruchu rowerowego, a zmiennością liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego. W części drugiej (pkt. 5.2) przeanalizowano i porównano wpływ warunków pogodowych oraz występowania dni wolnych od pracy oraz ferii i wakacji szkolnych na natężenie ruchu użytkowników systemu rowerów publicznych i ogół rowerzystów. Udział rowerów systemu miejskiego w całym potoku rowerzystów był przedmiotem badań opisanych w części 3 (pkt. 5.3). W części 4 (pkt. 5.4) przedstawiono badania nad związkiem pomiędzy chwilową prędkością użytkowników systemu Wavelo i prędkościami chwilowymi ogółu rowerzystów na różnych typach infrastruktury rowerowej i elementach infrastruktury drogowej (odcinkach drogowych i przejazdach rowerowych o różnym sposobie organizacji ruchu). Wnioski wynikające z zaprezentowanych badań przedstawiono w pkt. 5.5.

Zaprezentowane w rozdziale 5 badania stanowią syntezę bądź uzupełnienie opublikowanych prac własnych (Kieć i Pogodzińska, 2018; Pogodzińska, 2018; Pogodzinska, Kiec i D'Agostino, 2020; Pazdan, 2020; Pazdan, Kiec i D'Agostino, 2021).

5.1 Sezonowa zmienność natężenia ruchu rowerowego

Celem badań przedstawionych w pkt. 5.1 była analiza sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego oraz ocena jej związku ze zmiennością liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego. Jak opisano w pkt. 2.6 wahania natężenia ruchu rowerowego i liczby wypożyczeń rowerów Wavelo w ciągu roku mogą być odmienne (w szczególności latem ze względu wzrost liczby turystów w mieście oraz zimą z uwagi na ograniczoną liczbę rowerów dostępnych w systemie). Wykazanie związku pomiędzy zmiennością sezonową natężenia ruchu rowerowego i liczby wypożyczeń rowerów publicznych wskazałoby na możliwość szacowania wskaźników sezonowej zmienności natężenia rowerzystów na podstawie danych pochodzących z systemu rowerów publicznych w przypadku braku bardziej szczegółowych danych.

5.1.1 Przygotowanie bazy danych

Okres analizy obejmował 2 lata od 01.01.2018r. do 31.12.2019r. Na podstawie danych ze stacji ciągłego automatycznego pomiaru ruchu (pkt. 4.2), wyznaczono wartość dobowego natężenia ruchu rowerowego w miejscach lokalizacji 13 stacji pomiarowych. Dla 9 stacji (tj. Bulwary Wiślane, ul. Kotlarska, ul. Mogilska, ul. Wadowicka, ul. Wilecka, Dworzec Główny, ul. Monte Casino, ul. Smoleńsk, ul. Tyniecka) wyznaczono natężenia w 2018r. i 2019r. Dla 4 stacji (ul. Bora-Komorowskiego, ul. Klimeckiego, ul. Kopernika, ul. Nowohucka), wprowadzonych pod koniec 2018r., wyznaczono tylko natężenia w 2019r. Ustalono również dzienną liczbę wypożyczeń rowerów systemu Wavelo w całym mieście w przyjętym okresie analizy (pkt. 4.3).

Na podstawie zgromadzonych danych dla każdego dnia okresu analizy i każdej stacji pomiaru ruchu rowerowego oraz dla systemu Wavelo obliczono dobowy wskaźnik zmienności natężenia ruchu (w przypadku systemu Wavelo należy przez to rozumieć dobowy wskaźnik zmienności liczby wypożyczeń rowerów miejskich) (wz. 5.1).

$$\acute{S}DRR_{wska\acute{z}} = \frac{Q}{\acute{S}DRR} \quad [-] \quad (5.1)$$

gdzie: $\acute{S}DRR_{wska\acute{z}}$ – dobowy wskaźnik zmienności natężenia ruchu rowerowego (w przypadku stacji pomiaru ruchu) lub liczby wypożyczeń (w przypadku systemu Wavelo) [-];

Q – dobowe natężenie ruchu rowerowego (w przypadku stacji pomiaru ruchu) lub dobową liczbą wypożyczeń (w przypadku systemu Wavelo) [R/24h];

$\acute{S}DRR$ – średniodobowe natężenie ruchu rowerowego (w przypadku stacji pomiaru ruchu) lub średnia dobową liczbą wypożyczeń (w przypadku systemu Wavelo) w roku [R/24h].

Wartości wskaźników sezonowej zmienności natężenia ruchu dla poszczególnych stacji pomiaru ruchu i liczby wypożyczeń rowerów Wavelo w 2018r. i 2019r. przedstawiono w tabeli 5-1. W tabeli tej podano również wartości $\acute{S}DRR_{wska\acute{z}}$ średnie dla wszystkich stacji pomiaru ruchu rowerowego.

5.1.2 Metoda badań

Sezonowa zmienność natężenia ruchu rowerowego może być uzależniona od lokalizacji przekroju pomiarowego, która powiązana jest z charakterem ruchu rowerowego odbywającego w danym miejscu (gospodarczy - w przypadku niewielkich sezonowych wahań ruchu; turystyczny - w przypadku znacznego wzrostu średniego dobowego ruchu w lipcu i sierpniu). Ponadto wartości wskaźników sezonowej zmienności ruchu mogą zmieniać się w kolejnych latach, przede wszystkim ze względu na wpływ warunków pogodowych na natężenie ruchu rowerowego. W celu oceny wpływu lokalizacji przekroju pomiarowego na sezonową zmienność natężenia ruchu rowerowego wykonano analizę wariancji ANOVA. Wskaźniki sezonowej zmienności ruchu rowerowego w kolejnych dwóch latach badań porównano ze sobą wykorzystując test istotności dla dwóch wartości średnich.

Tab. 5-1 Wskaźniki sezonowej zmienności natężenia ruchu dla stacji pomiaru ruchu i liczby wypożyczeń rowerów systemu Wavelo w 2018r. i 2019r.

Źródło: opracowanie własne

Rok	Miesiąc	Stacja pomiaru ruchu														Wavelo
		Bulwary Wiślane	Dworzec Główny	ul. Kotlarska	ul. Mogilska	ul. Monte Casino	ul. Smoleńsk	ul. Tyniecka	ul. Wadowicka	ul. Wielicka	ul. Bora-Komorowskiego	ul. Klimeckiego	ul. Kopernika	ul. Nowohucka	Średnia_stacje	
2018	1	0.174	0.324	0.247	0.294	0.269	0.396	0.169	0.246	0.210					0.259	0.158
	2	0.121	0.252	0.188	0.225	0.185	0.307	0.117	0.206	0.149					0.194	0.124
	3	0.321	0.393	0.339	0.377	0.351	0.467	0.333	0.445	0.290					0.369	0.293
	4	1.777	1.361	1.521	1.493	1.566	1.312	1.785	1.324	1.425					1.507	1.733
	5	2.051	1.612	1.779	1.676	1.769	1.539	2.132	1.450	1.658					1.741	2.038
	6	1.683	1.601	1.563	1.634	1.613	1.540	1.433	1.550	1.503					1.567	1.936
	7	1.445	1.403	1.526	1.439	1.482	1.291	1.524	1.698	1.456					1.474	1.544
	8	1.531	1.556	1.723	1.573	1.658	1.398	1.701	1.633	1.747					1.613	1.550
	9	1.286	1.401	1.437	1.375	1.374	1.369	1.403	1.529	1.482					1.406	1.202
	10	0.928	1.075	1.013	1.012	0.923	1.144	0.813	0.902	1.093					0.989	0.834
	11	0.467	0.673	0.594	0.591	0.535	0.775	0.398	0.712	0.635					0.598	0.436
	12	0.171	0.308	0.263	0.270	0.230	0.428	0.139	0.264	0.304					0.264	0.152
	Min.	22	13	18	41	30	30	37	17	17					-	54
	Max.	5329	2345	4148	5252	3117	1344	6341	2802	1749					-	7427
ŚDRR	1520	866	1508	1994	1238	598	1258	841	729					-	2676	
2019	1	0.096	0.180	0.180	0.203	0.130	0.297	0.113	0.157	0.157	0.142	0.158	0.200	0.133	0.165	0.112
	2	0.351	0.347	0.369	0.396	0.316	0.515	0.344	0.362	0.329	0.333	0.335	0.370	0.303	0.359	0.239
	3	0.731	0.506	0.616	0.659	0.579	0.758	0.699	1.111	0.578	0.596	0.597	0.656	0.592	0.668	0.602
	4	1.080	0.995	0.991	1.000	0.927	0.999	0.966	0.971	0.919	0.934	0.959	1.001	0.945	0.976	1.144
	5	0.963	1.038	0.981	1.019	1.027	1.118	1.185	1.041	0.957	1.021	1.015	1.057	1.044	1.036	1.248
	6	1.887	1.836	1.827	1.777	1.942	1.614	2.137	1.646	1.852	2.081	2.113	1.813	2.077	1.893	2.223
	7	1.592	1.692	1.697	1.656	1.774	1.375	1.641	1.911	1.770	1.760	1.817	1.639	1.821	1.703	1.875
	8	1.816	1.514	1.575	1.542	1.645	1.329	1.851	1.599	1.678	1.802	1.549	1.495	1.711	1.624	1.693
	9	1.421	1.337	1.336	1.329	1.260	1.302	1.296	1.213	1.355	1.275	1.287	1.298	1.279	1.307	1.290
	10	1.165	1.264	1.224	1.212	1.229	1.251	1.038	0.835	1.228	1.093	1.121	1.231	1.121	1.155	0.964
	11	0.537	0.750	0.711	0.713	0.701	0.814	0.425	0.650	0.693	0.567	0.621	0.730	0.571	0.653	0.439
	12	0.329	0.508	0.461	0.462	0.432	0.604	0.268	0.457	0.446	0.359	0.395	0.476	0.364	0.428	0.134
	Min.	34	38	47	73	58	42	53	9	28	22	24	96	11	-	22
	Max.	4708	2364	4313	4995	3720	1415	5854	2961	2637	1794	2881	4572	1433	-	6446
ŚDRR	1558	907	1699	2050	1449	645	1225	894	995	674	1040	1828	509	-	2300	

gdzie: Min. i Max. – minimalne i maksymalne dobowe natężenie ruchu rowerowego (w przypadku stacji pomiaru ruchu) lub minimalna i maksymalna dobowa liczba wypożyczeń rowerów (w przypadku systemu Wavelo).

Analiza wariancji ANOVA

Wartości zmiennej zależnej (w badanym przypadku wskaźnika $\text{ŚDRR}_{\text{wskaż}}$) uzależnione są od jednego lub kilku czynników działających równocześnie, zwanych czynnikami grupującymi lub klasyfikacyjnymi (w badanym przypadku czynnikiem grupującym była lokalizacja przekroju pomiarowego). Każdy z nich ma kilka wariantów (poziomów). Analiza wariancji

ANOVA umożliwia ocenę, czy czynniki grupujące (klasyfikujące) wywierają statystycznie istotny wpływ na wartość zmiennej zależnej. Gdy analizowany jest wpływ tylko jednego czynnika grupującego mamy do czynienia z tzw. jednoczynnikową analizą wariancji ANOVA. W przypadku badań wpływu dwóch lub więcej czynników grupujących, analiza wariancji ANOVA nazywana jest wieloczynnikową.

W przeciwieństwie do hipotezy zerowej H_0 zakładającej brak różnic pomiędzy średnimi wartościami zmiennej losowej w porównywanych wariantach czynnika grupującego ($H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$), hipoteza alternatywna H_1 jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA wskazuje na istnienie takowych różnic dla co najmniej jednej pary porównywanych wariantów. Statystykę testu F wyznacza się z poniższych zależności (wz. 5.2-5.4) (Stanisz, 2007):

$$F = \frac{MS_{efekt}}{MS_{błąd}} [-] \quad (5.2)$$

$$MS_{efekt} = \frac{SS_{efekt}}{k - 1} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{k - 1} [-] \quad (5.3)$$

$$MS_{błąd} = \frac{SS_{błąd}}{n - k} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n - k} [-] \quad (5.4)$$

gdzie: F - statystyka testu [-];

n – całkowita liczebność próby [-];

n_i – liczebność próby dla *i-tego* wariantu czynnika grupującego [-];

k – liczba wariantów czynnika grupującego [-];

MS_{efekt} – średnia suma kwadratów międzygrupowa [-];

$MS_{błąd}$ - średnia suma kwadratów błędu [-];

\bar{x}_i – średnie wartości zmiennej losowej dla *i-tego* wariantu czynnika grupującego;

\bar{x} - wartość średnia zmiennej losowej;

x_{ij} – *j-ta* obserwowana wartość zmiennej losowej dla *i-tego* wariantu czynnika grupującego.

W przypadku wieloczynnikowej analizy wariancji ANOVA wartość statystyki F oblicza się osobno dla każdego z czynników grupujących. Dokładny opis metody wraz z odpowiednimi wzorami służącymi do obliczenia wartości statystyki F znaleźć można np. w pracy (Stanisz, 2007).

Wartość statystyki testu F porównuje się z wartością krytyczną rozkładu F-Snedecora odczytaną dla liczby stopni swobody $k-1$ i $n-k$. Jeżeli wartość bezwzględna statystyki testu jest większa od wartości krytycznej przy ustalonej wartości poziomu istotności α , odrzuca się hipotezę zerową H_0 , na rzecz hipotezy alternatywnej H_1 .

Analiza wariancji ANOVA wymaga spełnienia 4 założeń (Stanisz, 2007):

- 1) Zmienna zależna musi być mierzalna
- 2) Próby zostały pobrane losowo, niezależnie od siebie

- 3) Rozkład zmiennej zależnej w każdej z porównywanych grup musi być normalny
- 4) Wariancje zmiennej losowej w porównywanych grupach muszą być homogeniczne

Jeżeli warunki dotyczące homogeniczności wariancji i normalności rozkładu zmiennej zależnej nie są spełnione, analizę wariancji ANOVA należy zastąpić nieparametrycznym testem Kruskala-Wallisa. W przypadku równolicznych grup i niewielkiego naruszenia powyższych założeń ANOVA daje mimo wszystko dobre wyniki.

Test normalności rozkładu Shapiro-Wilka

Do testowania podobieństwa rozkładu zmiennej losowej do rozkładu normalnego służą testy statystycznych takie jak m.in.: test Kołmogorowa-Smirnowa, test Shapiro-Wilka, test Lilliefors'a, test Anderson'a-Darling'a. Dane literaturowe wskazują, że **test Shapiro-Wilka** charakteryzuje największa moc testu (Mohd Razali i Bee Wah, 2011). Z tego względu wybrany on został do testowania normalności rozkładu w niniejszej pracy. Hipoteza zerowa H_0 testu Shapiro-Wilka zakłada, że próba pochodzi z populacji o rozkładzie normalnym. Statystykę testu W wyznacza się ze wzoru 5.5:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^m a_i \cdot (X_{n+1-i} - X_i))^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} [-] \quad (5.5)$$

gdzie: W – statystyka testu Shapiro-Wilka [-];

n – liczebność próby [-];

m – gdy liczba elementów w próbie jest parzysta $m=n/2$, w przeciwnym wypadku $m=(n-1)/2$ [-];

$X_{n+1-i} - X_i$ – rozstęp rzędu i [-];

a_i – współczynnik Shapiro-Wilka odczytywany z tablic [-];

\bar{x} - wartość średnia zmiennej losowej;

x_i – i -ta wartość zmiennej losowej.

Hipotezę zerową H_0 można odrzucić na rzecz hipotezy alternatywnej H_1 , jeżeli wartość statystyki testu W przekracza wartość krytyczną wyznaczoną dla zadanej liczebności próby n i przyjętego poziomu istotności α . Można wówczas stwierdzić, że na poziomie ufności $1-\alpha$ rozkład zmiennej losowej nie jest rozkładem normalnym.

Test jednorodności wariancji Levene'a

Do oceny jednorodności (homogeniczności) wariancji w badanych próbach wykorzystuje się jeden z testów takich jak m.in. test Levene'a, test Bartle'a, test O'Brien'a. **Test Levene'a** jest mniej wrażliwy na odstępstwo od normalności rozkładu zmiennej losowej od testu Bartle'a i jest uważany za standardowy test jednorodności wariancji (Erjavec, 2011). Z tego względu został wybrany do testowania homogeniczności wariancji w niniejszej pracy. Hipoteza zerowa testu Levene'a H_0 zakłada równość wariancji i jest sprawdzana poprzez porównanie statystyki testu F_L (wz. 5.6) z wartością krytyczną rozkładu F-Snedecora odczytaną dla liczby

stopni swobody $k-1$ i $n-k$ dla przyjętego poziomu ufności α . Jeżeli wartość statystyki F_L przekracza wartość krytyczną odrzuca się hipotezę zerową H_0 , na rzecz hipotezy alternatywnej H_1 zakładającej występowanie różnic wariancji.

$$F_L = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \cdot (\bar{x}_i - \bar{x})^2 / (k - 1)}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} n_i \cdot (\bar{x}_{(ij)} - \bar{x}_i)^2 / \sum_{i=1}^k (n_i - 1)} [-] \quad (5.6)$$

gdzie: F_L – statystyka testu Levene’a [-];

n_i – liczebność próby dla i -tego wariantu czynnika grupującego [-];

k – liczba wariantów czynnika grupującego [-];

$\bar{x}_{(ij)}$ – wartość bezwzględna z różnicy pomiędzy j -tą obserwacją j w i -tej grupie a średnią w i -tej grupie;

\bar{x}_i – średnie wartości zmiennej losowej dla i -tego wariantu czynnika grupującego;

\bar{x} – wartość średnia zmiennej losowej.

Test post hoc HSD Tukey’a

Stwierdzenie statystycznie istotnego wpływu czynnika grupującego na wartości zmiennej losowej w analizie wariancji ANOVA, nie daje odpowiedzi na pytanie, pomiędzy którymi parami wariantów czynnika badana różnica była statystycznie istotna. W tym celu wykonuje się jeden z testów post hoc, np. test HSD Tukey’a, test Duncana, test Scheffego, test Fishera. W literaturze do porównań par średnich zaleca się wykorzystywać **test HSD Tukey’a** (Stanisz, 2007). Polega on na porównaniu wartości bezwzględnej różnicy pomiędzy średnimi wartościami zmiennej losowej dla dwóch wariantów czynnika grupującego z tzw. najmniejszą istotną różnicą NIR (wz. 5.7).

$$NIR = q_{p,k,n-k} \cdot \sqrt{MS_{bład} / n_i} [-] \quad (5.7)$$

gdzie: $q_{p,k,n-k}$ – kwantyl rozkładu studentyzowanego rozstępu wyznaczony z tablic dla poziomu istotności α i liczby stopni swobody $k, n-k$ [-];

n – całkowita liczebność próby [-];

n_i – liczebność próby dla i -tego wariantu czynnika grupującego [-];

k – liczba wariantów czynnika grupującego [-];

$MS_{bład}$ – średnia suma kwadratów błędów z analizy wariancji ANOVA (wz. 5.4).

Jeżeli bezwzględna różnica porównywanych średnich jest większa od wartości NIR można stwierdzić, że pomiędzy analizowanymi wariantami czynnika grupującego wspomniana różnica jest statystycznie istotna. Na podstawie wyników testu HSD Tukey’a możliwe jest wskazanie jednorodnych pod względem średniej wartości zmiennej losowej grup czynnika klasyfikującego.

Test istotności dla dwóch wartości średnich

Porównanie wskaźników sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego w poszczególnych miesiącach 2019r. względem roku poprzedniego, wykonano na podstawie **testu istotności dla dwóch wartości średnich**. Hipoteza zerowa testu H_0 zakłada brak różnic pomiędzy średnimi wartościami badanej zmiennej ($m_1=m_2$). W zależności o liczebności prób badawczych wartość statystyki testu oblicza się na podstawie jednego z dwóch wzorów (wz. 5.8a lub 5.8b) (Greń, 1972):

- a) gdy rozkłady zmiennej losowej w obu populacjach są normalne lub inne, a odchylenia standardowe zmiennej losowej w populacjach nie są znane, statystykę testu na podstawie danych z prób dużych oblicza się ze wzoru 5.8a:

$$u = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad [-] \quad (5.8a)$$

gdzie: u – statystyka testu [-];

n_1, n_2 – liczebności prób [-];

s_1, s_2 – odchylenia standardowe w obu próbach;

\bar{x}_1, \bar{x}_2 – wartości średnie zmiennej losowej w obu próbach;

- b) gdy rozkłady zmiennej losowej w obu populacjach są normalne $N(m_1, \sigma_1)$ i $N(m_2, \sigma_2)$, a odchylenia standardowe zmiennej losowej nie są znane, jednak są równe $\sigma_1=\sigma_2$, statystykę testu na podstawie danych z prób małych oblicza się ze wzoru 5.8b:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1 \cdot s_1^2 + n_2 \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad [-] \quad (5.8b)$$

gdzie: t – statystyka testu [-];

n_1, n_2 – liczebności prób [-];

s_1, s_2 – odchylenia standardowe w obu próbach;

\bar{x}_1, \bar{x}_2 – wartości średnie zmiennej losowej w obu próbach.

Obliczoną na podstawie jednego z powyższych wzorów statystykę testu porównuje się z wartością krytyczną standaryzowanego rozkładu normalnego $N(0,1)$ u_α odczytaną dla przyjętego poziomu istotności α (w przypadku statystyki policzonej na podstawie wzoru 5.8a) lub z wartością krytyczną rozkładu t-Studenta t_α odczytaną dla przyjętego poziomu istotności α i liczby stopni swobody równej n_1+n_2-2 (w przypadku statystyki policzonej na podstawie wzoru 5.8b). Jeżeli wartość bezwzględna statystyki testu jest większa od wartości krytycznej, odrzuca się hipotezę zerową H_0 , na rzecz hipotezy alternatywnej H_1 zakładającej istnienie różnic średnich wartości analizowanej zmiennej losowej dla obu populacji ($m_1 \neq m_2$).

Wartość p

Obecnie, z uwagi na możliwości obliczeniowe programów statystycznych i brak konieczności odczytu wartości krytycznych z tablic rozkładów, ocenę prawdziwości hipotezy zerowej H_0 prowadzi się na podstawie **wartości p** (*ang. p-value*). Im mniejsza wartość p tym większa statystyczna niezgodność danych z postawioną hipotezą zerową (Wasserstein i Lazar, 2016). Ta niezgodność interpretowana jest jako dowód przeciwko prawdziwości hipotezy zerowej. Jeśli wartość p jest mniejsza od przyjętego poziomu istotności α , to wynik uważa się za zaskakujący w świetle hipotezy zerowej H_0 , którą odrzuca się wówczas na rzecz hipotezy alternatywnej H_1 .

Obliczenia wykonano przy użyciu programu IBM SPSS Statistics 20, dla każdego miesiąca okresu analizy z osobna. Powodem prowadzenia badań osobno dla poszczególnych miesięcy był fakt, że wyznaczona dla całego roku średnia wartość wskaźnika $\acute{S}DRR_{wska\acute{z}}$ jest zawsze równa 1.0 (wartość $\bar{x}_i = 1.0$ oraz $\bar{x} = 1.0$ we wz. 5.3.), a co za tym idzie suma kwadratów MS_{efekt} wynosi 0. Niemożliwa byłaby tym samym ocena wpływu lokalizacji stacji pomiaru ruchu na zmienność ruchu rowerowego w ciągu roku.

5.1.3 Wyniki badań

W pierwszej kolejności sprawdzono założenia analizy wariancji ANOVA dotyczące normalności rozkładu i homogeniczności wariancji. Wyniki testu Shapiro-Wilka dla roku 2018 i 2019 oraz testu Levene'a zaprezentowano w załączniku 1 odpowiednio w tabelach Z1-1, Z1-2 oraz Z1-3. W większości przypadków (tj. ok. 58%) rozkład dobowego wskaźnika zmienności natężenia ruchu $\acute{S}DRR_{wska\acute{z}}$ był rozkładem normalnym. Wariancje dobowego wskaźnika zmienności natężenia ruchu $\acute{S}DRR_{wska\acute{z}}$ okazały się jednak jednorodne dla zaledwie 6 z 24 analizowanych miesięcy. Niemniej jednak w 15 miesiącach badane grupy były równoliczne, zaś w 4 pozostałych różnica liczebności grup nie przekraczała 1. Z tego względu badania wykonano mimo wszystko z wykorzystaniem analizy wariancji ANOVA.

Wyniki analizy ANOVA przedstawione w tabelach 5-2 oraz 5-3 odpowiednio dla roku 2018 i 2019 wskazują, że na poziomie ufności 0.95 lokalizacja stacji pomiaru ruchu nie miała statystycznie istotnego wpływu na wskaźnik sezonowy zmienności natężenia ruchu rowerowego dla 10 z 24 analizowanych miesięcy (6 miesięcy w 2018r. i 4 miesiące w 2019r.). Oznacza to, że w tych miesiącach wskaźniki dla poszczególnych stacji pomiaru ruchu nie różniły się statystycznie istotnie od siebie, od wskaźników wyznaczonych jako średnie dla wszystkich stacji pomiaru ruchu oraz od wskaźników zmienności sezonowej liczby wypożyczeń rowerów miejskich.

Dla pozostałych 14 miesięcy, w celu wyznaczenia jednorodnych pod względem wartości wskaźnika sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego grup, wykonano test post hoc HSD Tukey'a. Szczegółowe wyniki testu zamieszczono w tabelach Z2-1, Z2-2a i Z2-2b w załączniku 2. W tabelach 5-4 i 5-5 zaprezentowano natomiast uzyskane na podstawie wyników testu Tukey'a jednorodne pod względem wartości wskaźników sezonowej zmienności ruchu grupy lokalizacji odpowiednio dla roku 2018 i 2019.

Tab. 5-2 Wyniki analizy wariancji ANOVA wpływu lokalizacji na wskaźnik sezonowej zmienności ruchu rowerowego w poszczególnych miesiącach 2018r.
Źródło: opracowanie własne

Zmienna niezależna	Styczeń			Luty			Marzec			Kwiecień										
	MS	df	F	wartość p	MS	df	SS	F	wartość p	MS	df	SS	F	wartość p						
Stała	21.298	1	21.298	1734.333	0.000	10.911	1	10.911	1532.931	0.000	44.727	1	44.727	670.039	0.000	772.855	1	772.855	1753.765	0.000
Lokalizacja	1.588	10	0.159	12.930	0.000	0.980	10	0.098	13.763	0.000	0.973	10	0.097	1.458	0.154	9.401	10	0.940	2.133	0.022
Błąd	4.052	330	0.012	0.000	0.000	2.114	297	0.007	0.000	0.000	22.028	330	0.067	0.000	0.000	140.578	319	0.441	0.000	0.000
Całość	26.938	341			14.004	308				67.729	341				922.834	330				
Całość skorygowana	5.640	340			3.094	307				23.002	340				149.979	329				
Zmienna niezależna	Maj			Czerwiec			Lipiec			Sierpień										
MS	df	SS	F	wartość p	MS	df	SS	F	wartość p	MS	df	SS	F	wartość p						
Stała	1069.579	1	1069.579	2411.571	0.000	794.886	1	794.886	2039.683	0.000	730.168	1	730.168	2018.158	0.000	865.101	1	865.101	2592.928	0.000
Lokalizacja	15.679	10	1.568	3.535	0.000	5.674	10	0.567	1.456	0.155	3.185	10	0.319	0.880	0.552	3.071	10	0.307	0.921	0.514
Błąd	146.362	330	0.444	0.000	0.000	119.251	306	0.390	0.000	0.000	116.861	323	0.362	0.000	0.000	108.099	324	0.334	0.000	0.000
Całość	1231.620	341			943.345	317				852.367	334				980.238	335				
Całość skorygowana	162.041	340			124.925	316				120.047	333				111.170	334				
Zmienna niezależna	Wrzesień			Październik			Listopad			Grudzień										
MS	df	SS	F	wartość p	MS	df	SS	F	wartość p	MS	df	SS	F	wartość p						
Stała	635.255	1	635.255	1783.436	0.000	325.091	1	325.091	1808.199	0.000	112.452	1	112.452	1045.442	0.000	22.035	1	22.035	862.920	0.000
Lokalizacja	2.076	10	0.208	0.583	0.828	3.348	10	0.335	1.862	0.050	4.027	10	0.403	3.743	0.000	2.070	10	0.207	8.108	0.000
Błąd	113.271	318	0.356	0.000	0.000	59.330	330	0.180	0.000	0.000	34.313	319	0.108	0.000	0.000	8.427	330	0.026	0.000	0.000
Całość	751.125	329			387.769	341				150.791	330				32.533	341				
Całość skorygowana	115.347	328			62.678	340				38.339	329				10.497	340				

Tab. 5-3 Wyniki analizy wariancji ANOVA wpływu lokalizacji na wskaźnik sezonowej zmienności ruchu rowerowego w poszczególnych miesiącach 2019r.
Źródło: opracowanie własne

Zmienna niezależna	Styczeń				Luty				Marzec				Kwiecień			
	MS	df	SS	wartość p	MS	df	SS	wartość p	MS	df	SS	wartość p	MS	df	SS	wartość p
Stała	12.138	1	12.138	0.000	51.854	1	51.854	0.000	206.143	1	206.143	0.000	438.490	1	438.490	0.000
Lokalizacja	1.046	14	0.075	0.000	1.254	14	0.090	0.000	8.415	14	0.601	0.000	1.451	14	0.104	0.375
Błąd	2.411	450	0.005	0.000	9.606	404	0.024	0.000	58.486	446	0.131	0.000	120.327	435	0.277	0.000
Całość	15.595	465			62.792	419			273.173	461			560.268	450		
Całość skorygowana	3.457	464			10.860	418			66.901	460			121.777	449		
Zmienna niezależna	Maj				Czerwiec				Lipiec				Sierpień			
Stała	512.539	1	512.539	0.000	1649.739	1	1649.739	0.000	1367.224	1	1367.224	0.000	1232.943	1	1232.943	0.000
Lokalizacja	2.698	14	0.193	0.636	13.487	14	0.963	0.000	7.470	14	0.534	0.000	8.276	14	0.591	2.484
Błąd	136.277	450	0.303	0.000	140.069	435	0.322	0.000	140.357	450	0.312	0.000	107.113	450	0.238	0.000
Całość	651.513	465			1803.294	450			1515.051	465			1348.332	465		
Całość skorygowana	138.974	464			153.555	449			147.827	464			115.389	464		
Zmienna niezależna	Wrzesień				Październik				Listopad				Grudzień			
Stała	766.985	1	766.985	0.000	606.392	1	606.392	0.000	183.330	1	183.330	0.000	77.413	1	77.413	0.000
Lokalizacja	0.937	14	0.067	0.263	6.261	14	0.447	0.001	5.256	14	0.375	0.000	5.254	14	0.375	6.740
Błąd	110.519	435	0.254	0.000	73.362	450	0.163	0.000	34.572	435	0.079	0.000	25.055	450	0.056	0.000
Całość	878.441	450			686.016	465			223.158	450			107.723	465		
Całość skorygowana	111.456	449			79.623	464			39.828	449			30.309	464		

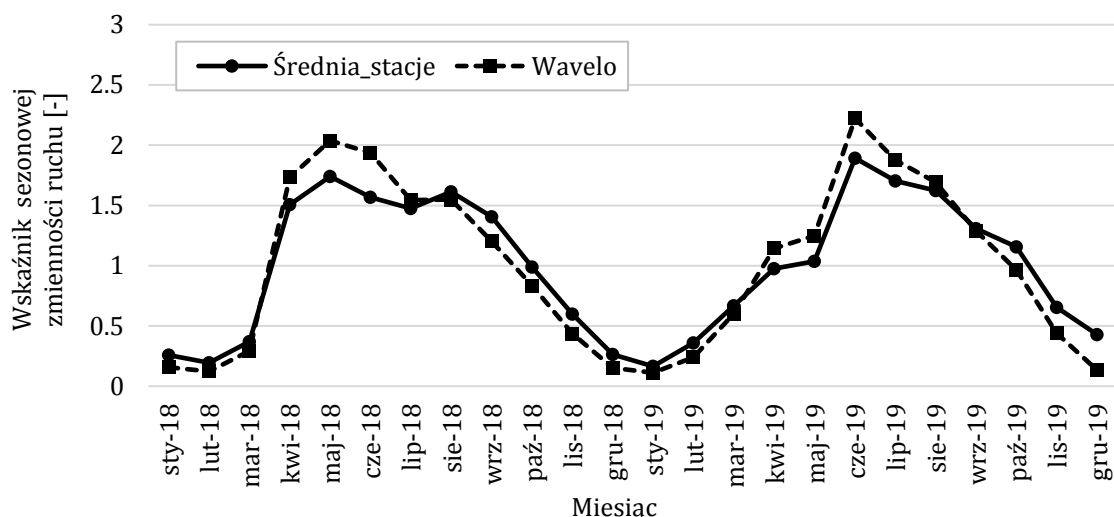
Tab. 5-4 Jednorodne pod względem wskaźników sezonowej zmienności ruchu rowerowego grupy lokalizacji dla poszczególnych miesięcy 2018r.
Źródło: opracowanie własne

Styczeń						Luty					Kwiecień									
Lokalizacja	Liczebność	Grupy					Lokalizacja	Liczebność	Grupy					Lokalizacja	Liczebność	Grupy				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
Wawelo	31	0.166					ul. Tyniecka	28	0.117					ul. Smoleńsk	3	1.312				
ul. Tyniecka	31	0.169	0.169				Bulwary Wiślane	28	0.128					ul. Wadowicka	3	1.324				
Bulwary Wiślane	31	0.174	0.174				Wawelo	28	0.126	0.126				Dworzec Główny	3	1.361				
ul. Wielicka	31	0.297	0.297	0.297			ul. Wielicka	28	0.149	0.149	0.149			ul. Wielicka	3	1.425				
ul. Wadowicka	31	0.246	0.246	0.246	0.246		ul. Monte Casino	28	0.185	0.185	0.185	0.185		ul. Mogińska	3	1.493				
ul. Kotlarska	31	0.247	0.247	0.247	0.247		ul. Kotlarska	28	0.188	0.188	0.188	0.188		Średnia_stacje	3	1.578				
Średnia_stacje	31	0.259	0.259	0.259	0.259		Średnia_stacje	28	0.194	0.194	0.194	0.194		ul. Kotlarska	3	1.522				
ul. Monte Casino	31			0.269	0.269		ul. Wadowicka	28			0.264	0.264		ul. Monte Casino	3	1.566				
ul. Mogińska	31			0.294	0.294		ul. Mogińska	28				0.225		Wawelo	3	1.764				
Dworzec Główny	31			0.324	0.324	0.324	Dworzec Główny	28				0.253	0.253	Bulwary Wiślane	3	1.778				
ul. Smoleńsk	31			0.396	0.396		ul. Smoleńsk	28					0.367	ul. Tyniecka	3	1.785				
wartość p		0.778	0.599	0.963	0.164	0.287	wartość p		0.628	0.870	0.273	0.134	0.355	wartość p		0.178				
Maj						Listopad					Grudzień									
Lokalizacja	Liczebność	Grupy					Lokalizacja	Liczebność	Grupy					Lokalizacja	Liczebność	Grupy				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
ul. Wadowicka	31	1.450					ul. Tyniecka	3	0.398					ul. Tyniecka	31.000	0.139				
ul. Smoleńsk	31	1.539	1.539				Wawelo	3	0.444	0.444				Wawelo	31.000	0.155				
Dworzec Główny	31	1.612	1.612	1.612			Bulwary Wiślane	3	0.467	0.467				Bulwary Wiślane	31.000	0.179				
ul. Wielicka	31	1.658	1.658	1.658			ul. Monte Casino	3	0.535	0.535	0.535			ul. Monte Casino	31.000	0.230	0.230			
ul. Mogińska	31	1.676	1.676	1.676			ul. Mogińska	3	0.599	0.599	0.599			ul. Kotlarska	31.000	0.263	0.263			
Średnia_stacje	31	1.748	1.748	1.748			ul. Kotlarska	3	0.594	0.594	0.594			Średnia_stacje	31.000	0.264	0.264			
ul. Monte Casino	31	1.769	1.769	1.769			Średnia_stacje	3	0.598	0.598	0.598			ul. Wadowicka	31.000	0.264	0.264			
ul. Kotlarska	31	1.779	1.779	1.779			ul. Wielicka	3	0.635	0.635	0.635			ul. Mogińska	31.000	0.273	0.273			
Bulwary Wiślane	31		2.514	2.514			Dworzec Główny	3		0.674	0.674			ul. Wielicka	31.000		0.342	0.342		
Wawelo	31		2.737	2.737			ul. Wadowicka	3		0.712	0.712			Dworzec Główny	31.000		0.383	0.383		
ul. Tyniecka	31			2.132			ul. Smoleńsk	3			0.775			ul. Smoleńsk	31.000			0.428	0.428	
wartość p		0.684	0.636	0.800			wartość p		0.160	0.620	0.153			wartość p		0.528	0.689	0.866		

Wskaźniki sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego wyznaczone jako średnie dla wszystkich stacji pomiaru ruchu nie różniły się statystycznie istotnie od wskaźników dla poszczególnych stacji w 8 z 14 analizowanych miesiącach (Tab. 5-4, Tab. 5-5). Statystycznie istotne różnice obserwuje się przede wszystkim w przypadku stacji zlokalizowanych na Bulwarach Wiślanych i ul. Tynieckiej, co może wynikać z turystycznego charakteru ruchu rowerowego odbywającego się w tych miejscach i jego bardziej dynamicznego wzrostu wiosną i latem względem miesięcy zimowych. Statystycznie istotne różnice zaobserwowano również w przypadku stacji na ul. Smoleńsk, gdzie dobowe natężenie ruchu rowerowego w ciągu roku jest najbardziej wyrównane, zaś ŚDRR najniższy w porównaniu do pozostałych lokalizacji. Na podstawie wyników testu Tukey'a można stwierdzić, że na poziomie ufności 0.95 wskaźniki sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego wyznaczone jako średnie dla wszystkich stacji pomiaru ruchu nie różnią się statystycznie istotnie od wskaźników sezonowych zmiany liczby wypożyczeń rowerów Wavelo dla 12 z 14 analizowanych miesięcy. Statystycznie istotne różnice obserwowane były tylko w styczniu 2018r. i grudniu 2019r. Zmienność liczby wypożyczeń rowerów Wavelo jest najbardziej zbliżona do zmienności natężenia ruchu rowerowego na Bulwarach Wiślanych i ul. Tynieckiej, co może świadczyć o wykorzystywaniu rowerów Wavelo głównie latem, bądź być wynikiem ograniczonej dostępności rowerów miejskich w miesiącach zimowych.

Podsumowując, na poziomie ufności 0.95 wartości wskaźników sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego wyznaczone jako średnie dla wszystkich stacji pomiarowych nie różniły się statystycznie istotnie od wskaźników wyznaczonych dla poszczególnych stacji w 18 z 24 analizowanych miesiącach. Na tej podstawie można stwierdzić, że lokalizacja stacji pomiaru ruchu nie ma statystycznie istotnego wpływu na sezonową zmienność natężenia ruchu rowerowego. Ponadto, na poziomie ufności 0.95 wskaźniki sezonowej zmienności liczby wypożyczeń rowerów Wavelo nie różniły się statystycznie istotnie od wskaźników sezonowych wyznaczonych jako średnie dla wszystkich stacji pomiaru ruchu dla 22 z 24 miesięcy. Oznacza to, że zmienność sezonowa ruchu rowerowego jest zbliżona do zmienności sezonowej liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego.

Na rysunku 5.1 przedstawiono zmianę wskaźników sezonowych natężenia ruchu rowerowego (wyznaczonych jako średnie dla wszystkich stacji pomiaru ruchu) oraz wskaźników sezonowych liczby wypożyczeń rowerów Wavelo w latach 2018-2019. Średniodobowe natężenie ruchu rowerowego w miejscach lokalizacji stacji pomiaru ruchu wzrosło średnio o 9.8% w 2019r. w stosunku do roku poprzedniego (Tab. 5-1). Najwyższy wzrost zarejestrowano dla stacji zlokalizowanej na ul. Wielickiej (wzrost o 36.5%), zaś najniższy na Bulwarach Wiślanych (wzrost o 2.5%). W przypadku stacji pomiaru ruchu zlokalizowanej na ul. Tynieckiej zaobserwowano zmniejszenie ŚDRR o 2.6%. Zmniejszeniu uległa również średniodobowa liczba wypożyczeń rowerów Wavelo, która w 2019r. była o 14.1% niższa niż w 2018r.



Rys. 5.1 Wskaźniki sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego (średnie dla wszystkich stacji pomiaru ruchu) i liczby wypożyczeń rowerów Wavelo w latach 2018-2019.

Źródło: opracowanie własne

Tab. 5-6 Wyniki testu istotności dla dwóch wartości średnich sezonowych wskaźników zmienności natężenia ruchu i liczby wypożyczeń rowerów miejskich.

Źródło: opracowanie własne

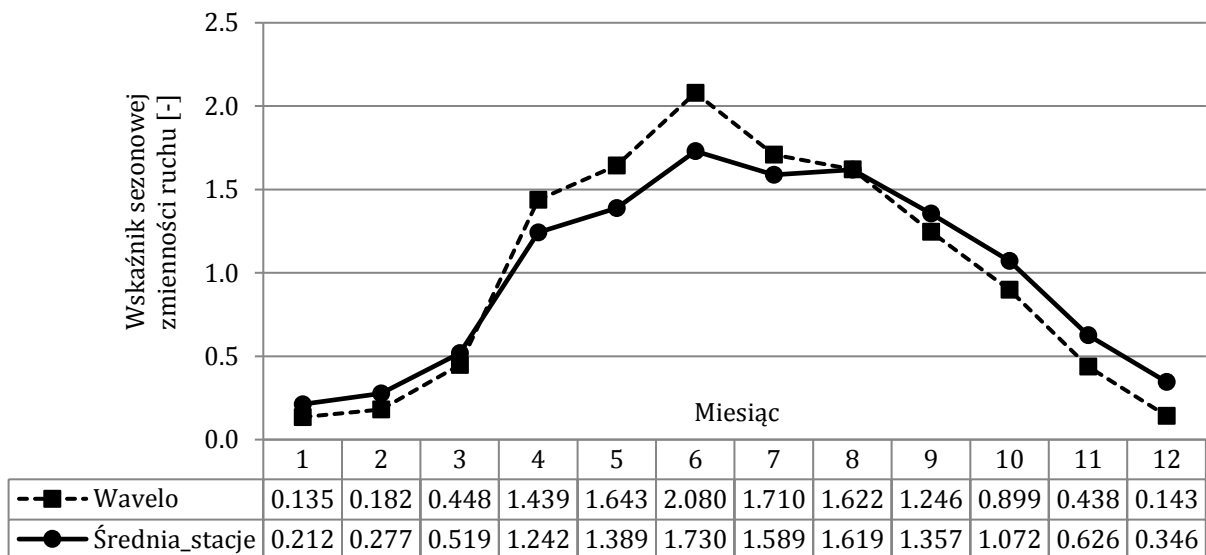
Dla danych o natężeniach ze stacji pomiaru ruchu rowerowego								
Miesiąc	2018r.			2019r.			Statystyka u	wartość p
	Wartość średnia	Odchylenie stand.	Liczebność*	Wartość średnia	Odchylenie stand.	Liczebność*		
1	0.259	0.131	279	0.165	0.089	403	3.574	<0.001
2	0.194	0.102	252	0.359	0.164	364	-5.633	<0.001
3	0.369	0.267	279	0.668	0.398	403	-6.785	<0.001
4	1.507	0.677	270	0.976	0.521	390	8.569	<0.001
5	1.741	0.702	279	1.036	0.551	403	11.314	<0.001
6	1.567	0.622	257	1.893	0.594	390	-5.194	<0.001
7	1.474	0.610	279	1.703	0.574	390	-3.794	<0.001
8	1.613	0.587	279	1.624	0.518	403	-0.177	0.860
9	1.406	0.607	270	1.307	0.511	390	1.670	0.095
10	0.989	0.438	279	1.155	0.425	403	-3.231	0.001
11	0.598	0.349	270	0.653	0.301	390	-1.206	0.226
12	0.264	0.179	279	0.428	0.254	390	-4.550	<0.001
Dla danych o liczbie wypożyczeń rowerów z systemu Wavelo								
Miesiąc	2018r.			2019r.			Statystyka t	wartość p
	Wartość średnia	Odchylenie stand.	Liczebność*	Wartość średnia	Odchylenie stand.	Liczebność*		
1	0.161	0.053	31	0.112	0.043	31	3.899	<0.001
2	0.126	0.046	28	0.248	0.102	27	-5.632	<0.001
3	0.299	0.164	31	0.691	0.206	27	-7.930	<0.001
4	1.763	0.597	30	1.144	0.519	30	4.211	<0.001
5	2.074	0.445	31	1.248	0.532	31	6.520	<0.001
6	1.969	0.568	30	2.223	0.492	30	-1.823	0.073
7	1.570	0.430	24	1.875	0.473	31	-2.416	0.019
8	1.577	0.414	25	1.693	0.323	31	-1.163	0.250
9	1.223	0.376	29	1.290	0.377	30	-0.666	0.508
10	0.849	0.289	31	0.964	0.268	31	-1.597	0.116
11	0.444	0.199	30	0.439	0.195	30	0.095	0.924
12	0.155	0.093	31	0.134	0.086	31	0.913	0.365

gdzie: (*) - liczebność prób nieodpowiadająca liczbie dni w danym miesiącu jest wynikiem braku danych o natężeniach ruchu i liczbie wypożyczeń rowerów Wavelo w pojedynczych dniach okresu analizy;

znak „+” przy wartościach statystyk testu oznacza, że wskaźnik sezonowy osiągał większą wartość w roku 2018, zaś znak „-”, że jego wartość była większa w 2019r.

Wyniki testu istotności dla dwóch wartości średnich, wykorzystanego do porównania zmiany wskaźników sezonowych w 2019r. względem roku poprzedniego, zaprezentowano w tabeli 5-6. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że na poziomie ufności 0.95 sezonowe wskaźniki zmienności ruchu nie zmieniły się statystycznie istotnie w 3-ech i 6-ciu miesiącach odpowiednio w przypadku stacji pomiaru ruchu i systemu Wavelo. Zaobserwowanie statystycznie istotnych różnic w pozostałych miesiącach może być efektem zmian w poziomie natężenia ruchu rowerowego wynikających z wpływu zmieniających się w kolejnych latach badań warunków pogodowych.

Na rysunku 5.2 przedstawiono wartości wskaźników sezonowych natężenia ruchu rowerowego oraz wskaźników sezonowych liczby wypożyczeń rowerów Wavelo średnie dla dwóch lat badań. Na jego podstawie można stwierdzić, że natężenie ruchu rowerowego w miejscach lokalizacji stacji pomiaru ruchu oraz liczba wypożyczeń rowerów Wavelo były najniższe w styczniu, kiedy stanowiły odpowiednio ok. 21.2% oraz 13.5% ŚDRR, i najwyższe w czerwcu, kiedy stanowiły odpowiednio ok. 173% oraz 208.0% ŚDRR. W październiku natężenia ruchu rowerowego i liczba wypożyczeń rowerów Wavelo były najbardziej zbliżone do wartości średniodobowych (wskaźniki zmienności ruchu wynosiły odpowiednio 1.072 oraz 0.899). Wahania liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego w ciągu roku są większe od wahań natężenia ruchu rowerowego, co demonstruje większa rozbieżność wskaźników sezonowej zmienności ruchu. Dla liczby wypożyczeń rowerów Wavelo wskaźnik przyjmuje wartości z zakresu 0.135-2.080, zaś dla natężenia ruchu w miejscach lokalizacji stacji pomiaru ruchu z zakresu 0.212-1.730. Oznacza to bardziej dynamiczny wzrost wykorzystania rowerów Wavelo w miesiącach letnich oraz bardziej dynamiczny spadek w miesiącach zimowych w porównaniu do zmian natężenia ruchu ogółu rowerzystów.



Rys. 5.2 Wskaźniki sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego (średnia ze stacji pomiarowych) i liczby wypożyczeń rowerów Wavelo.

Źródło: opracowanie własne

5.2 Wpływ warunków pogodowych na natężenie ruchu rowerowego

Wskaźniki sezonowej zmienności natężenia ruchu w sposób pośredni opisują wpływ warunków atmosferycznych na natężenie ruchu rowerowego. Nie są jednak przydatne do oceny wpływu warunków pogodowych na natężenie ruchu rowerowego w krótszym okresie (np. w określonej dobie) i ilościowego opisu wpływu parametrów pogodowych na natężenie ruchu rowerowego. Jak wskazano w pkt. 2.6 użytkownicy rowerów systemu miejskiego mają większą swobodę zmiany środka transportu w ciągu dnia, dlatego mogą być mniej wrażliwi na oddziaływanie niekorzystnych warunków atmosferycznych. Celem badań opisanych w rozdziale 5.2 była weryfikacja tej tezy. Ponadto ocenie poddano możliwość szacowania dobowej zmienności natężenia ruchu rowerowego na podstawie zmienności liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego z uwzględnieniem wpływu warunków pogodowych.

5.2.1 Baza danych

W badaniach wykorzystano bazę danych o wskaźnikach dobowej zmienności natężenia ruchu rowerowego w miejscach lokalizacji 13 stacji pomiarowych i wskaźnikach dobowej zmienności liczby wypożyczeń rowerów systemu Wavelo całym mieście w latach 2018-2019, opisaną w pkt. 5.1.1.

Studia literatury wskazują, że 77% rowerzystów, którzy podejmują decyzję o podróży rowerem z uwzględnieniem warunków pogodowych, nie bierze pod uwagę warunków prognozowanych, lecz występujące w danej chwili ([Gallop, Tse i Zhao, 2012](#)). W badaniach wykorzystano zatem historyczne dane o dobowych warunkach pogodowych w latach 2018-2019, zaczerpnięte ze stacji meteorologicznej zlokalizowanej w Krakowie przy ul. Fiołkowej. Stacja ta została wybrana ze względu na relatywnie dużą liczbę dostępnych danych pogodowych (poza danymi o temperaturze powietrza i opadach, dostępne były również m.in. dane o prędkości wiatru i wilgotności powietrza) oraz lokalizację w stosunkowo niewielkiej odległości od centrum miasta (ok. 3.5km), gdzie gęstość stacji wypożyczeń i zwrotów rowerów Wavelo była największa. Odległość stacji meteorologicznej w linii prostej od analizowanych stacji pomiaru ruchu rowerowego mieściła się w zakresie ok. 2-7km. Warunki atmosferyczne mogą się co prawda zmieniać na tak dużym obszarze, mimo wszystko dane ze stacji przy ul. Fiołkowej uznano za reprezentatywne w prezentowanych badaniach. Dane pogodowe z wybranej stacji meteorologicznej dostępne były na stronie internetowej meteo.kdwd.webd.pl. Wykaz dostępnych zmiennych pogodowych oraz ich podstawowe statystyki opisowe z okresu 2018-2019 przedstawiono w tabeli 5-7.

Wyniki badań prowadzonych dotychczas wskazują na statystycznie istotny wpływ wakacji szkolnych i dni wolnych od pracy na natężenie ruchu rowerowego ([Ma i in., 2019](#); [Zhao i in., 2019](#)). Z tego względu bazę danych uzupełniono o informacje o występowaniu lub nie w danym dniu wakacji lub ferii szkolnych (SH) oraz dni wolnych od pracy (PH) (z uwzględnieniem sobót i niedziel).

Badania wykonano w odniesieniu do natężeń dobowych. Wynikało to z agregacji danych z systemu Wavelo dotyczących liczby wypożyczeń (dane dostępne w ujęciu dobowym) oraz z faktu, że natężenia dobowe (nie np. godzinowe) są częściej wykorzystywane w analizach bezpieczeństwa ruchu drogowego. Ponadto, jak wynika z przeglądu literatury, związki

między natężeniem ruchu rowerowego, a warunkami atmosferycznymi budowane dla danych dobowych charakteryzują się lepszym dopasowaniem do danych empirycznych niż zależności budowane dla danych godzinowych. Przykładem mogą być wyniki badań (Tin Tin i in., 2012), z których wynika, że zmienność warunków pogodowych w 23% i 56% opisuje zmienność odpowiednio godzinowego i dobowego natężenia ruchu rowerowego.

Tab. 5-7 Statystyki opisowe parametrów pogody w latach 2018-2019.

Źródło: opracowanie własne

Parametr pogody	Jednostka	Symbol	Średnia	Minimum	Maksimum	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Minimalna temperatura powietrza	°C	Tmin	7.3	-15.3	20.8	8.313	1.138
Maksymalna temperatura powietrza	°C	Tmax	15.9	-9.9	34.5	10.755	0.676
Średnia temperatura powietrza	°C	Tśr	11.5	-11.6	26.5	9.316	0.811
Minimalna wilgotność powietrza	%	Hmin	60.1	25.0	97.0	17.897	0.298
Maksymalna wilgotność powietrza	%	Hmax	91.0	61.0	100.0	6.145	0.068
Średnia wilgotność powietrza	%	Hśr	76.8	43.0	99.0	11.694	0.152
Minimalne ciśnienie atmosferyczne	hPa	Pmin	1014.3	992.1	1036.1	7.707	0.008
Maksymalne ciśnienie atmosferyczne	hPa	Pmax	1019.9	1002.0	1039.9	7.140	0.007
Minimalne ciśnienie atmosferyczne	hPa	Pśr	1017.1	996.4	1038.1	7.338	0.007
Maksymalna prędkość wiatru	km/h	Wmax	8.4	0.0	35.2	9.292	1.101
Średnia prędkość wiatru	km/h	Wśr	1.6	0.0	18.0	2.481	1.530
Dzienny opad deszczu	mm	Rd	1.6	0.0	41.2	4.440	2.705

5.2.2 Metoda badań

Analizę wpływu warunków pogodowych na zmianę natężenia ruchu rowerowego przeprowadzono z wykorzystaniem uogólnionych modeli liniowych, przy użyciu programu IBM SPSS Statistics 20.

Uogólnione modele liniowe

Analiza regresji jest metodą analizy danych statystycznych, której celem jest wyznaczenie funkcji regresji, czyli funkcji matematycznej opisującej zależność pomiędzy zmienną lub zmiennymi niezależnymi, a zmienną zależną z uwzględnieniem błędu losowego (wz. 5.9) (Stanisz, 2007):

$$g(E(Y)) = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (5.9)$$

gdzie: Y – wektor wartości zmiennej zależnej;

E(Y) – wektor wartości oczekiwanych zmiennej zależnej;

g – funkcja wiążąca;

X – macierz wartości zmiennych niezależnych;

β – wektor współczynników regresji;

ε – losowy wektor reszt.

Przedstawiona powyżej zależność nosi nazwę **uogólnionego modelu liniowego**. Stanowi on rozszerzenie modelu liniowego, który otrzymujemy po przyjęciu za funkcję wiążącą funkcji identycznościowej. W odróżnieniu od modelu liniowego, zmienna zależna w uogólnionym modelu liniowym może mieć rozkład inny niż normalny, być dychotomiczna lub przyjmować skończoną liczbę wartości, a powiązanie między zmienną zależną a zmiennymi niezależnymi nie musi przyjmować postaci liniowej. Na podstawie wyznaczonej funkcji możliwe jest prognozowanie wartości zmiennej zależnej na podstawie wartości jednej bądź kilku zmiennych niezależnych.

Gdy wartość zmiennej zależnej uzależniona jest od wartości co najmniej dwóch zmiennych niezależnych, zbiór zmiennych objaśniających nie powinien obejmować zmiennych o małej zmienności (tj. niskiej wartości współczynnika zmienności) oraz zmiennych silnie skorelowanych. W przypadku małej zmienności zmiennej objaśniającej jej związek ze zmienną zależną będzie oszacowany z mniejszą dokładnością, co zwiększa błędy prognozowania wartości zmiennej objaśnianej przy zwiększonym zakresie zmienności zmiennej niezależnej. Wprowadzenie do modelu regresyjnego zmiennych niezależnych silnie skorelowanych zwiększa z kolei błędy oszacowania współczynników regresyjnych oraz uniemożliwia rozdzielenie wpływu tych zmiennych na zmienną zależną, co w konsekwencji prowadzi do błędów prognozowania wartości zmiennej objaśnianej na skutek zmiany wartości tylko jednej zmiennej niezależnej (Dormann i in., 2013). Ocenę siły korelacji pomiędzy dwoma zmiennymi prowadzi się najczęściej na podstawie wartości współczynnika korelacji Pearsona (pozwalającego na ocenę siły jedynie zależności liniowej między zmiennymi) lub współczynnika korelacji Spearmana (pozwalającego na ocenę siły dowolnej monotonicznej zależności pomiędzy zmiennymi). Wartość **współczynnika korelacji Spearmana** r_s można wyznaczyć ze wzoru 5.10 (Dobosz, 2001).

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i}{n^3 - n} [-] \quad (5.10)$$

gdzie: r_s – współczynnik korelacji Spearmana [-];

n – liczebność próby [-];

d_i – różnica pomiędzy rangami dwóch zmiennych [-].

W literaturze podaje się, że dwie zmienne niezależne nie powinny być jednocześnie uwzględnione w modelu regresyjnym jeżeli wartość bezwzględna współczynnika korelacji dla tych zmiennych przekracza wartość 0.7 (Dormann i in., 2013). Jednocześnie zaleca się podejmowanie decyzji również na podstawie wartości, tzw. **czynnika wzrostu wariacji** (*ang. Variance Inflation Factor, VIF*) (Dobosz, 2001). Jego wartość określa, w jakim stopniu wariacja zmiennej niezależnej jest zawyżona przez związek między tą zmienną, a innymi zmiennymi niezależnymi. Wartość VIF oblicza się ze wzoru 5.11:

$$VIF = \frac{1}{1 - r_i^2} \quad [-] \quad (5.11)$$

gdzie: VIF - czynnik wzrostu wariancji [-];

r_i - współczynnik korelacji wielorakiej między i -tą zmienną niezależną, a pozostałymi zmiennymi objaśniającymi w modelu [-].

Jako graniczną wartość VIF, która odzwierciedla silną korelację zmiennych wskazuje się 2.5 (Johnston, Jones ; Manley, 2018), 5 oraz 10 (James i in., 2013), co odpowiada wartościom współczynnika korelacji r_i^2 równym odpowiednio 0.6, 0.8 i 0.9.

Statystyczną istotność wpływu i -tej zmiennej niezależnej na zmienną zależną można zweryfikować na podstawie **testu chi-kwadrat Walda** (Stanisz, 2007). Hipoteza zerowa testu, zakładająca, że zmienna niezależna nie jest istotnym predyktorem zmiennej zależnej ($H_0: \beta_j=0$), jest weryfikowana na podstawie wartości statystyki χ^2_{Walda} (wz. 5.12). Hipotezę zerową odrzuca się na poziomie ufności $1-\alpha$, gdy wartość statystyki χ^2_{Walda} jest większa od wartości krytycznej rozkładu chi-kwadrat z 1 stopniem swobody.

$$\chi^2_{Walda} = \left(\frac{\beta_j}{\sigma_{\beta_j}} \right)^2 \quad [-] \quad (5.12)$$

gdzie: χ^2_{Walda} – statystyka testu Walda [-];

β_j – estymator parametru j -tej zmiennej niezależnej [-];

σ_{β_j} – asymptotyczny błąd standardowy estymatora β_j [-].

Zmienną zależną w poszukiwanych modelach był dobowy wskaźnik zmienności natężenia ruchu (w przypadku stacji pomiaru ruchu) oraz dobowy wskaźnik zmienności liczby wypożyczeń (w przypadku systemu Wavelo) (wz. 5.1). Powodem zdefiniowania zmiennej zależnej w ten sposób (poprzez wskaźnik natężenia ruchu, a nie bezwzględną wartość natężenia) były różne poziomy natężeń ruchu w poszczególnych lokalizacjach. Średniodobowe Natężenie Ruchu Rowerowego (ŚDRR) w 2018 roku wahało się bowiem od 729R/24h (ul. Wielicka) do 1994R/24h (ul. Mogilska), a w 2019r. od 509R/24h (ul. Nowohucka) do 2050R/24h (ul. Mogilska) (Tab. 5-1). Ponadto w przypadku systemu Wavelo badania prowadzone były w odniesieniu do liczby wypożyczeń, nie natężenia ruchu, czyli zupełnie innej zmiennej niż w przypadku stacji pomiaru ruchu. Aby otrzymane zależności można było ze sobą porównywać, konieczna była standaryzacja zmiennej zależnej.

Zbiór zmiennych niezależnych obejmował zarówno zmienne ilościowe (parametry pogodowe), jak i zmienne jakościowe, tj. występowanie bądź nie dni wolnych od pracy i weekendów, wakacji i ferii szkolnych oraz (biorąc pod uwagę wyniki badań opisanych w pkt. 5.1) charakter ruchu w danej lokalizacji (tj. turystyczny dla stacji zlokalizowanej na Bulwarach Wiślanych i ul. Tynieckiej, ruch gospodarczy dla pozostałych lokalizacji). Ogólną postać poszukiwanej zależności przedstawia wzór 5.13. Aby prognozowana wartość $\dot{S}DRR_{wskaż}$ nie

przyjmowała ujemnych wartości, uzależniono ją od zmiennych niezależnych z pomocą funkcji logarytmicznej.

$$\hat{SDRR}_{wskaż} = \exp(\alpha + \beta * WP + \gamma * Bin) [-] \quad (5.13)$$

gdzie: $\hat{SDRR}_{wskaż}$ – dobowy wskaźnik zmienności natężenia ruchu rowerowego (w przypadku stacji pomiaru ruchu) lub dobowy wskaźnik zmienności liczby wypożyczeń (w przypadku systemu Wavelo) [-];

α – wyraz wolny [-];

β - stała modelu dla zmiennych pogodowych [-];

WP – zmienne ilościowe opisujące warunki pogodowe;

γ – stała modelu dla zmiennych binarnych [-];

Bin – zmienne binarne tj. występowanie dni wolnych od pracy (wraz z weekendami) PH , wakacji lub ferii szkolnych SH , charakter ruchu rowerowego C ; zmienne PH , SH i C przyjmują wartość 1, gdy w danym dniu mamy odpowiednio dzień wolny od pracy lub weekend, wakacje lub ferie szkolne oraz w przypadku gospodarczego charakteru ruchu w danej lokalizacji, w przeciwnym wypadku zmienne PH , SH i C przyjmują wartość 0.

Modele regresyjne budowano przy założeniu rozkładu normalnego zmiennej losowej (przyjęcie takie założenia potwierdzają wyniki testu Szapiro-Wilka, Tab. Z1-1 i Z1-2 zaprezentowane w załączniku 1) osobno dla stacji pomiaru ruchu i systemu Wavelo tylko dla danych z 2018r. (dane z 2019r. wykorzystano do weryfikacji otrzymanych zależności). Wartości współczynników regresji kalibrowane były metodą największej wiarygodności.

5.2.3 Wyniki badań

Na podstawie statystyk opisowych zmiennych pogodowych (Tab. 5-7) oraz wyników analizy korelacji Spearman'a pomiędzy tymi parametrami (Tab. 5-8) wytypowano zmienne opisujące warunki pogodowe, które uwzględniane były jako zmienne niezależne w opracowywanych zależnościach. Z uwagi na małą wartość współczynników zmienności dla maksymalnej i minimalnej wilgotności oraz minimalnej, średniej i maksymalnej wartości ciśnienia atmosferycznego (nieprzekraczającą 0.3) zmienne te nie były brane pod uwagę. Tak jak się spodziewano, średnia wartość temperatury powietrza skorelowana była z minimalną i maksymalną wartością tej zmiennej, a średnia prędkość wiatru z maksymalną wartością prędkości wiatru ($r_s \geq 0.948$). Ostatecznie zmiennymi pogodowymi, które testowano jako zmienne niezależne w modelach regresyjnych były: średnia temperatura powietrza T_{sr} [°C], maksymalna prędkość wiatru W_{max} [km/h] oraz dzienny opad deszczu R_d [mm/24h]. Dotychczasowe badania wykazały nieliniowy związek pomiędzy temperaturą powietrza, a natężeniem ruchu rowerowego (Phung i Rose, 2007; Lewin, 2011; Miranda-Moreno i Nosal, 2011; Saneinejad, Roorda i Kennedy, 2012; Gebhart i Noland, 2014). W związku z powyższym testowano tylko nieliniowe związki temperatury powietrza z natężeniem ruchu rowerowego, gdzie wartość $\hat{SDRR}_{wskaż}$ uzależniana była od średniej wartości temperatury powietrza i kwadratu jej wartości.

Tab. 5-8 Współczynniki korelacji Spearman'a dla parametrów pogody.
Źródło: opracowanie własne

Parametr pogody		Tmin	Tmax	Tśr	Wmax	Wśr	Rd
Tmin	rs	1.000	0.919	0.967	0.050	-0.007	0.090
	wartość p	-	<0.001	<0.001	0.337	0.899	0.086
	wielkość próby	365	365	365	365	365	365
Tmax	rs	0.919	1.000	0.984	0.109	0.041	-0.066
	wartość p	<0.001	-	<0.001	0.038	0.439	0.208
	wielkość próby	365	365	365	365	365	365
Tśr	rs	0.967	0.984	1.000	0.092	0.029	-0.022
	wartość p	<0.001	<0.001	-	0.080	0.582	0.673
	wielkość próby	365	365	365	365	365	365
Wmax	rs	0.050	0.109	0.092	1.000	0.948	-0.097
	wartość p	0.337	0.038	0.080	-	<0.001	0.064
	wielkość próby	365	365	365	365	365	365
Wśr	rs	-0.007	0.041	0.029	0.948	1.000	-0.120
	wartość p	0.899	0.439	0.582	<0.001	-	0.022
	wielkość próby	365	365	365	365	365	365
Rd	rs	0.090	-0.066	-0.022	-0.097	-0.120	1.000
	wartość p	0.086	0.208	0.673	0.064	0.022	-
	wielkość próby	365	365	365	365	365	365

Ostateczną postać opracowanych zależności prezentuje wzór 5.14:

$$\acute{S}DRR_{wska\acute{z}} = \exp(\alpha + \beta_1 * T_{\acute{s}r}^2 + \beta_2 * T_{\acute{s}r} + \beta_3 * R_d + \gamma_1 * PH + \gamma_2 * SH) [-] \quad (5.14)$$

gdzie: $\acute{S}DRR_{wska\acute{z}}$ – dobowy wskaźnik zmienności natężenia ruchu rowerowego (w przypadku stacji pomiaru ruchu) lub dobowy wskaźnik zmienności liczby wypożyczeń (w przypadku systemu Wavelo) [-];

$T_{\acute{s}r}$ - średnia temperatura powietrza [°C];

R_d – dzienny opad deszczu [mm/24h];

PH – dzień wolny od pracy (w tym weekend); PH = 1 dla dni wolnych od pracy i/lub weekendów, PH=0 – dla dni powszednich;

SH – wakacje i ferie szkolne; SH = 1 dla wakacji i ferii szkolnych, SH=0 dla dni roku szkolnego;

$\alpha, \beta_i, \gamma_i$ – parametry modelu regresyjnego (Tab. 5-5) [-].

Wartości parametrów modelu zestawiono w tabeli 5-9. Zmienne objaśniające uwzględnione w modelu okazały się statystycznie istotnymi determinantami wartości $\acute{S}DRR_{wska\acute{z}}$ na poziomie ufności 0.99. Należy zaznaczyć, że statystycznie istotną zmienną była również maksymalna prędkość wiatru W_{max} , jednak współczynnik regresji dla tej zmiennej osiągał wartości większe od zera. Oznacza to, że natężenie ruchu rowerowego rośnie wraz ze wzrostem prędkości wiatru. Wynik ten był wątpliwy, dlatego wykluczono tą zmienną z analizą. Na poziomie ufności 0.95 charakter ruchu rowerowego w miejscu lokalizacji stacji pomiarowej nie miał statystycznie istotnego wpływu na wartość zmiennej zależnej. Opracowane zależności

charakteryzują wysokie wartości współczynników determinacji R^2 równe 0.858 i 0.707 odpowiednio dla danych z systemu Wavelo i stacji pomiaru ruchu.

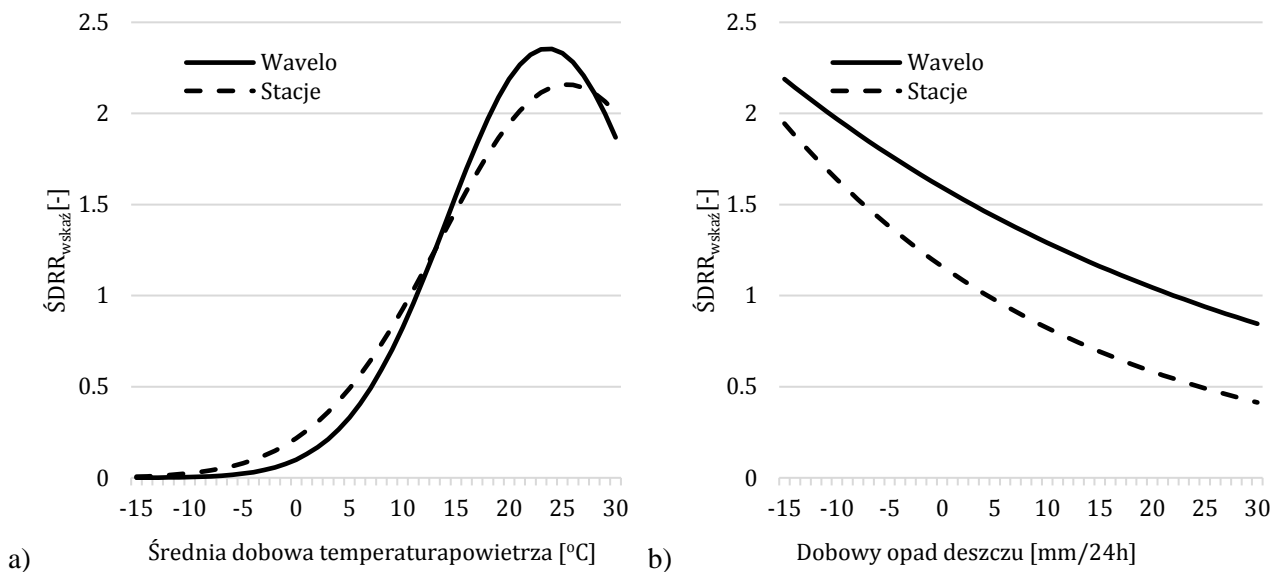
Tab. 5-9 Wartości parametrów modelu dla systemu Wavelo ($R^2=0.858$) i stacji pomiaru ruchu ($R^2=0.707$).

Źródło: opracowanie własne

Model dla Wavelo							
Parametr		Wartość	Błąd standardowy	χ^2_{Walda}	wartość P	Przedział ufności 0.95	
						dolna granica	górną granica
Wyraz wolny	α	-2.303	0.176	214.860	<0.001	-2.648	-1.958
Tśr2	β_1	-0.006	0.001	82.191	<0.001	-0.007	-0.005
Tśr	β_2	0.268	0.020	150.557	<0.001	0.228	0.307
Rd	β_3	-0.021	0.004	32.314	<0.001	-0.029	-0.014
PH	γ_1	-0.262	0.033	65.473	<0.001	-0.326	-0.198
SH	γ_2	-0.209	0.033	38.637	<0.001	-0.274	-0.143
Model dla stacji pomiaru ruchu							
Parametr		Wartość	Błąd standardowy	χ^2_{Walda}	wartość P	Przedział ufności 0.95	
						dolna granica	górną granica
Wyraz wolny	α	-1.527	0.054	990.458	<0.001	-1.634	-1.421
Tśr2	β_1	-0.004	0.000	264.920	<0.001	-0.004	-0.003
Tśr	β_2	0.181	0.007	626.614	<0.001	0.168	0.193
Rd	β_3	-0.034	0.002	219.558	<0.001	-0.039	-0.030
PH	γ_1	-0.273	0.015	322.347	<0.001	-0.302	-0.243
SH	γ_2	-0.096	0.015	39.817	<0.001	-0.126	-0.067

Na rysunku 5.3a przedstawiono wpływ zmiany średniej temperatury powietrza na wartość wskaźnika dobowej zmienności natężenia ruchu rowerowego i liczby wypożyczeń rowerów Wavelo wyznaczone na podstawie opracowanych zależności (wz. 5.14, Tab. 5-9). Wykres sporządzono przy założeniu braku opadów deszczu ($Rd=0$), dla dnia powszedniego ($PH=0$) w trakcie trwania roku szkolnego ($SH=0$). W przypadku stacji pomiarowych najwyższą wartość wskaźnika dobowej zmienności ruchu równą 2.16 obserwuje się dla średniej temperatury powietrza również 25°C . Z kolei największą liczbę wypożyczeń rowerów Wavelo można zaobserwować w dniach ze średnią temperaturą powietrza równą 24°C (wskaźnik dobowej zmienności liczby wypożyczeń wynosi 2.36). Wyniki są zbieżne z badaniami (Richardson, 2000), gdzie najwyższe natężenie ruchu obserwowano dla temperatury powietrza równej 25°C . Gdy średnia temperatura powietrza osiąga 13°C wartości $\hat{S}DRR_{\text{wskaż}}$ dla stacji pomiarowych i systemu Wavelo są sobie równe i wynoszą ok. 1.25. Dla temperatur poniżej 13°C wskaźniki dla stacji pomiarowych są wyższe niż dla systemu Wavelo. W niższych temperaturach wzrost wskaźnika dla systemu Wavelo jest wolniejszy niż w przypadku stacji pomiarowych. Dla wyższych temperatur zaobserwować można odwrotne zależności (tj. bardziej dynamiczny wzrost $\hat{S}DRR_{\text{wskaż}}$ wraz ze wzrostem temperatury oraz wyższe wartości dla systemu Wavelo w porównaniu do wartości dla stacji pomiaru ruchu). Może to sugerować, że użytkownicy systemu Wavelo są bardziej wrażliwi na oddziaływanie niskich temperatur oraz chętniej korzystają z systemu w cieplejszych miesiącach. Rezultat ten jest zbieżny z wynikami przedstawionymi w pkt. 5.1, gdzie zaobserwowano większe wahania wskaźników

sezonowych liczby wypożyczeń rowerów Wavelo w porównaniu do danych ze stacji pomiaru ruchu (Rys. 5.2). Wskaźnik $\dot{S}DRR_{wskaz}$ jest równy 1 przy temperaturze 11.3°C oraz 10.7°C odpowiednio dla systemu Wavelo i stacji pomiaru ruchu.

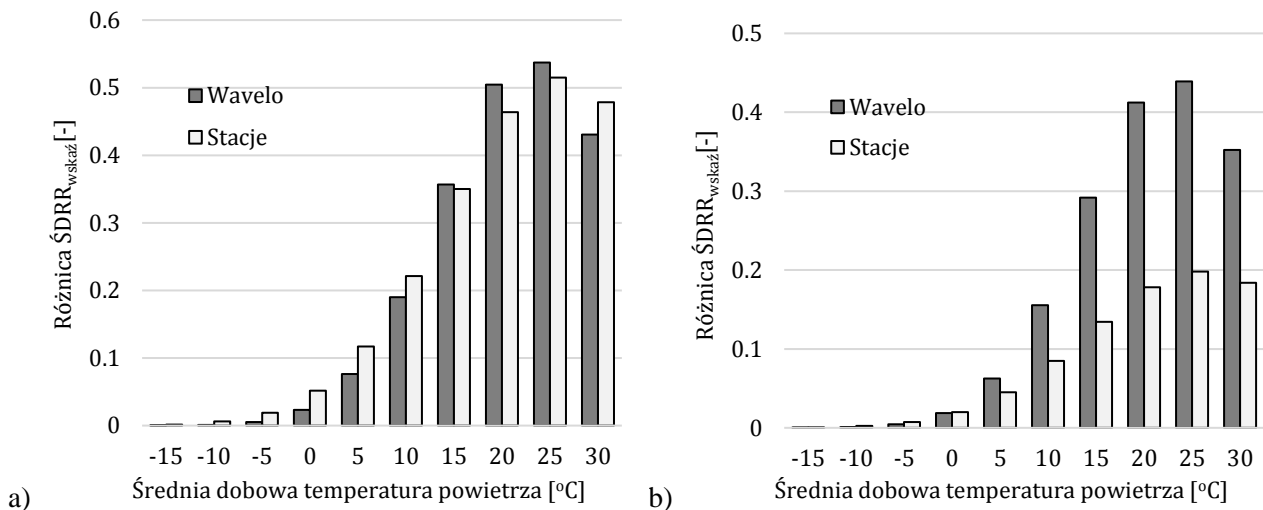


Rys. 5.3 Zmiana wskaźników dobowej zmienności natężenia ruchu w miejscach lokalizacji stacji pomiaru ruchu i liczby wypożyczeń rowerów systemu Wavelo na skutek zmiany a) średniej temperatury powietrza b) ilości opadów deszczu.

Źródło: opracowanie własne

Rysunek 5.3b prezentuje wpływ zmiany ilości dobowych opadów deszczu na wartość wskaźnika dobowej zmienności ruchu rowerowego przygotowany na podstawie zbudowanych zależności (wz. 5.15, Tab. 5-9). Wykres opracowano przy założeniu średniej temperatury powietrza równej $T_{sr}=20^{\circ}C$, dla dnia powszedniego ($PH=0$) w trakcie trwania roku szkolnego ($SH=0$). Na jego podstawie można stwierdzić, że użytkownicy systemu Wavelo są mniej wrażliwi na opady deszczu niż ogół rowerzystów. Wartości $\dot{S}DRR_{wskaz}$ dla systemu Wavelo osiągają bowiem wyższe wartości niż dla stacji pomiaru ruchu.

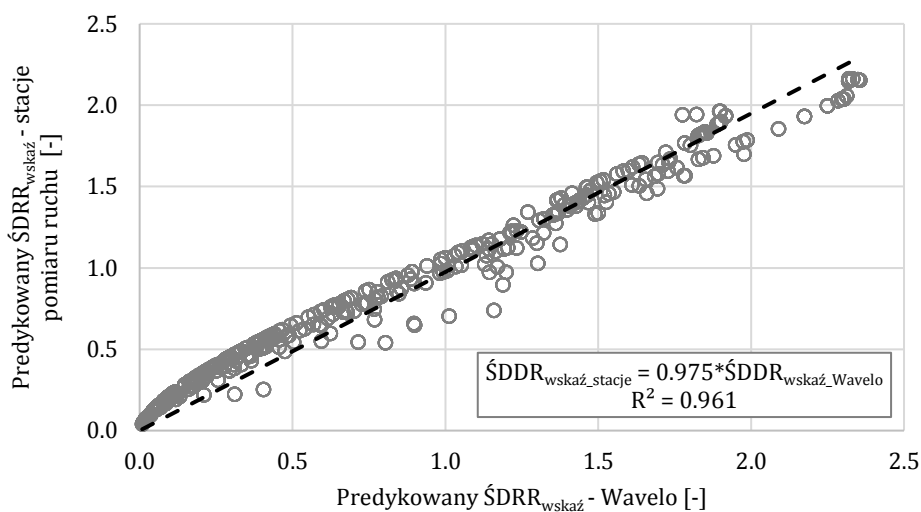
Wpływ dni ustawowo wolnych od pracy (w tym weekendów) na zmienności natężenia ruchu w miejscach lokalizacji stacji pomiarowych i liczby wypożyczeń rowerów Wavelo przedstawiono na rysunku 5.4a. Oś pionowa wykresu opisuje różnicę pomiędzy wskaźnikiem dobowej zmienności ruchu rowerowego w dni powszednie ($PH=0$) i dni wolne od pracy ($PH=1$) dla różnych średnich temperatur powietrza. Wykres opracowano przy założeniu braku opadów deszczu ($Rd=0$) i trwania roku szkolnego ($SH=0$). W dni wolne od pracy i weekendy natężenia ruchu rowerowego i liczba wypożyczeń rowerów Wavelo są niższe niż w dni powszednie, jednak wpływ ten zanika przy niskich temperaturach powietrza. Podobne wyniki uzyskano dla wakacji i ferii szkolnych (Rys. 5.4b). W trakcie trwania roku szkolnego natężenie ruchu rowerowego i liczba wypożyczeń rowerów Wavelo są wyższe niż w trakcie trwania wakacji i ferii szkolnych. Przy niższych średnich temperaturach powietrza, gdy natężenie ruchu rowerowego i liczba wypożyczeń rowerów Wavelo utrzymują się na niskim poziomie, wpływ wakacji i ferii szkolnych zanika. Otrzymane wyniki mogą sugerować, że system rowerów miejskich Wavelo wykorzystywany był głównie do realizowania dojazdów do pracy czy szkoły, rzadziej w przypadku podróży rekreacyjnych.



Rys. 5.4 Zmiana wskaźników dobowej zmienności natężenia ruchu w miejscach lokalizacji stacji pomiaru ruchu i liczby wypożyczeń rowerów systemu Wavelo w a) dni ustawowo wolne od pracy (w tym weekendy); b) wakacje i ferie szkolnych, dla różnych średnich temperatur powietrza.

Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 5.5 przedstawiono związek pomiędzy predykwoną wartością $\dot{S}DRR_{wskaz}$, wyznaczoną na podstawie modelu opracowanego dla systemu Wavelo (oś X) i modelu opracowanego dla stacji pomiarowych (oś Y). Wskaźniki $\dot{S}DRR_{wskaz}$ wyznaczone na podstawie modelu dla stacji pomiaru ruchu stanowią ok. 97.5% wartości wskaźników $\dot{S}DRR_{wskaz}$ obliczonych z modelu dla systemu Wavelo. Zależność tą charakteryzuje wysoka wartość współczynnika determinacji $R^2=0.961$, co oznacza, że zmienność dobowa natężenia ruchu rowerowego z uwzględnieniem warunków pogodowych może być oszacowana na podstawie dobowej zmienności liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego. Wpływ warunków pogodowych i dni wolnych od pracy oraz ferii i wakacji szkolnych na natężenia ruchu rowerowego w miejscach lokalizacji stacji pomiaru ruchu jest zatem zbliżony do ich wpływu na liczbę wypożyczeń rowerów Wavelo.

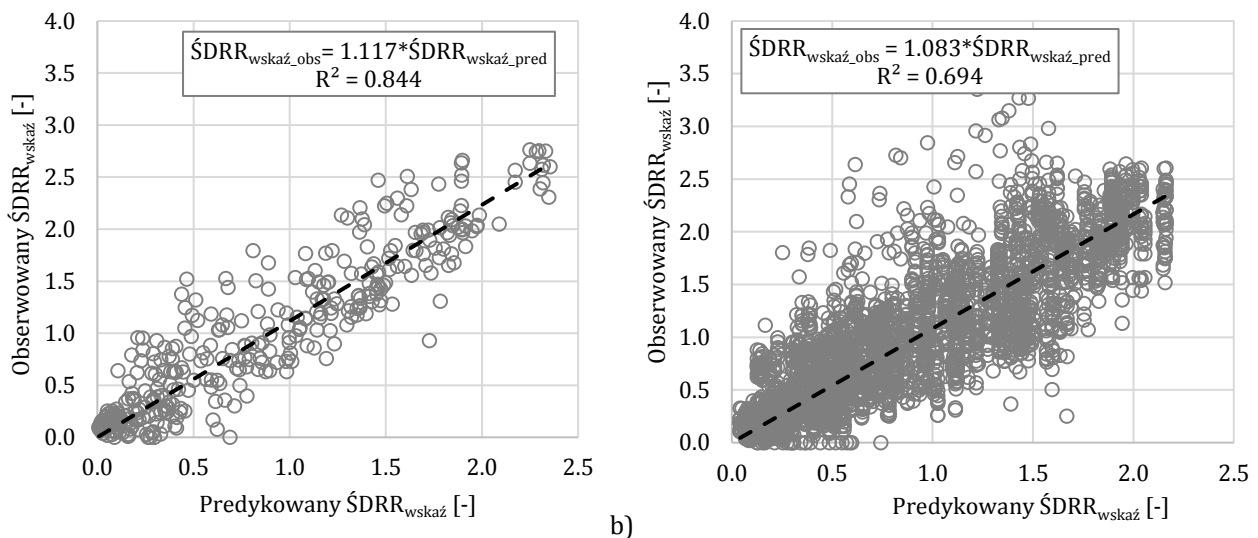


Rys. 5.5 Zależność pomiędzy predykwonami wartościami $\dot{S}DRR_{wskaz}$ wyznaczonymi na podstawie modelu dla systemu Wavelo i modelu dla stacji pomiaru ruchu.

Źródło: opracowanie własne

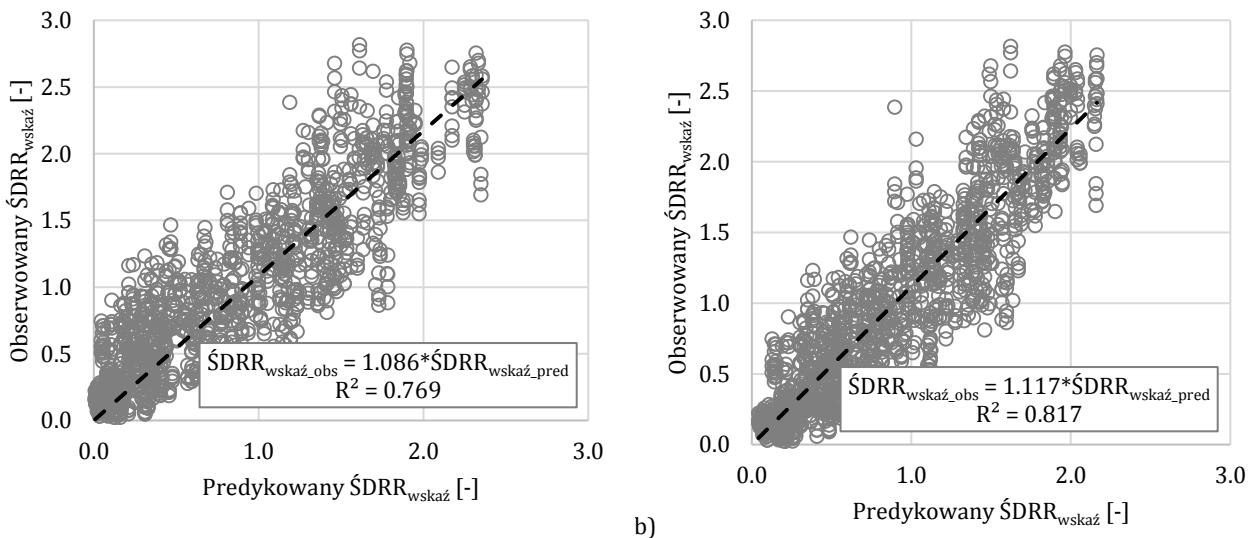
5.2.4 Weryfikacja opracowanych zależności

W celu weryfikacji opracowanych zależności wykorzystano dane z 2019r. Na rysunku 5.6a i 5.6b przedstawiono związek pomiędzy predygowaną na podstawie opracowanych zależności wartością $\dot{S}DRR_{wskaz}$ (oś X), a obserwowaną wartością tego wskaźnika (oś Y) w 2019r. odpowiednio dla systemu Wavelo i stacji pomiaru ruchu. W obu przypadkach predykowane wartości wskaźnika $\dot{S}DRR_{wskaz}$ są niższe od wartości obserwowanych o 11.7% oraz 8.3% odpowiednio dla danych z systemu Wavelo i stacji pomiaru ruchu. Model dla systemu Wavelo jest lepiej dopasowany do danych empirycznych niż model dla stacji pomiaru ruchu, współczynnik determinacji R^2 dla obu modeli równy jest odpowiednio 0.844 oraz 0.694.



Rys. 5.6 Zależność pomiędzy predygowanym i obserwowanym wskaźnikiem dobowej zmienności a) liczby wypożyczeń rowerów Wavelo b) natężenia ruchu w miejscach lokalizacji stacji pomiaru ruchu.

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5.7 Zależność pomiędzy obserwowanym wskaźnikiem dobowej zmienności natężenia ruchu w miejscach kontrolnych i wskaźnikiem predygowanymi na podstawie a) modelu dla systemu Wavelo b) modelu dla stacji pomiaru ruchu.

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie utworzonych zależności oszacowano również wskaźniki dobowej zmienności natężenia ruchu w miejscach kontrolnych tj. lokalizacji 4 stacji pomiaru ruchu, które wprowadzone były pod koniec 2018r. Zależności pomiędzy obserwowanymi wartościami $\dot{S}DRR_{wskaż}$ a wartościami predykowanymi na podstawie obu opracowanych modeli, przedstawione na rysunku 5.7, charakteryzują współczynniki determinacji R^2 równe 0.769 (w przypadku modelu dla systemu Wavelo) i 0.817 (w przypadku modelu dla stacji pomiaru ruchu).

Przedstawione wyniki wskazują, że opracowane zależności mogą być wykorzystywane do szacowania wskaźnika zmienności natężenia ruchu rowerowego w dowolnym okresie i dla dowolnej lokalizacji.

5.3 Udział rowerów systemu miejskiego w całym potoku rowerzystów

Wyniki badań opisanych w pkt. 5.1 oraz 5.2 wskazują, że sezonowa i dobowa (z uwzględnieniem wpływu warunków pogodowych) zmienność natężenia ruchu rowerowego powiązane są ze zmiennością liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego. Nie dają jednak odpowiedzi na pytanie, czy natężenie ruchu ogółu rowerzystów w danej lokalizacji może być estymowane na podstawie natężenia ruchu rowerów systemu miejskiego. Wyznaczenie takiej zależności stanowiłoby wkład w rozwój narzędzi szacowania parametrów ruchu rowerowego przy ograniczonych nakładach finansowych i czasie analizy. Badania nad udziałem rowerów systemu miejskiego w całym potoku rowerzystów stanowią przedmiot badań opisanych w niniejszym rozdziale.

5.3.1 Przygotowanie bazy danych

Na podstawie danych ze stacji ciągłego automatycznego pomiaru ruchu (pkt. 4.2) oraz danych GPS z systemu rowerów miejskich (pkt. 4.3) wyznaczono dobowe natężenie ruchu ogółu rowerzystów oraz użytkowników systemu Wavelo w miejscach lokalizacji 5 stacji ciągłego pomiaru ruchu (tj. Bulwary Wiślany, ul. Kotlarska, ul. Mogilska, ul. Wadowicka i ul. Wielicka) dla okresu od 1 do 30 czerwca 2017r. Długość przyjętego okresu analizy wynikała z dostępnych szczegółowych danych GPS z systemu Wavelo (dane dostępne wyłącznie dla czerwca 2017r.).

Natężenie ruchu rowerów Wavelo w analizowanych lokalizacjach wyznaczono przy użyciu specjalnie utworzonej do tego celu aplikacji komputerowej. W miejscach lokalizacji każdej stacji pomiaru ruchu wyznaczono przekrój pomiarowy położony prostopadłe do infrastruktury ruchu rowerowego, zdefiniowany za pomocą współrzędnych geograficznych punktów na dwóch końcach przekroju. Współrzędne punktów dobierane były w taki sposób, aby długość przekroju pomiarowego wynosiła ok. 4m. Szerokość ta jest większa od szerokości infrastruktury rowerowej występujących w analizowanych lokalizacjach, jednak uwzględniono w ten sposób dokładność rejestracji współrzędnych przez urządzenia GPS zamontowane w rowerach Wavelo oraz możliwość występowania zakłóceń sygnału GPS. Dla każdej podróży rowerem miejskich program sprawdzał, czy prosta łącząca parę następujących po sobie punktów GPS podróży przecina przekrój pomiarowy. Wystąpienie takiego przecięcia oznaczało, że rowerzysta przejechał przez analizowany przekrój. W wyniku działania aplikacji

otrzymywano plik csv z zestawieniem danych o numerze podróży, dacie i godzinie oraz długościach i szerokościach geograficznych pary punktów GPS „przed” i „za” analizowanym przekrojem pomiarowym.

Udział rowerów Wavelo w całym potoku rowerzystów może być inny w poszczególnych lokalizacjach, dniach tygodnia, w okresie wakacji (w stosunku do okresu trwania roku szkolnego) oraz w dniach ustawowo wolnych od pracy (w stosunku do pozostałych dni). Wakacje szkolne rozpoczęły się 24 czerwca. W okresie analizy wystąpił tylko jeden dzień ustawowo wolny od pracy tj. czwartek 15-ego czerwca (święto Bożego Ciała), dlatego zdecydowano się na wykluczenie tego dnia z analiz. Wpływ dniach ustawowo wolnych od pracy nie mógł być tym samym przeanalizowany.

Zebrane dane o natężeniu ruchu rowerowego Q i natężeniu rowerów systemu miejskiego Q_{Wavelo} dla każdej z 5 analizowanych lokalizacji w poszczególnych dniach okresu analizy zestawiono w tabeli 5-10. Z kolei w tabeli 5-11 zestawiono wartości średniego udziału rowerów Wavelo w całym potoku rowerzystów w poszczególnych lokalizacjach i dniach tygodnia, oraz w wakacje i czasie trwania roku szkolnego. Z przedstawionych danych wynika, że badany udział osiąga średnią wartość na poziomie około 8.5%.

Tab. 5-10 Natężeni ruchu rowerów systemu miejskiego oraz ogółu rowerzystów w miejscach lokalizacji stacji pomiaru ruchu [R/24h].

Źródło: opracowanie własne

Data	Dzień tygodnia	Wakacje	Bulwary Wiślane		ul. Mogilska		ul. Kotlarska		ul. Wadowicka		ul. Wielicka	
			Q	Q_{Wavelo}	Q	Q_{Wavelo}	Q	Q_{Wavelo}	Q	Q_{Wavelo}	Q	Q_{Wavelo}
01.06.2017	CZW	nie	3623	309	3415	251	3415	223	1115	97	1460	78
02.06.2017	PT	nie	3494	283	3263	219	3263	225	1041	88	1333	75
03.06.2017	SOB	nie	4020	296	2255	198	2255	191	593	52	1115	55
04.06.2017	NDZ	nie	2961	197	1513	86	1513	109	338	28	799	46
05.06.2017	PON	nie	2552	228	2835	205	2835	211	992	86	1131	76
06.06.2017	WT	nie	2579	285	3098	208	3098	210	1052	98	1322	95
07.06.2017	ŚR	nie	2728	292	3087	217	3087	236	1099	104	1245	82
08.06.2017	CZW	nie	3125	284	3460	247	3460	224	1024	108	1553	100
09.06.2017	PT	nie	3109	303	3370	256	3370	223	1026	94	1431	73
10.06.2017	SOB	nie	1084	90	913	81	913	77	379	28	492	40
11.06.2017	NDZ	nie	4043	340	2305	158	2305	189	522	46	1096	72
12.06.2017	PON	nie	1963	201	2450	208	2450	182	987	89	1287	72
13.06.2017	WT	nie	2179	247	3091	250	3091	238	1158	111	1370	103
14.06.2017	ŚR	nie	1931	186	2610	236	2610	211	913	79	1166	75
16.06.2017	PT	nie	948	105	1089	100	1089	103	463	41	628	29
17.06.2017	SOB	nie	454	77	449	67	449	49	181	17	221	26
18.06.2017	NDZ	nie	2936	290	1607	146	1607	141	447	60	860	65
19.06.2017	PON	nie	2835	236	3338	275	3338	248	1131	83	1529	107
20.06.2017	WT	nie	3559	313	3749	300	3749	261	1005	105	1572	111
21.06.2017	ŚR	nie	3146	333	3835	333	3835	290	991	108	1605	100
22.06.2017	CZW	nie	3179	375	3619	316	3619	285	1003	112	1593	106
23.06.2017	PT	nie	1283	155	1838	205	1838	166	699	66	790	70
24.06.2017	SOB	tak	3032	290	1858	220	1858	181	544	68	984	58
25.06.2017	NDZ	tak	3500	328	2175	146	2175	153	537	53	1013	85
26.06.2017	PON	tak	2088	264	3346	277	3346	271	881	124	1469	90
27.06.2017	WT	tak	2941	282	3738	323	3738	273	943	79	1509	97
28.06.2017	ŚR	tak	2130	241	3370	292	3370	264	903	88	1398	83
29.06.2017	CZW	tak	2092	180	2881	195	2881	145	699	76	1239	63
30.06.2017	PT	tak	2272	234	3222	263	3222	245	834	85	1307	80

Tab. 5-11 Udział rowerów Wavelo w całym potoku rowerzystów w poszczególnych lokalizacjach, dniach tygodnia, w trakcie wakacji i roku szkolnego – wartości średnie.

Źródło: opracowanie własne

		Wielkość próby	Średnia Q_{Wavelo}/Q
Lokalizacja	Bulwary Wiślane	29	0.100
	ul. Mogilska	29	0.084
	ul. Kotlarska	29	0.077
	ul. Wadowicka	29	0.097
	ul. Wielicka	29	0.066
Dzień tygodnia	poniedziałek	20	0.084
	wtorek	20	0.083
	środa	20	0.085
	czwartek	20	0.079
	piątek	25	0.084
	sobota	20	0.096
	niedziela	20	0.081
Wakacje	nie	110	0.084
	tak	35	0.086

5.3.2 Metoda badań

Celem badań było wyznaczenie funkcji regresji opisującej zależność pomiędzy natężeniem ruchu rowerów Wavelo, a natężeniem ruchu ogółu rowerzystów (analiza regresji opisana została w pkt. 5.2.2). Ogólną postać poszukiwanej zależności prezentuje wz. 5.15.

$$Q = \alpha + \beta * Q_{Wavelo} + \gamma * Z_j \quad [R/24h] \quad (5.15)$$

gdzie: Q – natężenie ruchu rowerowego [R/24h];

α – wyraz wolny [-];

Q_{Wavelo} – natężenie ruchu rowerów Wavelo [R/24h];

β – współczynnik regresji dla natężenia ruchu rowerów Wavelo [-];

Z_j – zmienne jakościowe (charakter ruchu rowerowego, dzień tygodnia, wakacje szkolne);

γ – współczynniki regresji dla zmiennych jakościowych [-].

Wyniki testu Shapiro-Wilka dla zmiennej losowej jaką było natężenie ruchu rowerowego Q wskazują, że ma ona rozkład normalny tylko w przypadku stacji zlokalizowanej na Bulwarach Wiślanych ($W=0.956$; $p=0.257$). Dla pozostałych lokalizacji statystyka testu nie przekraczała wartości 0.910 ($p \leq 0.018$). Uzyskane rezultaty mogą być wynikiem krótkiego okresu, z którego pochodzą dane o natężeniach ruchu rowerowego (tj. 1 miesiąc). W nawiązaniu do wyników badań (Vaughan, 1970) rozkład dobowego natężenia ruchu rowerowe jest najbardziej zbliżony do przesuniętego rozkładu gamma. W związku z powyższym modele regresyjne budowano przy założeniu przesuniętego rozkładu gamma oraz mimo wszystko rozkładu normalnego natężenia ruchu rowerowego.

Ponieważ udział rowerów Wavelo w całym potoku rowerzystów może być inny w poszczególnych lokalizacjach, dniach tygodnia, w okresie wakacji (w stosunku do okresu trwania roku szkolnego), wpływ tych zmiennych był również analizowany, a zmienne te

testowane w modelu jako zmienne niezależne. W nawiązaniu do wyników badań przedstawionych w rozdziale 5.1, w przypadku zmiennej jakościowej jaką była lokalizacja przekroju pomiarowego testowano wpływ charakteru ruchu rowerowego odbywającego się w danej lokalizacji, tj. turystyczny na Bulwarach Wiślanych i gospodarczy w pozostałych lokalizacjach, nie zaś wpływ każdej lokalizacji z osobna. W przypadku dnia tygodnia testowano wpływ każdego dnia z osobna, jak również wpływ dni powszednich i weekendów. Obliczenia wykonano przy użyciu programu IBM SPSS Statistics 20. Wartości parametrów modelu szacowane były metodą największej wiarygodności.

5.3.3 Wyniki badań

Ostateczną postać poszukiwanej zależności otrzymaną przy założeniu rozkładu normalnego zmiennej zależnej przedstawia wzór 5.16.

$$Q = \alpha + \beta * Q_{Wavelo} + \gamma * C \quad [R/24h] \quad (5.16)$$

gdzie: Q – natężenie ruchu rowerowego [R/24h];

α – wyraz wolny [-];

Q_{Wavelo} – natężenie ruchu rowerów Wavelo [R/24h];

β – współczynnik regresji dla natężenia ruchu rowerów Wavelo [-];

C – charakter ruchu rowerowego; C=1 w przypadku gospodarczego charakteru ruchu, C=0 w przypadku ruchu turystycznego;

γ – współczynnik regresji dla charakteru ruchu rowerowego [-].

Wartości parametrów modelu podano w tabeli 5-12. Na poziomie ufności 0.95 udział rowerów Wavelo w całym potoku rowerzystów nie jest zależny od dnia tygodnia oraz występowanie wakacji szkolnych, jednak różni się statystycznie istotnie w zależności od charakteru ruchu rowerowego odbywającego w danym miejscu (turystyczny, gospodarczy).

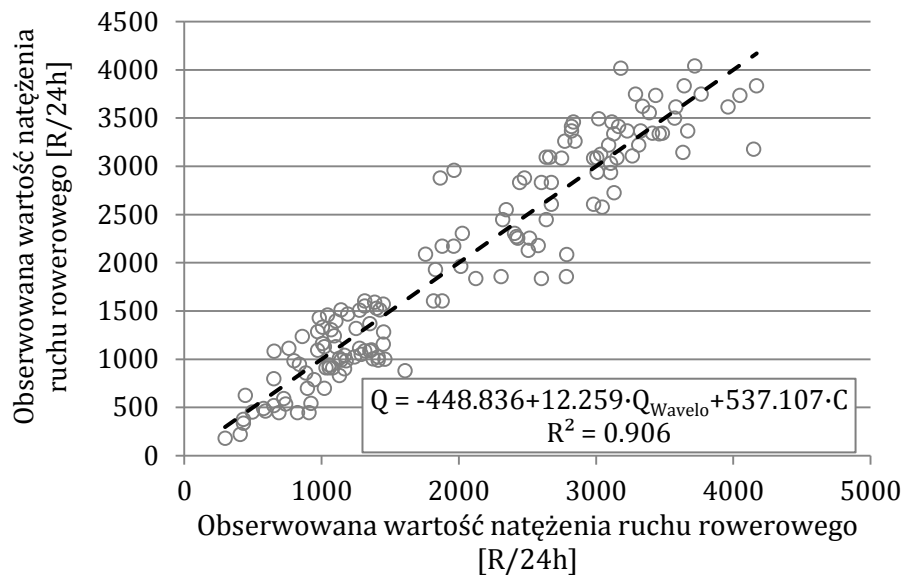
Tab. 5-12 Wartości parametrów modelu.

Źródło: opracowanie własne

Parametr		Wartość	Błąd standardowy	χ^2_{Walda}	wartość p	przedział ufności 0.95	
						dolna granica	górną granica
Wyraz wolny	α	-448.836	105.798	17.998	<0.001	-656.195	-241.476
Q_{Wavelo}	β	12.259	0.343	1280.725	<0.001	11.587	12.930
C	γ	537.107	383.053	46.695	<0.001	383.053	691.161

Zależność pomiędzy obserwowanymi wartościami dobowego natężenia ruchu rowerowego, a wartościami predykowanymi na podstawie opracowanej zależności przedstawiono w sposób obrazowy na rysunku 5.8. Zależność charakteryzuje wysoka wartość współczynnika determinacji R^2 wynosząca 0.906. Należy dodać, że model opracowany przy założeniu przesuniętego rozkładu gamma natężenia ruchu rowerowego charakteryzował współczynnik determinacji R^2 równy 0.904. Wyraz wolny przyjmuje wartość ujemną, z tego względu należy podkreślić, że opracowany model może być wykorzystany do szacowania

natężenia ruchu rowerowego tylko dla zakresu zmienności natężenia ruchu rowerów Wavelo przedstawionych w tabeli 5-10.



Rys. 5.8 Zależność pomiędzy obserwowanymi, a predykowanymi na podstawie opracowanego modelu wartościami dobowego natężenia ruchu rowerowego.

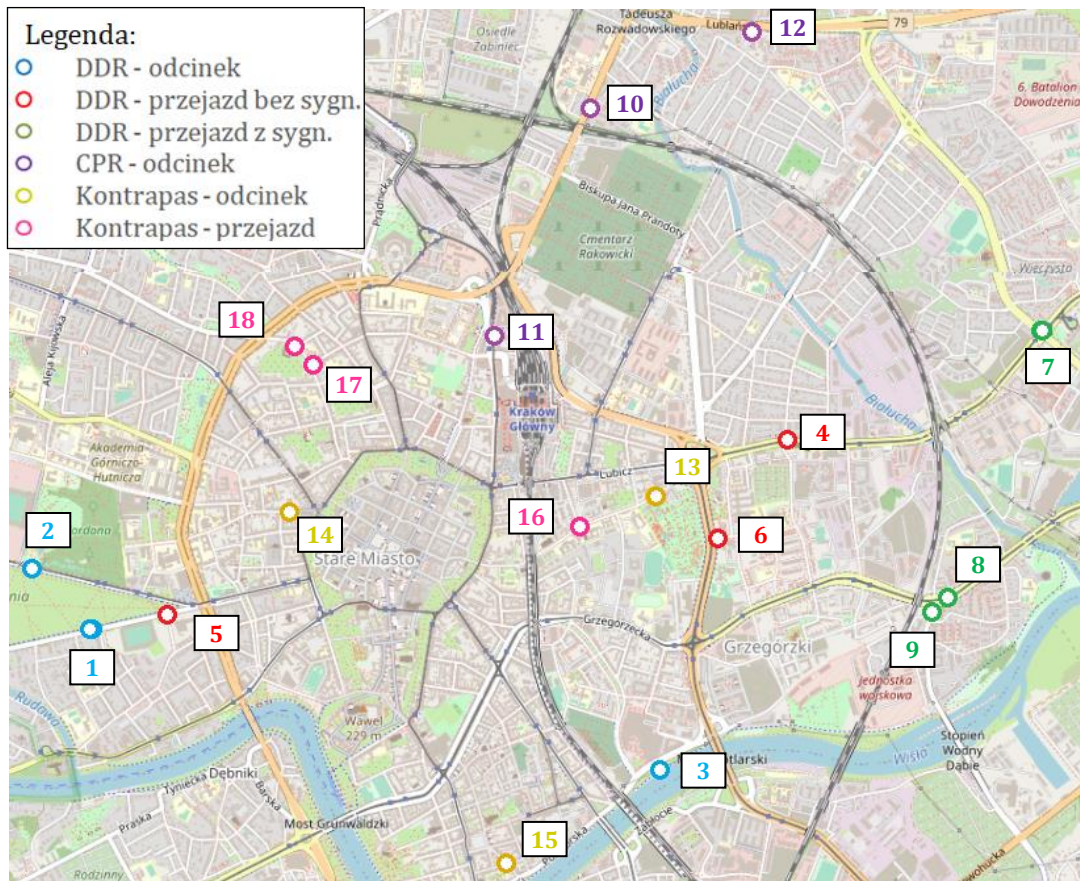
Źródło: opracowanie własne

5.4 Prędkości w ruchu rowerowym

Obok natężenia podstawowym parametrem ruchu determinującym możliwość popełnienia błędu przez kierującego i ciężkość zdarzeń drogowych jest prędkość. Średnie prędkości osiągnięte przez użytkowników systemu rowerów publicznych mogą być jednak niższe od prędkości ogółu rowerzystów. Wynika to z konstrukcji rowerów Wavelo, które są cięższe i wyposażone w mniejszą liczbę biegów (tj. 3) niż rowery standardowe. Badania opisane w (Fishman i Schepers, 2016) wskazują, że prędkości osiągnięte przez użytkowników systemu miejskiego są o ok. 5-10km/h niższe, niż prędkości pozostałych rowerzystów. Wniosek ten wysunięto jednak na podstawie badań przeprowadzonych w różnych krajach, co nie daje możliwości oceny prędkości obu grup rowerzystów w tej samej lokalizacji, a tym samym szacowania prędkości rowerzystów na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich. Badania stanowiące uzupełnienie wspomnianej luki badawczej opisane zostały w niniejszym rozdziale.

5.4.1 Wybór poligonów badawczych

Badania przeprowadzono dla 18 poligonów badawczych o różnym typie infrastruktury rowerowej (droga dla rowerzystów DDR, ciąg pieszo-rowerowy CPR, kontrapas) zarówno na przejazdach rowerowych, jak również na odcinkach pomiędzy skrzyżowaniami. Lokalizację wybranych poligonów przedstawiono na mapie na rysunku 5.9, zaś ich szczegółowy wykaz znajduje się w tabeli 5-13.



Rys. 5.9 Lokalizacja poligonów pomiarowych (punkty ponumerowane zgodnie z Tab. 5-13).

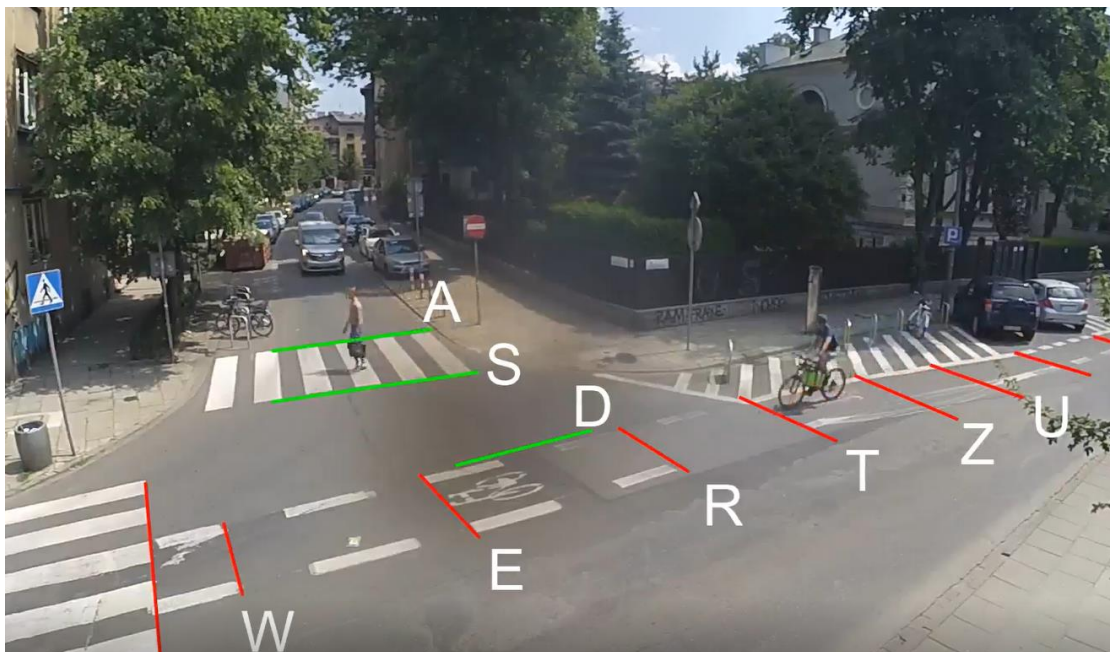
Źródło: opracowanie własne na podstawie OpenStreetMap

Ze względu na czas trwania pomiarów empirycznych dla uzyskania statystycznie istotnej próby badawczej, poligony wybrano w miejscach o stosunkowo dużym natężeniu ruchu rowerowego. Sposób organizacji ruchu i zagospodarowania otoczenia drogi, które mogłyby wpłynąć na zmianę zachowań rowerzystów i ich prędkości, nie zmieniły się w tych miejscach istotnie od czerwca 2017r. (czyli od okresu z którego pochodzą dostępne szczegółowe dane GPS z systemu Wavelo) do chwili wykonania pomiarów empirycznych ruchu rowerowego.

5.4.2 Pomiary empiryczne prędkości chwilowej w ruchu rowerowym

Prędkości chwilowe ogółu rowerzystów na wybranych poligonach badawczych wyznaczono na podstawie wrywkowych pomiarów empirycznych. Pomiary prowadzone były w miesiącach maj, czerwiec i lipiec w 2017, 2018, 2019 i 2021 roku, przy dobrych warunkach atmosferycznych (bez opadów) i przy dziennym oświetleniu. Czas trwania pojedynczego pomiaru wynosił minimum 2 godziny. Pomiary wykonywane były z wykorzystaniem techniki video. Kamery wysokiej rozdzielczości montowane były na masztach o wysokości 4-6m. Maszty ustawiane były w pobliżu analizowanych poligonów badawczych w taki sposób, aby można było bez przeszkód śledzić przejazd rowerzystów wzdłuż badanego poligonu. Za pomocą programu VSDC Free Video Editor na każdy film naniesiono wirtualne przekroje pomiarowe stanowiące bazę pomiarową. W przypadku odcinków drogowych miejsca lokalizacji przekrojów pomiarowych musiały być wstępnie oznaczone wzdłuż infrastruktury ruchu rowerowego podczas pomiarów terenowych (np. za pomocą pachołka drogowego).

Przekroje rozmieszczane były co ok. 10m na odcinku o długości 40-50m. W przypadku przejazdów rowerowych przekroje oznaczane były na początku i końcu przejazdu, ewentualnie w dodatkowych miejscach celem śledzenia zmian prędkości rowerzystów na przejeździe. Przykładowy obraz z kamery z naniesionymi przekrojami pomiarowymi pokazano na rysunku 5.10.



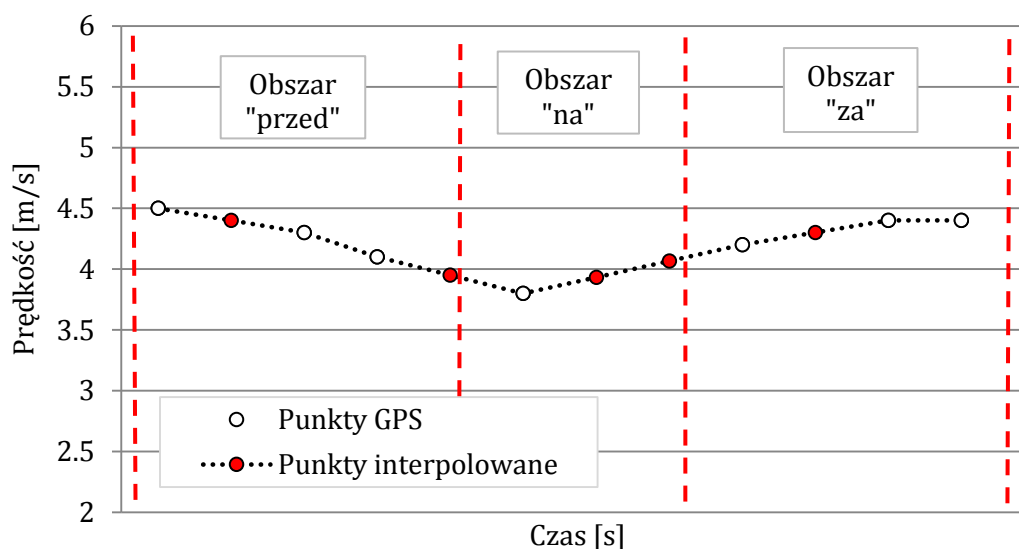
Rys. 5.10 Widok z kamery z naniesionymi przekrojami pomiarowymi.
Źródło: opracowanie własne

Następnie przy użyciu programu KBDiIR Player wykonano analizę obrazu zarejestrowanego przez kamery. Program umożliwia odtwarzanie jednego filmu w trzech różnych ujęciach, przy zmiennym powiększeniu obrazu i prędkości odtwarzania. Filmy przeglądane były przy zmniejszonej prędkości odtwarzania równej 1/4 prędkości rzeczywistej. Czas pojawienia się roweru w kolejnych przekrojach pomiarowych rejestrowany był poprzez wciśnięcie przypisanego klawisza na klawiaturze komputera (każdy klawisz odpowiadał innemu przekrojowi pomiarowemu). W wyniku otrzymywano plik *txt* zawierający kod przekroju oraz czas pojawienia się roweru w danym przekroju. Prędkości chwilowe rowerzystów wyznaczono jako iloraz długości odcinka stanowiącego bazę pomiarową (zmierzonej podczas pomiarów terenowych) i czasu jego przejazdu, wyznaczonego na podstawie czasu zgłoszeń w przekrojach pomiarowych. W badaniach uwzględniono jedynie rowerzystów, którzy poruszali się w sposób płynny, bez zatrzymań.

5.4.3 Prędkości chwilowe rowerów systemu miejskiego

Na podstawie szczegółowych danych GPS z systemu Wavelo z czerwca 2017r. (pkt. 4.3) oraz specjalnie przygotowanej do tego celu aplikacji komputerowej wyznaczono prędkości chwilowe rowerów Wavelo na analizowanych poligonach badawczych. Podczas pracy z programem w pierwszym kroku należało określić współrzędne GPS trzech prostokątnych obszarów tzn. „przed”, „na” i „za” analizowanym poligonem badawczym. W przypadku

przejazdów rowerowych prostokąt „na” obejmował przejazd rowerowy, a prostokąty „przed” i „za” odcinki na dojeździe do przejazdu z obu stron. W przypadku odcinków drogowych 3 prostokąty rozmieszczone były równomiernie wzdłuż analizowanego poligonu. Szerokości prostokątów (mierzone prostopadle do infrastruktury ruchu rowerowego) wynosiły kilka metrów i dostosowane były do typu infrastruktury drogowej i rowerowej w danym miejscu. Długość bazy pomiarowej dla odcinków drogowych wynosiła ok. 60m (każdy prostokąt miał długość ok. 20m). W przypadku przejazdów rowerowych długość obszarów „przed” i „za” wynosiły ok. 50m, zaś obszaru „na” odpowiadała szerokości wlotu ulicy. Program filtrował wszystkie zarejestrowane podróże wybierając tylko te, które odbyły się wzdłuż analizowanych poligonów. Za pomocą interpolacji liniowej szacowana była prędkość rowerzystów wzdłuż analizowanych obszarów co 1s (jako iloraz czasu i długości bazy pomiarowej) (Rys. 5.11). Ostatecznie prędkość chwilową każdego rowerzysty oszacowano jako średnią arytmetyczną prędkości w trzech obszarach (w przypadku odcinków) i obszaru „na” (w przypadku przejazdów). Prędkość chwilową dla analizowanego poligonu obliczono jako średnią prędkości chwilowych wszystkich rowerzystów. Z powodu dosyć krótkiej bazy pomiarowej w przypadku przejazdów rowerowych wykonanie obliczeń dla 3 prostokątów „przed”, „na” i „za” umożliwiło oszacowanie prędkości rowerzystów nawet w przypadku braku jakiegokolwiek punktu GPS na samym przejeździe oraz jej dokładniejsze oszacowanie w przypadku wystąpienia tylko 1 punktu. W celu uwzględnienia jedynie prędkości rowerzystów poruszających się w sposób płynny, bez zatrzymań, brano pod uwagę tylko tych rowerzystów, których prędkość średnia na przejeździe była nie mniejsza niż 1.4m/s (co stanowi prędkość ruchu pieszego przyjmowaną w analizach przepustowości skrzyżowań drogowych (GDDKiA, 2004)).



Rys. 5.11 Sposób wyznaczenie prędkości chwilowej rowerzystów za pomocą aplikacji komputerowej.

Źródło: opracowanie własne

5.4.4 Metoda badań zależności pomiędzy prędkością rowerów Wavelo a prędkościami ogółu rowerzystów

Celem badań było znalezienie odpowiedzi na pytanie, czy prędkości użytkowników systemu rowerów miejskich różnią się statystycznie istotnie od prędkości ogółu rowerzystów, a jeżeli tak, jaka jest zależność pomiędzy tymi prędkościami.

W celu oceny statystycznej istotności różnic pomiędzy prędkościami pochodzącymi z dwóch analizowanych źródeł, dla każdego poligonu badawczego wykonano test istotności dla dwóch wartości średnich (opisany w pkt. 5.1.2).

Ogólną postać poszukiwanej funkcji regresji (analiza regresji została opisana w pkt. 5.2.2.), opisującej zależność pomiędzy średnią prędkością ogółu rowerzystów wyznaczoną podczas pomiarów empirycznych, a średnią prędkością użytkowników systemu rowerów miejskich, prezentuje wzór 5.17. Funkcję regresji budowano przy założeniu rozkładu normalnego średnich prędkości chwilowych w ruchu rowerowym, co potwierdza wartość statystyki testu Shapiro-Wilka (pkt. 5.1.2) równa 0.955 ($p=0.572$). Pomimo, że każda jednorodna pod względem typu infrastruktury rowerowej (droga dla rowerów, ciąg pieszo-rowerowy, kontrapas) oraz elementu infrastruktury drogowej (przejazd rowerowy, odcinek pomiędzy skrzyżowaniami) grupa poligonów badawczych liczyła tylko 3 lokalizacje, wpływ ww. zmiennych jakościowych w opracowanych zależnościach był również testowany.

$$V_{sr} = \alpha + \beta * V_{Wavelo} + \gamma * Z_j \quad [m/s] \quad (5.17)$$

gdzie: V_{sr} – średnia prędkość rowerzystów wyznaczona w badaniach empirycznych [m/s];

α – wyraz wolny [-];

V_{Wavelo} – średnia prędkość użytkowników systemu rowerów miejskich Wavelo [m/s];

β – współczynnik regresji dla prędkości rowerów Wavelo [-];

Z_j – zmienne jakościowe tj. typ infrastruktury rowerowej, element infrastruktury drogowej;

γ – współczynniki regresji dla zmiennych jakościowych [-].

Obliczenia wykonano przy użyciu programu IBM SPSS Statistics 20. Współczynniki regresji szacowane były metodą największej wiarygodności.

5.4.5 Wyniki badań

W tabelach 5-13 oraz 5-14 zestawiono wyniki badań prędkości chwilowych rowerzystów wyznaczone odpowiednio na podstawie pomiarów empirycznych i danych z systemu Wavelo. Tabele zawierają następujące dane: N – wielkość próby badawczej [R]; V_{sr} lub V_{Wavelo} – średnia prędkość chwilowa odpowiednio w badaniach empirycznych i użytkowników systemu Wavelo [m/s]; S – odchylenie standardowe średniej prędkości chwilowej [m/s]; Wz – współczynnik zmienności średniej prędkości chwilowej [-]; V_{min} – minimalna wartość prędkości chwilowej [m/s]; V_{max} – maksymalna wartość prędkości chwilowej [m/s]; V_{15} – kwantyl 15% prędkości chwilowej [m/s]; V_{50} – kwantyl 50% prędkości chwilowej [m/s]; V_{85} – kwantyl 85% prędkości chwilowej [m/s]; N_{min} – minimalna liczebność próby wyznaczona przy założeniu 5% błędu oszacowania wartości prędkości średniej oraz poziomu ufności 0.95 [R_{min}]. Dla obu źródeł danych i wszystkich poligonów badawczych wielkość próby była większa od wymaganej minimalnej liczebności próby przy założeniu 5% błędu oszacowania wartości prędkości średniej oraz poziomu ufności 0.95.

Tab. 5-13 Wyniki badań empirycznych prędkości chwilowej w ruchu rowerowym.

Źródło: opracowanie własne

Lp.	Poligon	Inf. rowerowa	Element infrastruktury drogowej	N	V _{śr}	S	Wz	V _{min}	V _{max}	V ₁₅	V ₅₀	V ₈₅	N _{min}
1	ul. Focha	Droga dla rowerów	Odcinek drogi	248	4.7	1.51	0.32	2.1	11.8	3.4	4.4	6.0	158
2	Al. 3 Maja			138	6.0	1.65	0.27	2.4	10.9	4.5	5.7	7.6	114
3	Bulwary Wiślane			338	4.8	1.85	0.38	1.6	14.3	3.3	4.4	6.4	226
4	ul. Grunwaldzka		Przejazd bez sygnalizacji świetlnej	251	6.2	1.73	0.28	3.0	14.1	4.5	5.9	7.8	121
5	ul. Kasztelańska			110	2.7	0.71	0.26	1.5	4.3	2.0	2.6	3.5	105
6	ul. Sądowa			138	4.4	1.22	0.28	1.5	6.7	3.0	4.3	5.8	120
7	ul. Meissnera		Przejazd z sygnalizacją świetlną	59	4.6	0.83	0.18	2.9	6.3	3.7	4.6	5.5	51
8	Al. Pokoju			31	3.9	0.53	0.14	2.7	5.0	3.4	3.8	4.3	28
9	ul. Ofiar Dąbia			47	2.9	0.49	0.17	1.8	4.0	2.4	2.9	3.4	44
10	Al. 29 Listopada	Ciąg pieszo-rowerowy	Odcinek drogi	129	5.2	1.03	0.20	2.2	9.2	4.3	5.3	6.2	60
11	ul. Pawia			90	5.0	1.17	0.23	3.1	8.0	3.7	5.0	6.7	84
12	ul. Opolska			100	5.3	1.29	0.24	2.7	10.0	3.8	4.9	6.3	90
13	ul. Kopernika	Kontrapas	Odcinek drogi	156	4.6	1.11	0.24	2.0	8.0	3.5	4.5	5.6	89
14	ul. Krupnicza			94	4.3	1.01	0.23	2.7	8.0	3.0	4.2	5.6	84
15	ul. Mostowa			98	4.4	1.08	0.24	2.1	8.0	3.3	4.3	5.6	92
16	ul. Kopernika		Przejazd bez sygnalizacji świetlnej	89	6.0	1.28	0.21	3.9	11.2	4.9	5.8	7.5	69
17	ul. Łobzowska			63	5.0	0.96	0.19	3.1	8.3	4.1	4.9	5.7	57
18	ul. Teresy			134	5.2	1.40	0.27	1.4	10.2	4.0	4.9	6.5	113

Tab. 5-14 Wyniki badań prędkości chwilowej rowerów Wavelo.

Źródło: opracowanie własne

Lp.	Poligon	Inf. rowerowa	Element infrastruktury drogowej	N	V _{Wavelo}	S	Wz	V _{min}	V _{max}	V ₁₅	V ₅₀	V ₈₅	N _{min}
1	ul. Focha	Droga dla rowerów	Odcinek drogi	310	4.8	0.91	0.19	2.2	8.5	4.0	4.7	5.5	56
2	Al. 3 Maja			619	5.2	0.96	0.19	1.7	8.0	4.1	5.2	6.1	53
3	Bulwary Wiślane			115	4.0	0.90	0.22	2.0	7.7	3.3	3.8	4.9	76
4	ul. Grunwaldzka		Przejazd bez sygnalizacji świetlnej	1736	4.5	0.96	0.21	1.5	8.5	3.6	4.5	5.5	69
5	ul. Kasztelańska			633	3.1	0.59	0.19	1.8	5.8	2.5	3.1	3.7	55
6	ul. Sądowa			352	4.0	1.02	0.26	1.4	7.3	3.0	3.8	5.1	102
7	ul. Meissnera		Przejazd z sygnalizacją świetlną	2250	3.1	0.92	0.30	1.4	7.1	2.2	2.9	4.1	136
8	Al. Pokoju			187	3.1	0.73	0.23	1.5	5.0	2.3	3.2	3.8	84
9	ul. Ofiar Dąbia			147	2.4	0.63	0.27	1.4	3.8	1.7	2.3	3.1	109
10	Al. 29 Listopada	Ciąg pieszo-rowerowy	Odcinek drogi	1049	4.6	0.93	0.20	1.9	7.6	3.6	4.5	5.6	63
11	ul. Pawia			335	4.3	0.74	0.17	1.9	6.2	3.5	4.3	5.0	47
12	ul. Opolska			1211	4.4	0.80	0.18	2.1	7.7	3.6	4.3	0.0	51
13	ul. Kopernika	Kontrapas	Odcinek drogi	391	4.0	0.61	0.15	2.0	5.6	3.5	4.0	4.7	35
14	ul. Krupnicza			144	4.0	0.68	0.17	1.6	5.4	3.3	4.0	4.7	45
15	ul. Mostowa			722	3.7	0.77	0.21	1.2	5.7	2.8	3.6	4.6	66
16	ul. Kopernika		Przejazd bez sygnalizacji świetlnej	250	4.3	0.78	0.18	1.9	6.2	3.4	4.3	5.1	52
17	ul. Łobzowska			178	4.3	0.88	0.20	1.5	6.5	3.5	4.4	5.2	63
18	ul. Teresy			36	4.1	0.59	0.14	2.8	5.2	3.5	4.2	4.7	32

Średnie prędkości chwilowe rowerzystów na odcinkach dróg dla rowerów i ciągów pieszo-rowerowych wynosiły 5.2m/s (18.7km/h), zaś na kontrapasach 4.4m/s (15.8km/h). Prędkości chwilowe użytkowników rowerów Wavelo dla tych samych typów infrastruktury rowerowej wynosiły odpowiednio 4.7m/s (16.9km/h), 4.4m/s (15.8km/h) oraz 3.9m/s (14.0km/h). Wyniki te są zbliżone z danymi literaturowymi, w których wskazywano, że prędkości rowerzystów w ruchu swobodnym wahają się w granicach 10–28 km/h (Allen i in., 1998). Na

przejazdach rowerowych zlokalizowanych wzdłuż dróg dla rowerów prędkości rowerzystów były średnio o ok. 1.1m/s (4km/h) oraz 1.3m/s (4.7km/h) niższe niż na odcinkach drogowych odpowiednio w pomiarach empirycznych i dla danych z systemu Wavelo. Co zaskakujące, dla obu źródeł danych prędkości na przejazdach rowerowych zlokalizowanych wzdłuż kontrapasów były średnio o 0.3m/s (1.1km/h) i 1m/s (3.6km/h) wyższe niż na odcinkach pomiędzy skrzyżowaniami (odpowiednio dla rowerów Wavelo i danych z pomiarów empirycznych), co może być wynikiem lokalnych uwarunkowań w miejscach lokalizacji wybranych poligonów badawczych.

Dla 16 z 18 poligonów badawczych prędkości chwilowe rowerzystów korzystających z systemu rowerów miejskich były niższe od prędkości ogółu rowerzystów wyznaczonych w pomiarach empirycznych średnio o 17.4% (od 0.3m/s (1.0km/h) do 1.8m/s (6.5km/h)). Wyniki testu istotności dla dwóch wartości średnich zamieszczone w tabeli 5-15 wskazują, że różnice te były statystycznie istotne na poziomie ufności 0.98. Otrzymane wyniki są zbliżone do danych literaturowych, gdzie wskazywano różnice pomiędzy prędkościami użytkowników systemu rowerów miejskich i prędkościami ogółu rowerzystów na poziomie 5-10km/h (Fishman i Schepers, 2016). W przypadku poligonu badawczego nr 1 zlokalizowanego na odcinku drogi dla rowerów wzdłuż ul. Focha, prędkość średnia rowerów Wavelo była wyższa od średniej prędkości wyznaczonej w pomiarach empirycznych. Różnica ta była jednak statystycznie nieistotna (wartość $p=0.294$, Tab. 5-15). Podobne wyniki zaobserwowano dla poligonu nr 5 zlokalizowanego na przejeździe rowerowym na ul. Kasztelańskiej. W tym przypadku prędkość średnia użytkowników systemu rowerów miejskich była statystycznie istotnie wyższa od prędkości wyznaczonej w pomiarach empirycznych.

Tab. 5-15 Wyniki testu istotności dla dwóch wartości średnich.

Źródło: opracowanie własne

Lp	Poligon	Inf. rowerowa	Element infrastruktury drogowej	Statystyka u	wartość p
1	ul. Focha	Droga dla rowerów	Odcinek drogi	-1.053*	0.294
2	Al. 3 Maja			6.883	<0.001
3	Bulwary Wiślane			6.937	<0.001
4	ul. Grunwaldzka		Przejazd rowerowy bez sygnalizacji świetlnej	19.702	<0.001
5	ul. Kasztelańska			-4.654*	<0.001
6	ul. Sądowa			3.692	<0.001
7	ul. Meissnera		Przejazd rowerowy z sygnalizacją świetlną	12.467	<0.001
8	Al. Pokoju			5.520	<0.001
9	ul. Ofiar Dąbia			4.122	<0.001
10	Al. 29 Listopada	Ciąg pieszo-rowerowy	Odcinek drogi	6.370	<0.001
11	ul. Pawia			5.676	<0.001
12	ul. Opolska			7.729	<0.001
13	ul. Kopernika	Kontrapas	Odcinek drogi	6.442	<0.001
14	ul. Krupnicza			2.412	0.016
15	ul. Mostowa			6.367	<0.001
16	ul. Kopernika		Przejazd bez sygnalizacji świetlnej	12.850	<0.001
17	ul. Łobzowska			4.927	<0.001
18	ul. Teresy			6.715	<0.001

gdzie: (*) – ujemna wartość statystyki u oznacza, że średnia prędkość rowerów Wavelo była wyższa od średniej prędkości wyznaczonej w badaniach empirycznych

Wyniki badań wskazują również, że średnie prędkości chwilowe rowerów Wavelo są bardziej jednorodnie. Dla wszystkich poligonów poza przejazdami rowerowymi z sygnalizacją

światłą, odchylenia standardowe prędkości chwilowych rowerów miejskich były o ok. 30% niższe od odchyżeń standardowych prędkości uzyskanych podczas pomiarów empirycznych. Większa wartość odchylenia standardowego prędkości ogółu rowerzystów wskazuje na większą dyspersję prędkości, co może wynikać m.in. z bardziej zróżnicowanej grupy użytkowników pod względem wieku i płci oraz motywacji podróży.

Wartości współczynników funkcji regresji, opisującej związek pomiędzy średnią prędkością rowerzystów wyznaczoną w badaniach empirycznych, a prędkością użytkowników systemu Wavelo, oszacowano z pominięciem danych dla poligonów nr 1 (ul. Focha) i 5 (ul. Kasztelańska). Ostateczną postać poszukiwanej zależności przedstawia wzór 5.18. Wartości współczynników regresji podano w tabeli 5-16. Na podstawie wartości statystyki testu chi-kwadrat Walda dla zmiennej niezależnej jaką był element infrastruktury drogowej wynoszącej 8.413 ($p=0.015$) można stwierdzić, że zmienna ta jest statystycznie istotnym predyktorem średniej prędkości chwilowych w ruchu rowerowym. Nie mniej jednak, statystycznie istotny wpływ miało uwzględnienie w modelu tylko wpływu odcinków drogowych ($p=0.036$). Niezależnie od sposobu organizacji ruchu (z sygnalizacją świetłą lub bez niej) przejazdy rowerowe nie miały statystycznie istotnego wpływu na zmienną zależną ($p>0.05$). Stała modelu okazała się również statystycznie nieistotna (wartość $p=0.717$).

$$V_{sr} = \beta * V_{Wavelo} + \gamma * E \quad [m/s] \quad (5.18)$$

gdzie: V_{sr} – średnia prędkość chwilowa ruchu rowerowego [m/s];

V_{Wavelo} – prędkość średnia rowerów Wavelo [m/s];

β – współczynnik regresji dla prędkości średniej rowerów Wavelo [-];

E – element infrastruktury drogowej; E=1 w przypadku odcinka drogi, E=0 w przypadku przejazdu rowerowego;

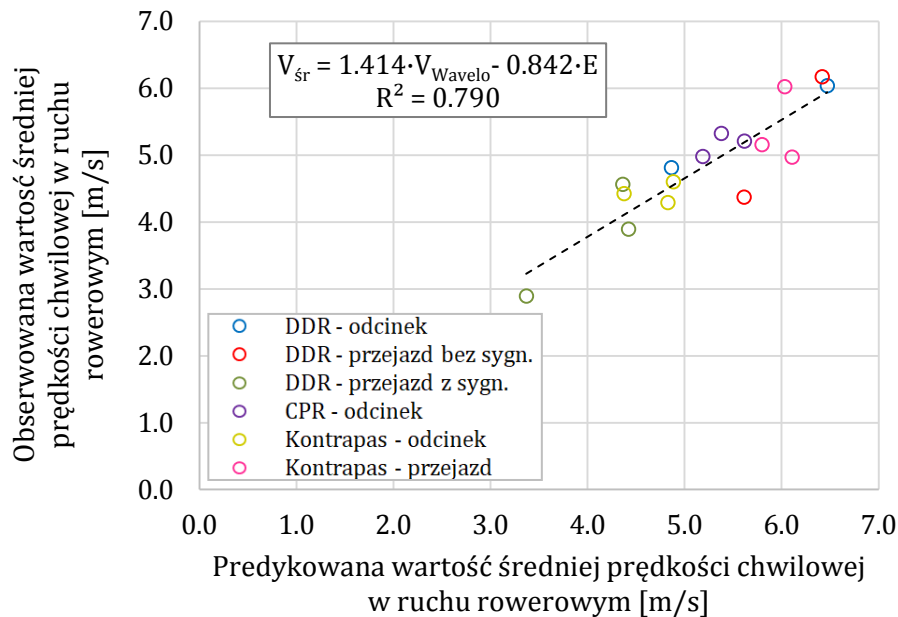
γ – współczynnik regresji dla elementu infrastruktury drogowej [-].

Tab. 5-16 Wartości parametrów modelu

Źródło: opracowanie własne

Parametr		Wartość	Błąd standardowy	χ^2_{Walda}	wartość p	przedział ufności 0.95	
						dolna granica	górną granica
V_{Wavelo}	β	1.414	0.236	36.126	<0.001	0.953	1.876
E	γ	-0.842	0.401	4.404	0.036	-1.628	-0.056

Zależność pomiędzy obserwowanymi wartościami średniej prędkości chwilowej w ruchu rowerowym, a wartościami predykowanymi na podstawie opracowanej zależności przedstawiono w sposób obrazowy na rysunku 5.12. Zależność charakteryzuje wysoka wartość współczynnika determinacji R^2 wynosząca 0.790.



Rys. 5.12 Zależność pomiędzy obserwowanymi, a predykowanymi na podstawie opracowanego modelu wartościami prędkości chwilowej w ruchu rowerowym.

Źródło: opracowanie własne

5.5 Wnioski

Celem badań zaprezentowanych w rozdziale 5 było stworzenie narzędzi umożliwiających szacowanie parametrów ruchu rowerowego, jakimi są natężenie ruchu oraz prędkość, na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich. Znalezienie takich zależności usprawniłoby proces wyznaczania parametrów ruchu rowerowego, bez konieczności wykonywania kosztownych i czasochłonnych pomiarów manualnych lub instalowania gęstej sieci stacji ciągłego pomiaru automatycznego, a także szacowanie parametrów ruchu rowerowego w szczególnych okresach (jak np. w trakcie trwania światowej pandemii, zmian w organizacji ruchu drogowego), kiedy opracowane wcześniej modele rozkładu ruchu mogą być nieadekwatne. Najważniejsze wnioski jakie wynikają z zaprezentowanych w rozdziale 5 badań są następujące:

- 1) Zmienność sezonowa natężenia ruchu rowerowego nie różni się statystycznie istotnie od sezonowej zmienności liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego (dla 22 z 24 analizowanych miesięcy; $p < 0.05$);
- 2) Wahania liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego w ciągu roku są większe od wahań natężenia ruchu rowerowego, co demonstruje większa rozbieżność wskaźników sezonowej zmienności ruchu;
- 3) Warunki pogodowe (tj. średnia temperatura powietrza i wielkość opadów deszczu) oraz występowanie weekendów i dni wolnych od pracy oraz ferii i wakacji szkolnych mają statystycznie istotny wpływ na dobowe natężenie ruchu rowerowego oraz liczbę wypożyczeń rowerów systemu miejskiego ($p < 0.001$);
- 4) Wpływ warunków pogodowych oraz występowania weekendów i dni wolnych od pracy oraz ferii i wakacji szkolnych na dobowe natężenie ruchu rowerowego jest zbliżony do ich wpływu na dobową liczbę wypożyczeń rowerów systemu miejskiego ($R^2 = 0.961$) i może być szacowany na jego podstawie ($R^2 = 0.769$);

- 5) Użytkownicy systemu rowerów miejskich są bardziej wrażliwi na oddziaływanie niskich temperatur powietrza i mniej wrażliwi na występowanie opadów deszczu niż ogół rowerzystów;
- 6) Dobowe natężenie ruchu rowerowego w danej lokalizacji może być oszacowane na podstawie natężenia dobowego rowerów systemu miejskiego z uwzględnieniem charakteru ruchu rowerowego odbywającego się w danej lokalizacji (turystyczny, gospodarczy) ($R^2=0.906$);
- 7) Udział rowerów systemu miejskiego w całym potoku rowerzystów nie jest statystycznie istotnie zależny od dnia tygodnia oraz występowania wakacji szkolnych ($p>0.05$) i wynosi średnio 8.5%;
- 8) Prędkości chwilowe osiągnane przez użytkowników systemu rowerów miejskich są statystycznie istotnie niższe od prędkości chwilowych ogółu rowerzystów średnio o 17.4% ($p<0.02$);
- 9) Prędkość chwilowa w ruchu rowerowym może być oszacowana na podstawie prędkości chwilowych użytkowników systemu rowerów miejskich z uwzględnieniem wpływu elementu infrastruktury drogowej (odcinek drogi, przejazd rowerowy) ($R^2=0.790$).

Wyniki badań opisanych w rozdziale 5 wskazują, że dane z urządzeń GPS pochodzące z systemu rowerów miejskich mogą być wykorzystywane do szacowania charakterystyk ruchu ogółu rowerzystów i są alternatywę dla bezpośrednich pomiarów ruchu rowerowego, co stanowi potwierdzenie tezy 1 pracy przedstawionej w pkt. 3.2.

6. Kwantyfikacja poziomu bezpieczeństwa ruchu rowerowego z wykorzystaniem miar pośrednich i modeli regresyjnych

Opisane w pkt. 2.3 ograniczenia klasycznej metody analiz bezpieczeństwa ruchu drogowego opartej na zarejestrowanej liczbie zdarzeń drogowych skłaniają do poszukiwania innych wielkości opisujących poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego, którymi mogą być tzw. miary pośrednie. Aby wybrana miara pośrednia mogła być wykorzystywana w analizach brd, musi wykazywać związek z liczbą zarejestrowanych zdarzeń drogowych. W badaniach prowadzonych dotychczas miary pośrednie bezpieczeństwa ruchu rowerowego (opóźnienie w ruchu rowerowym (Strauss i in., 2017), średnia różnica prędkości pomiędzy dwoma rowerzystami jadącymi kolejno po sobie (Xu i in., 2016), odchylenie standardowe prędkości w ruchu rowerowym (Xu i in., 2016)) wybierane były arbitralnie, a ich związek z liczbą wypadków i/lub kolizji był weryfikowany na etapie badań.

Celem badań opisanych w rozdziale 6 była metodyczna ocena związku pomiędzy różnymi miarami pośrednimi, które mogą być wyznaczone z danych GPS z systemu rowerów miejskich, a liczbą zarejestrowanych zdarzeń drogowych umożliwiającą wskazanie miary pośredniej, której zmienność najlepiej objaśnia zmienność liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów. Na podstawie wytypowanej miary pośredniej zbudowano uogólniony model liniowy pozwalający na ocenę poziomu bezpieczeństwa ruchu rowerowego reprezentowanego poprzez predykowaną liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów z uwzględnieniem wpływu czynników drogowo-ruchowych.

Ponieważ większość zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów w Krakowie w latach 2016-2019 miało miejsce na skrzyżowaniach drogowych (ok. 51.6%) (pkt. 4.1), badania przeprowadzono tylko w odniesieniu do przejazdów rowerowych z pominięciem odcinków drogowych.

6.1 Identyfikacja miar pośrednich bezpieczeństwa ruchu rowerowego

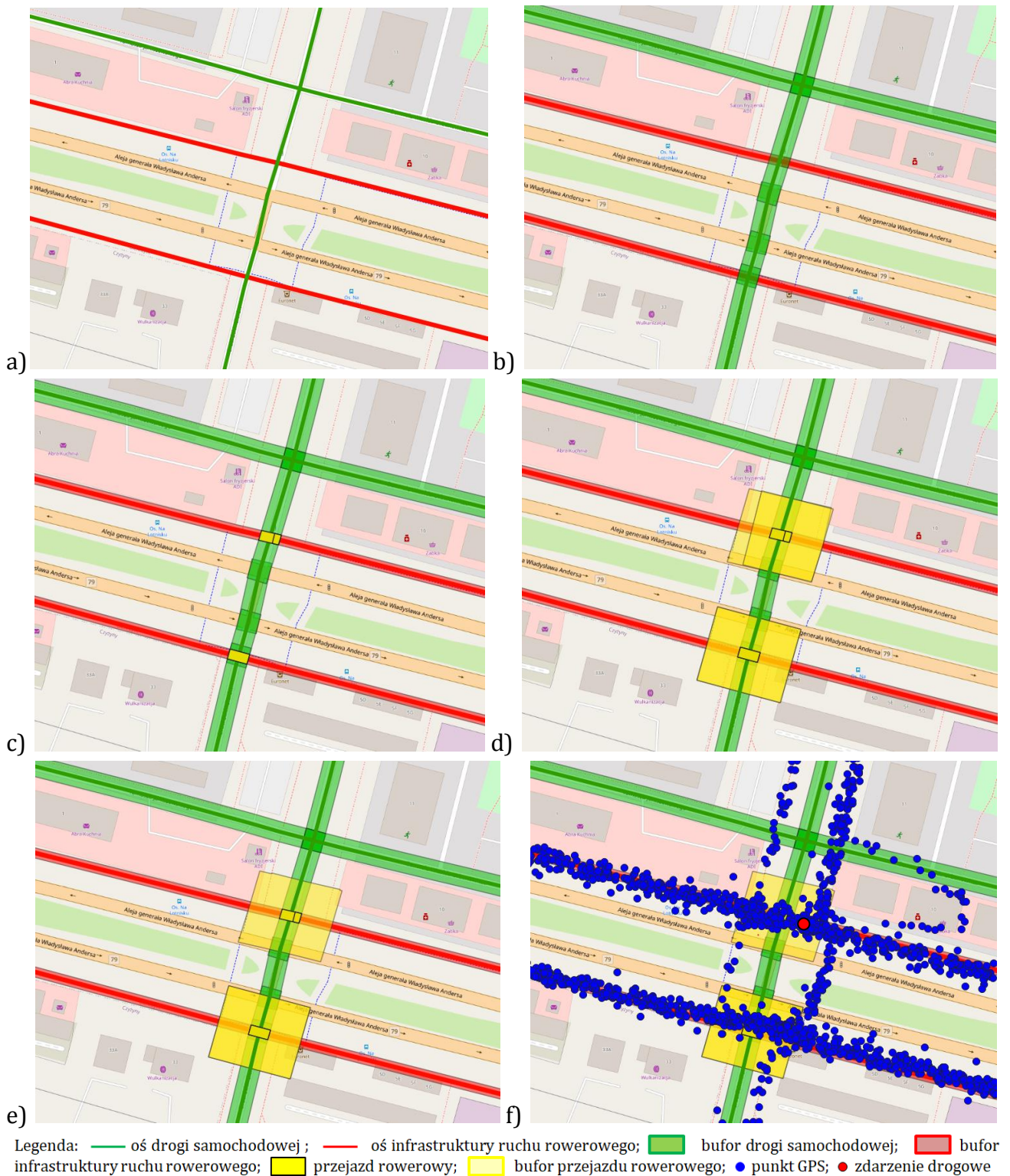
Biorąc pod uwagę kryteria wyboru miar pośrednich bezpieczeństwa ruchu drogowego zaprezentowane w pkt. 2.3 oraz zakres dostępnych szczegółowych danych GPS o ruchu rowerów Wavelo (pkt. 4.3), rozważanymi miarami, których przydatność do oceny bezpieczeństwa ruchu rowerowego była analizowana, były:

- a) prędkość w ruchu rowerowym – prędkość determinuje możliwość popełnienia błędu przez kierującego oraz ciężkość zdarzeń drogowych. Wyniki badań opisane w pkt. 5.4 wskazują na związek pomiędzy średnią prędkością chwilową użytkowników systemu rowerów miejskich i prędkością całego potoku rowerzystów. Wzrost prędkości rowerów Wavelo, oznacza wzrost prędkości ogółu rowerzystów, a tym samym wzrost zagrożenia zdarzeniami drogowymi;
- b) odchylenie standardowe prędkości w ruchu rowerowym – wzrost wartości odchylenia standardowego związany jest ze wzrostem niejednorodności prędkości rowerzystów. Większa różnica w zachowaniach rowerzystów na danym elemencie infrastruktury drogowej może sprzyjać występowaniu konfliktów w ruchu, a tym samym wskazywać na zwiększone zagrożenie zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów.

- Niejednorodność zachowań rowerzystów może być również związana ze zmiennymi w czasie okolicznościami wpływającymi na powstawanie zagrożeń bezpieczeństwa ruchu;
- c) współczynnik zmienności prędkości w ruchu rowerowym – będący ilorazem odchylenia standardowego i wartości średniej prędkości, podobnie jak odchylenie standardowe jest miarą jednorodności prędkości w ruchu rowerowym na danym elemencie infrastruktury drogowej. Wzrost wartości współczynnika zmienności oznacza większe zróżnicowanie prędkości rowerzystów, bądź wynika ze zmiennych w czasie okoliczności wpływających na powstawanie zagrożeń bezpieczeństwa ruchu, co wpływa na zwiększenie zagrożenia konfliktami i w konsekwencji zdarzeniami drogowymi;
 - d) opóźnienie w ruchu rowerowym – redukcja prędkości w ruchu rowerowym może być wynikiem celowego hamowania np. na dojeździe do skrzyżowania, bądź toczenia się rowerem (kiedy rowerzysta przestaje pedałowac). Opóźnienie pojawić się może również w sytuacji konfliktowej, kiedy uniknięcie zderzenia z innym uczestnikiem ruchu drogowego wymaga nagłego hamowania. Im wyższa wartość opóźnienia tym bardziej niebezpieczna może być sytuacja konfliktowa. Ponadto większa liczba gwałtownych opóźnień w danej lokalizacji może wskazywać na występowanie większej liczby konfliktów w ruchu drogowym, a tym samym na większe zagrożenie zdarzeniami drogowymi.

6.2 Przygotowanie bazy danych

Do przygotowania bazy danych wykorzystano program QGIS. Program ten umożliwia przeglądanie, edytowanie i analizę danych przestrzennych, tworzenie własnych map, zarządzanie danymi geograficznymi, itd. Sposób wykorzystania programu QGIS do utworzenia bazy danych przedstawiono krok po kroku na rysunku 6.1. W kroku 1 wczytano do programu podkład mapowy OpenStreetMap, dane o infrastrukturze ruchu rowerowego z platformy CARTO (pkt. 4.5) oraz dane o drogach samochodowych z OpenStreetMap (pkt. 4.4) (Rys. 6.1a). Typ infrastruktury rowerowej pozwala w sposób pośredni uwzględnić parametry ruchu rowerowego na dojeździe do skrzyżowania oraz determinuje charakter możliwych konfliktów z ruchem pieszym (np. brak konfliktów z ruchem pieszym na przejazdach w przypadku kontrapasów, możliwe konflikty z pieszymi w ruchu mieszanym na ciągach pieszo-rowerowych). Klasa drogi samochodowej w sposób pośredni odzwierciedla natężenie ruchu, prędkości pojazdów silnikowych, udział pojazdów ciężkich oraz natężenie ruchu pieszego. Ze względu na format pliku danych (tj. *shp*), infrastruktura ruchu rowerowego oraz drogi samochodowe zostały wczytane jako osie, bez uwzględnienia ich rzeczywistej szerokości. Dla wszystkich typów infrastruktury ruchu rowerowego zadano zatem bufor o szerokości 2m, co odpowiada całkowitej szerokości równej 4m, zaś szerokość bufora dla dróg uzależniono od ich klasy (klasy dróg OSM zgodnie z pkt. 4.4, Tab. 4-2). Dla dróg pierwszego rzędu było to 7m, dla dróg drugiego rzędu i zbiorczo-rozprowadzających 5m, dla pozostałych (lokalnych, serwisowych i w strefie zamieszkania) 4m (Rys. 6.1b). Za pomocą programu zidentyfikowano położenie przejazdów rowerowych poprzez ustalenie części wspólnych buforów infrastruktury ruchu rowerowego oraz dróg samochodowych (Rys. 6.1c).



Rys. 6.1 Sposób przygotowania bazy danych w programie QGIS.

Źródło: opracowanie własne na podstawie OpenStreetMap

Aby rejestrować zachowania rowerzystów nie tylko na samym przejeździe, ale również na dojeździe do niego, dla każdego zidentyfikowanego przejazdu wprowadzono dodatkowy bufor odsunięty od zidentyfikowanego przejazdu na odległość 20m (Rys. 6.1d). W przypadku występowania dwóch lub więcej przejazdów obok siebie (tak jak w przykładzie na Rys. 6.1d)

zachowania rowerzystów na obu z nich są od siebie zależne. W takim przypadku bufory łączono w jeden i analizowano jako pojedynczy przejazd (Rys. 6.1e). Następnie wczytano do programu bazę danych o zdarzeniach drogowych w latach 2016-2019 (każde zdarzenie naniesiono na mapę jako punkt o znanych współrzędnych GPS) oraz dane GPS z systemu Wavelo, gdzie każdy punkt opisany był przez szereg danych zestawionych w tab. 4-1 (Rys. 6.1.f). Za pomocą programu QGIS wygenerowano bazę danych, w której każdemu przejazdowi przypisano był szereg punktów GPS oraz zdarzenia drogowe zarejestrowane w utworzonym na przejeździe buforze. Dodatkowo wygenerowano informację o wielkość każdego obszaru oraz ręcznie przypisano każdemu przejazdowi informację o występowaniu lub nie sygnalizacji świetlnej. Wielkość obszaru analizy determinuje liczbę punktów GPS zarejestrowanych w obrębie przejazdu, zaś obecność sygnalizacji świetlnej na przejeździe rowerowym odzwierciedla sposób organizacji ruchu oraz wpływa na charakter możliwych konfliktów w ruchu drogowym na tym przejeździe.

Zidentyfikowano łącznie 931 przejazdów rowerowych, które podzielono na dwie grupy. Grupę pierwszą stanowiły przejazdy wprowadzone przed początkiem 2015r., zaś drugą wprowadzone w 2015r. Należy zaznaczyć, że dla przejazdów pierwszej grupy zebrano dane o zdarzeniach drogowych z udziałem rowerzystów w latach 2016-2018, zaś dla drugiej grupy z lat 2017-2019. Dzięki temu minimalny czas funkcjonowania przejazdu przed wystąpieniem zdarzenia drogowego uwzględnianego w analizie wynosił co najmniej 1 rok. Umożliwiło to wykluczenie wpływu zmiany organizacji ruchu wynikającej z wprowadzenia przejazdu na bezpieczeństwo ruchu rowerowego w wykonywanych badaniach.

Dane o liczbie analizowanych przejazdów oraz (po ukośniku) liczbie zdarzeń drogowych w 3-letnim okresie analizy w poszczególnych grupach przejazdów zestawiono w tabeli 6-1. Łącznie grupę pierwszą stanowiło 828 przejazdów rowerowych, na których doszło do 399 zdarzeń (31.1% wszystkich zdarzeń z udziałem rowerzystów, które miały miejsce w latach 2016-2018), zaś drugą grupę 103 przejazdy, na których miały miejsce 41 zdarzenia drogowe (3.1% zdarzeń w latach 2017-2019).

Na podstawie utworzonej w programie QGIS bazy danych, dla każdego przejazdu wyznaczono sumaryczne natężenie ruchu rowerów Wavelo w czerwcu 2017r. $Q_{Wavelo,m}$ [R/m-c], czyli okresu, z którego pochodzą szczegółowe dane GPS z systemu rowerów miejskich, oraz średnią prędkość rowerzystów V_{Wavelo} [m/s], jako średnią prędkość wszystkich punktów zarejestrowanych w buforze przejazdu. Ponadto wyznaczono odchylenie standardowe S [m/s] i współczynnik zmienności W_z [-] prędkości średniej rowerzystów. Wyznaczając prędkość średnią rowerzystów uwzględniono jedynie te punkty GPS, dla których prędkość „przed” wykonaniem manewru opóźnienia/przyspieszenia (Tab. 4-1, kol. 8) była nie mniejsza niż 1.4m/s (prędkość ruchu pieszego (GDDKiA, 2004)) i nie większa niż 15m/s. Osiągnięcie większych prędkości w przypadku rowerów miejskich jest wątpliwe i mogło wynikać z zakłóceń sygnału GPS.

Tab. 6-1 Liczba zidentyfikowanych przejazdów rowerowych/liczba zdarzeń drogowych na przejazdach rowerowych.
Źródło: opracowanie własne

Infrastruktura rowerowa	Drogi samochodowe						SUMA
	Pierwszego rzędu (primary)	Drugiego rzędu (secondary)	Zbiorczo-rozprowadzające (tertiary)	Lokalne (residential)	W strefie zamieszkania (living street)	Serwisowe (service)	
Grupa pierwsza (przejazdy wprowadzone przed początkiem 2015r.)							
Droga dla rowerów DDR	41/33	59/60	49/47	154/123	5/0	180/38	488/301
Ciąg pieszo-rowerowy CPR	-	4/2	3/2	40/10	-	40/5	87/19
Chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym znakami C-16 i T-22	-	-	5/2	30/5	12/8	45/5	92/20
Chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym na zasadach PORD	-	-	-	10/5	-	20/0	30/5
Kontrapas	-	-	6/4	72/39	-	53/11	131/52
SUMA	41/33	63/62	63/55	306/182	17/8	338/59	828/399
Grupa druga (przejazdy wprowadzone w 2015r.)							
Droga dla rowerów DDR	4/2	6/6	3/7	8/3	2/0	14/5	37/23
Ciąg pieszo-rowerowy CPR	-	-	-	1/0	-	1/0	2/0
Chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym znakami C-16 i T-22	-	-	-	3/0	-	7/0	10/0
Chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym na zasadach PORD	-	-	-	-	-	-	-
Kontrapas	-	-	6/3	31/11	2/2	15/2	54/18
SUMA	4/2	6/6	9/10	43/14	4/2	37/7	103/41

gdzie PORD – Prawo O Ruchu Drogowym

Dla każdego przejazdu i każdej wartości opóźnienia od 0.2 do 2.0m/s² (z krokiem co 0.1m/s²) określono liczbę opóźnień o wartości nie mniejszej niż zadana Lop_a [-]. Np. $Lop_{0.9}=690$ oznacza, że na analizowanym przejeździe w czerwcu 2017r. zarejestrowano 690 punktów GPS o opóźnieniu nie mniejszym niż 0.9m/s². Przyjęto, że opóźnienia mniejsze od 0.2m/s² występują podczas toczenia się roweru (kiedy rowerzysta przestaje pedałowac) i w normalnym ruchu podczas oscylacji wokół prędkości pożądaney. Zaledwie dla 33 z 828 przejazdów obserwowano wartości opóźnienia większe niż 2.0m/s², dlatego nie wyznaczono wartości Lop_a dla opóźnień większych niż 2.0m/s².

Bazę danych dla przejazdów grupy pierwszej (Tab. 6-1) wykorzystano przy wyborze miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego oraz do oszacowania parametrów modelu predykcji liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów, zaś bazę danych przejazdów grupy drugiej do weryfikacji otrzymanej zależności.

Przyjęto, że w okresie analizy 2016-2019 na analizowanych przejazdach nie miała miejsca żadna istotna zmiana organizacji ruchu, geometrii przejazdu, zagospodarowania otoczenia drogi, itp., które mogłyby wpływać na zachowania rowerzystów. Przyjęcie takiego założenia oznaczało, że prędkości oraz opóźnienia w ruchu rowerów miejskich zarejestrowane w czerwcu 2017r. reprezentowały zachowania rowerzystów w całym okresie analizy.

6.3 Metoda badań

6.3.1 Metoda wyboru miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego

Wykorzystanie do oceny poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego wybranej miary pośredniej wymaga wykazania jej związku z rejestrowaną liczbą zdarzeń drogowych (Songchitruksa i Tarko, 2004). W przeciwnym wypadku miara pośrednia jest nieefektywna, a jej wykorzystanie w zarządzaniu bezpieczeństwem ruchu drogowego jest wątpliwe. Związek pomiędzy zidentyfikowanymi miarami pośrednimi stanowiącymi zmienne niezależne (tj. prędkością średnią w ruchu rowerowym, odchyleniem standardowym prędkości średniej, współczynnikiem zmienności prędkości średniej, liczbą opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach nie mniejszych niż zadane), a zarejestrowaną liczbą zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów stanowiącą zmienną zależną oceniono za pomocą uogólnionych modeli liniowych (analiza regresji opisana została w pkt. 5.2.2). W badaniach uwzględniono tylko przejazdy rowerowe grupy pierwszej, które wprowadzone zostały przed 2015r. (Tab. 6-1). Ogólną postać poszukiwanej zależności przedstawia wzór 6.1:

$$LZ = \exp(\alpha + \beta \cdot MP) \text{ [zdarzeń/3lata]} \quad (6.1)$$

gdzie: LZ – liczba zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów [zdarzeń/3lata];

α – wyraz wolny [-];

β – współczynnik regresji dla miary pośredniej [-];

MP – miara pośrednia (tj. prędkość średnia w ruchu rowerowym, odchylenie standardowe prędkości średniej, współczynnik zmienności prędkości średniej, liczba opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach nie mniejszych niż zadana).

Wyniki dotychczasowych badań wskazują, że rozkład Poissona oraz rozkład dwumianowy ujemny zmiennej losowej najlepiej opisują zmienność liczby zdarzeń drogowych (Chengye i Ranjitkar, 2013). Z tego względu oba rozkłady testowane były w opisywanych badaniach. Wartości parametrów modelu szacowano metodą największej wiarygodności przy użyciu programu IBM SPSS Statistics 20.

Miarę pośrednią, której zmienność najlepiej opisuje zmienność liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów zidentyfikowano na podstawie kryterium informacyjnego Akaike (AIC) (wz. 6.2).

$$AIC = 2k - 2L \text{ [-]} \quad (6.2)$$

gdzie: AIC - kryterium informacyjne Akaike [-];

k – liczba parametrów modelu [-];

L - logarytm funkcji wiarygodności modelu [-].

Niższa wartość kryterium AIC oznacza niższą oczekiwaną stratę informacji przez model, a co za tym idzie, preferowany jest model o najniższej wartości AIC. Na podstawie różnicy

między wartościami kryterium AIC dla dwóch modeli (wz. 6.3) możliwe jest jakościowe porównanie opracowanych zależności. Zgodnie z (Burnham i Anderson, 2004) jeżeli omawiana różnica jest nie większa niż 4, można stwierdzić, że oba modele dają porównywalne wyniki. W przeciwnym wypadku model o najniższej wartości kryterium informacyjnego AIC (zwykle większej liczbie predyktorów) jest statystycznie istotnie lepiej dopasowany do danych empirycznych od drugiego rozważanego modelu.

$$\Delta_i = AIC_i - AIC_{\min} [-] \quad (6.3)$$

gdzie: Δ_i – różnica wartości kryterium informacyjnego AIC dla *i*-tego modelu [-];

AIC_i – wartość kryterium informacyjnego AIC dla *i*-tego modelu [-];

AIC_{\min} – najniższa wartość kryterium informacyjnego AIC spośród wartości wyznaczonych dla wszystkich zbudowanych modeli [-].

6.3.2 Metoda ilościowej oceny bezpieczeństwa ruchu rowerowego z wykorzystaniem miary pośredniej

Po wytypowaniu miary pośredniej wyznaczonej na podstawie danych GPS, której zmienność najlepiej opisuje zmienność liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów, zbudowano na jej podstawie kolejny uogólniony model liniowy, umożliwiający ocenę poziomu bezpieczeństwa ruchu rowerowego na przejeździe rowerowym reprezentowanego poprzez liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów z uwzględnieniem wpływu czynników drogowo-ruchowych. Ogólną postać poszukiwanej zależności przedstawia wzór 6.4:

$$LZ = \exp(\alpha + \beta \cdot MP + \gamma \cdot Z_i + \xi \cdot Z_j) \text{ [zdarzeń/3lata]} \quad (6.4)$$

gdzie: LZ – liczba zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów [zdarzeń/3lata];

α – wyraz wolny [-];

β - współczynnik regresji dla miary pośredniej [-];

MP – miara pośrednia wykazująca najlepsze powiązanie z danymi o liczbie zdarzeń drogowych;

γ - współczynnik regresji dla zmiennych ilościowych [-];

Z_i – zmienne ilościowe (np. natężenie ruchu rowerów Wavelo, wielkość obszaru analizy);

ξ - współczynnik regresji dla zmiennych jakościowych [-];

Z_j – zmienne jakościowe (tj. typ infrastruktury rowerowej, klasa drogi samochodowej, obecność sygnalizacji świetlnej na przejeździe rowerowym).

Wartości parametrów modelu szacowano metodą największej wiarygodności przy użyciu programu IBM SPSS Statistics 20.

6.3.3 Metoda weryfikacji opracowanych zależności

Ponieważ rozkład liczby zdarzeń drogowych nie jest rozkładem normalnym, a opracowywane modele wypadkowe są zwykle nieliniowe, ocenę jakości dopasowania tych modeli do danych empirycznych wykonuje się na podstawie wykresu reszt skumulowanych (*ang. Cumulative Residuals Plot, CURE Plot*) (Miaou, Lu i Lum, 1996). Przedstawia on różnicę pomiędzy obserwowaną liczbą zdarzeń drogowych, a liczbą zdarzeń predykowaną na podstawie utworzonego modelu. O dobrym dopasowaniu możemy mówić wtedy, gdy opisane wyżej różnice są bliskie zeru. Weryfikację wykonano w następujących krokach (Hauer i Bamfo, 1997):

Krok 1: uszeregowanie przejazdów rowerowych według rosnącego natężenia ruchu rowerów Wavelo;

Krok 2: wyznaczenie wartości r_{cal} dla każdego przejazdu (wz. 6.5):

$$r_{cal,i} = \frac{\sum N_{observed,i}}{\sum N_{model,i}} \cdot N_{model,i} \text{ [zdarzeń/3lata]} \quad (6.5)$$

gdzie: $\sum N_{observed,i}$ – suma obserwowanej liczby zdarzeń drogowych na wszystkich przejazdach [zdarzeń/3lata];

$\sum N_{model,i}$ – suma predykowanej na podstawie modelu regresyjnego liczby zdarzeń drogowych na wszystkich przejazdach [zdarzeń/3lata];

$N_{model,i}$ – predykowaną liczbą zdarzeń drogowych na *i*-tym przejeździe rowerowym [zdarzeń/3lata];

Krok 3: obliczenie reszty dla każdego przejazdu (wz. 6.6):

$$res_i = N_{observed,i} - r_{cal,i} \text{ [zdarzeń/3lata]} \quad (6.6)$$

gdzie: $N_{observed,i}$ – obserwowana liczba zdarzeń na *i*-tym przejeździe rowerowym [zdarzeń/3lata];

$r_{cal,i}$ – wz. 6.5 [zdarzeń/3lata];

Krok 4: obliczenie tzw. reszt skumulowanych dla kolejnych przejazdów (wz. 6.7):

$$res_{cum,i} = res_i + res_{i-1} \text{ [zdarzeń/3lata]} \quad (6.7)$$

gdzie: res_i – reszta dla *i*-tego przejazdu (wz. 6.6) [zdarzeń/3lata];

res_{i-1} – reszta dla przejazdu *i-1* (wz. 6.6) [zdarzeń/3lata];

Krok 5: wyznaczenie odchylenia standardowego reszt skumulowanych dla każdego przejazdu (wz. 6.8):

$$\sigma_i = \sqrt{\sqrt{\text{res, cum}_i} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{\text{res, cum}_i}}{\sqrt{\text{res, cum}_n}}\right)} \quad [-] \quad (6.8)$$

gdzie: $\text{res}_{\text{cum},i}$ – reszta skumulowana dla i -tego przejazdu rowerowego (wz. 6.7) [zdarzeń/3lata];

$\text{res}_{\text{cum},n}$ – reszta skumulowana dla n -tego przejazdu (wz. 6.7) [zdarzeń/3lata];

Krok 6: narysowanie wykresu reszt skumulowanych i podwojonych odchyłeń standardowych $2\sigma_i$ i $-2\sigma_i$ (wz. 6.8) dla wszystkich przejazdów;

Krok 7: ocena otrzymanego na podstawie powyższych obliczeń wykresu reszt skumulowanych, który powinien zawierać się pomiędzy wykresami podwojonych odchyłeń standardowych $2\sigma_i$ i $-2\sigma_i$. Jeżeli ten warunek jest spełniony, można stwierdzić, że model jest dobrze dopasowany do danych empirycznych.

6.4 Wyniki badań

6.4.1 Wybór miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego

W tabeli 6-2 zestawiono wartości kryterium AIC uogólnionych modeli liniowych zbudowanych z uwzględnieniem poszczególnych miar pośrednich dla dwóch testowanych rozkładów zmiennej losowej. Dla każdej analizowanej miary pośredniej model utworzony przy założeniu rozkładu Poissona zmiennej losowej charakteryzuje znacznie wyższa wartość AIC niż dla modelu obliczonego przy założeniu rozkładu dwumianowego ujemnego (od ok. 161 do ok. 231). Wynika stąd, że rozkład dwumianowy ujemny wykazuje lepsze dopasowanie do zmienności występowania zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów niż rozkład Poissona.

Tab. 6-2 Wartości kryterium AIC oraz istotność analizowanych miar pośrednich bezpieczeństwa ruchu rowerowego.

Źródło: opracowanie własne

Rozkład		Miara pośrednia bezpieczeństwa ruchu rowerowego										
		Lop _{0.2}	Lop _{0.3}	Lop _{0.4}	Lop _{0.5}	Lop _{0.6}	Lop _{0.7}	Lop _{0.8}	Lop _{0.9}	Lop _{1.0}	Lop _{1.1}	Lop _{1.2}
Poissona	wartość p	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.003
	AIC	1650.67	1654.29	1655.23	1594.91	1593.61	1602.73	1636.66	1694.85	1727.18	1744.45	1748.57
Dwumianowy ujemny	wartość p	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.013
	AIC	1461.3	1463.31	1463.98	1431.72	1431.18	1436.2	1449.2	1471.37	1496.41	1517.09	1525.39
Rozkład		Miara pośrednia bezpieczeństwa ruchu rowerowego										
		Lop _{1.3}	Lop _{1.4}	Lop _{1.5}	Lop _{1.6}	Lop _{1.7}	Lop _{1.8}	Lop _{1.9}	Lop _{2.0}	V _{sr}	S	W _z
Poissona	wartość p	0.039	0.026	0.025	0.069	0.063	0.048	0.089	0.102	0.278	<0.001	0.014
	AIC	1751.37	1750.87	1750.85	1751.97	1751.88	1751.53	1752.21	1752.26	1753.2	1743.86	1748.51
Dwumianowy ujemny	wartość p	0.097	0.076	0.076	0.140	0.135	0.111	0.163	0.189	0.370	0.004	0.040
	AIC	1530.38	1530.05	1529.96	1531.22	1531.11	1530.85	1531.59	1531.95	1532.89	1525.42	1529.47

Na poziomie ufności równym 0.95, miarami pośrednimi, które wykazywały statystycznie istotny wpływ na liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów były: liczba opóźnień nie mniejszych niż od 0.2m/s^2 do 1.2m/s^2 (tzn. $Lop_{0.2}$ do $Lop_{1.2}$), odchylenie standardowe S oraz

współczynnik zmienności W_z prędkości średniej. Najniższa wartość AIC charakteryzowała model utworzony dla liczby opóźnień nie mniejszych niż 0.6m/s^2 ($L_{op0.6}$). Można zatem stwierdzić, że zmienność tej miary najlepiej objaśnia zmienność liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów w porównaniu do innych testowanych miar.

6.4.2 Ilościowy opis poziomu bezpieczeństwa ruchu rowerowego z wykorzystaniem miary pośredniej

W tabeli 6-3 zamieszczono podstawowe statystyki opisowe zmiennych ilościowych opisujących czynniki drogowo-ruchowe, których wpływ na liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów był testowany za pomocą uogólnionego modelu liniowego. Pomimo, że wyniki badań opisanych w pkt. 6.4.1 wskazują na brak statystycznie istotnego wpływu prędkości średniej w ruchu rowerowym na liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów (Tab. 6-2), a współczynnik zmienności prędkości jest stosunkowo niski (równy 0.129, Tab. 6-3) jej wpływ na liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów zdecydowano się ponownie przeanalizować. Prędkość średnia może bowiem stanowić uzupełnienie informacji o zachowaniach rowerzystów w obrębie danego przejazdu przy uwzględnieniu pozostałych czynników drogowo-ruchowych.

Tab. 6-3 Statystyki opisowe niezależnych zmiennych ilościowych.

Źródło: opracowanie własne

Zmienna	Jednostka	Symbol	Średnia	Minimum	Maksimum	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Prędkość średnia	m/s	V_{Wavelo}	3.83	2.45	5.66	0.493	0.129
Liczba opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach $\geq 0.6\text{m/s}^2$	liczba/m-c	$L_{op0.6}$	43.09	0.00	536.00	84.659	1.965
Wielkość obszaru analizy	m ²	P	2555.14	1665.18	9688.55	876.258	0.343
Liczba podróży rowerów Wavelo	R/m-c	$Q_{Wavelo,m}$	1910.80	4.00	11191.00	2032.934	1.064

Tab. 6-4 Współczynniki korelacji Spearman'a dla niezależnych zmiennych ilościowych.

Źródło: opracowanie własne

Parametr pogody		$V_{srWavelo}$	$L_{op0.6}$	P	$Q_{Wavelo,m}$
V_{Wavelo}	rs	1.000	-0.490	-0.194	-0.108
	wartość p	-	<0.001	<0.001	0.002
	wielkość próby	828	828	828	828
$L_{op0.6}$	rs	-0.490	1.000	0.230	0.745
	wartość p	<0.001	-	<0.001	<0.001
	wielkość próby	828	828	828	828
P	rs	-0.194	0.230	1.000	0.082
	wartość p	<0.001	<0.001	-	0.018
	wielkość próby	828	828	828	828
$Q_{Wavelo,m}$	rs	-0.108	0.745	0.082	1.000
	wartość p	0.002	<0.001	0.018	-
	wielkość próby	828	828	828	828

Na podstawie wartości współczynników korelacji Spearman'a (Tab. 6-4) można stwierdzić, że na poziomie ufności równym 0.98 analizowane zmienne ilościowe są ze sobą skorelowane. Współczynniki korelacji nie przekraczają jednak wartości 0.7, wskazanej w literaturze jako graniczna, która świadczy o silnej korelacji zmiennych (pkt. 5.2.2). Wyjątek stanowi współczynnik korelacji pomiędzy liczbą opóźnień o wartościach nie mniejszych niż 0.6m/s² $Lop_{0.6}$, a natężeniem ruchu rowerów Wavelo $Q_{Wavelo,m}$, który osiąga wartość 0.745. Nie mniej jednak wartość czynnika wzrostu wariancji VIF dla wszystkich zmiennych ilościowych (Tab. 6-5) jest niższa od wartości granicznej proponowanej w literaturze równej 2.5 (pkt. 5.2.2). Oznacza to, że występujące korelacje pomiędzy zmiennymi ilościowymi nie mają istotnego wpływu na wartości szacowanych parametrów modelu. Z tego względu wpływ wszystkich zmiennych ilościowych testowany był w budowanym uogólnionym modelu liniowym.

Tab. 6-5 Wartości czynnika wzrostu wariancji VIF dla niezależnych zmiennych ilościowych.
Źródło: opracowanie własne

Zmienna niezależna	VIF
$Lop_{0.6}$	2.050
V_{Wavelo}	1.247
$Q_{Wavelo,m}$	1.672
P	1.064

Ostateczną postać zależności opisującej związek pomiędzy predykowaną liczbą zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów, a liczbą opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach nie mniejszych niż 0.6m/s² i czynnikami drogowo-ruchowymi opisuje wzór 6.9:

$$LZ = Q_{Wavelo,m}^{\gamma_1} \cdot \exp(\alpha + \beta \cdot Lop_{0.6} + \gamma_2 \cdot V_{Wavelo} + \gamma_3 \cdot P + \xi) \quad [\text{zdarzeń}/3\text{lata}] \quad (6.9)$$

gdzie: LZ – liczba zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów [zdarzeń/3lata];

$Q_{Wavelo,m}$ – natężenie rowerów Wavelo [R/m-c];

$Lop_{0.6}$ – liczba opóźnień o wartościach nie mniejszych niż 0.6m/s² [liczba/m-c];

V_{Wavelo} – średnia prędkość rowerów Wavelo [m/s];

P – wielkość obszaru analizy [m²];

$\alpha, \beta, \gamma_i, \xi$ – parametry modelu (Tab. 6-6) [-].

Wartości parametrów modelu zestawiono w tabeli 6-6. Wszystkie zmienne niezależne ilościowe uwzględnione w modelu okazały się statystycznie istotne na poziomie ufności równym 0.99, zaś zmienna jakościowa, tj. klasa drogi samochodowej, na poziomie ufności nieznacznie mniejszym równym 0.94. Na poziomie ufności 0.95 typ infrastruktury rowerowej oraz występowanie sygnalizacji świetlnej na przejeździe rowerowym nie miały statystycznie istotnego wpływu na liczbę zdarzeń drogowym z udziałem rowerzystów.

Tab. 6-6 Wartości parametrów modelu.

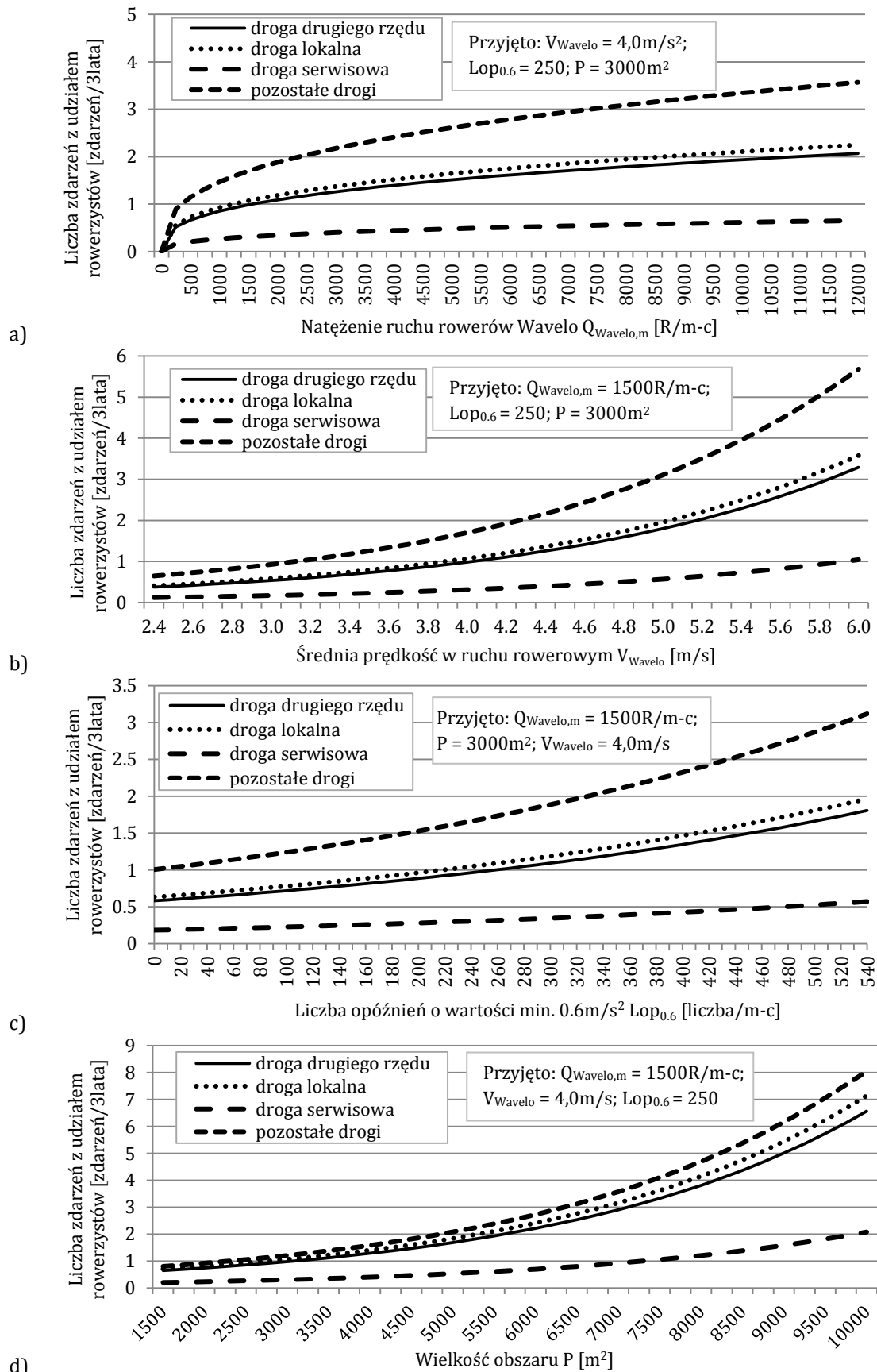
Źródło: opracowanie własne

Parametr		Wartość	Błąd	wartość p	Przedział ufności 0.95		Wpływ zmiennej niezależnej			
					dolna granica	górną granica	χ^2_{Walda}	df	wartość p	
Wyraz wolny		α	-5.835	0.7222	<0.001	-7.250	-4.419	77.046	1	<0.001
Q _{Wavelo,m}		γ_1	0.357	0.0699	<0.001	0.220	0.494	26.078	1	<0.001
Lop _{0,6}		β	0.002	0.0008	0.006	0.001	0.004	7.600	1	0.006
V _{Wavelo}		γ_2	0.604	0.1647	<0.001	0.281	0.927	13.448	1	<0.001
P		γ_3	2.712*10 ⁻⁴	0.871*10 ⁻⁴	0.002	0.000	0.000	9.692	1	0.002
Droga	drugiego rzędu	ξ	-0.546	0.2874	0.057	-1.110	0.017	51.647	5	<0.001
	lokalna		-0.462	0.2366	0.051	-0.926	0.001			
	serwisowa		-1.695	0.2752	<0.001	-2.235	-1.156			
	pozostałe(*)		0							

gdzie: (*) – poprzez pozostałe drogi należy rozumieć drogi pierwszego rzędu, zbiorczo-rozprowadzające i w strefie zamieszkania

Warto podkreślić, że wartość kryterium AIC zaprezentowanego modelu równa jest 1329, zaś modelu z tymi samymi zmiennymi niezależnymi, ale z pominięciem liczby opóźnień co najmniej równych 0.6m/s² wynosi 1334.86. Różnica kryteriów AIC obu modeli równa 5.86 jest większa od 4, zatem można stwierdzić, że uwzględnienie w modelu miary pośredniej jaką była liczba opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach co najmniej równych 0.6m/s² istotnie poprawia jakość modelu.

Wpływ zmiany parametrów modelu na zmianę predykowanej liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów przedstawiono na rysunkach 6.2a-6.2d. Wzrost wartości wszystkich zmiennych ilościowych prowadzi do wzrostu predykowanej liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów. Wzrost ten jest najbardziej dynamiczny dla dróg pierwszego rzędu, zbiorczo-rozprowadzających i w strefie zamieszkania (opisanych na poniższych wykresach jako „pozostałe”), dla których predykowana liczba zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów jest również największa. Wyniki uzyskiwane dla dróg lokalnych i drugiego rzędu są do siebie zbliżone. Predykowana liczba zdarzeń drogowych jest zawsze najmniejsza dla dróg serwisowych, dla których wzrost liczby zdarzeń wraz ze wzrostem wartości parametrów modelu jest też najłagodniejszy.

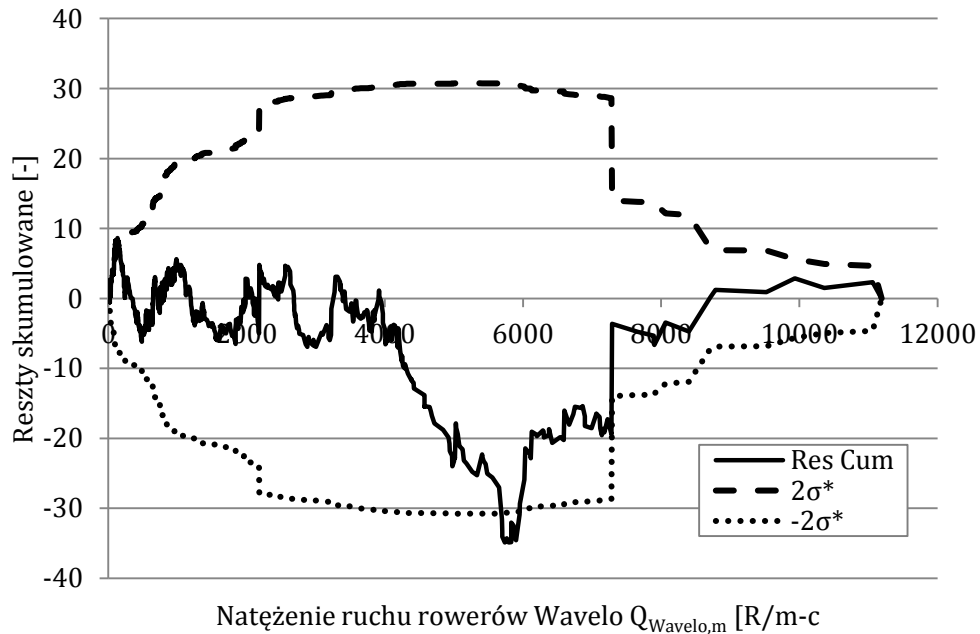


Rys. 6.2 Wpływ a) natężenia rowerów Wavelo; b) prędkości średniej rowerów Wavelo w ruchu swobodnym, c) liczby opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach co najmniej równych $0,6m/s^2$; d) wielkości obszaru analizy; na liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów dla poszczególnych klas dróg samochodowych.

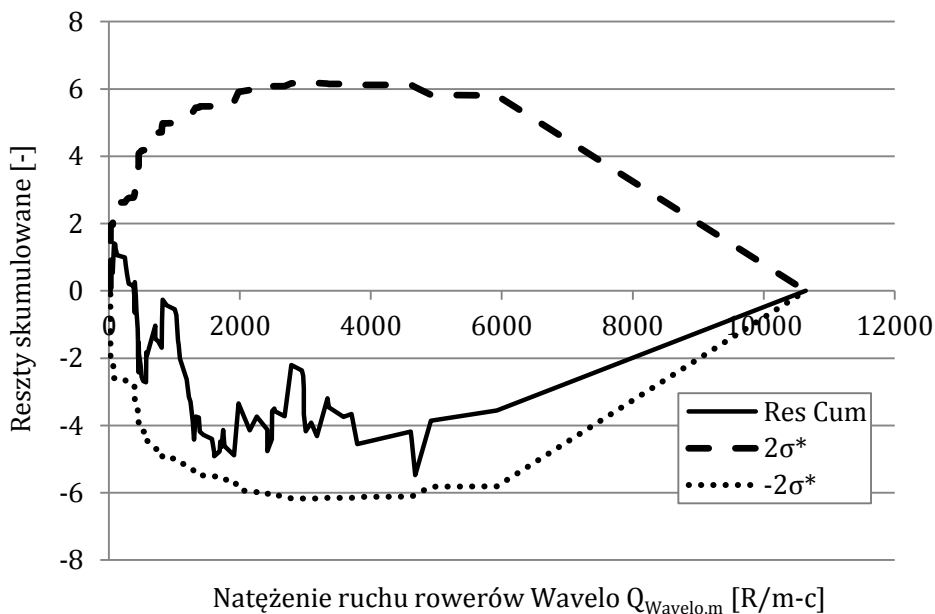
Źródło: opracowanie własne

6.4.3 Ocena jakości dopasowania modelu do danych empirycznych i jego weryfikacja

Na rysunkach 6.3 oraz 6.4 przedstawiono wykresy reszt skumulowanych odpowiednio dla pierwszej grupy przejazdów, którą wykorzystano do oszacowania parametrów modelu predykcji liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów oraz grupy drugiej, którą wykorzystano do weryfikacji otrzymanych zależności (podział przejazdów na grupy zgodnie z Tab. 6-1).



Rys. 6.3 Wykres reszt skumulowanych dla pierwszej grupy przejazdów rowerowych.
Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.4 Wykres reszt skumulowanych dla drugiej grupy przejazdów rowerowych.
Źródło: opracowanie własne

W ogólności wykresy reszt skumulowanych zawierają się pomiędzy wykresami podwojonych odchyłeń standardowych $2\sigma_i$ i $-2\sigma_i$. Można zatem stwierdzić, że zaprezentowany model jest dobrze dopasowany do danych empirycznych. Model nie powinien być jednak stosowany do szacowania liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów przy natężeniach ruchu rowerów Wavelo na przejeździe rowerowym w przedziale ok. 5700-6000R/m-c. Wartości bezwzględne reszt skumulowanych okazały się w tym przedziale natężeń większe od wartości podwojonych odchyłeń standardowych $2\sigma_i$ w przypadku przejazdów grupy pierwszej.

6.5 Wnioski

Celem badań opisanych w rozdziale 6 była identyfikacja miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu drogowego, która może być wyznaczona na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich, wykazującej najsilniejszy związek z liczbą rejestrowanych zdarzeń drogowych na przejazdach rowerowych oraz opracowanie na jej podstawie modelu umożliwiającego ocenę poziomu bezpieczeństwa ruchu rowerowego reprezentowanego poprzez liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów z uwzględnieniem wpływu czynników drogowo-ruchowych. Na podstawie wyników badań przedstawionych w rozdziale 6 można stwierdzić, że spośród wszystkich testowanych miar pośrednich bezpieczeństwa ruchu rowerowego (jakimi były prędkość średnia w ruchu rowerowym, odchylenie standardowe prędkości średniej, współczynnik zmienności prędkości średniej, liczba opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach nie mniejszych niż od 0.2m/s^2 do 2.0m/s^2 z krokiem co 0.1m/s^2), miarą, której zmienność najlepiej opisuje zmienność liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów na przejazdach rowerowych jest liczba opóźnień w ruchu o wartościach co najmniej równych 0.6m/s^2 ($Lop_{0.6}$). Zidentyfikowana wartość opóźnienia jest znacznie niższa od wartości odpowiadających gwałtownemu hamowaniu roweru prezentowanych w literaturze równych $2.45\text{--}6.95\text{m/s}^2$ (Famiglietti i in., 2020), 2.6m/s^2 (CROW, 2006) oraz 3.3m/s^2 (Strauss i in., 2017). Może to być wynikiem zachowania rowerzystów w sytuacjach konfliktowych. Badania (Włodarek i Olszewski, 2020) wykazały bowiem, że rowerzyści hamowali gwałtownie tylko w 16-28% zarejestrowanych konfliktów z pojazdami silnikowymi. Znacznie częściej obserwowano zmianę trajektorii przejazdu, której towarzyszyło niewielkie opóźnienie w ruchu.

Na poziomie ufności 0.94 wskazana miara pośrednia (tj. liczba opóźnień w ruchu o wartościach co najmniej równych 0.6m/s^2) oraz natężenie ruchu użytkowników systemu rowerów miejskich, ich prędkość średnia, wielkość obszaru analizy, klasa drogi samochodowej mają statystycznie istotny wpływ na liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów. Można zatem stwierdzić, że wskazana miara pośrednia jest statystycznie istotnym predyktorem liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów. Co więcej, jej uwzględnienie w opracowanym modelu statystycznie istotnie poprawiło jego jakość. Ponadto wykazano, że rozkład dwumianowy ujemny lepiej opisuje zmienność liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów niż rozkład Poissona.

7. Ocena wpływu czynników infrastrukturalnych na zagrożenie zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów

Wyniki badań opisane w rozdziale 6 wskazują, że liczba zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów rośnie wraz ze wzrostem liczby opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach większych bądź równych 0.6m/s^2 . Badania prowadzone były na podstawie zarejestrowanej liczby zdarzeń drogowych, tylko dla przejazdów rowerowych z pominięciem odcinków drogowych oraz z uwzględnieniem wpływu ograniczonej liczby czynników infrastrukturalnych.

Celem badań opisanych w rozdziale 7 była bardziej szczegółowa ocena wpływu czynników infrastrukturalnych na zagrożenie zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów. Zagrożenie reprezentowane było poprzez opóźnienie w ruchu rowerowym wyznaczone na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich, zaś czynniki infrastrukturalne zostały zidentyfikowane na podstawie dwóch baz danych tj. OpenStreetMap oraz CARTO (pkt. 4.4 oraz 4.5). Analizę wykonano w skali makro. Badania umożliwiły ilościową ocenę wpływu czynników infrastrukturalnych na bezpieczeństwo ruchu rowerowego nie tylko na przejazdach rowerowych, ale również na odcinkach pomiędzy skrzyżowaniami. Zidentyfikowano rozwiązania, w pobliżu których rejestrowano potencjalnie niebezpieczne zachowania rowerzystów (tj. zwiększoną liczbę opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach większych bądź równych 0.6m/s^2), jednak nie zaobserwowano zwiększonej liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów. Wskazano tym samym miejsca, gdzie zdarzenia drogowe z udziałem rowerzystów mogą wystąpić w przyszłości, jak również miejsca potencjalnych konfliktów przede wszystkim między niechronionymi uczestnikami ruchu drogowego, których identyfikacja na podstawie danych o zdarzeniach drogowych może być utrudniona.

7.1 Przygotowanie bazy danych

Bazę danych przygotowano wykorzystując utworzoną specjalnie w tym celu aplikację komputerową. Aplikacja w pierwszej kolejności przeszukiwała bazę punktów GPS z systemu Wavelo (pkt. 4.2) w poszukiwaniu punktów o **małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty**. Założono, że małe zagrożenie zdarzeniem drogowym miało miejsce, gdy rowerzysta poruszał się mniej więcej ze stałą prędkością, a przyspieszenia i opóźnienia w ruchu rowerowym nie przekraczały 0.2m/s^2 . Biorąc pod uwagę wyniki badań opisanych w rozdziale 6, przyjęto, że zwiększone zagrożenie zdarzeniem drogowym towarzyszyło sytuacji, gdy opóźnienie w ruchu wynosiło co najmniej 0.6m/s^2 . W badaniach uwzględniono tylko te punkty GPS, dla których prędkość „przed” wykonaniem manewru opóźnienia/przyspieszenia (Tab. 4-1, kol. 8) mieściła się w przedziale 1.4m/s - 15m/s . Prędkość 1.4m/s odpowiada prędkości ruchu pieszego przyjmowanej w analizach przepustowości skrzyżowań (GDDKiA, 2004), zaś osiągnięcie prędkości wyższej od 15m/s w przypadku rowerów miejskich jest wątpliwe i mogło wynikać z zakłóceń sygnału GPS.

Program analizował następnie prostokątny obszar, w centrum którego znajdował się punkt GPS o małym bądź zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem

rowerzysty, rejestrując wystąpienie w tym obszarze poszczególnych czynników infrastrukturalnych, przy czym:

- czynniki infrastrukturalne identyfikowane były na podstawie danych z OpenStreetMap (pkt. 4.4) z podziałem na wyróżnione wcześniej kategorie (Tab. 4-1) oraz na podstawie danych CARTO o infrastrukturze ruchu rowerowego (pkt. 4.5);
- z uwagi na złożoności prowadzonych badań wykonywanych w skali całego miasta, nie uwzględniano występowanie w badanym obszarze poszczególnych klas dróg samochodowych wyróżnionych w OpenStreetMap (Tab. 4-1);
- z powodu braku szczegółowych danych, np. o długości przejazdu rowerowego, liczby pasów dla relacji skrętnych na skrzyżowaniach, parametry te nie było uwzględniane w badaniach, pomimo ich wpływu na bezpieczeństwo ruchu rowerowego wykazanego w dotychczasowych pracach (pkt. 2.1);
- w badaniach pomięto występowanie odcinków dróg z kontraruchem. Kontraruch wprowadzany był na odcinkach ulic w Krakowie od drugiej połowy 2017r. Ponieważ w czerwcu 2017r. (czyli okresu z którego pochodzą szczegółowe dane GPS z systemu Wavelo) takie rozwiązania nie występowały, wpływ kontraruch nie był uwzględniany;
- w celu oceny wpływu wielkości obszaru analizy na uzyskane wyniki, obliczenia przeprowadzono dla obszaru o wymiarach 10x10m, 20x20m, 40x40m oraz 100x100m.

Obecność poszczególnych czynników infrastrukturalnych dla różnych wielkości obszaru analizy została również wyznaczona dla zdarzeń drogowych, które miały miejsce w Krakowie w latach 2016-2018.

W wyniku pracy programu otrzymywano plik csv, w którym każdy wiersz reprezentował pojedynczy punkt GPS o małym bądź zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty lub zdarzenie drogowe. Pojedyncza komórka bazy danych zawierała wartość 1, jeżeli dany czynnik infrastrukturalny wystąpił w analizowanym obszarze, lub 0 w przeciwnym wypadku. Program rejestrował tylko wystąpienie danego czynnika, nie zaś to ile razy pojawia się w analizowanym obszarze. Jeżeli dwa punkty GPS występowały obok siebie, program analizował je oddzielnie, co pozwoliło na uwzględnienie zwiększonego wpływu danego czynnika na zagrożenie w ruchu rowerowym. Ze względu na możliwości obliczeniowe liczbę analizowanych punktów w każdej grupie ograniczono do 100tys. To ograniczenie dotyczyło w rezultacie tylko punktów o małym zagrożeniu zdarzeniem, których w całej bazie danych było łącznie ponad 19 mln. Punkty wylosowane do badań zlokalizowane były w odległościach do 5m i do 10m od odpowiednio 67% i 81% wszystkich punktów o małym zagrożeniu zdarzeniem. Na tej podstawie przyjęto, że uwzględniona w badaniach próba jest reprezentatywna dla całego zbioru punktów o małym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty.

W tabeli 7-1 zestawiono dane o liczbie oraz udziale (wartości podane w nawiasie) punktów o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty i zdarzeń drogowych, które wystąpiły w pobliżu poszczególnych czynników infrastrukturalnych dla różnych wielkości obszaru badań.

Tab. 7-1 Liczba wystąpienia danego czynnika infrastrukturalnego w pobliżu punktów o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty oraz miejsc występowania zdarzeń drogowych dla różnych wielkości obszaru analizy.
Źródło: opracowanie własne

Czynnik infrastrukturalny	Małe zagrożenie zdarzeniem ($ a \leq 0.2 \text{ m/s}^2$) n=100 000				Zwiększone zagrożenie zdarzeniem ($ a \geq 0.6 \text{ m/s}^2$) n=65 791				Zdarzenia drogowe n=1 282			
	10x10m	20x20m	40x40m	100x100m	10x10m	20x20m	40x40m	100x100m	10x10m	20x20m	40x40m	100x100m
Przebieg dla pieszych/przejazd dla rowerzystów z sygnalizacją świetlną	1218 (1.2%)	3356 (3.4%)	7057 (7.1%)	16395 (16.4%)	1752 (2.7%)	9366 (14.2%)	19275 (29.3%)	25959 (39.5%)	128 (10%)	180 (14%)	235 (18.3%)	302 (23.6%)
Przebieg dla pieszych/przejazd dla rowerzystów bez sygnalizacji świetlnej	1827 (1.8%)	5285 (5.3%)	11913 (11.9%)	30182 (30.2%)	2318 (3.5%)	7491 (11.4%)	16020 (24.3%)	28140 (42.8%)	152 (11.9%)	236 (18.4%)	358 (27.9%)	521 (40.6%)
Przebieg dla pieszych/przejazd dla rowerzystów z wyspą zjazdu	114 (0.1%)	339 (0.3%)	847 (0.8%)	2381 (2.4%)	66 (0.1%)	281 (0.4%)	813 (1.2%)	1904 (2.9%)	3 (0.2%)	8 (0.6%)	16 (1.2%)	31 (2.4%)
Przystanek autobusowy	1324 (1.3%)	3236 (3.2%)	7507 (7.5%)	23327 (23.3%)	914 (1.4%)	2665 (4.1%)	7358 (11.2%)	26029 (39.6%)	13 (1%)	40 (3.1%)	125 (9.8%)	422 (32.9%)
Przystanek tramwajowy	209 (0.2%)	840 (0.8%)	3309 (3.3%)	13943 (13.9%)	277 (0.4%)	1141 (1.7%)	4343 (6.6%)	18911 (28.7%)	0 (0%)	9 (0.7%)	48 (3.7%)	237 (18.5%)
Pęta autobusowa/tramwajowa	25 (<1%)	65 (0.1%)	142 (0.1%)	517 (0.5%)	37 (0.1%)	93 (0.1%)	191 (0.3%)	656 (1%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (0.1%)	4 (0.3%)
Skrzyżowanie A-7	27 (<1%)	146 (0.1%)	600 (0.6%)	1825 (1.8%)	34 (0.1%)	352 (0.5%)	1196 (1.8%)	2533 (3.9%)	1 (0.1%)	2 (0.2%)	19 (1.5%)	33 (2.6%)
Rondo	159 (0.2%)	436 (0.4%)	1302 (1.3%)	3304 (3.3%)	82 (0.1%)	381 (0.6%)	1691 (2.6%)	3352 (5.1%)	6 (0.5%)	8 (0.6%)	24 (1.9%)	37 (2.9%)
Skrzyżowanie B-20	5 (<1%)	16 (<1%)	31 (<1%)	228 (0.2%)	4 (<1%)	7 (<1%)	13 (<1%)	120 (0.2%)	1 (0.1%)	1 (0.1%)	2 (0.2%)	5 (0.4%)
Restauracja	444 (0.4%)	1990 (2%)	6617 (6.6%)	21519 (21.5%)	222 (0.3%)	1211 (1.8%)	4802 (7.3%)	17393 (26.4%)	2 (0.2%)	24 (1.9%)	111 (8.7%)	318 (24.8%)
Szkola wyższa	202 (0.2%)	721 (0.7%)	2115 (2.1%)	6424 (6.4%)	308 (0.5%)	705 (1.1%)	1459 (2.2%)	4339 (6.6%)	2 (0.2%)	12 (0.9%)	28 (2.2%)	65 (5.1%)
Szkola	122 (0.1%)	471 (0.5%)	1750 (1.8%)	6494 (6.5%)	67 (0.1%)	314 (0.5%)	941 (1.4%)	3861 (5.9%)	3 (0.2%)	12 (0.9%)	30 (2.3%)	86 (6.7%)
Szpital	102 (0.1%)	486 (0.5%)	1422 (1.4%)	3138 (3.1%)	24 (<1%)	125 (0.2%)	429 (0.7%)	1381 (2.1%)	2 (0.2%)	8 (0.6%)	20 (1.6%)	38 (3%)
Sklep	918 (0.9%)	4011 (4%)	13132 (13.1%)	36571 (36.6%)	810 (1.2%)	3734 (5.7%)	12307 (18.7%)	32146 (48.9%)	11 (0.9%)	55 (4.3%)	226 (17.6%)	560 (43.7%)
Obiekt związany z rozrywką	151 (0.2%)	626 (0.6%)	2090 (2.1%)	8404 (8.4%)	95 (0.1%)	452 (0.7%)	1222 (1.9%)	4804 (7.3%)	2 (0.2%)	7 (0.5%)	30 (2.3%)	116 (9%)
Obiekt związany z czasem wolnym	1737 (1.7%)	4848 (4.8%)	10721 (10.7%)	25266 (25.3%)	1460 (2.2%)	3903 (5.9%)	7900 (12%)	16984 (25.8%)	17 (1.3%)	61 (4.8%)	127 (9.9%)	252 (19.7%)
Hotel	100 (0.1%)	496 (0.5%)	2362 (2.4%)	9460 (9.5%)	58 (0.1%)	302 (0.5%)	1570 (2.4%)	8333 (12.7%)	0 (0%)	5 (0.4%)	30 (2.3%)	138 (10.8%)
Obiekt o podziwanym zwiększonym ruchu turystycznym	190 (0.2%)	790 (0.8%)	2484 (2.5%)	9139 (9.1%)	142 (0.2%)	580 (0.9%)	1641 (2.5%)	6978 (10.6%)	0 (0%)	3 (0.2%)	21 (1.6%)	94 (7.3%)
Parking	37 (<1%)	152 (0.2%)	467 (0.5%)	2578 (2.6%)	44 (0.1%)	150 (0.2%)	442 (0.7%)	2019 (3.1%)	2 (0.2%)	3 (0.2%)	10 (0.8%)	46 (3.6%)
Droga dla rowerów	34871 (34.9%)	34871 (34.9%)	34871 (34.9%)	34871 (34.9%)	23067 (35.1%)	23067 (35.1%)	23067 (35.1%)	23067 (35.1%)	430 (33.5%)	430 (33.5%)	430 (33.5%)	430 (33.5%)
Chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym na zasadach PORD	5302 (5.3%)	5302 (5.3%)	5302 (5.3%)	5302 (5.3%)	1989 (3%)	1989 (3%)	1989 (3%)	1989 (3%)	33 (2.6%)	33 (2.6%)	33 (2.6%)	33 (2.6%)
Chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym z znakami C-16 i T-22	7819 (7.8%)	7819 (7.8%)	7819 (7.8%)	7819 (7.8%)	3499 (5.3%)	3499 (5.3%)	3499 (5.3%)	3499 (5.3%)	32 (2.5%)	32 (2.5%)	32 (2.5%)	32 (2.5%)
Ciąg pieszo-rowerowy	6945 (6.9%)	6945 (6.9%)	6945 (6.9%)	6945 (6.9%)	3734 (5.7%)	3734 (5.7%)	3734 (5.7%)	3734 (5.7%)	50 (3.9%)	50 (3.9%)	50 (3.9%)	50 (3.9%)
Kontrapas	4711 (4.7%)	4711 (4.7%)	4711 (4.7%)	4711 (4.7%)	3091 (4.7%)	3091 (4.7%)	3091 (4.7%)	3091 (4.7%)	92 (7.2%)	92 (7.2%)	92 (7.2%)	92 (7.2%)
Pas rowerowy	833 (0.8%)	833 (0.8%)	833 (0.8%)	833 (0.8%)	543 (0.8%)	543 (0.8%)	543 (0.8%)	543 (0.8%)	6 (0.5%)	6 (0.5%)	6 (0.5%)	6 (0.5%)

gdzie: wartości w () oznaczają udział punktów (o małym lub zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem) lub udział zdarzeń drogowych, które wystąpiły w pobliżu danego czynnika infrastrukturalnego

Analizując dane przedstawione w tabeli 7-1 można zauważyć, że liczba punktów zidentyfikowanych w pobliżu skrzyżowań z wlotami podporządkowanymi znakami A-7 i B-20 jest bardzo niewielka. Powodem uzyskania takich wyników był najprawdopodobniej fakt, że skrzyżowania te zidentyfikowano na podstawie znaków pionowych A-7 i B-20, które (jak potwierdziła wizualna analiza danych wykonana w programie QGIS) nie były oznaczone na każdym skrzyżowaniu, na którym występują. Z tego względu wpływ tych skrzyżowań nie był analizowany w dalszych badaniach.

7.2 Metoda badań

W badaniach przyjęto dwa założenia:

- jeżeli czynnik infrastrukturalny nie miałby wpływu na bezpieczeństwo ruchu rowerowego, to opóźnienia o wartościach 0.6m/s^2 lub większych (utożsamiane ze zwiększonym zagrożeniem zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty) występowałyby w sieci drogowej w sposób losowy. Prawdopodobieństwo, że zostałyby zarejestrowane w pobliżu danego czynnika infrastrukturalnego byłoby wówczas zbliżone do prawdopodobieństwa dla przyspieszeń i opóźnień o wartościach nieprzekraczających 0.2m/s^2 . Jeżeli zatem udział opóźnień co najmniej równych 0.6m/s^2 , które zarejestrowano w pobliżu danego czynnika infrastrukturalnego jest statystycznie istotnie większy od udziału dla przyspieszeń i opóźnień o wartościach nieprzekraczających 0.2m/s^2 , można stwierdzić, że czynnik ten negatywnie oddziałuje na zachowania rowerzystów, bardziej gwałtowne opóźnienia są w jego pobliżu stosunkowo częściej rejestrowane, a zagrożenie konfliktem w ruchu i w konsekwencji zdarzeniem drogowym jest zwiększone;
- jeżeli udział opóźnień co najmniej równych 0.6m/s^2 , które zarejestrowano w pobliżu danego czynnika infrastrukturalnego jest statystycznie istotnie większy od udziału dla zdarzeń drogowych może to oznaczać, że w pobliżu tego czynnika zagrożenie zdarzeniami drogowymi jest większe niż wynikające z raportów policyjnych. Miejsca te są zatem miejscami potencjalnie niebezpiecznymi, gdzie zdarzenia drogowe mogą być obserwowane w przyszłości, lub gdzie mogą występować głównie konflikty rower-rower oraz rower-pieszcy. Miejsca te, z uwagi na nieraportowanie części zdarzeń drogowych, mogłyby nie być możliwe do zidentyfikowania wyłącznie na podstawie danych wypadkowych.

Biorąc pod uwagę powyższe założenia dla każdego czynnika infrastrukturalnego wykonano dwa porównania:

- udziału punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty (tj. punktów GPS o opóźnieniach co najmniej równych 0.6m/s^2), które wystąpiły w pobliżu danego czynnika infrastrukturalnego, z udziałem dla punktów o małym zagrożeniu zdarzeniem (tj. punktów GPS o $|a| \leq 0.2\text{m/s}^2$);
- udziału punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty (tj. punktów GPS o opóźnieniach co najmniej równych 0.6m/s^2), które wystąpiły w pobliżu danego czynnika infrastrukturalnego, z udziałem dla zarejestrowanych zdarzeń drogowych, które miały miejsce w latach 2016-2018.

Analizę wykonano na podstawie dwustronnego **testu istotności dla dwóch wskaźników struktury** (Greń, 1972). W przeciwieństwie do hipotezy zerowej H_0 , hipoteza alternatywna testu zakłada występowanie statystycznie istotnej różnicy pomiędzy wskaźnikiem struktury w obu populacjach. Hipoteza zerowa może być odrzucona jeżeli wartość bezwzględna statystyki testu u_s (wz. 7.4) jest większa od wartości krytycznej wyznaczonej z rozkładu normalnego $N(0,1)$ dla przyjętego poziomu ufności $1-\alpha$.

$$n = \frac{n_i \cdot n_j}{n_i + n_j} \quad [-] \quad (7.1)$$

$$\bar{p} = \frac{m_i + m_j}{n_i + n_j} \quad [-] \quad (7.2)$$

$$\bar{q} = 1 - \bar{p} \quad [-] \quad (7.3)$$

$$u_s = \frac{\frac{m_i}{n_i} - \frac{m_j}{n_j}}{\sqrt{\frac{\bar{p}\bar{q}}{n}}} \quad [-] \quad (7.4)$$

gdzie: u_s – statystyka testu [-];

p_i, p_j – prawdopodobieństwo sukcesu (występowania czynnika infrastrukturalnego) w populacjach i i j [-];

m_i, m_j – liczba sukcesów (występowania czynnika infrastrukturalnego) w próbkach i i próbkach j [-];

n_i, n_j – liczebność próby i i próbki j [-];

\bar{p} – prawdopodobieństwa sukcesu (występowania czynnika infrastrukturalnego) w obu próbkach [-];

\bar{q} – prawdopodobieństwa porażki (braku czynnika infrastrukturalnego) w obu próbkach [-].

Dla czynników infrastrukturalnych, których wpływ na zagrożenie bezpieczeństwa ruchu rowerowego i występowanie zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów okazał się statystycznie istotny na poziomie ufności 0.95, wyznaczono zdefiniowany na potrzeby niniejszych badań **wskaźnik zagrożenia RF** (wz. 7.5).

$$RF = \frac{p_i}{p_j} \quad [-] \quad (7.5)$$

gdzie: RF – wskaźnik zagrożenia [-];

p_i – udział punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty (tj. punktów GPS o opóźnieniach co najmniej równych 0.6m/s^2), które wystąpiły w pobliżu danego czynnika infrastrukturalnego [-];

p_j – udział punktów o małym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty (tj. punktów GPS o $|a| \leq 0.2 \text{ m/s}^2$) lub udział zdarzeń drogowych, które wystąpiły w pobliżu danego czynnika infrastrukturalnego [-].

Wartość wskaźnika zagrożenia RF dla danego czynnika infrastrukturalnego wskazuje:

- w przypadku wskaźnika obliczonego dla porównania punktów o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym - ile razy w pobliżu danego czynnika infrastrukturalnego wzrasta zagrożenie zdarzeniem drogowym w porównaniu do zagrożenia przy założeniu braku wpływu tego czynnika na brd rowerzystów;
- w przypadku wskaźnika obliczanego dla porównania punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem i zdarzeń drogowych - ile razy w pobliżu danego czynnika infrastrukturalnego wzrasta zagrożenie zdarzeniem drogowym w porównaniu do zagrożenia wynikającego z raportów policyjnych.

Wskaźnik zagrożenia RF stanowi analogię do współczynnika CMF (*ang. Crash Modification Factor*), pozwalającym obliczyć spodziewaną liczbę wypadków po wprowadzeniu zmian w zakresie organizacji ruchu lub rozwiązań projektowych (Kolody i in., 2014).

7.3 Wyniki badań

W tabelach 7-2 i 7-3 zestawiono wyniki testu istotności dla dwóch wskaźników struktury dla różnych wielkości obszaru analizy odpowiednio dla porównania punktów o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty (Tab. 7-2) oraz porównania punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty i zdarzeń drogowych (Tab. 7-3). Pogrubioną czcionką oznaczono wyniki, które na poziomie ufności 0.95 wskazują na statystycznie istotną różnicę porównywanych wskaźników struktury.

Analizując wyniki dla punktów o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty można w ogólności stwierdzić, że przejścia dla pieszych i przejazdy rowerowe (zarówno z jak i bez sygnalizacji świetlnej), miejsca parkingowe i postoju taksówek, gdzie ruch rowerowy krzyżuje się z ruchem samochodowym, jak również przystanki tramwajowe i pętle komunikacji zbiorowej, sklepy i obiekty związane z czasem wolnym, gdzie może mieć miejsce większa liczba konfliktów pieszy-rower, negatywnie wpływają na bezpieczeństwo rowerzystów. Udział opóźnień co najmniej równych $0,6 \text{ m/s}^2$, które wystąpiły w pobliżu ww. elementów infrastruktury, był bowiem statystycznie istotnie większy (na poziomie ufności 0.95) od udziału dla przyspieszeń i opóźnień nieprzekraczających 0.2 m/s^2 . Zwiększone zagrożenie zdarzeniem drogowym zarejestrowano również w pobliżu przystanków autobusowych, rond oraz przejść dla pieszych i przejazdów rowerowych z wyspą azylu dla obszaru analizy $20 \times 20 \text{ m}$ i większych, w pobliżu hoteli dla obszaru analizy $100 \times 100 \text{ m}$ oraz w pobliżu szkół wyższych dla obszaru analizy $10 \times 10 \text{ m}$ oraz $20 \times 20 \text{ m}$.

Zmiana wpływu czynnika infrastrukturalnego na zagrożenie zdarzeniem drogowym wraz ze zmianą wielkości obszaru analizy może wynikać ze sposobu oznaczania danego czynnika w OSM. Przystanki autobusowe i tramwajowe oznaczane są w miejscach lokalizacji słupów przystankowych lub wiat przystankowych jako węzły. Konflikty pieszy-rower mogą

występować jednak na całej długości zatoki autobusowej czy przystanku, a zatem w odległościach większych niż 5m czy 10m od węzła. Szpitale, hotele, szkoły itp. mogą być oznaczone jako relacje (jeżeli odwzorowana jest granica działki) lub węzły (punkty w środku budynku). W przypadku ich oznaczenia za pomocą węzłów nie jest możliwa rejestracja ich występowania dla mniejszych obszarów nawet jeżeli rowerzysta poruszał się w pobliżu wjazdu/wejścia do danego obiektu.

Tab. 7-2 Wyniki testu istotności dwóch wskaźników struktury dla porównania punktów o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty.

Źródło: opracowanie własne

Czynnik infrastrukturalny	Wielkość obszaru analizy							
	10x10m		20x20m		40x40m		100x100m	
	Statystyka u_s	wartość p	Statystyka u_s	wartość p	Statystyka u_s	wartość p	Statystyka u_s	wartość p
Przejście dla pieszych/przejazd dla rowerzystów z sygnalizacją świetlną	21.702	<0.001	81.427	<0.001	121.210	<0.001	105.349	<0.001
Przejście dla pieszych/przejazd dla rowerzystów bez sygnalizacji świetlnej	21.643	<0.001	45.573	<0.001	66.191	<0.001	52.520	<0.001
Przejście dla pieszych/przejazd dla rowerzystów z wyspą azylu	-0.828	0.408	2.876	0.004	7.778	<0.001	6.441	<0.001
Przystanek autobusowy	1.126	0.260	8.760	<0.001	25.638	<0.001	70.735	<0.001
Przystanek tramwajowy	7.813	<0.001	16.396	<0.001	31.257	<0.001	73.967	<0.001
Zajezdnia autobusowa/tramwajowa	3.219	0.001	4.930	<0.001	6.599	<0.001	11.411	<0.001
Rondo	-1.797	0.072	4.071	<0.001	18.976	<0.001	18.174	<0.001
Restauracja	-3.356	0.001	-2.162	0.031	5.364	<0.001	23.115	<0.001
Szkoła wyższa	9.574	<0.001	7.563	<0.001	1.408	0.159	1.384	0.166
Szkoła	-1.190	0.234	0.182	0.856	-5.040	<0.001	-5.149	<0.001
Szpital	-4.736	<0.001	-9.731	<0.001	-14.597	<0.001	-12.710	<0.001
Sklep	6.143	<0.001	15.713	<0.001	30.810	<0.001	49.696	<0.001
Obiekt związany z rozrywką	-0.342	0.733	1.512	0.130	-3.312	0.001	-8.108	<0.001
Obiekt związany z czasem wolnym	6.984	<0.001	9.661	<0.001	8.118	<0.001	2.510	0.012
Hotel	-0.765	0.445	-1.064	0.287	0.319	0.750	20.633	<0.001
Obiekt o spodziewanym zwiększonym ruchu turystycznym	1.151	0.250	2.015	0.044	0.131	0.896	9.867	<0.001
Parking	2.693	0.007	3.550	<0.001	5.526	<0.001	5.955	<0.001
Droga dla rowerów	0.794	0.427	0.794	0.427	0.794	0.427	0.794	0.427
Chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym na zasadach PORD	-22.139	<0.001	-22.139	<0.001	-22.139	<0.001	-22.139	<0.001
Chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym znakami C-16 i T-22	-19.752	<0.001	-19.752	<0.001	-19.752	<0.001	-19.752	<0.001
Ciąg pieszo-rowerowy	-10.301	<0.001	-10.301	<0.001	-10.301	<0.001	-10.301	<0.001
Kontrapas	-0.120	0.904	-0.120	0.904	-0.120	0.904	-0.120	0.904
Pas rowerowy	-0.168	0.866	-0.168	0.866	-0.168	0.866	-0.168	0.866

gdzie: znak „-” przy wartości statystyki u_s oznacza, że udział dla punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty był mniejszy niż dla punktów o małym zagrożeniu zdarzeniem

Udział punktów o małym zagrożeniu zdarzeniem drogowym, które zarejestrowano na ciągach pieszo-rowerowych, chodnikach z ruchem rowerowym dopuszczonym znakami C-16 i T-22 oraz na zasadach PORD (patrz pkt. 4.5) (gdzie ruch rowerowy krzyżuje się z ruchem pieszym, a prędkości rowerzystów mogą być niższe w porównaniu do np. prędkości na drogach dla rowerów) oraz w pobliżu szpitali były statystycznie istotnie większy od udziału dla punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty. Podobne wyniki zaobserwowano również w przypadku szkół i obiektów związanych z rozrywką (np. kina, teatry), jednak wpływ ten obserwowany jest dla większych obszarów analizy (tj. 40x40m i 100x100m). Wpływ restauracji i obiektów o spodziewanym zwiększonym

ruchu turystycznym na zagrożenie zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów jest niejednoznaczny.

Tab. 7-3 Wyniki testu istotności dwóch wskaźników struktury dla porównania punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem i zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów.

Źródło: opracowanie własne

Czynnik infrastrukturalny	Wielkość obszaru analizy							
	10x10m		20x20m		40x40m		100x100m	
	Statystyka u_s	wartość p	Statystyka u_s	wartość p	Statystyka u_s	wartość p	Statystyka u_s	wartość p
Przejście dla pieszych/przejazd dla rowerzystów z sygnalizacją świetlną	-15.730	<0.001	0.198	0.843	8.563	<0.001	11.552	<0.001
Przejście dla pieszych/przejazd dla rowerzystów bez sygnalizacji świetlnej	-15.691	<0.001	-7.800	<0.001	-2.951	0.003	1.528	0.127
Przejście dla pieszych/przejazd dla rowerzystów z wyspą azylu	-1.479	0.139	-1.066	0.286	-0.040	0.968	1.008	0.313
Przystanek autobusowy	1.140	0.254	1.677	0.094	1.615	0.106	4.822	<0.001
Przystanek tramwajowy	2.328	0.020	2.820	0.005	4.096	<0.001	8.054	<0.001
Zajezdnia autobusowa/tramwajowa	0.849	0.396	1.347	0.178	1.409	0.159	2.461	0.014
Rondo	-3.364	<0.001	-0.210	0.834	1.569	0.127	3.576	<0.001
Restauracja	1.115	0.265	-0.083	0.934	-1.850	0.064	1.313	0.189
Szkoła wyższa	1.632	0.103	0.467	0.640	0.081	0.935	2.183	0.029
Szkoła	-1.452	0.147	-2.339	0.019	-2.701	0.007	-1.265	0.206
Szpital	-2.153	0.031	-3.460	<0.001	-3.949	<0.001	-2.132	0.033
Sklep	1.203	0.229	2.128	0.033	0.980	0.327	3.674	<0.001
Obiekt związany z rozrywką	-0.108	0.914	0.607	0.544	-1.265	0.206	-2.375	0.018
Obiekt związany z czasem wolnym	2.158	0.031	1.766	0.077	2.296	0.022	4.998	<0.001
Hotel	1.064	0.287	0.363	0.716	0.107	0.914	2.030	0.042
Obiekt o spodziewanym zwiększonym ruchu turystycznym	1.665	0.096	2.474	0.013	1.953	0.051	3.780	<0.001
Parking	-1.207	0.227	-0.045	0.964	-0.469	0.639	-1.066	0.287
Droga dla rowerów	1.130	0.258	1.130	0.258	1.130	0.258	1.130	0.258
Chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym na zasadach PORD	0.931	0.352	0.931	0.352	0.931	0.352	0.931	0.352
Chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym znakami C-16 i T-22	4.481	<0.001	4.481	<0.001	4.481	<0.001	4.481	<0.001
Ciąg pieszo-rowerowy	2.729	0.006	2.729	0.006	2.729	0.006	2.729	0.006
Kontrapas	-4.133	<0.001	-4.133	<0.001	-4.133	<0.001	-4.133	<0.001
Pas rowerowy	1.406	0.160	1.406	0.160	1.406	0.160	1.406	0.160

gdzie: znak „-” przy wartości statystyki u_s oznacza, że udział dla punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty były mniejszy niż dla zdarzeń drogowych

Niezależenie od wielkości obszaru analizy udział zdarzeń drogowych, które wystąpiły na kontrapasach był statystycznie istotnie większy na poziomie ufności 0.95 od udziału dla opóźnień co najmniej równych 0.6m/s^2 (Tab. 7-3). Podobne rezultaty zaobserwowano w przypadku szpitali (statystycznie istotny wpływ dla obszaru $20\text{x}20\text{m}$ i większych), przejść dla pieszych i przejazdów rowerowych bez sygnalizacji świetlnej (wpływ zanika dla obszaru o wielkości $100\text{x}100\text{m}$) oraz obiektów związanych z rozrywką (tylko dla obszaru $100\text{x}100\text{m}$). Udział opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach co najmniej równych 0.6m/s^2 rejestrowanych na ciągach pieszo-rowerowych oraz chodnikach z ruchem rowerowym dopuszczonym znakami C-16 i T-22 był statystycznie istotnie większy od udziału dla zdarzeń drogowych. Może to wynikać z faktu nieraportowania części zdarzeń drogowych (zwłaszcza tych pomiędzy niechronionymi uczestnikami ruchu drogowego), które mogą występować częściej w pobliżu ww. typów infrastruktury rowerowej. Podobne wyniki obserwuje się dla przystanków tramwajowych i obiektów o spodziewanym zwiększonym ruchu turystycznym

(dla obszaru analizy 20x20m i większych) oraz przystanków autobusowych, pętli komunikacji zbiorowej, szkół wyższych oraz hoteli (jedynie dla obszaru analizy 100x100m). Wpływ pozostałych czynników infrastrukturalnych jest niejednoznaczny.

Wartości wskaźnika zagrożenia RF (wz. 7.5) dla czynników infrastrukturalnych, których wpływ na zagrożenie bezpieczeństwa w ruchu rowerowym i występowanie zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów okazał się statystycznie istotny na poziomie ufności 0.95, przedstawiono w tabelach 7-4 oraz 7-5 odpowiednio dla porównania punktów o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty oraz punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym i zdarzeń drogowych.

Tab. 7-4 Wskaźniki zagrożenia RF dla porównania punktów o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty.

Źródło: opracowanie własne

Czynnik infrastrukturalny	Wielkość obszaru analizy			
	10x10m	20x20m	40x40m	100x100m
Przejście dla pieszych/przejazd dla rowerzystów z sygnalizacją świetlną	2.19	4.24	4.15	2.41
Przejście dla pieszych/przejazd dla rowerzystów bez sygnalizacji świetlnej	1.93	2.15	2.04	1.42
Przejście dla pieszych/przejazd dla		1.26	1.46	1.22
Przystanek autobusowy		1.25	1.49	1.70
Przystanek tramwajowy	2.01	2.06	1.99	2.06
Pętla autobusowa/tramwajowa	2.25	2.17	2.04	1.93
Rondo		1.33	1.97	1.54
Restauracja	0.76	0.92	1.10	1.23
Szkoła wyższa	2.32	1.49		
Szkoła			0.82	0.90
Szpital	0.36	0.39	0.46	0.67
Sklep	1.34	1.41	1.42	1.34
Obiekt związany z rozrywką			0.89	0.87
Obiekt związany z czasem wolnym	1.28	1.22	1.12	1.02
Hotel				1.34
Obiekt o spodziewanym zwiększonym ruchu turystycznym		1.12		1.16
Parking	1.81	1.50	1.44	1.19
Chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym na zasadach PORD	0.57	0.57	0.57	0.57
Chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym znakami C-16 i T-22	0.68	0.68	0.68	0.68
Ciąg pieszo-rowerowy	0.82	0.82	0.82	0.82

W przypadku porównania punktów o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty najwyższą wartość wskaźnika zagrożenia RF równą 4.24 zaobserwowano dla przejść dla pieszych i przejazdów rowerowych z sygnalizacją świetlną i obszaru analizy 40x40m (Tab. 7-4). Oznacza to, że w pobliżu tego rodzaju przejść i przejazdów liczba rejestrowanych opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach co najmniej równych 0.6m/s^2 jest ponad 4 razy większa, niż spodziewana, przy założeniu braku wpływu tego typu przejść na bezpieczeństwo w ruchu rowerowym. Najniższą wartość wskaźnika RF równą 0.36 zarejestrowano dla szpitali i obszaru analizy 10x10m. W pobliżu szpitali liczba opóźnień o wartościach co najmniej równych 0.6m/s^2 jest ok. 3 razy niższa niż spodziewana. Ruch rowerowy odbywa się tam zatem w sposób bardziej płynny i jednostajny.

Tab. 7-5 Wskaźniki zagrożenia RF dla porównania punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym i zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów.

Źródło: opracowanie własne

Czynnik infrastrukturalny	Wielkość obszaru analizy			
	10x10m	20x20m	40x40m	100x100m
Przejście dla pieszych/przejazd dla rowerzystów z sygnalizacją świetlną	0.27		1.60	1.67
Przejście dla pieszych/przejazd dla rowerzystów bez sygnalizacji świetlnej	0.30	0.62	0.87	
Przystanek autobusowy				1.20
Przystanek tramwajowy*		2.47	1.76	1.55
Pętla autobusowa/tramwajowa				3.20
Rondo	0.27			1.77
Szkoła wyższa				1.30
Szkoła		0.51	0.61	0.87
Szpital	0.23	0.30	0.42	0.71
Sklep		1.32		1.12
Obiekt związany z rozrywką				0.81
Obiekt związany z czasem wolnym	1.67		1.21	1.31
Hotel				1.18
Obiekt o spodziewanym zwiększonym ruchu turystycznym		3.77		1.45
Chodnik z ruchem rowerowym dopuszczonym znakami C-16 i T-22	2.15	2.15	2.15	2.15
Kontrapas	0.65	0.65	0.65	0.65

gdzie: (*) – dla obszaru analizy 10x10m w pobliżu przystanków tramwajowych nie zarejestrowano ani jednego zdarzenia drogowego z udziałem rowerzysty, dlatego pomimo stwierdzenia statystycznie istotnej różnicy dwóch udziałów niemożliwe było obliczenie wskaźnika zagrożenia RF

W przypadku porównania punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym i zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów najwyższą wartość wskaźnika zagrożenia RF równą 3.77 zaobserwowano dla obiektów o spodziewanym zwiększonym ruchu turystycznym i obszaru analizy 40x40m (Tab. 7-5). Liczba opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach co najmniej równych 0.6m/s^2 zarejestrowania w pobliżu tych miejsc była niemal 4 razy większa, niż spodziewana wynikająca z danych o zdarzeniach drogowych. Miejsca te są zatem miejscami potencjalnie niebezpiecznymi, gdzie zdarzenia drogowe mogą wystąpić w przyszłości, bądź gdzie mogą występować głównie konflikty pomiędzy niechronionymi uczestnikami ruchu drogowego. Najniższą wartość wskaźnika RF równą 0.23 zarejestrowano dla szpitali i obszaru analizy 10x10m. Liczba opóźnień o wartościach co najmniej równych 0.6m/s^2 zaobserwowana w pobliżu szpitali była ok. 4.3 razy niższa niż spodziewana wynikająca z liczby rejestrowanych w tych miejscach zdarzeń drogowych.

W analogiczny sposób należy interpretować pozostałe wartości wskaźników zagrożenia RF zaprezentowane w tabelach.

7.4 Wnioski

Celem badań opisanych w niniejszym rozdziale była ilościowa ocena wpływu czynników infrastrukturalnych na zagrożenie bezpieczeństwa ruchu rowerowego. Wyniki opisanych badań wskazują, że zagrożenie zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty (utożsamiane z pojawieniem się opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach co najmniej równych 0.6m/s^2) wzrasta istotnie nie tylko na przejazdach rowerowych czy w pobliżu miejsc parkingowych, gdzie ruch rowerowy krzyżuje się z ruchem samochodowym, ale również w pobliżu miejsc

przecięć ruchu rowerowego z ruchem pieszym, takich jak przystanki i pętle tramwajowe i autobusowe, sklepy, obiekty związane z czasem wolnym (np. parki, place zabaw). Uzyskane wyniki są zbieżne z danymi literaturowymi wskazującymi na negatywny wpływ skrzyżowań (Wang i Nihan, 2004), parkowania (Wachtel i Lewiston, 1994; Nosal i Miranda-Moreno, 2012; Teschke i in., 2012; Vandenbulcke, Thomas i Int Panis, 2014), przystanków komunikacji zbiorowej (Oh i in., 2008; Strauss, Miranda-Moreno i Morency, 2013; Strauss, Miranda-Moreno i Morency, 2014; Liggett i in., 2016) na bezpieczeństwo ruchu rowerowego. Co więcej, w pobliżu przystanków tramwajowych, sklepów, obiektów związanych z czasem wolnym i o spodziewanym zwiększonym ruchu turystycznym, a także na chodnikach z ruchem rowerowym dopuszczonym znakami C-16 i T-22 opóźnienia co najmniej równe 0.6m/s^2 były obserwowane statystycznie istotnie częściej niż wynikałoby z liczby rejestrowanych w tych miejscach zdarzeń drogowych. Wyniki badań wskazują zatem, że na podstawie miary pośredniej wyznaczonej na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich ruchu rowerowego, jaką jest liczba opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach $\geq 0.6\text{m/s}^2$, możliwa byłaby identyfikacja miejsc konfliktów rower-rower oraz rower-pieszy. Zdarzenia drogowe między niechronionymi uczestnikami ruchu drogowego są często nierejestrowane przez policję i nie figurują w statystykach wypadkowych, co potwierdzają dane literaturowe. Dane GPS z systemu rowerów miejskich mogą zatem stanowić uzupełnienie bazy wiedzy obok danych o zdarzeniach drogowych i być wspólnie z nimi wykorzystywane do kwantyfikacji wpływu czynników infrastrukturalnych na bezpieczeństwo rowerzystów w ruchu drogowym oraz identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów.

W celu identyfikacji infrastruktury drogowej i zagospodarowania otoczenia drogi w skali całego miasta wykorzystano w badaniach bazę danych OpenStreetMap. Wykazana zmiana wpływu czynnika infrastrukturalnego na zagrożenie zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów wraz ze zmianą wielkości obszaru analizy wskazuje, że wielkość obszaru powinna być dostosowana do sposobu oznaczania danego czynnika infrastrukturalnego w bazie OpenStreetMap.

8. Identyfikacja miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów z wykorzystaniem miar pośrednich

Przedmiotem wielu badań są średnie wartości analizowanych zmiennych (np. średnia prędkość pojazdów, średnia temperatura powietrza, średnie wynagrodzenie), a obserwacje odstające (ekstremalne) są często odrzucane (np. podczas budowania modeli regresyjnych) i nie podlegają analizie. Ekstremalne wartości badanych zmiennych (np. prędkości wiatru, temperatury powietrza) występują zazwyczaj bardzo rzadko, niekiedy nie są w ogóle możliwe do zaobserwowania przy rozsądnych długościach okresu obserwacji, czy na podstawie wieloletnich danych. Wystąpienie ekstremalnych wartości badanych zmiennych jest z reguły niepożądane. Z tego względu w niektórych dziedzinach nauki prognozowanie wystąpienia zdarzeń ekstremalnych jest kluczowe. W tym celu wykorzystywana jest teoria wartości ekstremalnych (*ang. Extreme Value Theory, EVT*). Jest to gałąź statystyki służąca do prognozowania prawdopodobieństwa wystąpienia ekstremalnych wartości analizowanych zmiennych na podstawie ograniczonej liczby danych historycznych. Teoria ta jest od dawna wykorzystywana przede wszystkim w naukach przyrodniczych (np. hydrologii, do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia stanu wód przekraczających poziom dopuszczalny) i analizach finansowych (np. do oceny prawdopodobieństwa skrajnie wysokich wypłat odszkodowań), jednak jej zastosowanie w analizach ruchu drogowego nie jest tak powszechne.

Wykorzystanie teorii wartości ekstremalnych do szacowania prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń drogowych zostało po raz pierwszy zaproponowane w (Campbell, Jokschi Green, 1996). W pracy (Songchitruksa i Tarko, 2006) wykazano, że oszacowana przy wykorzystaniu teorii wartości ekstremalnych liczba wystąpień wartości $PET \leq 0s$ (utożsamianej z wystąpieniem zdarzenia w ruchu drogowym) w okresie 4 lat na podstawie wartości PET rejestrowanych w trakcie 8-godzinnych pomiarów terenowych, jest powiązana z obserwowaną liczbą wypadków z okresu 4 lat. Metoda ta była stosowana również m.in. w pracach (Farah i Azevedo, 2017; Zheng i in., 2018; Fu, Sayed i Zheng, 2020; Arun i in., 2021), jednak nie w odniesieniu do analiz bezpieczeństwa ruchu rowerowego.

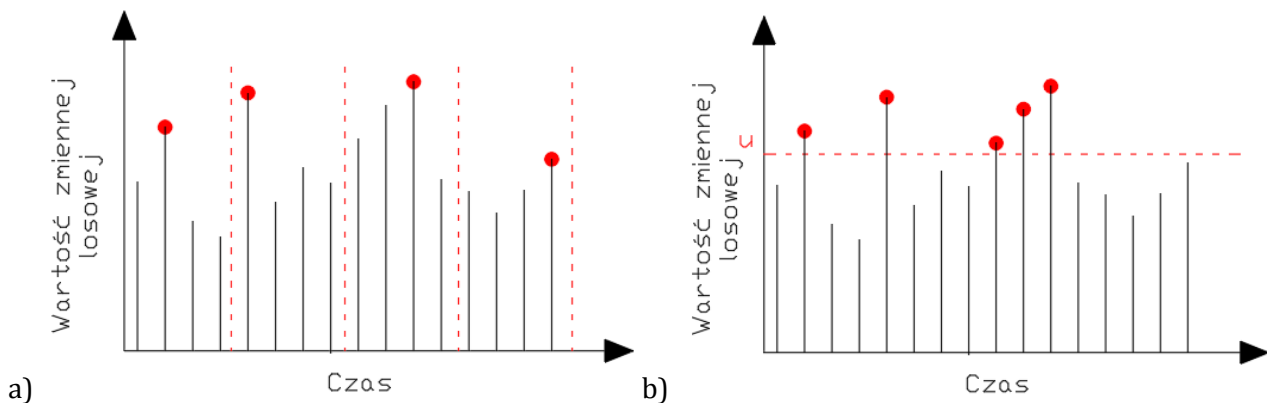
Celem badań własnych opisanych w rozdziale 8 była ocena możliwości identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów na podstawie prawdopodobieństwa wystąpienia ekstremalnych wartości opóźnienia w ruchu rowerowym. Podstawowym problemem badawczym jest określenie granicznej wartości opóźnienia, która mogłaby być wykorzystywana w tego typu badaniach, której liczba wystąpień w przyjętym okresie analizy reprezentowałaby poziom bezpieczeństwa ruchu rowerowego w danej lokalizacji. W tym celu, na podstawie danych GPS z 1 miesiąca (tj. czerwca 2017r.) o opóźnieniach w ruchu rowerów Wavelo, wyznaczono parametry rozkładów wartości ekstremalnych, oszacowano ile razy w okresie analizy równym 3 lata (2017-2019r.) wystąpiły opóźnienia o wartościach nie mniejszych niż zadane oraz wskazano wartość opóźnienia, której liczba wystąpień w przyjętym okresie analizy była najlepiej powiązana z liczbą zarejestrowanych w tym samym okresie zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów. Analizę wykonano dla wybranej grupy przejazdów rowerowych wykorzystując bazę danych opisaną w pkt. 6.2.

8.1 Teoria wartości ekstremalnych

Przedmiotem badań w teorii wartości ekstremalnych jest rozkład ekstremalnych wartości obserwowanej zmiennej losowej. Parametry rozkładu obliczane są na podstawie dostępnych danych historycznych. Znając postać rozkładu można wyznaczyć tzw. okres powrotu (*ang. return period*), czyli okres, po którym dana wartość zmiennej losowej zostanie przekroczona, oraz tzw. poziom powrotu (*ang. return level*), czyli wartość zmiennej losowej, która zostanie przekroczona raz w analizowanym okresie. Wyróżnić można dwie podstawowe metody wyboru wartości ekstremalnych z danych historycznych, tj.:

- metoda maksimumów/minimów blokowych (*ang. Block Maxima/Minima*), w której obserwacje analizowanej zmiennej dzieli się na n bloków czasowych o jednakowej długości. Wartością ekstremalną zmiennej losowej jest maksymalna/minimalna wartość z każdego bloku czasowego;
- metoda przekroczeń (*ang. Peak Over Threshold, POT*), w której jako ekstremalne traktowane są tylko te obserwacje, które przekroczyły określoną wartość progową zmiennej losowej.

Rysunek 8.1 prezentuje różnice w sposobie określania wartości ekstremalnych dla obu ww. metod. Metody zostały bardziej szczegółowo opisane w pkt. 8.1.1 i 8.1.2 na podstawie (Coles, 2001).



Rys. 8.1 Wybór wartości ekstremalnych a) w metodzie maksimumów blokowych b) w metodzie przekroczeń.

Źródło: opracowanie własne

8.1.1 Metoda maksimumów blokowych

Niech X_1, X_2, \dots, X_n będzie ciągiem n niezależnych zmiennych losowych o wspólnej dystrybucji $F(x)$. Przez M_n oznaczmy n -tą statystykę pozycyjną, będącą maksimum, określoną wzorem (wz. 8.1):

$$M_n = \max(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (8.1)$$

Dystrybuanta największej statystyki pozycyjnej $F_n(x)$ będzie określona wzorem (wz. 8.2):

$$F_n(x) = P\{M_n \leq x\} = P\{X_1 \leq x, X_2 \leq x, \dots, X_n \leq x\} \quad (8.2)$$

Jeżeli dla pewnych stałych $a_n > 0$ i b_n mamy (wz. 8.3):

$$P\{a_n(M_n - b_n) \leq x\} \rightarrow G(x) \text{ gdy } n \rightarrow \infty \quad (8.3)$$

dla pewnej niezdegenerowanej dystrybuanty G , wtedy dystrybuanta G przyjmuje jedną z trzech postaci nazywanych rozkładami wartości ekstremalnych danymi wzorami 8.4, 8.5 i 8.6:

$$\text{Typ I} \quad G(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-b}{a}\right)\right), \quad -\infty < x < \infty \quad (8.4)$$

$$\text{Typ II} \quad G(x) = \begin{cases} 0 & , x \leq b \\ \exp\left[-\left(\frac{x-b}{a}\right)^{-\alpha}\right] & , x > b \end{cases} \quad (8.5)$$

$$\text{Typ III} \quad G(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[\left(\frac{x-b}{a}\right)^\alpha\right]\right\} & , x \leq b \\ 1 & , x > b \end{cases} \quad (8.6)$$

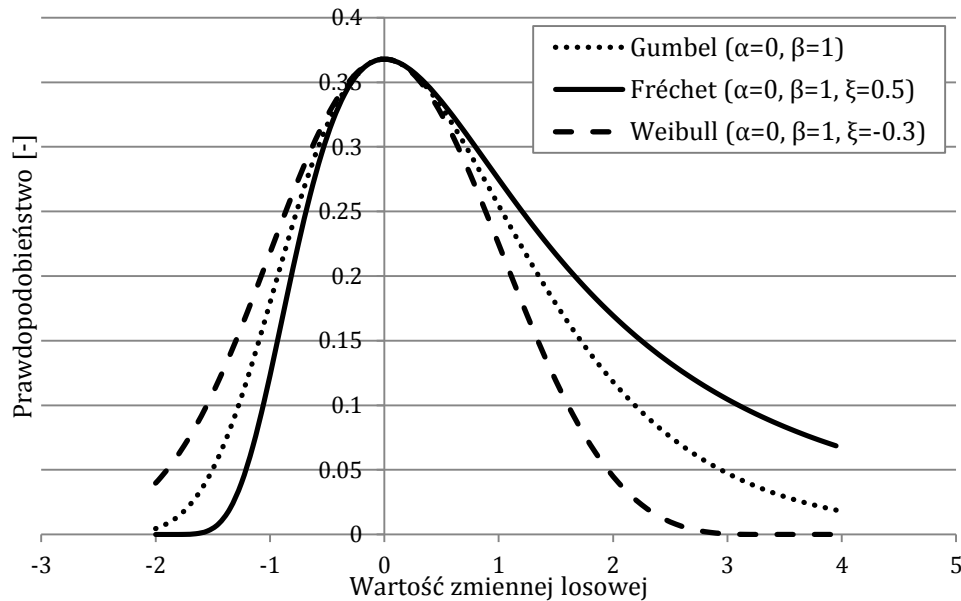
Rozkłady te nazywane są odpowiednio rozkładem Gumbel'a, Fréchet'a i Weibull'a.

Łącząc wszystkie trzy typy rozkładów wartości ekstremalnych otrzymujemy uogólniony rozkład wartości ekstremalnych (*ang. Generalized Extreme Value, GEV*) dany wzorem (wz. 8.7):

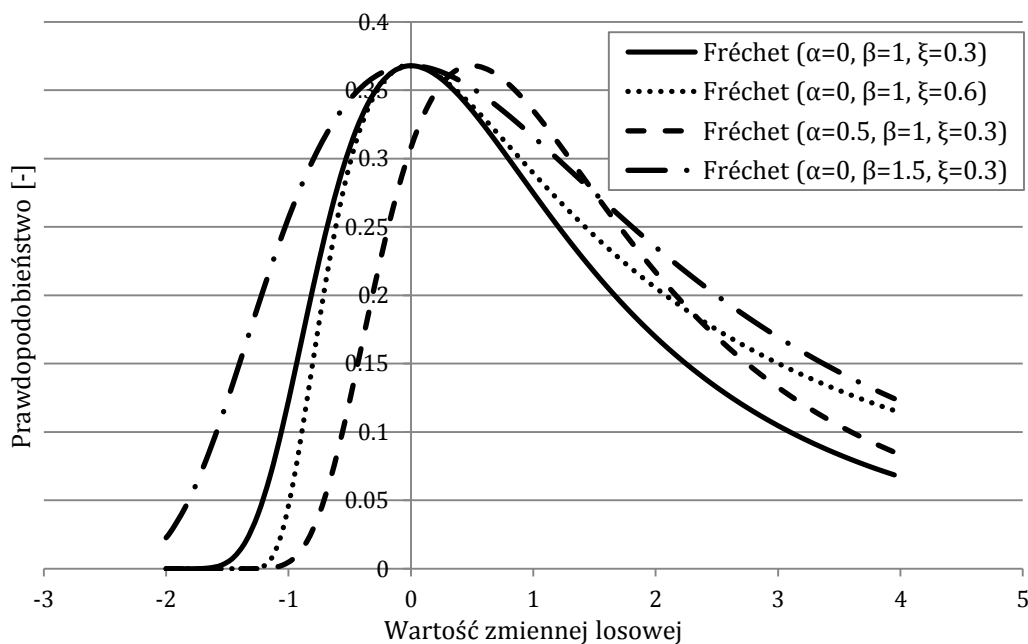
$$G(x) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} \quad (8.7)$$

Rozkład GEV ma trzy parametry, tj.: parametr położenia α , parametr skali β , parametr kształtu ξ . Jeżeli parametr kształtu $\xi > 0$ lub $\xi < 0$ mamy do czynienia odpowiednio z rozkładem Fréchet'a i Weibull'a. Gdy $\xi = 0$ rozkład wartości ekstremalnych ma postać rozkładu Gumbel'a.

Rysunek 8.2 przedstawia kształty funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla trzech typów rozkładów (Gumbel'a, Fréchet'a i Weibull'a) i wybranych wartości parametrów rozkładu. Wykresy te charakteryzują się odpowiednio „cienkim”, „grubym” i „krótkim” prawym ogonem rozkładu. Wpływ zmiany wartości parametrów na rozkład zmiennej losowej został przedstawiony na rysunku 8.3 na przykładzie rozkładu Fréchet'a. Parametr położenia α opisuje położenie maksimum wykresu, czyli wartość zmiennej losowej o największym prawdopodobieństwie wystąpienia, parametr skali β odpowiada za szerokość „dzwonu” rozkładu, parametr kształtu ξ opisuje szerokość prawego ogona rozkładu.



Rys. 8.2 Funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla rozkładów wartości ekstremalnych.
Źródło: opracowanie własne



Rys. 8.3 Wpływ zmiany wartości parametrów rozkładu na kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu Fréchet'a.
Źródło: opracowanie własne

W metodzie maksimów blokowych kluczowym jest dobranie długości bloku czasowego. Mała długość bloku generuje większą liczbę wartości ekstremalnych, czemu towarzyszy większa możliwość naruszenia asymptotycznej podstawy modelu i uzyskania błędnych wyników. Z drugiej strony większa długość bloku prowadzi do mniejszej liczby wartości ekstremalnych i uzyskania wyników o dużej wariancji. Najczęściej przyjmowaną w literaturze długością bloku czasowego jest rok lub miesiąc (w zależności od okresu agregacji analizowanych danych).

8.1.2 Metoda przekroczeń

Niech X będzie zmienną losową, a u pewną wartością graniczną tej zmiennej. Rozkład przekroczeń powyżej wartości granicznej u dany jest wzorem (wz. 8.8):

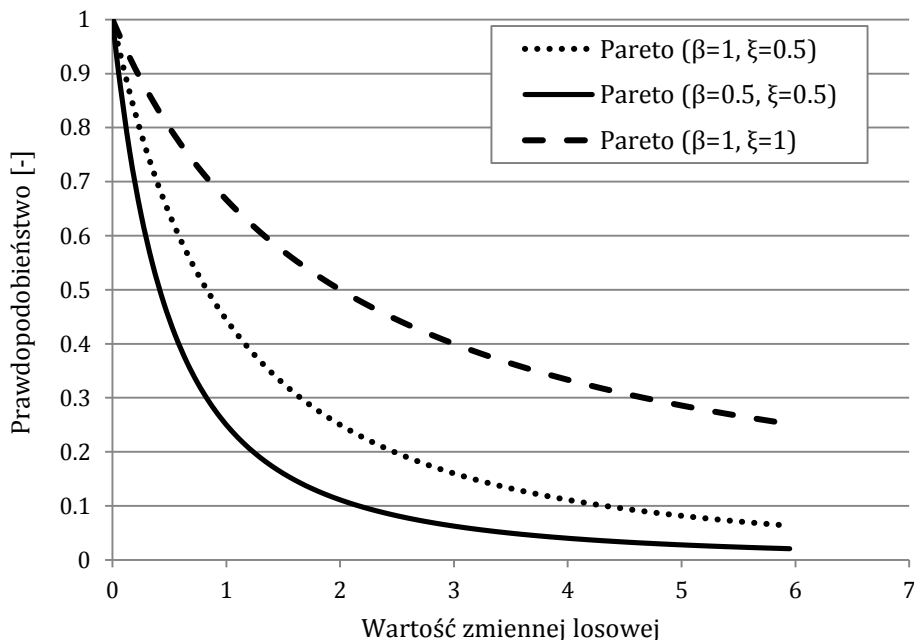
$$F_u(x) = P(X > u + x | X > u) = \frac{1 - F(u + x)}{1 - F(u)} \quad (8.8)$$

Dla odpowiednio wysokiej wartości u , dystrybuanta warunkowa $(X-u)$ uzależniona od $X > u$ ma rozkład graniczny, który jest uogólnionym rozkładem Pareto (*ang. Generalized Pareto Distribution, GPD*) z dystrybuantą postaci (wz. 8.9):

$$G(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{\xi x}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\xi}} & \text{dla } \xi \neq 0 \\ 1 - e^{-\frac{x}{\beta}} & \text{dla } \xi = 0 \end{cases} \quad (8.9)$$

Rozkład GPD ma dwa parametry, tj.: parametr skali β , parametr kształtu ξ .

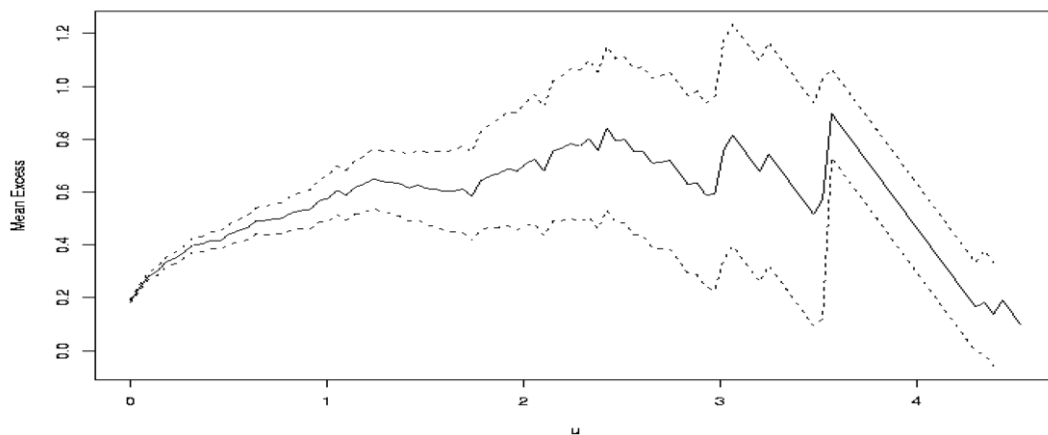
Kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa dla rozkładu Pareto oraz wpływ zmiany wartości parametrów na rozkład zmiennej losowej został przedstawiony na rysunku 8.4. Podobnie jak dla rozkładu GEV, parametr skali β odpowiada za szerokość „dzwonu” rozkładu, zaś parametr kształtu ξ opisuje szerokość prawego ogona rozkładu.



Rys. 8.4 Wpływ zmiany wartości parametrów rozkładu na kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu Pareto.
Źródło: opracowanie własne

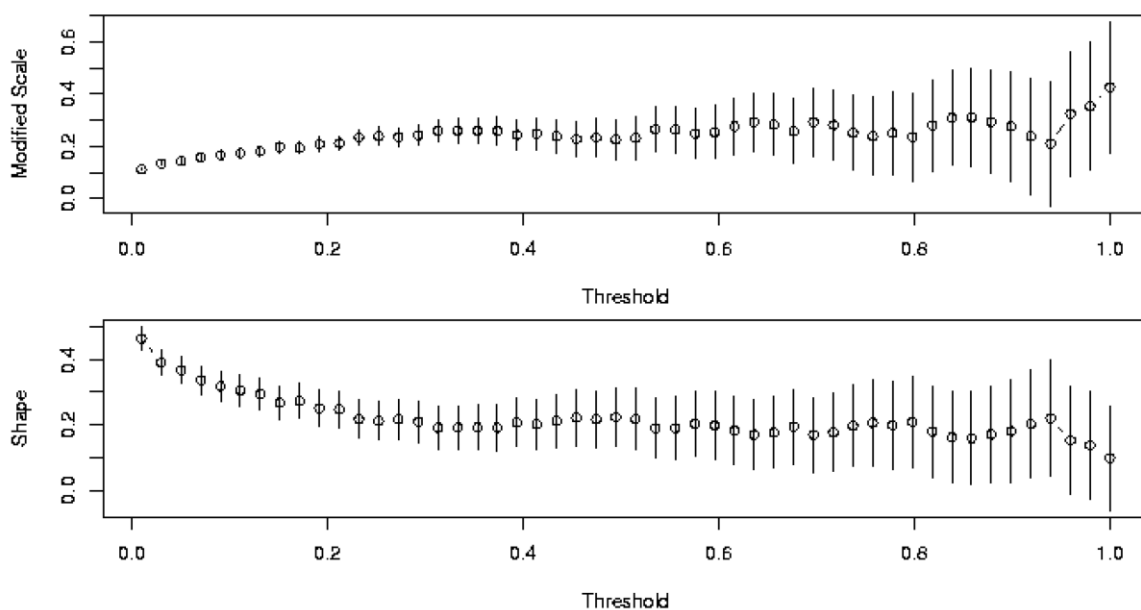
W metodzie przekroczeń kluczowym jest dobranie wartości progowej u . Zbyt niska wartość doprowadzi do uwzględnienia w analizie zbyt wielu centralnych obserwacji (niepochodzących z ogona rozkładu zmiennej losowej) i w konsekwencji obciążenie

estymatorów błędem. Z kolei zbyt wysoka wartość progu generuje mniejszą liczbę obserwacji i wzrost wariancji. W literaturze zaleca się uzależnienie wartości progowej u od liczby wszystkich obserwacji zmiennej losowej oraz liczby przekroczeń progu u . Najczęściej wybraną wartością progową jest kwantyl 90% lub 95% zmiennej losowej, co oznacza, że parametry rozkładu szacowane są na podstawie odpowiednio 10% i 5% najbardziej ekstremalnych obserwacji zmiennej losowej. Wartości graniczna u wyznaczana jest również na podstawie wykresu średnich przekroczeń lub wykresu stabilności parametrów rozkładu, których przykłady pokazano odpowiednio na rysunkach 8.5 i 8.6. Wykres średnich przekroczeń (Rys. 8.5) prezentuje zależność pomiędzy poszczególnymi wartościami progowymi u zmiennej losowej (oś pozioma X), a średnim przekroczeniem tego progu (oś pionowa Y) wraz z przedziałami ufności. Wartość progowa u powinna być równa najniższej wartości, powyżej której wykres jest liniowy. Wykres stabilności parametrów rozkładu (Rys. 8.6) prezentuje oszacowane wartości parametrów rozkładu dla różnych wartości progowych u wraz z ich przedziałami ufności. Parametry rozkładu powinny przyjmować stałą wartość powyżej wybranej wartości progowej u .



Rys. 8.5 Wykres średnich przekroczeń.

Źródło: (Gilleland i Katz, 2005)



Rys. 8.6 Wykres stabilności parametrów a) skali b) kształtu.

Źródło: (Gilleland i Katz, 2005)

8.1.3 Estymacja parametrów rozkładów GEV i GPD

Istnieje wiele metod estymacji parametrów rozkładu teorii wartości ekstremalnych. Należą do nich m.in. metoda graficzna (*ang. Graphical Method, GM*), metoda momentów (*ang. Method Of Moments, MOM*), metoda najmniejszych kwadratów (*ang. Least-Squares Regression Method, LSM*). Najczęściej stosowaną metodą jest metoda największej wiarygodności (*ang. Maximum Likelihood Estimation, MLE*), która polega na dobraniu parametrów rozkładu w takich sposób, aby funkcja wiarygodności osiągnęła największą wartość. Logarytm funkcji wiarygodności jest postaci (wz. 8.10-8.13):

a) dla rozkładu GEV

$$L(\alpha, \beta, \xi) = -k \cdot \log(\beta) - \left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \sum_{i=1}^k \log \left[1 + \xi \left(\frac{x_i - \alpha}{\beta}\right)\right] - \sum_{i=1}^k \left[1 + \xi \left(\frac{x_i - \alpha}{\beta}\right)\right]^{1/\xi} \quad (8.10)$$

gdy $\xi=0$, wtedy

$$L(\alpha, \beta) = -k \cdot \log(\beta) - \sum_{i=1}^k \frac{x_i - \alpha}{\beta} - \sum_{i=1}^k \exp\left(-\frac{x_i - \alpha}{\beta}\right) \quad (8.11)$$

b) dla rozkładu GPD

$$L(\beta, \xi) = -N_u \cdot \log(\beta) - \left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \sum_{i=1}^{N_u} \log \left(1 + \xi \frac{x_i}{\beta}\right) \quad (8.12)$$

gdy $\xi=0$, wtedy

$$L(\beta) = -N_u \cdot \log(\beta) - \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{N_u} x_i \quad (8.13)$$

gdzie: α, β, ξ – parametry odpowiednio położenia, skali i kształtu;

k – liczba bloków w metodzie maksimów blokowych;

N_u – liczba przekroczeń progu u ;

x_i – wartość zmiennej losowej.

W przypadku procesów stacjonarnych parametry rozkładów GEV i GPD (położenia α , skali β , kształtu ξ) przyjmują stałe wartości. Oznacza to, że prawdopodobieństwo wystąpienia ekstremalnej wartości zmiennej losowej jest jednakowe w każdej chwili czasu. W przypadku procesów niestacjonarnych parametry rozkładów zmieniają się w funkcji czasu lub innych współzmiennych, co odzwierciedla zmienne w czasie prawdopodobieństwo wystąpienia ekstremalnych wartości zmiennej losowej (wz. 8.14).

$$p(t) = a_0 + a_i \cdot z_i \quad (8.14)$$

gdzie: $p(t)$ – parametr rozkładu GEV lub GPD (położenia α , skali β , kształtu ξ);

p_0 – stała;

p_i – współczynnik dla współzmiennnej z_i ;

z_i – współzmienna.

Parametr skali β w każdej chwili czasu musi przyjmować wartość większą od 0. Z tego względu jego wartość najczęściej uzależnia się od czasu lub innych współzmiennych z pomocą funkcji logarytmicznej (wz. 8.15):

$$\beta(t) = \exp(\beta_0 + \beta_i \cdot z_i) \quad (8.15)$$

gdzie: $\beta(t)$ – parametr skali β ;

β_0 – stała;

β_i – współczynnik dla współzmiennnej z_i ;

z_i – współzmienna.

8.2 Dobór próby badawczej i przygotowanie bazy danych

W badaniach wykorzystano bazę danych o przejazdach rowerowych, której sposób przygotowania opisano szczegółowo w pkt. 6.2.

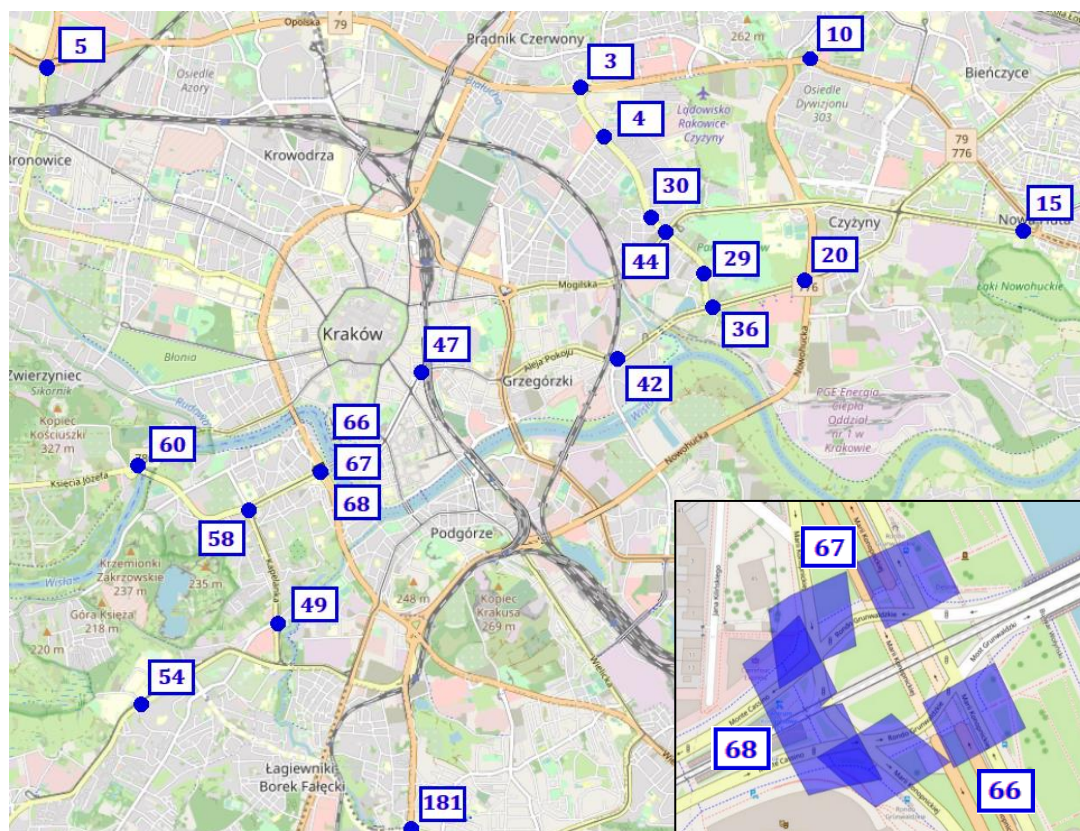
Poszukiwana wartość graniczna opóźnienia w ruchu rowerowym, która mogłaby być wykorzystywana do identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów, może być uzależniona od klasy drogi samochodowej i typu infrastruktury ruchu rowerowego. Z tego względu analiza powinna być wykonana osobno dla poszczególnych grup przejazdów rowerowych wyróżnionych w tab. 6-1. W niniejszej pracy zdecydowano się na wykonanie obliczeń tylko dla jednej grupy przejazdów. W celu zapewnienia odpowiedniej wielkości próby badawczej, w pierwszej kolejności wykluczono grupy mniej liczne niż 20 przejazdów. W badaniach należało uwzględnić przejazdy o różnorodnym poziomie bezpieczeństwa tzn. zróżnicowanej liczbie zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów. Z tego względu wykluczono grupy przejazdów, dla których maksymalna liczba zdarzeń drogowych na pojedynczym przejeździe w okresie 3 lat, tj. w latach 2017-2019, nie przekraczała 3. Dzieląc sumaryczną liczbę zdarzeń drogowych, które miały miejsce na przejazdach danej grupy przez ich liczbę, wyznaczono średnią liczbę zdarzeń drogowych na każdym przejeździe. Ustalono w ten sposób, że najniebezpieczniejsze są w pierwszej kolejności (wybrane do dalszych badań) skrzyżowania dróg dla rowerów z drogami drugiego rzędu (klasy dróg zdefiniowane na podstawie OSM, pkt. 4.4). Do tej grupy należało 65 przejazdów, dla których średnia liczba zdarzeń w okresie 3 lat wynosiła ok. 1.0 zdarzenie na przejazd. Z grupy tej losowo wybrano 20 przejazdów, które stanowiły próbę badawczą. Podstawowe parametry ruchu rowerów Wavelo oraz dane o liczbie zdarzeń

drogowych w latach 2017-2019 dla wybranej grupy przejazdów zestawiono w tab. 8-1. Lokalizację wybranych poligonów pokazano na rysunku 8.7.

Tab. 8-1 Parametry ruchu rowerów Wavelo oraz dane o liczbie zdarzeń drogowych dla wybranej grupy przejazdów rowerowych.

Źródło: opracowanie własne

ID	$Q_{Wavelo,m}$ [R/m-c]	V_{Wavelo} [m/s]	S [m/s]	W_z [-]	a_{max} [m/s ²]	Kwantyl 90% a [m/s ²]	Liczba zdarzeń w latach 2017-2019
3	3543	3.59	1.14	0.32	1.396	0.378	0
4	5264	3.71	1.10	0.30	1.048	0.248	1
5	959	2.93	0.90	0.31	1.734	0.258	3
10	818	3.19	0.86	0.27	1.194	0.242	3
15	2561	3.68	1.16	0.32	1.152	0.260	2
20	3156	3.79	1.10	0.29	1.014	0.340	3
29	2983	3.92	1.26	0.32	1.078	0.296	0
30	4682	4.20	1.37	0.33	1.206	0.334	1
36	3766	3.93	1.25	0.32	1.148	0.324	0
42	5124	3.49	1.25	0.36	2.65	0.298	1
44	8711	3.54	1.16	0.33	1.156	0.360	6
47	2707	3.37	1.15	0.34	1.27	0.250	1
49	6750	3.09	1.16	0.37	2.29	0.288	2
54	2159	3.64	1.47	0.40	1.158	0.290	0
58	1947	3.08	1.03	0.33	0.962	0.286	0
60	778	3.53	1.20	0.34	0.99	0.310	1
66	8061	3.41	0.96	0.28	1.816	0.252	7
67	6598	3.39	0.99	0.29	1.248	0.286	6
68	11061	3.35	1.00	0.30	2.36	0.262	4
181	768	3.74	1.45	0.39	1.204	0.270	0



Rys. 8.7 Lokalizacja wybranych poligonów badawczych.

Źródło: opracowanie własne

Wybór metody wyznaczania wartości ekstremalnych (metoda maksimumów blokowych lub metoda przekroczeń) ma wpływ na otrzymane wyniki. Z powodu braku przesłanek wskazujących na słusność wyboru jednej z nich w przypadku analizy bezpieczeństwa ruchu rowerowego, zdecydowano się na wykonanie obliczeń obiema metodami i porównanie otrzymanych wyników.

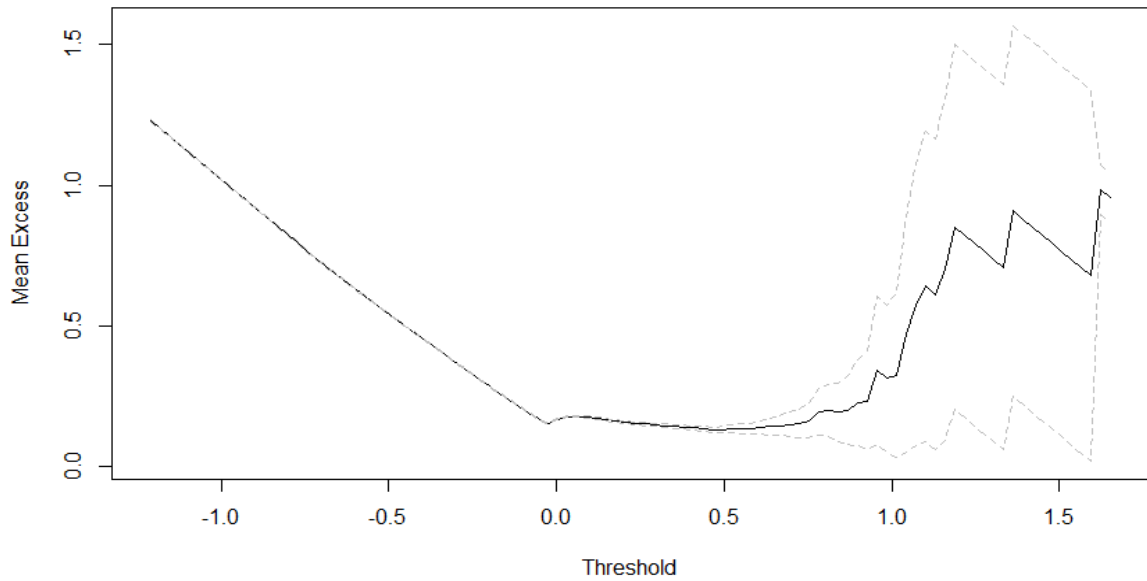
8.2.1 Metoda maksimumów blokowych

W metodzie maksimumów blokowych długość bloku czasowego przyjęto równą 1 godzinie, co dawało łącznie 720 bloków. Wykonanie badań dla dłuższego bloku czasu (np. 2 godziny, 5 godzin, 1 dzień) skutkowałoby małą liczbą wartości ekstremalnych wykorzystanych do oszacowania parametrów rozkładu GEV oraz możliwością pominięcia dużych wartości opóźnienia zwłaszcza w godzinach szczytu porannego i popołudniowego, gdy natężenie ruchu rowerowego i samochodowego, a tym samym możliwość wystąpienia konfliktu w ruchu drogowym, jest największe. Z kolei mniejsza długość bloku (równa np. 30 minut, 15 minut) skutkowałaby otrzymaniem bardzo dużej liczby bloków, dla których nie zarejestrowano przejazdu ani jednego rowerzysty korzystającego z roweru miejskiego, a tym samym, ani jednego opóźnienia w ruchu rowerowym. Dla każdego analizowanego przejazdu, każdej godziny, każdego dnia czerwca 2017r. ustalono maksymalną wartość opóźnienia w ruchu rowerowym, jak również średnie prędkości V_{Wavelo} (dla prędkości z zakresu 1.4-15m/s²) oraz natężenie ruchu rowerów Wavelo $Q_{Wavelo,h}$. Jak wynika z badań opisanych w pkt. 6, natężenie i prędkość mają statystycznie istotny wpływ na bezpieczeństwo rowerzystów, zatem w analizach niestacjonarnych parametry rozkładu GEV będą uzależniane od wartości tych zmiennych. Należy zaznaczyć, że opóźnieniom w ruchu rowerowym przypisano znak „+”, zaś przyspieszeniom znak „-”, co wynikało z wymagań oprogramowania stosowanego do estymacji parametrów modeli (pkt. 8.3.1).

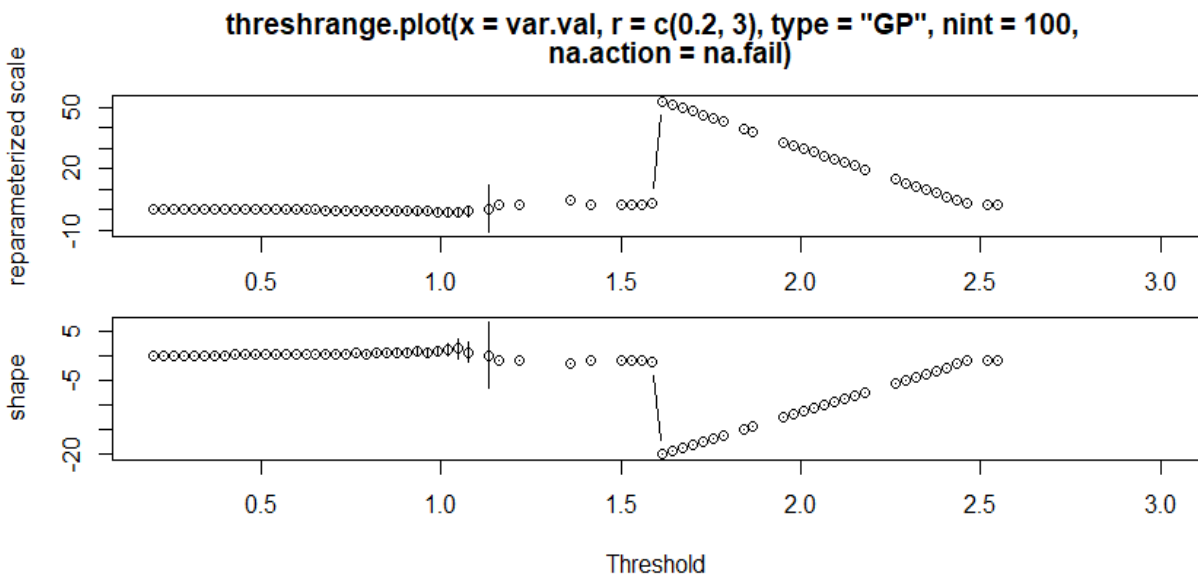
8.2.2 Metoda przekroczeń

Dla metody przekroczeń graniczną wartość opóźnienia u ustalano dla każdego przejazdu z osobna na podstawie opisanych w rozdziale 8.1.2 wykresów średnich przekroczeń i stabilności parametrów rozkładu, z uwzględnieniem kwantyla 90% rozkładu opóźnień (Tab. 8-1). Poniżej zaprezentowano sposób ustalenia wartości granicznej u opóźnienia dla jednego przejazdu o ID=42. W przypadku pozostałych przejazdów procedura była analogiczna.

Na rysunkach 8.7 i 8.8 przedstawiono odpowiednio wykres średnich przekroczeń oraz wykres stabilności parametrów rozkładu Pareto dla analizowanego przejazdu. Wykres średnich przekroczeń jest liniowy dla granicznej wartości opóźnienia u w przedziałach ok. -1.3 ÷ -0.1m/s² oraz 0.2 ÷ 0.5m/s². Poszukiwana wartość graniczna powinna być większa od 0 (co odpowiada opóźnieniom w ruchu rowerowym), dlatego powinna być dobrana z zakresu 0.2 ÷ 0.5m/s². Parametry skali β i kształtu ξ (Rys. 8.8) przyjmują stałą wartość dla wartości progowej u od 0.2m/s² do 1.0m/s². Kwantyl 90% przyspieszeń w ruchu rowerowym na analizowanym przejeździe wynosił 0.298m/s² (Tab. 8-1). Ostatecznie zatem jako wartość progową opóźnienia w ruchu rowerowym wykorzystaną do estymacji parametrów rozkładu GPD przyjęto wartość 0.3m/s².



Rys. 8.8 Wykres średnich przekroczeń dla przejazdu ID=42.
Źródło: opracowanie własne



Rys. 8.9 Wykres stabilności parametrów a) skali, b) kształtu, dla przejazdu ID=42.
Źródło: opracowanie własne

Dla 18 z 20 analizowanych przejazdów wartości granicznego opóźnienia u przyjęto równą 0.3m/s^2 . Dla pozostałych dwóch przejazdów (ID=3 oraz ID=44) wynosiła ona 0.4m/s^2 .

Baza danych dla metody przekroczeń (podobnie jak dla metody maksimów blokowych) poza wartościami opóźnień w ruchu rowerowym zawierała również dane o średniej prędkości rowerzystów w ruchu V_{Wavelo} (dla prędkości z zakresu $1.4\text{-}15\text{m/s}^2$) oraz natężeniu ruchu rowerów Wavelo $Q_{\text{Wavelo,h}}$ w godzinie, w której dane opóźnienie zostało zarejestrowane.

8.3 Metoda badań

8.3.1 Estymacja parametrów rozkładów teorii wartości ekstremalnych

Parametry rozkładów GEV i GPD ekstremalnych wartości opóźnienia w ruchu rowerowym estymowano przy użyciu pakietu statystycznego *R* oraz specjalnych pakietów dodatkowych *extRemes* oraz *in2extRemes* dedykowanych do teorii wartości ekstremalnych (Gilleland i Katz, 2005).

Listę rozważanych modeli, dla których szacowano wartości parametrów rozkładów, przedstawiono w tabeli 8-2. Modele oznaczone jako M0 to modele stacjonarne, w których parametry rozkładów przyjmują stałe wartości. Modele niestacjonarne oznaczone jako M1, M2 i M3 uwzględniają zmienność w czasie odpowiednio parametru położenia α , skali β i kształtu ξ . Parametry te uzależniane były od wartości średniej prędkości w ruchu rowerowym V_{Wavelo} (modele oznaczone literą „a”), od godzinowego natężenia ruchu rowerów Wavelo $Q_{Wavelo,h}$ (modele oznaczone literą „b”) oraz obu ww. parametrów (modele oznaczone literą „c”). Parametr położenia α i kształtu ξ uzależniano od parametrów ruchu rowerowego za pomocą funkcji liniowej, zaś parametr skali β za pomocą funkcji logarymicznej.

Tab. 8-2 Postaci poszukiwanych parametrów rozkładu wartości ekstremalnych dla analizowanych modeli.

Źródło: opracowanie własne

Model	Parametr położenia α^*	Parametr skali β	Parametr kształtu ξ
M0	$\alpha = \text{const.}$	$\beta = \text{const.}$	$\xi = \text{const.}$
M1	M1a $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot V_{Wavelo}$	$\beta = \text{const.}$	$\xi = \text{const.}$
	M1b $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_2 \cdot Q_{Wavelo,h}$	$\beta = \text{const.}$	$\xi = \text{const.}$
	M1c $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot V_{Wavelo} + \alpha_2 \cdot Q_{Wavelo,h}$	$\beta = \text{const.}$	$\xi = \text{const.}$
M2	M2a $\alpha = \text{const.}$	$\beta(t) = \exp(\beta_0 + \beta_1 \cdot V_{Wavelo})$	$\xi = \text{const.}$
	M2b $\alpha = \text{const.}$	$\beta(t) = \exp(\beta_0 + \beta_2 \cdot Q_{Wavelo,h})$	$\xi = \text{const.}$
	M2c $\alpha = \text{const.}$	$\beta(t) = \exp(\beta_0 + \beta_1 \cdot V_{Wavelo} + \beta_2 \cdot Q_{Wavelo,h})$	$\xi = \text{const.}$
M3	M3a $\alpha = \text{const.}$	$\beta = \text{const.}$	$\xi(t) = \xi_0 + \xi_1 \cdot V_{Wavelo}$
	M3b $\alpha = \text{const.}$	$\beta = \text{const.}$	$\xi(t) = \xi_0 + \xi_2 \cdot Q_{Wavelo,h}$
	M3c $\alpha = \text{const.}$	$\beta = \text{const.}$	$\xi(t) = \xi_0 + \xi_1 \cdot V_{Wavelo} + \xi_2 \cdot Q_{Wavelo,h}$
M4	$\alpha(t)$	$\beta(t)$	$\xi = \text{const.}$
M5	$\alpha(t)$	$\beta = \text{const.}$	$\xi(t)$
M6	$\alpha = \text{const.}$	$\beta(t)$	$\xi(t)$
M7	$\alpha(t)$	$\beta(t)$	$\xi(t)$

gdzie: (*) - parametr położenia szacowany był tylko dla rozkładu GEV;

W pierwszej kolejności dla każdego z parametrów rozkładu wytypowano model z jedną współzmienną (model „a” lub „b”), który charakteryzował się wyższą wartością logarytmu funkcji wiarygodności. Model ten porównywano następnie z modelem z dwoma współzmiennymi (oznaczony literą „c”) za pomocą statystyki $D_{M_i-M_j}$ (wz. 8.16):

$$D_{M_i-M_j} = 2 \cdot (\text{Log}L_{M_i} - \text{Log}L_{M_j}) [-] \quad (8.16)$$

gdzie: $D_{M_1-M_2}$ - statystyka [-];

$\text{Log}L_{M_i}$, $\text{Log}L_{M_j}$ - logarytm funkcji wiarygodności dla modelu M_i i M_j [-].

Takie porównanie umożliwiło ocenę, czy uzależnienie parametrów rozkładu zarówno od prędkości w ruchu rowerowym V_{Wavelo} jak i godzinowego natężenia ruchu rowerów Wavelo $Q_{Wavelo,h}$ statystycznie istotnie poprawia jakość dopasowanie modelu do danych empirycznych

w porównaniu do modelu z jedną zmienną. Jeżeli wartość statystyki D_{Mi-Mj} jest większa od wartości krytycznej rozkładu chi-kwadrat $\chi_{1-\alpha,df}$ dla zadanego poziomu ufności $1-\alpha$ i liczby stopni swobody df równej różnicy liczby estymowanych za pomocą obu porównywanych modeli parametrów, można stwierdzić, że model M_i jest istotnie lepiej dopasowany do danych empirycznych od modelu M_j . Dla poziomu istotności równego 0.05 wartość krytyczna rozkładu chi-kwadrat wynosi 3.8415, 5.9915, 7.8147 oraz 9.4877 odpowiednio dla różnicy w liczbie szacowanych za pomocą porównywanych modeli parametrów równej 1, 2, 3 i 4. Liczba szacowanych parametrów dla modelu z jedną współzmienną i dwoma współzmiennymi wynosi odpowiednio 4 i 5. Wartość statystyki D_{Mi-Mj} porównywano zatem z wartością krytyczną rozkładu chi-kwadrat $\chi_{0.95,1} = 3.8415$. Model z dwiema współzmiennymi (oznaczony literą „c”) wybrany był do dalszych analiz, jeżeli wartość statystyki D_{Mi-Mj} dla porównania tego modelu z modelem z jedną zmienną o wyższej wartości logarytmu funkcji wiarygodności była większa od $\chi_{0.95,1} = 3.8415$. W przeciwnym wypadku wybrano model z jedną zmienną (prostszy, z mniejszą liczbą parametrów). W analogiczny sposób na podstawie wartości statystyki D_{Mi-Mj} spośród wytypowanych modeli M1, M2 i M3 wybrano statystycznie istotnie najlepszy model uwzględniający niestacjonarność tylko w jednym parametrze rozkładu wartości ekstremalnych. Model ten oznaczono jako Mn.

Następnie przeanalizowano dodatkowo modele, w których dwa lub trzy (w przypadku rozkładu GEV) parametry rozkładu zmieniały się w funkcji czasu. Były to modele oznaczone jako M4, M5, M6 i M7 (Tab. 8-2), uwzględniające zmienność w czasie odpowiednio parametru położenia i skali, położenia i kształtu, skali i kształtu, wszystkich 3 parametrów (w przypadku rozkładu GPD opracowano tylko jeden model M6). Modele te zbudowano dla tych postaci parametrów rozkładów („a”, „b” lub „c”), które wytypowano jako statystycznie istotnie najlepsze w poprzednim kroku analiz. Nowe modele porównano ze sobą za pomocą statystyki D_{Mi-Mj} , a do dalszych badań wybrano model statystycznie istotny lepszy od wszystkich pozostałych modeli ($D_{Mi-Mj} > \chi_{0.95,df}$), bądź najprostszy, z najmniejszą liczbą szacowanych parametrów (jeżeli $D_{Mi-Mj} < \chi_{0.95,df}$). Wybrany model oznaczono jako Mm. W przypadku rozkładu GPD w dalszych analizach uwzględniono model M6.

Ostateczną postać poszukiwanego modelu wybrano ponownie za pomocą statystyki D_{Mi-Mj} . Wykonano w tym celu dwa porównania tj.:

- 1) modelu niestacjonarnego dla jednego parametru rozkładu Mn z modelem stacjonarnym M0;
- 2) modelu niestacjonarnego dla dwóch lub trzech parametrów rozkładu Mm z modelem niestacjonarnym dla jednego parametru rozkładu Mn.

8.3.2 Metoda wyznaczenia granicznej wartości opóźnienia w ruchu rowerowym

Na podstawie wybranej postaci rozkładów GEV lub GPD, dla każdej wartości opóźnienia od 0.2 do 3.0m/s² (z krokiem co 0.1m/s²) obliczono ile razy w okresie analizy 2017-2019 wystąpiło opóźnienie o wartości nie mniejszej od danej Lop_a [-] (wz. 8.17).

$$Lop_a = \frac{N_T}{N_t} \cdot \sum_{i=1}^t p_a \quad [-] \quad (8.17)$$

gdzie: Lop_a – liczba opóźnień o wartościach nie mniejszych od a w okresie czasu T [-];

N_T – liczba bloków czasowych w całym okresie analizy T [-];

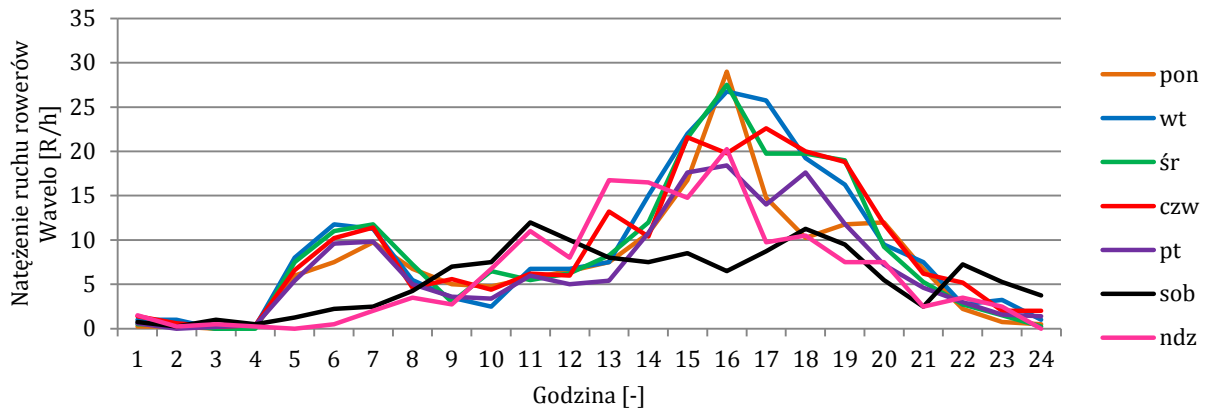
N_t – liczba bloków czasowy w okresie t , z którego pochodzą dane [-];

p_a – prawdopodobieństwo wystąpienia opóźnień o wartościach co najmniej równych a w i -tym bloku okresu t [-].

W przypadku modeli niestacjonarnych, gdy parametry rozkładu uzależnione są od średniej prędkości w ruchu rowerowym i/lub natężenia ruchu, wartość prawdopodobieństwa p_a zmienia się w czasie. Do jego wyznaczenia konieczne jest oszacowanie prędkości i natężeń ruchu w każdej godzinie okresu analizy.

Średnią prędkość rowerzystów V_{Wavelo} dla każdego przejazdu i każdej godziny okresu analizy wyznaczono przy założeniu rozkładu normalnego tej zmiennej (przyjęcie takiego założenia potwierdzają wyniki testu Shapiro-Wilka, opisane w pkt. 5.4.4). Na podstawie wartości średniej prędkości dla wszystkich podróży realizowanych w czerwcu 2017r., jej odchylenia standardowego oraz przy wykorzystaniu generatora liczb losowych programu IBM SPSS Statistics 20 oszacowano prędkości rowerzystów w każdej godzinie okresu analizy.

Na rysunku 8.10 przedstawiono przykładowy wykres godzinowej zmienności natężenia ruchu rowerów Wavelo na przejeździe ID=42 w poszczególnych dniach tygodnia, wyznaczony na podstawie danych GPS z czerwca 2017r. Zmienność natężenia ruchu w soboty i niedziele różni się od zmienności w dni powszednie (poniedziałek – piątek). Wyznaczono zatem wskaźniki godzinowej i dobowej zmienności natężenie rowerów Wavelo oddzielnie dla dni powszednich (poniedziałek – piątek), sobót i niedziel dla każdego przejazdu z osobna. Wskaźniki sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerów Wavelo zaczerpnięto z danych przedstawionych na rysunku 5.2. Wzrost natężenia ruchu w latach 2017-2019 wyznaczono na podstawie danych z 4 stacji pomiaru ruchu rowerowego (tj. zlokalizowanych na Bulwarach Wiślanych, ul. Mogilskiej, ul. Kotlarskiej, ul. Wielickiej). W 2018r. natężenie ruchu dla tych stacji wzrosło średnio o 20% względem 2017r., zaś w 2019r. o 15% względem roku poprzedniego. Przy wyznaczaniu wzrostu ruchu pominięto dane ze stacji zlokalizowanej na ul. Wadowickiej, które wskazywały na wzrost natężenia ruchu w latach 2017-2018 o 120% (znacznie więcej niż dla pozostałych stacji). Wyznaczone w opisany powyżej sposób wskaźniki zmienności ruchu umożliwiły oszacowane natężenia ruchu rowerów Wavelo w każdej godzinie okresu analizy $Q_{Wavelo,h}$. Obliczone natężenia zaokrąglono do liczb całkowitych.



Rys. 8.10 Godzinowa zmienność natężenia ruchu rowerowego w poszczególnych dniach tygodnia na przejeździe ID=42 (dane z czerwca 2017r.).

Źródło: opracowanie własne

W tym miejscu należy zaznaczyć, że natężenie ruchu rowerów Wavelo szacowane było również dla stycznia i lutego 2017r., kiedy to system Wavelo jeszcze nie funkcjonował. Fakt ten został jednak pominięty w analizach.

Dane o liczbie zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów nie były wykorzystywane do estymacji parametrów rozkładów GEV i GPD, dlatego wyznaczenie granicznej wartości opóźnienia w ruchu rowerowym, jako tej, dla której liczba opóźnień Lop_a w przyjętym okresie analizy jest taka sama jak liczba zdarzeń drogowych jest nieuzasadnione. Ponadto wypadki i kolizje drogowe są zdarzeniami losowymi i nie wszystkie są rejestrowane. Wynika stąd, że liczba zdarzeń drogowych jedynie reprezentuje rzeczywisty poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego w danej lokalizacji. Poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego powinien być zatem przedstawiany jako przedział ufności, a nie konkretna wartość (Songchitruksa i Tarko, 2006; Nicholson, 1987). Przedział ufności poziomu bezpieczeństwa ruchu można wyznaczyć na podstawie liczby zdarzeń drogowych jako (wz. 8.18) (Nicholson, 1987):

$$\frac{1}{2} \cdot \chi_{1-\frac{\alpha}{2}; 2 \cdot lz}^2 \leq \lambda \leq \frac{1}{2} \cdot \chi_{\frac{\alpha}{2}; 2 \cdot (lz+1)}^2 \quad (8.18)$$

gdzie: λ – poziom bezpieczeństwa ruchu;

$\chi_{1-\alpha; df}^2$ - wartości krytycznej rozkładu chi-kwadrat dla poziomu ufności $1-\alpha$ i liczby stopni swobody df ;

lz - liczba zdarzeń drogowych w okresie analizy.

Dla liczby zdarzeń drogowych $lz=0$ przyjmuje się $\chi_{1-\alpha/2, 0}^2 = 0$.

Graniczną wartość opóźnienia w ruchu rowerowym wyznaczono jako tę wartość, dla której dla największej liczby analizowanych przejazdów liczba opóźnień Lop_a mieściła się w przedziale ufności poziomu bezpieczeństwa ruchu (wz. 8.18).

8.4 Wyniki badań

8.4.1 Parametry rozkładów GEV i GPD

W tabelach 8-3 oraz 8-4 zestawiono wartości logarytmów funkcji wiarygodności $LogL$ modeli uwzględniających niestacjonarność w jednym parametrze rozkładu opracowanych dla wartości ekstremalnych opóźnień w ruchu rowerowym wyznaczonych odpowiednio metodą przekroczeń i metodą maksimumów blokowych. Wartości statystyki $D_{M_i-M_j}$ logarytmów funkcji wiarygodności wykorzystanych do porównań modeli wraz z informacją o wybranej postaci modelu dla każdego z parametrów rozkładu również zestawiono w tabelach 8-3 oraz 8-4. W tabelach tych pogrubioną czcionką oznaczono logarytmy funkcji wiarygodności tych modeli M1, M2 i M3, które na podstawie wartości statystyki $D_{M_i-M_j}$ uznano za statystycznie najlepsze.

Tab. 8-3 Logarytmy funkcji wiarygodności $LogL$ i wartości statystyki $D_{M_i-M_j}$ modeli dla rozkładu GPD.

Źródło: opracowanie własne

ID przejazdu	Logarytm funkcji wiarygodności $LogL$										Wybrany model Mn uwzględniający niestacjonarność w jednym parametrze rozkładu
	Modele M2 - niestacjonarność parametru skali β					Modele 3 - niestacjonarność parametru kształtu ξ					
	M2a	M2b	M2c	$D_{M2c-M2a}$ lub $D_{M2c-M2b}$	Wybrany model	M3a	M3b	M3c	$D_{M3c-M3a}$ lub $D_{M3c-M3b}$	Wybrany model	
3	1319.13	1299.71	1323.07	7.8700	M2c	1311.89	1299.28	1321.24	18.7040	M3c	M2c
4	1130.65	1125.07	1130.99	0.6780	M2a	1128.65	1124.68	1128.65	0.0080	M3a	M2a
5	492.53	485.41	492.57	0.0806	M2a	498.82	485.17	498.82	0.0000	M3a	M3a
10	380.62	375.38	382.77	4.2894	M2c	382.42	377.88	383.78	2.7192	M3a	M3a
15	690.60	692.22	692.71	0.9728	M2b	689.65	690.37	690.45	0.1580	M3b	M2b
20	1462.11	1443.52	1463.81	3.4040	M2a	1450.57	1443.46	1452.24	3.3460	M3a	M2a
29	692.50	682.06	692.52	0.0430	M2a	685.59	682.28	685.60	0.0122	M3a	M2a
30	1053.15	1037.41	1053.15	0.0040	M2a	1041.30	1037.29	1041.72	0.8340	M3a	M2a
36	950.32	928.89	950.32	0.0004	M2a	936.22	928.26	936.29	0.1320	M3a	M2a
42	2207.94	2185.65	2207.96	0.0440	M2a	2197.27	2189.83	2199.77	5.000	M3c	M2a
44	2588.55	2579.30	2589.30	1.5040	M2a	2584.70	2579.63	2584.77	0.1420	M3a	M2a
47	723.70	710.57	724.39	1.3856	M2a	717.09	710.79	721.33	8.4660	M3c	M2a
49	3078.51	3053.63	3079.11	1.1980	M2a	3070.62	3053.55	3075.03	8.8280	M3c	M2a
54	623.41	611.02	626.90	6.9802	M2c	617.54	609.85	621.44	7.7864	M3c	M2c
58	787.13	764.19	790.93	7.6008	M2c	779.44	764.20	782.97	7.0448	M3c	M2c
60	275.11	269.68	275.12	0.0120	M2a	272.31	269.60	272.31	0.0018	M3a	M2a
66	3089.10	3078.22	3090.39	2.5700	M2a	3080.23	3077.40	3080.47	0.4740	M3a	M2a
67	3755.26	3741.16	3755.30	0.0940	M2a	3746.71	3741.95	3747.17	0.9200	M3a	M2a
68	4225.98	4199.23	4226.73	1.5140	M2a	4236.46	4198.74	4236.78	0.6380	M3a	M3a
181	189.66	173.09	189.83	0.3432	M2a	179.22	173.11	179.22	0.0002	M3a	M2a

gdzie: pogrubioną czcionką oznaczono logarytmy funkcji wiarygodności statystycznie najlepszych modeli M2 i M3 spośród wszystkich rozważanych;

Tab. 8-4 Logarytmny funkcji wiarygodności $LogL$ i wartości statystyki D_{M1-Mj} modeli dla rozkładu GEV.
Źródło: opracowanie własne

ID przejazdu	Logarytm funkcji wiarygodności $LogL$																		Wybrany model Mn uwzględniający niestacjonarność w jednym parametrze rozkładu
	Modele M1 - niestacjonarność parametru położenia α						Modele M2 - niestacjonarność parametru skali β						Modele M3 - niestacjonarność parametru kształtu ξ						
	M1a	M1b	M1c	$D_{M1c-M1a}$ lub $D_{M1c-M1b}$	Wybrany model	M2a	M2b	M2c	$D_{M2c-M2a}$ lub $D_{M2c-M2b}$	Wybrany model	M3a	M3b	M3c	$D_{M3c-M3a}$ lub $D_{M3c-M3b}$	Wybrany model				
3	1.97	117.14	117.14	0.0002	M1b	9.86	2.22	11.58	3.43408	M2a	4.14	3.41	10.52	12.75153	M3c	M1b			
4	64.49	181.81	181.81	0.0066	M1b	65.16	68.45	70.55	4.19904	M2c	-378.43	-515.02	-508.73	-260.593	M3a	M1b			
5	34.99	77.25	78.23	1.96862	M1b	34.54	35.02	35.03	0.01384	M2b	38.45	46.80	80.72	67.83796	M3c	M3c			
10	61.25	103.02	105.89	5.7282	M1c	72.37	66.75	78.81	12.87348	M2c	62.34	75.12	-141.89	-434.004	M3b	M1c			
15	137.94	227.19	228.66	2.9438	M1b	129.62	128.09	129.65	0.0604	M2a	128.11	129.05	129.21	0.3216	M3b	M1b			
20	9.42	115.89	117.40	3.0232	M1b	11.16	14.09	16.94	5.69718	M2c	15.46	-504.41	-493.59	-1018.088	M3a	M1b			
29	16.95	136.25	137.78	3.063	M1b	9.80	20.25	20.32	0.1379	M2b	15.06	9.82	15.41	0.70582	M3a	M1b			
30	-76.00	41.13	44.86	7.457	M1c	-76.70	-74.04	-72.10	3.88604	M2c	-75.70	-76.83	-73.21	4.97282	M3c	M1c			
36	-64.76	33.17	44.92	23.50122	M1c	-65.66	-65.93	-65.51	0.29194	M2a	-50.14	-498.32	-489.13	-877.9892	M3a	M1c			
42	-60.09	66.05	74.74	17.39332	M1c	-62.94	-55.67	-53.14	5.07084	M2c	-56.26	-577.88	-571.94	-1031.357	M3a	M1c			
44	73.70	176.96	189.24	24.5568	M1c	71.89	71.29	73.36	2.92856	M2a	82.28	-560.42	-557.05	-1278.655	M3a	M1c			
47	49.37	147.60	150.13	5.058	M1c	42.75	39.27	42.99	0.48882	M2a	43.82	43.27	54.57	21.48922	M3c	M1c			
49	74.51	165.89	215.57	99.3724	M1c	43.80	28.43	47.35	7.0961	M2c	48.98	37.82	71.90	45.83436	M3c	M1c			
54	15.79	111.70	111.74	0.0816	M1b	16.41	21.21	23.55	4.67664	M2c	22.22	17.91	28.54	12.64342	M3c	M1b			
58	40.27	75.02	115.30	80.55798	M1c	24.52	20.57	24.68	0.30228	M2a	-312.24	22.55	-402.79	-850.6776	M3b	M1c			
60	6.34	5.74	22.76	32.828288	M1c	-7.47	-11.63	-7.28	0.391438	M2a	-6.90	-276.20	-264.76	-515.7035	M3a	M1c			
66	22.55	187.26	187.30	0.0674	M1b	22.48	23.94	24.49	1.0996	M2b	23.09	48.24	49.18	1.87472	M3b	M1b			
67	140.59	277.41	277.86	0.9038	M1b	142.98	146.39	148.48	4.1882	M2c	141.09	-555.94	-549.02	-1380.222	M3a	M1b			
68	24.55	207.94	207.97	0.0562	M1b	26.07	56.99	57.33	0.68884	M2b	30.61	71.73	75.20	6.92752	M3c	M1b			
181	30.79	67.13	67.15	0.04086	M1b	30.89	32.46	32.49	0.07298	M2b	45.22	33.23	49.27	8.11698	M3c	M1b			

gdzie: pogrubioną czcionką oznaczono logarytmny funkcji wiarygodności statystycznie najlepszych modeli M1, M2 i M3 spośród wszystkich rozważanych;

W przypadku rozkładu GPD dla 17 z 20 analizowanych przejazdów najlepszy model uzyskiwano dla zmiennego w czasie parametru skali β , dla pozostałych 3 - parametru kształtu ξ . Modelami o najwyższych wartościach logarytmu funkcji wiarygodności były głównie modele M2a i M3a uzależniające parametry rozkładu wyłącznie od zmieniającej się w czasie prędkości w ruchu rowerowym (dla 16 z 20 przejazdów). W przypadku rozkładu GEV dla 19 z 20 analizowanych przejazdów model o najwyższej wartości logarytmu funkcji wiarygodności uzyskiwano poprzez uwzględnienie niestacjonarności w parametrze położenia α . W przypadku przejazdu o ID=5 najwyższą wartością logarytmu funkcji wiarygodności charakteryzował się model M3c (z liczbą szacowanych parametrów równą 5), który był statystycznie istotnie lepszy od drugiego w kolejności modelu M1b (z liczbą szacowanych parametrów równą 4) ($D_{M_i-M_j}=2 \cdot (80.72-77.25)=6.94 > 3.8415$). Dla 10 z 19 przejazdów najlepszym modelem był model M1b, uzależniający parametr położenia wyłącznie od zmienności natężenia ruchu rowerowego, zaś dla pozostałych 9 przejazdów – model M1c uwzględniający zmienność zarówno natężenia jak i prędkości w ruchu rowerowym.

Na podstawie wybranych i zestawionych w tabelach 8-3 i 8-4 postaciach modeli M1, M2 i M3 zbudowano kolejne 4 modele M4, M5, M6 i M7. Wartości logarytmów funkcji wiarygodności dla nowych modeli wraz z informacją o liczbie szacowanych parametrów osobno dla rozkładu GEV i GPD zestawiono odpowiednio w tabelach 8-5 i 8-7. W przypadku rozkładu GEV dla przejazdu o ID=3 modelem o najwyższej wartości $LogL$ był jednocześnie model o najmniejszej liczbie szacowanych parametrów tj. M4, który od razu przyjęto do dalszych badań. Dla pozostałych przejazdów najwyższą wartością logarytmu funkcji wiarygodności charakteryzowała model M7. Za pomocą statystyki $D_{M_i-M_j}$ porównano go z trzema pozostałymi modelami (M4, M5 i M6). Model M7 wybrano do dalszych badań jeżeli był statystycznie istotny lepszy od wszystkich pozostałych modeli ($D_{M7-M_j} > \chi_{0.95,df}$). W przeciwnym wypadku wybrano model o $D_{M_i-M_j} < \chi_{0.95,df}$ z najmniejszą liczbą szacowanych parametrów. Informację o wybranym modelu przedstawiono w tabeli 8-5. W przypadku rozkładu GPD w dalszych analizach uwzględniono model M6.

Tab. 8-5 Logarytmy funkcji wiarygodności $LogL$ i wartości statystyki $D_{M_i-M_j}$ modeli niestacjonarnych dla rozkładu GEV.

Źródło: opracowanie własne

ID przejazdu	M4		M5		M6		M7		D_{M7-M4}	D_{M7-M5}	D_{M7-M6}	Wybrany model M_m uwzględniający niestacjonarność w dwóch lub trzech parametrach rozkładu
	$LogLM4$	Liczba parametrów	$LogLM5$	Liczba parametrów	$LogLM6$	Liczba parametrów	$LogLM7$	Liczba parametrów				
3	129.713	5	-481.2	6	47.2548	6	-402.05	7	-	-	-	M4
4	186.815	6	187.584	5	75.5115	6	192.493	7	11.3568	9.8188	233.9636	M7
5	84.7801	5	120.767	6	85.8451	6	133.119	7	96.6770	24.7034	94.5470	M7
10	134.534	7	-236.61	6	83.308	6	135.649	8	2.2298	744.5200	104.6824	M4
15	228.003	5	227.4	5	131.002	5	228.299	6	0.5912	1.7962	194.5938	M4
20	134.974	6	125.836	5	26.9212	6	144.04	7	18.1314	36.4088	234.2378	M7
29	143.179	5	139.947	5	26.5258	5	144.671	6	2.9832	9.4472	236.2898	M4
30	49.572	7	52.1542	7	-66.178	7	54.673	9	10.2020	5.0376	241.7014	M5
36	54.535	6	62.5465	6	-48.482	5	67.6783	7	26.2866	10.2636	232.3212	M7
42	107.626	7	81.7771	6	-41.603	6	118.896	8	22.5398	74.2380	320.9980	M7
44	190.127	6	205.37	6	88.9383	5	210.485	7	40.7174	10.2312	243.0940	M7
47	150.232	6	173.105	7	64.2302	6	174.7	8	48.9356	3.1908	220.9400	M5
49	273.247	7	-668	7	84.8993	7	292.315	9	38.1362	1920.6294	414.8314	M7
54	112.568	6	122.813	6	36.0343	7	124.203	8	23.2704	2.7800	176.3370	M5
58	120.191	6	-392.49	6	24.9907	5	120.201	7	0.0198	1025.3842	190.4198	M4
60	22.7603	6	33.755	6	-4.2454	5	33.7676	7	22.0146	0.0252	76.0260	M5
66	191.331	5	-587.26	5	73.5869	5	202.349	6	22.0354	1579.2226	257.5236	M7
67	308.084	6	277.834	5	149.021	6	308.539	7	0.9102	61.4100	319.0352	M4
68	214.943	5	234.086	6	110.335	6	240.374	7	50.8624	12.5770	260.0780	M7
181	67.5805	5	83.3357	6	49.3552	6	84.8517	7	34.5424	3.0320	70.9930	M5

gdzie: pogrubioną czcionką oznaczono model uwzględniający niestacjonarność w dwóch lub trzech parametrach rozkładu o wyższej wartości logarytmu funkcji wiarygodności;

W tabelach 8-6 oraz 8-7 zestawiono wartości logarytmów funkcji wiarygodności $LogL$ i liczbę szacowanych parametrów dla modelu stacjonarnego M_0 , modelu niestacjonarnego dla jednego parametru rozkładu M_n (Tab. 8-3 dla rozkładu GPD i Tab. 8-4 dla rozkładu GEV) oraz modelu niestacjonarnego dla dwóch lub trzech parametrów rozkładu M_m (Tab. 8-5 dla rozkładu GEV, Model M6 dla rozkładu GPD) odpowiednio dla rozkładu GEV i GPD. Na podstawie wartości $D_{M_n-M_0}$ można stwierdzić, że niezależnie od metody określania wartości ekstremalnych opóźnień w ruchu rowerowym (metoda maksimów blokowych lub metoda przekroczeń) modele niestacjonarne są lepiej dopasowane do danych empirycznych od modeli stacjonarnych. Wartości logarytmów funkcji wiarygodności modeli, w których parametry rozkładów GEV i GPD uzależnione były od prędkości czy natężenia ruchu rowerowego, dla każdego analizowanego przejazdu są statystycznie istotnie wyższe niż dla modeli ze stałymi wartościami tych parametrów. Uwzględnienie niestacjonarności w co najmniej dwóch z trzech parametrach rozkładu GEV statystycznie istotnie poprawiło jakość dopasowania modelu do danych empirycznych dla 19 z 20 badanych przejazdów. W przypadku rozkładu GPD dla ponad połowy przejazdów (12 z 20) uwzględnienie zmieniających się w czasie wartości zarówno parametru skali β jak i kształtu ξ nie wpłynęło statystycznie istotnie na poprawę jakości dopasowania modeli do danych empirycznych.

W tabelach 8-6 oraz 8-7 wskazano również ostateczne postacie przyjętych modeli. Jeżeli wartość statystyki $D_{M_m-M_n}$ była większa od wartości krytycznej rozkładu chi-kwadrat $\chi_{0.95,df}$, przyjmowano model niestacjonarny dla min. dwóch parametrów rozkładu. W przeciwnym wypadku wybrano model M_n (prostszy, z mniejszą liczbą parametrów). Wartości parametrów rozkładów przyjętych ostatecznie modeli zestawiono w tabelach 8-8 i 8-9 odpowiednio dla rozkładu GEV i GPD.

Tab. 8-6 Wartości logarytmów funkcji wiarygodności wraz z wartościami statystyki D dla porównania modeli stacjonarnych z modelami niestacjonarnymi dla rozkładu GEV.

Źródło: opracowanie własne

ID przejazdu	Model stacjonarny M_0		Model niestacjonarny dla jednego parametru rozkładu (Tab. 8-3)			Najlepszy model niestacjonarny dla dwóch lub trzech parametrów rozkładu (Tab. 8-5)			Wybrany model
	$LogL_{M_0}$	Liczba parametrów	$LogL_{M_n}$	Liczba parametrów	$D_{M_n-M_0}$	$LogL_{M_m}$	Liczba parametrów	$D_{M_m-M_n}$	
3	1.96	3	117.14	4	230.3642	129.71	5	25.14	M4
4	64.09	3	181.81	4	235.4438	192.49	7	21.37	M7
5	34.54	3	80.72	5	92.347	133.12	7	104.81	M7
10	60.92	3	105.89	5	89.926	134.53	7	57.29	M4
15	128.09	3	227.19	4	198.2062	228.00	5	1.62	M1b
20	8.86	3	115.89	4	214.0572	144.04	7	56.30	M7
29	9.75	3	136.25	4	253.001	143.18	5	13.86	M4
30	-77.74	3	44.86	5	245.1924	52.15	7	14.59	M5
36	-65.98	3	44.92	5	221.803	67.68	7	45.52	M7
42	-66.06	3	74.74	5	281.6104	118.90	8	88.30	M7
44	70.03	3	189.24	5	238.4166	210.49	7	42.49	M7
47	39.27	3	150.13	5	221.7258	173.10	7	45.95	M5
49	25.79	3	215.57	5	379.5552	292.32	9	153.49	M7
54	15.78	3	111.70	4	191.8366	122.81	6	22.22	M5
58	19.98	3	115.30	5	190.6298	120.19	6	9.78	M4
60	-11.92	3	22.76	5	69.3586	33.76	6	22.00	M5
66	21.68	3	187.26	4	331.1776	202.35	6	30.17	M7
67	140.54	3	277.41	4	273.737	308.08	6	61.35	M4
68	24.27	3	207.94	4	367.3418	240.37	7	64.87	M7
181	30.78	3	67.13	4	72.7032	83.34	6	32.41	M5

Tab. 8-7 Wartości logarytmów funkcji wiarygodności wraz z wartościami statystyki D dla porównania modeli stacjonarnych z modelami niestacjonarnymi dla rozkładu GPD.

Źródło: opracowanie własne

ID przejazdu	Model stacjonarny M0		Model niestacjonarny dla jednego parametru rozkładu (Tab. 8-4)			Model niestacjonarny dla dwóch parametrów rozkładu M6			Wybrany model
	LogL _{M0}	Liczba parametrów	LogL _{Mn}	Liczba parametrów	D _{Mn-M0}	LogL _{M6}	Liczba parametrów	D _{M6-Mn}	
3	1299.27	3	1323.07	5	43.94	1325.83	7	5.524	M2c
4	1124.68	3	1130.65	4	11.936	1130.65	5	0.004	M2a
5	485.17	3	498.82	4	27.3	499.05	5	0.4552	M3a
10	374.41	3	382.77	5	16.02	384.50	5	3.4554	M2c
15	689.25	3	692.22	4	5.9482	692.30	5	0.1418	M2b
20	1442.52	3	1462.11	4	39.182	1464.09	5	3.948	M6
29	681.99	3	692.50	4	21.0104	693.08	5	1.177	M2a
30	1037.28	3	1053.15	4	31.742	1055.67	5	5.03	M6
36	926.48	3	950.32	4	47.674	953.35	5	6.0618	M6
42	2185.36	3	2207.94	4	45.162	2211.08	6	6.272	M6
44	2579.21	3	2588.55	4	18.674	2588.56	5	0.026	M2a
47	710.53	3	723.70	4	26.3336	726.96	6	6.529	M6
49	3053.55	3	3078.51	4	49.916	3084.41	6	11.8	M6
54	608.85	3	626.90	5	36.1042	628.89	7	3.9706	M2c
58	764.18	3	790.93	5	53.5044	791.73	7	1.589	M2c
60	269.54	3	275.11	4	11.1488	275.38	5	0.5228	M2a
66	3077.39	3	3089.10	4	23.426	3089.18	5	0.15	M2a
67	3741.08	3	3755.26	4	28.352	3755.49	5	0.464	M2a
68	4198.09	3	4236.46	4	76.74	4240.03	5	7.138	M6
181	173.07	3	189.66	4	33.1806	192.47	5	5.6188	M6

Tab. 8-8 Wartości parametrów rozkładu GEV dla przyjętych modeli.

Źródło: opracowanie własne

ID przejazdu	Wybrany model	Parametr położenia α			Parametr skali β			Parametr kształtu ξ		
		α_0	α_1	α_2	β_0	β_1	β_2	ξ_0	ξ_1	ξ_2
3	M4	0.28146	-	0.02549	-2.18642	0.14254	-	-0.19498	-	-
4	M7	0.17503	-	0.01484	-1.56704	-0.02901	-0.01173	-0.68918	0.12969	-
5	M7	0.15607	-	0.03244	-1.48688	-	-0.11895	-1.15195	0.20750	0.11327
10	M4	-0.04841	0.06919	0.04790	-3.44815	0.51316	-0.03482	-0.18729	-	-
15	M1b	0.14097	-	0.02334	0.14014	-	-	-0.07043	-	-
20	M7	0.23581	-	0.02549	-1.79496	0.08589	-0.03560	-0.88816	0.15545	-
29	M4	0.07530	-	0.03069	-2.07552	-	0.03135	0.02370	-	-
30	M5	0.08972	0.01180	0.02448	0.20621	-	-	-0.62930	0.12759	-0.00990
36	M7	0.11116	0.00763	0.02319	-1.48497	-	-0.01832	-0.78045	0.15194	-
42	M7	0.00912	0.08148	0.01556	-2.37865	0.25786	-0.02613	-0.41304	0.10267	-
44	M7	0.31838	0.00740	0.01023	-2.40638	0.17408	-	-1.07224	0.23163	-
47	M5	0.24907	-0.03423	0.03277	0.16248	-	-	-1.31950	0.33180	0.01760
49	M7	-0.01445	0.11291	0.01070	-3.40588	0.46425	0.00166	-0.47037	0.08532	0.01008
54	M5	0.08501	-	0.04036	0.17563	-	-	-0.62171	0.14845	-0.01350
58	M4	-0.22545	0.12145	0.03519	-1.82982	0.08079	-	-0.38661	-	-
60	M5	0.53576	-0.09541	0.02743	0.21456	-	-	-1.02112	0.20996	-
66	M7	0.27464	-	0.01055	-1.77577	-	-0.00382	-0.24726	-	0.01121
67	M4	0.32884	-	0.01159	-2.13136	0.13890	-0.02717	-0.15139	-	-
68	M7	0.31943	-	0.00711	-1.71687	-	-0.00875	-0.95489	0.18679	0.00984
181	M5	0.05298	-	0.05522	0.16921	-	-	-0.50514	0.10766	0.00886

Tab. 8-9 Wartości parametrów rozkładu GPD dla przyjętych modeli.

Źródło: opracowanie własne

ID przejazdu	Wybrany model	Parametr skali β			Parametr kształtu ξ		
		β_0	β_1	β_2	ξ_0	ξ_1	ξ_2
3	M2c	-3.51417	0.44709	0.00920	-0.16202	-	-
4	M2a	-2.62982	0.21307	-	-0.18418	-	-
5	M3a	0.10833	-	-	-1.94783	0.63927	-
10	M2c	-3.45748	0.45362	0.04371	-0.21368	-	-
15	M2b	-1.89207	-	-0.02161	-0.05139	-	-
20	M6	-3.50758	0.48152	-	0.24073	-0.12337	-
29	M2a	-2.76989	0.28802	-	-0.20423	-	-
30	M6	-3.53124	0.45046	-	0.43957	-0.14033	-
36	M6	-3.62132	0.48431	-	0.32156	-0.12434	-
42	M6	-3.04507	0.32983	-	-0.09959	0.03174	-0.00304
44	M2a	-2.92860	0.28173	-	-0.14771	-	-
47	M6	-3.11545	0.37582	-	-0.42264	0.05628	0.01802
49	M6	-2.81298	0.26576	-	-0.37616	0.08870	0.00284
54	M2c	-2.82140	0.24975	0.02415	-0.18964	-	-
58	M2c	-3.54882	0.49567	0.02371	-0.24679	-	-
60	M2a	-2.56590	0.26657	-	-0.23420	-	-
66	M2a	-3.17892	0.33972	-	-0.03526	-	-
67	M2a	-3.00351	0.31154	-	-0.13228	-	-
68	M6	-2.77674	0.23312	-	-1.01595	0.28219	-
181	M6	-3.71133	0.52358	-	0.80348	-0.24517	-

8.4.2 Graniczna wartość opóźnienia w ruchu rowerowym

W tabeli 8-10 zestawiono górne i dolne granice przedziału ufności poziomu bezpieczeństwa ruchu dla analizowanych przejazdów przy założeniu poziomu istotności 0.05 oraz 0.01 (wz. 8.18).

Tab. 8-10 Przedziały ufności poziomu bezpieczeństwa ruchu.

Źródło: opracowanie własne

ID przejazdu	Liczba zdarzeń w latach 2017-2019	95% przedział ufności ($\alpha=0.05$)		99% przedział ufności ($\alpha=0.01$)	
		dolna granica	górną granica	dolna granica	górną granica
3	0	0.000	3.689	0.000	5.298
4	1	0.025	5.572	0.005	7.430
5	3	0.619	8.767	0.338	10.977
10	3	0.619	8.767	0.338	10.977
15	2	0.242	7.225	0.104	9.274
20	3	0.619	8.767	0.338	10.977
29	0	0.000	3.689	0.000	5.298
30	1	0.025	5.572	0.005	7.430
36	0	0.000	3.689	0.000	5.298
42	1	0.025	5.572	0.005	7.430
44	6	2.202	13.059	1.537	15.660
47	1	0.025	5.572	0.005	7.430
49	2	0.242	7.225	0.104	9.274
54	0	0.000	3.689	0.000	5.298
58	0	0.000	3.689	0.000	5.298
60	1	0.025	5.572	0.005	7.430
66	7	2.814	14.423	2.037	17.134
67	6	2.202	13.059	1.537	15.660
68	4	1.090	10.242	0.672	12.594
181	0	0.000	3.689	0.000	5.298

Na podstawie wyznaczonych w pkt. 8.4.1 postaci rozkładów GEV i GPD wartości ekstremalnych opóźnienia w ruchu rowerowym, dla każdej wartości opóźnienia od 0.2m/s^2 do 3.0m/s^2 (z krokiem co 0.1m/s^2) obliczono wartość Lop_a , określającą ile razy w okresie analizy 2017-2019 wystąpi opóźnienie o wartości co najmniej równej a . Wyniki zestawiono w tabelach 8-11 oraz 8-12 odpowiednio dla rozkładu GEV i GPD. Wartości Lop_a , które mieszczą się w przedziale ufności 95% poziomu bezpieczeństwa ruchu oznaczono w poniższych tabelach poprzez podkreślenie, zaś mieszczące się w przedziale ufności 99% pogrubioną czcionką.

Szacowana dla rozkładu GEV liczba opóźnień w ruchu rowerowym Lop_a w przyjętym okresie analizy dla większości przejazdów i wartości opóźnienia jest wyższa niż w przypadku rozkładu GPD. Największą zbieżność pomiędzy obserwowaną liczbą zdarzeń drogowych w okresie 2017-2019, a szacowaną liczbą opóźnień w ruchu rowerowym uzyskano dla wartości opóźnienia w ruchu rowerowym równej 1.6m/s^2 oraz 2.0m/s^2 odpowiednio dla rozkładu GPD i GEV. Wartości $Lop_{1.6}$ oraz $Lop_{2.1}$ mieszczą się bowiem w przedziale ufności 99% poziomu bezpieczeństwa ruchu dla 60% wszystkich analizowanych przejazdów (12 z 20). Należy jednak zauważyć, że wspomnianą zbieżność uzyskano przede wszystkim dla przejazdów, na których nie zarejestrowano żadnego bądź zarejestrowano tylko 1 zdarzenie drogowe. Dla przejazdów o ID 5, 10, 20, 44, 66 bądź 67 na których doszło do 3, 6 lub 7 zdarzeń drogowych, zbieżność liczby zdarzeń drogowych z wartością Lop_a obserwuje się z reguły dla niższych wartości opóźnienia w ruchu rowerowym.

Przyjęcie wyższej wartości poziomu istotności równej 0.05, prowadzi do zawężenia przedziału ufności poziomu bezpieczeństwa ruchu. Dla poziomu ufności 0.95 największą zbieżność pomiędzy obserwowaną liczbą zdarzeń drogowych, a szacowaną liczbą opóźnień w ruchu rowerowym zarejestrowano dla wartości opóźnienia 1.3m/s^2 oraz od 1.5m/s^2 do 1.8m/s^2 dla rozkładu GPD, a także 2.1m/s^2 oraz od 2.7m/s^2 do 3.0m/s^2 w przypadku rozkładu GEV. Szacowana liczba wystąpień wskazanych wyżej wartości opóźnień w 3-letnim okresie analizy mieści się w przedziale ufności 95% poziomu bezpieczeństwa ruchu dla 50% analizowanych przejazdów (10 z 20).

Tab. 8-11 Liczba opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach nie mniejszych od zadana w okresie analizy 2017-2019 dla rozkładu GEV.
Źródło: opracowanie własne

ID przejazdu	Lop2.2	Lop2.3	Lop2.4	Lop2.5	Lop2.6	Lop2.7	Lop2.8	Lop2.9	Lop2.10	Lop2.11	Lop2.12	Lop2.13	Lop2.14	Lop2.15	Lop2.16	Lop2.17	Lop2.18	Lop2.19	Lop2.20	Lop2.21	Lop2.22	Lop2.23	Lop2.24	Lop2.25	Lop2.26	Lop2.27	Lop2.28	Lop2.29	Lop2.30
3	12763.87	10972.89	8588.53	6087.84	3916.59	2295.46	1228.22	600.38	268.51	110.29	41.71	14.41	4.43	1.16	0.25	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	11806.12	8904.72	5923.75	3429.01	1700.55	713.41	254.71	80.31	24.05	7.53	2.64	1.05	0.46	0.22	0.11	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	4875.21	3346.37	1861.32	783.03	263.09	88.78	34.03	15.01	7.49	4.13	2.47	1.57	1.06	0.74	0.54	0.40	0.31	0.24	0.19	0.16	0.13	0.11	0.09	0.08	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04
10	4673.72	3277.93	1998.73	1091.64	549.00	259.52	117.00	50.80	21.40	8.78	3.52	1.38	0.53	0.20	0.07	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	8563.80	5657.30	3223.62	1629.84	750.00	319.33	126.71	46.86	16.08	5.07	1.45	0.37	0.08	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	11020.60	9299.25	7139.54	4848.44	2814.37	1350.50	530.60	178.79	57.83	20.31	7.90	3.35	1.54	0.76	0.40	0.22	0.13	0.08	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29	7998.71	5430.66	3461.97	2118.96	1265.57	746.30	438.07	257.34	151.80	90.10	53.87	32.46	19.72	12.08	7.46	4.64	2.91	1.84	1.17	0.75	0.48	0.31	0.21	0.14	0.09	0.06	0.04	0.03	0.02
30	11223.41	8925.45	6628.73	4606.80	2997.36	1822.87	1033.10	544.19	266.91	123.68	56.37	26.79	13.84	7.82	4.71	2.97	1.95	1.31	0.91	0.64	0.46	0.34	0.25	0.19	0.14	0.11	0.09	0.07	0.05
36	10202.27	8015.56	5789.14	3819.79	2297.34	1269.63	659.34	333.89	172.00	92.68	52.71	31.57	19.79	12.90	8.70	6.05	4.31	3.14	2.34	1.77	1.36	1.06	0.84	0.67	0.54	0.44	0.37	0.30	0.26
42	14788.39	12783.96	10237.99	7601.68	5273.56	3474.56	2225.72	1417.83	911.80	596.21	397.34	269.95	186.85	131.63	94.28	68.59	50.63	37.88	28.71	22.01	17.07	13.37	10.58	8.45	6.80	5.52	4.52	3.72	3.08
44	17460.70	15686.76	12725.94	9084.34	5646.44	3095.82	1542.00	719.08	322.69	144.01	65.89	31.67	16.18	8.78	5.04	3.03	1.91	1.24	0.84	0.58	0.41	0.29	0.22	0.16	0.12	0.10	0.07	0.06	0.05
47	9694.12	6880.13	4283.68	2372.81	1249.69	679.84	398.73	252.70	170.89	121.63	90.18	69.08	54.34	43.71	35.81	29.81	25.16	21.48	18.54	16.14	14.17	12.53	11.16	9.99	8.99	8.14	7.40	6.75	6.18
49	17864.33	15523.77	11687.18	7709.24	4621.19	2617.60	1448.51	802.66	452.33	261.49	155.73	95.71	60.69	39.67	26.68	18.42	13.04	9.43	6.97	5.24	4.01	3.11	2.45	1.96	1.58	1.29	1.06	0.88	0.74
54	7635.56	5432.92	3508.74	2075.01	1143.96	606.32	322.09	178.05	104.24	64.68	42.26	28.85	20.42	14.91	11.17	8.56	6.69	5.31	4.29	3.50	2.90	2.42	2.05	1.74	1.50	1.29	1.12	0.98	0.87
58	8244.75	6351.24	4350.78	2578.29	1280.83	516.11	164.36	40.38	7.54	1.10	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	3978.79	3071.21	2165.17	1359.20	727.50	313.99	129.93	65.14	37.96	24.19	16.40	11.65	8.60	6.54	5.10	4.07	3.30	2.72	2.27	1.92	1.64	1.42	1.23	1.08	0.95	0.84	0.75	0.68	0.61
66	17026.51	14220.39	10431.79	6655.78	3717.49	1863.17	877.71	414.43	205.78	107.90	59.54	34.48	20.86	13.13	8.56	5.75	3.98	2.82	2.04	1.51	1.14	0.87	0.67	0.53	0.42	0.34	0.28	0.23	0.19
67	17328.39	15325.76	12116.51	8300.53	4808.99	2317.67	929.85	316.18	91.81	22.38	4.37	0.63	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
68	19351.03	16905.67	13063.46	8609.54	4707.75	2140.98	874.94	360.27	159.10	76.64	40.17	22.70	13.69	8.71	5.81	4.03	2.89	2.13	1.61	1.24	0.98	0.78	0.64	0.52	0.43	0.36	0.31	0.26	0.23
181	2708.33	1725.38	1002.93	547.19	290.19	155.22	85.93	49.75	30.17	19.12	12.60	8.60	6.05	4.37	3.24	2.45	1.89	1.48	1.18	0.95	0.77	0.64	0.53	0.45	0.38	0.32	0.28	0.24	0.21
Liczba przejazdów, dla których Lopa mieści się w przedziale ufnosci 95%	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	7	6	4	8	9	9	9	9	9	10	9	9	9	9	9	10	10	10	10
Liczba przejazdów, dla których Lopa mieści się w przedziale ufnosci 99%	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	7	6	6	10	11	11	11	10	12	11	11	10	9	9	10	10	11	11	11

Tab. 8-12 Liczba opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach nie mniejszych od zadanej w okresie analizy 2017-2019 dla rozkładu GPD.

Źródło: opracowanie własne

ID przejazdu	Lopn2	Lopn3	Lopn4	Lopn5	Lopn6	Lopn7	Lopn8	Lopn9	Lopn10	Lopn11	Lopn12	Lopn13	Lopn14	Lopn15	Lopn16	Lopn17	Lopn18	Lopn19	Lopn20	Lopn21	Lopn22	Lopn23	Lopn24	Lopn25	Lopn26	Lopn27	Lopn28	Lopn29	Lopn30	
3	3605,70	1726,91	807,33	370,88	168,44	76,01	34,21	15,42	6,98	3,18	1,47	0,69	0,33	0,16	0,08	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
4	3998,06	1674,05	632,82	204,07	54,25	11,56	1,96	0,27	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
5	1124,02	551,89	324,17	214,18	153,19	115,88	91,33	74,26	61,87	52,56	45,37	39,69	35,11	31,36	28,24	25,61	23,37	21,45	19,78	18,33	17,05	15,91	14,91	14,00	13,19	12,46	11,79	11,19	10,64	
10	515,42	118,42	23,84	4,30	0,71	0,11	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
15	2799,26	1273,53	562,03	240,03	98,94	39,24	14,92	5,42	1,87	0,61	0,19	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	4112,09	2081,83	954,80	379,16	120,59	26,78	3,65	0,41	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29	4458,70	2419,61	1249,16	613,43	287,18	128,72	55,53	23,20	9,46	3,79	1,51	0,60	0,24	0,10	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	5205,35	2918,03	1564,85	788,33	363,38	147,00	48,55	11,48	1,72	0,34	0,11	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
36	4763,99	2667,07	1434,79	729,71	343,56	145,65	53,79	17,02	4,88	1,34	0,35	0,11	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
42	4633,84	2522,70	1404,50	800,08	466,28	277,85	169,14	105,09	66,56	42,94	28,18	18,79	12,72	8,74	6,08	4,29	3,06	2,21	1,61	1,19	0,88	0,66	0,50	0,38	0,29	0,23	0,18	0,14	0,11	
44	4095,86	1714,22	650,74	220,79	66,01	17,20	3,88	0,76	0,13	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
47	3688,73	1829,70	907,76	457,53	236,24	125,34	68,37	38,32	22,04	13,00	7,85	4,85	3,06	1,96	1,22	0,86	0,58	0,40	0,28	0,19	0,14	0,10	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
49	4067,62	1826,66	817,56	371,24	173,28	83,76	42,06	21,95	11,89	6,67	3,87	2,32	1,43	0,90	0,58	0,39	0,26	0,18	0,13	0,09	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	
54	3176,48	1500,83	672,00	286,87	117,68	46,80	18,21	6,99	2,65	1,00	0,37	0,14	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
58	2449,39	1025,34	417,40	168,22	67,98	27,88	11,70	5,05	2,25	1,04	0,49	0,24	0,12	0,06	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60	2056,90	1115,85	574,80	282,35	133,24	60,96	27,30	12,08	5,34	2,38	1,07	0,49	0,22	0,10	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
66	4232,09	1967,57	908,49	416,78	190,06	86,19	38,89	17,46	7,81	3,48	1,55	0,69	0,30	0,13	0,06	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
67	4049,69	1700,28	654,26	227,89	70,96	19,54	4,72	1,00	0,19	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
68	4554,46	2078,29	987,77	500,08	270,76	156,03	94,98	60,63	40,30	27,73	19,66	14,30	10,65	8,08	6,25	4,90	3,90	3,15	2,57	2,11	1,76	1,48	1,25	1,06	0,91	0,79	0,68	0,60	0,52	
181	1820,83	1090,28	632,06	344,86	170,58	73,02	28,51	13,36	7,19	4,08	2,54	1,66	1,16	0,87	0,70	0,58	0,48	0,41	0,35	0,30	0,26	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	
Liczba przejazdów, dla których Lopn mieści się w przedziale ufnosci 95%	0	0	0	1	1	0	4	2	7	9	9	10	9	10	10	10	10	9	9	9	9	9	9	8	8	8	7	7	7	
Liczba przejazdów, dla których Lopn mieści się w przedziale ufnosci 99%	0	0	0	1	1	0	4	4	8	11	10	10	11	11	12	11	11	10	10	9	9	9	9	9	9	9	8	8	9	

8.5 Wnioski

Celem badań opisanych w rozdziale 8 była ocena możliwości identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów na podstawie prawdopodobieństwa wystąpienia ekstremalnych wartości opóźnienia w ruchu rowerowym wraz z wyznaczeniem granicznej wartości opóźnienia w ruchu rowerów systemu miejskiego, która mogłaby być stosowana w tym celu. Wyniki badań wykonanych z wykorzystaniem teorii wartości ekstremalnych wskazują, że poziom bezpieczeństwa ruchu rowerowego jest najlepiej reprezentowany przez liczbę wystąpień opóźnień w ruchu rowerów systemu miejskiego o wartościach nie mniejszych niż 1.6m/s^2 oraz 2.0m/s^2 odpowiednio dla metody przekroczeń i metody maksimumów blokowych wyboru wartości ekstremalnych z danych historycznych. Dla 12 z 20 (60%) analizowanych przejazdów rowerowych przez drogę drugiego rzędu zlokalizowanych w ciągu drogi dla rowerów, szacowana liczba wystąpień opóźnień o wartościach nie mniejszych niż wskazane powyżej, mieściła się w przedziale ufności 99% poziomu bezpieczeństwa ruchu wyznaczonego na podstawie zarejestrowanej liczby zdarzeń drogowych. Podobne dopasowanie wyników uzyskanych na podstawie teorii wartości ekstremalnych do danych o zdarzeniach drogowych uzyskano w pracy (Songchitrukha i Tarko, 2006) (oszacowana liczba wystąpień wartości $PET \leq 0\text{s}$ mieściła się w przedziale ufności 99% poziomu bezpieczeństwa ruchu dla 8 z 12 analizowanych skrzyżowań (66%)). Ponadto wykazano, że modele niestacjonarne, uwzględniające wpływ natężenia i prędkości rowerzystów na opóźnienia w ruchu rowerowym, lepiej opisują zmienność ekstremalnych wartości opóźnień w ruchu rowerowym w porównaniu do modeli stacjonarnych.

Wyznaczone graniczne wartości opóźnienia w ruchu rowerowym są najbardziej zbliżone do wartości prezentowanych w (CROW, 2006) równych 1.5m/s^2 oraz 2.6m/s^2 , wskazywanych jako opóźnienia odpowiednio przy komfortowym i gwałtownym hamowaniu roweru.

9. Podsumowanie

Skutkiem działań podejmowanych na rzecz promocji roweru jako atrakcyjnej alternatywy dla indywidualnego ruchu zmotoryzowanego jest obserwowany wzrost natężenia ruchu rowerowego w polskich miastach. Pociąga on za sobą zwiększenie zagrożenia bezpieczeństwa rowerzystów, co potwierdzają dane o zdarzeniach drogowych zarówno krajowe jak i zagraniczne. Ograniczenia klasycznej metody analiz bezpieczeństwa ruchu opartej na rejestrowanej liczbie zdarzeń drogowych oraz fakt nieraportowania przez policję części zdarzeń w szczególności z udziałem niechronionych uczestników ruchu drogowego, wymusza poszukiwanie nowych metod prowadzenia tego typu badań, które opierać się będą na miarach pośrednich. Klasyczne miary pośrednie takie jak czas do kolizji TTC oraz czas po opuszczeniu punktu kolizji PET, wyznaczone na podstawie badań empirycznych z wykorzystaniem techniki wideo, mogą być stosowane tylko w przypadku wstępnie wytypowanych lokalizacji. Niezależnie od sposobu prowadzenia oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego (klasycznie lub z wykorzystaniem miar pośrednich) podstawowymi parametrami ruchu determinującymi wystawienie na ryzyko oraz ciężkość zdarzeń drogowych, są natężenie ruchu oraz prędkość. Studia literatury zagranicznej wskazują na trudności w pozyskiwaniu reprezentatywnych wartości tych parametrów w odniesieniu do ruchu rowerowego. Z powyższych względów w pracy podjęto badania nad możliwością wykorzystania danych GPS z systemu rowerów miejskich do szacowania parametrów ruchu rowerowego, oceny bezpieczeństwa w ruchu rowerowym oraz identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów w skali makro.

Realizacja celów pracy wymagała w pierwszej kolejności oceny związku pomiędzy parametrami ruchu ogółu rowerzystów, a parametrami ruchu użytkowników systemu rowerów miejskich. Na podstawie analizy wariancji ANOVA oraz przy wykorzystaniu uogólnionych modeli liniowych wykonano analizę porównawczą zmienności sezonowej oraz wpływu warunków pogodowych na natężenia ruchu rowerowego i liczbę wypożyczeń rowerów miejskich. Uogólnione modele liniowe były również podstawą badań nad udziałem rowerów miejskich w natężeniu dobowym ruchu rowerowego i związkiem pomiędzy prędkościami chwilowymi rowerzystów korzystających z rowerów miejskich, a prędkościami ogółu rowerzystów wyznaczonymi w badaniach empirycznych. W ramach oceny bezpieczeństwa ruchu rowerowego zidentyfikowano miarę pośrednią wyznaczoną na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich, która wykazywała najsilniejszy związek z liczbą rejestrowanych zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów, oceniony na podstawie wartości kryterium informacyjnego Akaike uogólnionych modeli liniowych. Wybrana miara pośrednia była podstawą budowy modelu bezpieczeństwa ruchu rowerowego, umożliwiającego ocenę poziomu bezpieczeństwa ruchu rowerowego reprezentowanego poprzez liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów na przejazdach rowerowych z uwzględnieniem wpływu czynników drogowo-ruchowych. Ponadto w skali makro w sposób ilościowy oszacowano wpływ czynników infrastrukturalnych zidentyfikowanych na podstawie baz danych OpenStreetMap oraz CARTO na zagrożenie zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów (ocenione w oparciu o wytypowaną miarę pośrednią bezpieczeństwa ruchu rowerowego). Na podstawie teorii wartości ekstremalnych oszacowano graniczną wartość

miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego, która mogłaby być wykorzystana do identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów.

9.1 Najważniejsze efekty pracy

Na podstawie rezultatów badań zaprezentowanych w pracy sformułowano następujące wnioski naukowe:

- 1) w zakresie szacowania parametrów ruchu rowerowego:
 - wskaźniki sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego w poszczególnych lokalizacjach stacji pomiaru ruchu rowerowego nie różnią się statystycznie istotnie od wskaźników zmienności wyznaczonych jako średnie dla wszystkich lokalizacji (dla 18 z 24 analizowanych miesięcy);
 - wartości wskaźników sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego wyznaczone jako średnie dla wszystkich lokalizacji stacji pomiaru ruchu nie różnią się statystycznie istotnie od wskaźników sezonowej zmienności liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego (dla 22 z 24 analizowanych miesięcy);
 - warunki pogodowe, tj. średnia temperatura powietrza i wielkość opadów deszczu, oraz występowanie weekendów i dni wolnych od pracy oraz ferii i wakacji szkolnych mają statystycznie istotny wpływ na wskaźnik dobowej zmienności natężenia ruchu rowerowego oraz wskaźnik dobowej zmienności liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego ($p < 0.01$);
 - wpływ warunków pogodowych oraz występowania weekendów i dni wolnych od pracy oraz ferii i wakacji szkolnych na wartość wskaźnika dobowej zmienności liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego jest zbliżony do ich wpływu na wskaźnik dobowej zmienności natężenia ruchu rowerowego ($R^2 = 0.961$);
 - dobowe natężenie ruchu rowerów systemu miejskiego oraz charakter ruchu rowerowego odbywającego się w danej lokalizacji (turystyczny, gospodarczy) są statystycznie istotnymi determinantami natężenia ruchu ogółu rowerzystów w danej lokalizacji ($R^2 = 0.906$; $p < 0.01$);
 - udział rowerów systemu miejskiego w całym potoku rowerzystów nie jest statystycznie istotnie zależny od dnia tygodnia oraz występowania wakacji szkolnych ($p \geq 0.05$);
 - prędkości chwilowe osiągane przez użytkowników systemu rowerów miejskich są statystycznie istotnie niższe od prędkości chwilowych ogółu rowerzystów ($p < 0.05$), średnio o 17.4%;
 - prędkości chwilowe rowerów systemu miejskiego oraz element infrastruktury drogowej (odcinek drogi lub przejazd) są statystycznie istotnymi determinantami prędkości ogółu rowerzystów w danej lokalizacji ($R^2 = 0.790$; $p < 0.05$);
 - typ infrastruktury rowerowej nie ma statystycznie istotnego wpływu na prędkość chwilową ruchu rowerowego w danej lokalizacji ($p \geq 0.05$);
- 2) w zakresie oceny bezpieczeństwa ruchu rowerowego i identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów:

- miarą pośrednią bezpieczeństwa ruchu rowerowego wyznaczoną na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich, której zmienność najlepiej opisuje zmienność liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów na przejazdach rowerowych, jest liczba opóźnień w ruchu o wartościach nie mniejszych niż 0.6m/s^2 (ocena na podstawie wartości kryterium informacyjnego AIC). Miara ta jest statystycznie istotnym predyktorem liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów;
- natężenie ruchu rowerów systemu miejskiego oraz ich średnia prędkość, klasa drogi samochodowej oraz wielkość analizowanego w obrębie przejazdu rowerowego obszaru mają statystycznie istotny wpływ na liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów ($p < 0.06$);
- model umożliwiający predykcję liczby zdarzeń drogowych zawierający z zbiorze zmiennych niezależnych miarę pośrednią jaką jest liczba opóźnień w ruchu o wartościach nie mniejszych niż 0.6m/s^2 jest statystycznie istotnie lepiej dopasowany do danych empirycznych w porównaniu do modelu zbudowanego z pominięciem tej zmiennej niezależnej (ocena na podstawie wartości kryterium informacyjnego AIC);
- zagrożenie zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty (utożsamiane z wystąpieniem opóźnień w ruchu rowerów miejskich o wartościach co najmniej 0.6m/s^2) wzrasta istotnie na przejazdach rowerowych i w pobliżu miejsc parkingowych, gdzie ruch rowerowy krzyżuje się z ruchem samochodowym, jak również w pobliżu miejsc przecięć ruchu rowerowego z ruchem pieszym, takich jak przystanki i pętle tramwajowe i autobusowe, sklepy, obiekty związane z czasem wolnym (np. place zabaw, parki, baseny);
- w pobliżu przystanków tramwajowych, sklepów, obiektów o spodziewanym zwiększonym ruchu turystycznym (np. muzea, punkty widokowe) i związanych z czasem wolnym, a także na chodnikach z ruchem rowerowym dopuszczonym znakami C-16 i T-22 opóźnienia co najmniej równe 0.6m/s^2 są obserwowane statystycznie istotnie częściej niż wynikałoby z liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów rejestrowanych w tych miejscach;
- oszacowana przy wykorzystaniu teorii wartości ekstremalnych liczba wystąpień opóźnień w ruchu rowerowych o wartościach 1.6m/s^2 oraz 2.0m/s^2 i większych (odpowiednio dla metody przekroczeń i metody maksimów blokowych) mogłaby zostać wykorzystana do identyfikacji przejazdów rowerowych przez drogę drugiego rzędu zlokalizowanych w ciągu drogi dla rowerów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów.

Do wniosków praktycznych pracy należą:

- wskaźniki sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego mogą być szacowane na podstawie wartości wskaźników sezonowej zmienności liczby wypożyczeń rowerów systemu miejskiego;

- wpływ warunków pogodowych oraz weekendów, dni wolnych od pracy, a także ferii i wakacji szkolnych na dobowy wskaźnik zmienności natężenia ruchu rowerowego może być oszacowany na podstawie ich wpływu na dobowy wskaźnik zmienności liczby wypożyczeń rowerów miejskich;
- natężenie ruchu rowerowego może być oszacowane na podstawie natężenia rowerów systemu miejskiego z uwzględnieniem wpływu charakteru ruchu (turystyczny, gospodarczy) odbywającego się w danej lokalizacji;
- prędkość chwilowa w ruchu rowerowym może być oszacowana na podstawie wartości prędkości chwilowych użytkowników systemu miejskiego z uwzględnieniem wpływu elementu infrastruktury drogowej (odcinek drogowy, przejazd rowerowy);
- ocenę bezpieczeństwa ruchu rowerowego na przejazdach rowerowych można prowadzić na podstawie przedstawionego uogólnionego modelu regresyjnego z wykorzystaniem miary pośredniej brd wyznaczonej z danych GPS z systemu rowerów miejskich, tj. liczby opóźnień w ruchu o wartościach nie mniejszych niż 0.6m/s^2 ;
- dane GPS z systemu rowerów miejskich mogą stanowić uzupełnienie bazy wiedzy obok danych o zdarzeniach drogowych i być wspólnie z nimi wykorzystywane do identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów, w szczególności miejsc o zwiększonym zagrożeniu konfliktami z udziałem niechronionych uczestników ruchu drogowego (rower-rower, rower-pieszy).

9.2 Ocena realizacji celów pracy i weryfikacja tez badawczych

Podstawowe **cele pracy** sprecyzowane w rozdziale 3.1 **zostały osiągnięte** poprzez opracowanie uogólnionych modeli liniowych umożliwiających szacowanie natężeń i prędkości w ruchu rowerowym na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich oraz modelu wypadkowego umożliwiającego ocenę poziomu bezpieczeństwa ruchu rowerowego reprezentowanego przez predykowaną liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów, z wykorzystaniem wyznaczonej na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego. Weryfikacja statystyczna przedstawionych w pracy modeli wskazuje na wysoką jakość ich dopasowania do danych empirycznych. Ponadto wykorzystując teorię wartości ekstremalnych wskazano wartość opóźnienia w ruchu rowerów systemu miejskiego, której liczba wystąpień najlepiej reprezentowała poziom bezpieczeństwa ruchu rowerowego oszacowany na podstawie liczby rejestrowanych zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów. Wskazano tym samym graniczną wartość miary pośredniej brd, która mogłaby być wykorzystana do identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów.

Zaprezentowane wyniki badań wskazują, że dane z urządzeń GPS pochodzące z systemu rowerów miejskich mogą być wykorzystywane do szacowania dobowego natężenia ruchu rowerowego oraz prędkości w ruchu rowerowym. Na podstawie danych o liczbie wypożyczeń rowerów systemu miejskiego możliwe jest oszacowanie wskaźników sezonowej zmienności

nateżenia ruchu rowerowego oraz wpływu warunków pogodowych na natężenie dobowe. Parametry ruchu rowerzystów korzystających z systemu rowerów miejskich pozostają w ścisłym związku z charakterystykami ruchu ogółu rowerzystów. **Wnioski te stanowią potwierdzenie tezy 1 rozprawy zaprezentowanej w rozdziale 3.2.**

Spośród szeregu miar pośrednich bezpieczeństwa ruchu rowerowego wyznaczonych na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich, miarą, której zmienność najlepiej opisuje zmienność zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów, jest liczba opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach nie mniejszych niż 0.6m/s^2 . Zaprezentowany model predykcji liczby zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów na przejazdach rowerowych, w którym zmiennymi niezależnymi są natężenie ruchu rowerów systemu miejskiego oraz ich średnia prędkość, jak również klasa drogi samochodowej (wyróżniona na podstawie danych OSM) oraz wielkość analizowanego w obrębie przejazdu rowerowego obszaru, jest statystycznie istotnie lepiej dopasowany do danych empirycznych przy uwzględnieniu w nim dodatkowej zmiennej objaśniającej, jaką jest liczba opóźnień w ruchu rowerów systemu miejskiego o wartościach nie mniejszych niż 0.6m/s^2 . Potwierdza to możliwość traktowania wskazanej wyżej zmiennej jako pośredniej miary bezpieczeństwa ruchu rowerowego. Prowadzenie monitoringu stanu bezpieczeństwa ruchu przy wykorzystaniu danych GPS z systemu rowerów miejskich i opracowanych modeli umożliwiłoby identyfikację miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzystów oraz podjęcie działań interwencyjnych uprzednio przed możliwym wystąpieniem zdarzeń drogowych w tych lokalizacjach. Pozwoliłoby to na realizację proaktywnego podejścia do bezpieczeństwa ruchu rowerowego. Na podstawie wyników badań przeprowadzonych z wykorzystaniem teorii wartości ekstremalnych można stwierdzić, że identyfikacja przejazdów rowerowych przez drogi drugiego rzędu zlokalizowanych w ciągu drogi dla rowerów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami z udziałem rowerzystów mogłaby być również prowadzona na podstawie liczby wystąpień opóźnień w ruchu rowerów systemu miejskiego równych co najmniej 1.6m/s^2 oraz 2.0m/s^2 (odpowiednio dla metody przekroczeń i metody maksimów blokowych wyznaczania wartości ekstremalnych). Kwantyfikacja wpływu czynników infrastrukturalnych na bezpieczeństwo ruchu rowerowego wykonana w skali makro z wykorzystaniem baz danych OpenStreetMap i CARTO wskazuje, że dane GPS z systemu rowerów miejskich mogą stanowić uzupełnienie bazy wiedzy obok danych o zdarzeniach drogowych i być wspólnie z nimi wykorzystywane do identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów. Dane GPS mogą być wykorzystane w szczególności do identyfikacji miejsc konfliktów z udziałem niechronionych uczestników ruchu rowerowego (rower-rower, rower-pieszcy), które nie byłyby możliwe do zidentyfikowania wyłącznie na podstawie danych wypadkowych. **Powyższe wnioski stanowią potwierdzenie tezy 2 rozprawy zaprezentowanej w rozdziale 3.2.**

9.3 Ograniczenia zastosowanych metod i kierunki dalszych badań

Metoda analiz ruchu rowerowego z wykorzystaniem danych GPS z systemu rowerów miejskich ma kilka ograniczeń. Związane są one przede wszystkim z dokładnością urządzeń GPS i częstotliwością z jaką rejestrowane jest położenie poruszającego się roweru. Parametry

te w bezpośredni sposób wpływają na wyznaczone na podstawie danych GPS prędkości oraz opóźnienia w ruchu rowerowym. Zapewnienie jak najwyższej dokładności pracy urządzeń GPS wpłynie na poprawę jakości szacowanych parametrów ruchu rowerowego na podstawie zebranych danych. Niemniej jednak pojedyncze zakłócenia sygnału GPS, które mogą występować przede wszystkim w pobliżu wysokich budynków, tuneli, przejść podziemnych, mogą powodować, że miejsca o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów będą błędnie identyfikowane. Należy jednak zaznaczyć, że wytypowanie danej lokalizacji jako potencjalnie niebezpiecznej na podstawie danych GPS jest jedynie przesłanką do wykonania w danej lokalizacji szczegółowych analiz ruchu rowerowego. Celem takich badań jest zidentyfikowanie zagrożeń bezpieczeństwa ruchu i wskazanie właściwych dla danej lokalizacji środków poprawy z uwzględnieniem uwarunkowań lokalnych. Ponadto szacowanie parametrów ruchu rowerowego oraz identyfikacja miejsc zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów nie będzie możliwa w miejscach, w których z powodu np. małej gęstości stacji wypożyczeń, natężenie ruchu rowerów systemu miejskiego jest niewielkie bądź równe 0. Uzupełnieniem danych o ruchu rowerowym w tych lokalizacjach mogą być dane GPS pochodzące z dedykowanych aplikacji na telefon komórkowy, np. Strava. Należy jednak pamiętać, że użytkownicy tego typu aplikacji to głównie osoby o większym doświadczeniu, jeżdżące na rowerze w sposób wyczynowy, stąd też parametry ruchu tej grupy są inne niż średnie dla ogółu rowerzystów, a średnia prędkość jazdy jest wyższa niż ogółu rowerzystów, co potwierdziły badania własne przedstawione w (Kieć i Pogodzińska, 2018). Z tego względu konieczne byłoby ponowne określenie związku pomiędzy natężeniem i prędkościami ogółu rowerzystów, a parametrami ruchu osób korzystających z takiej aplikacji oraz identyfikacja miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego.

Krakowski system rowerów miejskich nie funkcjonuje od początku 2020 roku. Jednocześnie pojawiły się systemy oferujące podróże elektrycznymi urządzeniami transportu osobistego tj. hulajnogami. Pojawia się zatem pytanie, czy w obecnej sytuacji wyniki badań zaprezentowanych w pracy mają praktyczne zastosowanie? Należy zwrócić uwagę, że niewielki pod względem liczby rowerów system rowerów elektrycznych (ponad 40 rowerów) funkcjonuje na terenie parkingu „P+R Czerwone Maki” (ZTP Kraków, 2020). Niewykluczone, że w przyszłości system ten zostanie rozszerzony, a wykorzystanie danych z systemu będzie możliwe w skali całego miasta. Systemy rowerów miejskich działają również w wielu innych miastach w Polsce, m.in. w Warszawie, Wrocławiu, Opolu. Możliwość zastosowania opracowanych zależności w tych miejscowościach, powinna być jednak zweryfikowana odpowiednimi badaniami. Na natężenie ruchu użytkowników systemu rowerów miejskich oraz osiągnięte przez nich prędkości ma bowiem wpływ szereg czynników takich jak m.in. wielkość miasta, wielkość systemu (liczba stacji wypożyczeń, liczba rowerów), gęstość rozmieszczenia stacji wypożyczeń, konstrukcja rowerów (elektryczne, zwykłe), standard i ciągłość infrastruktury ruchu rowerowego, wysokość opłat związanych z wypożyczeniem rowerów, a także opłat związanych z podróżowaniem innymi środkami transportu (np. wysokość opłat parkingowych, ceny biletów komunikacji zbiorowej). Użytkownicy elektrycznych urządzeń transportu osobistego stanowią niechronioną grupę użytkowników dróg, są w jednakowy sposób narażeni na działanie warunków atmosferycznych co rowerzyści, często poruszają się po infrastrukturze ruchu rowerowego, a osiągnięte przez nich prędkości jazdy wydają się

zbliżone do prędkości w ruchu rowerowym. Wyniki badań opisanych w rozprawie wskazują na możliwości wykorzystania danych GPS pochodzących z urządzeń transportu osobistego w ocenie bezpieczeństwa tej grupy użytkowników dróg. Problematyka ta jest stosunkowo nowa, a szczegółowe badania w tym zakresie nie były prowadzone.

Dalsze badania powinny być ukierunkowane na:

- ocenę możliwości zastosowania danych GPS pochodzących z innych źródeł (np. aplikacji na telefon komórkowy) do szacowania parametrów ruchu rowerowego oraz w analizach bezpieczeństwa ruchu rowerowego;
- wyznaczenie minimalnego okresu, z którego powinny pochodzić dane GPS (z uwzględnieniem sezonowej, tygodniowej i godzinowej zmienności ruchu rowerowego), aby wyznaczone na ich podstawie parametry ruchu rowerowego były oszacowane z zakładaną dokładnością, a prowadzona na ich podstawie ocena bezpieczeństwa ruchu rowerowego wykonana z dopuszczalnym błędem;
- ocenę możliwości wykorzystania opracowanych zależności w analizach ruchu rowerowego w innych miastach wraz z kalibracją parametrów modeli dla dodatkowych zmiennych niezależnych umożliwiających uwzględnienie charakterystyki miasta i systemu rowerów miejskich w przedstawionych zależnościach;
- identyfikację i wybór miary pośredniej bezpieczeństwa ruchu rowerowego wyznaczonej na podstawie danych GPS z systemu rowerów miejskich, wykazującej najlepsze powiązanie z liczbą zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów na odcinkach dróg;
- oszacowanie granicznych wartości opóźnień w ruchu rowerowym wykorzystywanych do identyfikacji miejsc o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniami drogowymi z udziałem rowerzystów dla pozostałych typów przejazdów rowerowych nieuwzględnionych w przedstawionych badaniach oraz odcinków drogowych;
- ocenę możliwości wykorzystania danych GPS pochodzących z systemu wypożyczeń elektrycznych urządzeń transportu osobistego w ocenie bezpieczeństwa ruchu tej grupy użytkowników dróg.

Literatura:

- Allen, D. P., Roupail, N., Hummer, J. E., Milazzo II, J. S. (1998). Operational Analysis of Uninterrupted Bicycle Facilities. *Transportation Research Record*, 1636, pp. 29–36. doi: 10.3141/1636-05.
- Amoh-Gyimah, R., Saberi, M., Sarvi, M. (2016). Macroscopic modeling of pedestrian and bicycle crashes: a cross-comparison of estimation methods. *Accident Analysis and Prevention*, 93, pp. 147–159. doi: 10.1016/j.aap.2016.05.001.
- An, R., Zahnow, R., Pojani, D., Corcoran, J. (2019). Weather and cycling in New York: The case of Citibike. *Journal of Transport Geography*, 77, pp. 97–112. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2019.04.016.
- Anysz, H., Włodarek, P., Olszewski, P., Cafiso, S. (2021). Identifying factors and conditions contributing to cyclists' serious accidents with the use of association analysis. *Archives of Civil Engineering*, 67(3), pp. 197–211. doi: 10.24425/ace.2021.138051.
- Arun, A., Haque, M. M., Bhaskar, A., Washington, S., Sayed, T. (2021). A bivariate extreme value model for estimating crash frequency by severity using traffic conflicts. *Analytic Methods in Accident Research*, 32. doi: 10.1016/j.amar.2021.100180.
- Aultman-Hall, L., Kaltenecker, M. G. (1999). Toronto Bicycle Commuter Safety Rates. *Accident Analysis and Prevention*, 31(6), pp. 675–686. doi: 10.1016/S0001-4575(99)00028-7.
- Beca (2013). *Queensland Cycle Crash Models*. Dostępne na: <<https://www.tmr.qld.gov.au/-/media/Travelandtransport/Cycling/Research/Report3BECAQueenslandCycleCrashModels.pdf?la=en>> [dostęp: 15.09.2017r.]
- Bella, F., Silvestri, M. (2017). Interaction driver–bicyclist on rural roads: Effects of cross-sections and road geometric elements. *Accident Analysis and Prevention*, 102, pp. 191–201. doi: 10.1016/j.aap.2017.03.008.
- Bergström, A., Magnusson, R. (2003). Potential of transferring car trips to bicycle during winter. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(8), pp. 649–666. doi: 10.1016/S0965-8564(03)00012-0.
- Bernardi, S., Rupi, F. (2015). An analysis of bicycle travel speed and disturbances on off-street and on-street facilities. *Transportation Research Procedia*, 5, pp. 82–94. doi: 10.1016/j.trpro.2015.01.004.
- Brandenburg, C., Matzarakis, A., Arnberger, A. (2007). Weather and cycling – a first approach to the effects of weather conditions on cycling. *Meteorological Applications*, 14, pp. 61–67. doi: 10.1002/met.6.
- Broach, J., Dill, J., Gliebe, J. (2012). Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(10), pp. 1730–1740. doi: 10.1016/j.tra.2012.07.005.
- Broach, J., Gliebe, J., Dill, J. (2011). *Bicycle route choice model developed using revealed preference GPS data*. Prezentacja na: 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C. Dostępne na: <https://ppms.trec.pdx.edu/media/project_files/TRB2011_Bicycle%20route%20choice%20model%20developed%20using%20revealed%20preference%20GPS%20data.pdf> [dostęp: 20.09.2017r.]
- Brüde, U., Larsson, J. (2000). What roundabout design provides the highest possible safety? *Nordic Road & Transport Research*, 2, pp. 17–21.

- Buck, D., Buehler, R., Happ, P., Rawls, B., Chung, P., Borecki, N. (2013). Are Bikeshare Users Different from Regular Cyclists? A First Look at Short-Term Users, Annual Members, and Area Cyclists in the Washington, DC Region. *Transportation Research Record*, 2387, pp. 112–119. doi: 10.3141/2387-13.
- Burnham, K. P., Anderson, D. R. (2004). Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods and Research*, 33(2), pp. 261–304. doi: 10.1177/0049124104268644.
- Campbell, K. L., Joksch, H. C., Green, P. E. (1996). *A Bridging Analysis for Estimating the Benefits of Active Safety Technologies*. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C. Dostępne na <<https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/1165/89736.0001.001.pdf?sequence=2&isAllowed=y>> [dostęp: 20.09.2017r.]
- Chen, C., Anderson, J. C., Wang, H., Wang, Y., Vogt, R., Hernandez, S. (2017). How bicycle level of traffic stress correlate with reported cyclist accidents injury severities: A geospatial and mixed logit analysis. *Accident Analysis and Prevention*, 108, pp. 234–244. doi: 10.1016/j.aap.2017.09.001.
- Chen, L., Chen, C., Srinivasan, R., McKnight, C. E., Ewing, R., Roe, M. (2012). Evaluating the Safety Effects of Bicycle Lanes in New York City. *American Journal of Public Health*, 102(6), pp. 1120–1127. doi: 10.2105/AJPH.2011.300319.
- Chengye, P., Ranjitkar, P. (2013). Modelling Motorway Accidents using Negative Binomial Regression. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 10, pp. 1946–1963. doi: 10.11175/easts.10.1946.
- Chimba, D., Emaasit, D., Kutela, B. (2012). Likelihood Parameterization of Bicycle Crash Injury Severities. *Journal of Transportation Technologies*, 2(3), pp. 213–219. doi: 10.4236/jtts.2012.23023.
- Coles, S. (2001) *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London: Springer pp. 45-90. doi: 10.1007/978-1-4471-3675-0.
- Corcoran, J., Li, T., Rohde, D., Charles-Edwards, E., Mateo-Babiano, D. (2014). Spatio-temporal patterns of a Public Bicycle Sharing Program: the effect of weather and calendar events. *Journal of Transport Geography*, 41, pp. 292–305. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2014.09.003.
- CROW (2006) *Design Manual for Cycle Traffic*. CROW, Utrecht, Netherlands.
- Daniels, S., Brijs, T., Nuyts, E., Wets, G. (2009). Injury crashes with bicyclists at roundabouts : influence of some location characteristics and the design of cycle facilities. *Journal of Safety Research*. 40(2), pp. 141–148. doi: 10.1016/j.jsr.2009.02.004.
- Dill, J. (2009). Bicycling for Transportation and Health: The Role of Infrastructure. *Journal of Public Health Policy*, 30(S1), pp. S95–S110. doi: 10.1057/jphp.2008.56.
- Dobosz, M. (2001). *Statystyczna analiza wyników badań*. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, pp. 206, 360.
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., García Marquéz, J. R., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D. Lautenbach, S. (2013). Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), pp. 27–46. doi: 10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x.
- Dudek, D., Ostaszewski, P. (2020) *Pomiary ruchu rowerowego 2020*. Warszawa. Dostępne na:

<<https://zdm.waw.pl/wp-content/uploads/2020/11/Pomiary-ruchu-rowerowego-2020-w-Warszawie-raport.pdf>> [dostęp: 10.07.2021r.]

- El-Geneidy, A., Krizek, K. J., Iacono, M. (2007). *Predicting Bicycle Travel Speeds Along Different Facilities Using GPS Data: A Proof of Concept Model*. Prezentacja na: 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Erjavec, N. (2011). *Tests for Homogeneity of Variance*. w: Lovric M. (ed) *International Encyclopedia of Statistical Science*. Berlin, Heidelberg: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-04898-2_590.
- ETSC (2020). *How safe is walking and cycling in Europe? PIN Flash Report 38*.
- Famiglietti, N., Nguyen, B., Fatzinger, E., Landerville, J. (2020). Bicycle Braking Performance Testing and Analysis. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 2(6), pp. 3384–3397. doi: 10.4271/2020-01-0876.
- Farah, H., Azevedo, C. L. (2017). Safety analysis of passing maneuvers using extreme value theory. *IATSS Research*, 41(1), pp. 12–21. doi: 10.1016/j.iatssr.2016.07.001.
- Fishman, E., Schepers, P. (2016). Global bike share: What the data tells us about road safety. *Journal of Safety Research*, 56, pp. 41–45. doi: 10.1016/j.jsr.2015.11.007.
- Flynn, B. S., Dana, G. S., Sears, J., Aultman-Hall, L. (2012). Weather factor impacts on commuting to work by bicycle. *Preventive Medicine*, 54(2), pp. 122–124. doi: 10.1016/j.ypmed.2011.11.002.
- Fournier, N., Christofa, E., Knodler, M. A. (2017). A sinusoidal model for seasonal bicycle demand estimation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50, pp. 154–169. doi: 10.1016/j.trd.2016.10.021.
- Fournier, N., Christofa, E., Knodler, M. A. (2019). A mixed methods investigation of bicycle exposure in crash rates. *Accident Analysis and Prevention*, 130, pp. 54–61. doi: 10.1016/j.aap.2017.02.004.
- Fu, C., Sayed, T., Zheng, L. (2021). Multivariate Bayesian hierarchical modeling of the non-stationary traffic conflict extremes for crash estimation. *Analytic Methods in Accident Research*, 29. doi: 10.1016/j.amar.2020.100135.
- Gaca, S., Kieć, M. (2016). Metoda Pośredniej Oceny Bezpieczeństwa Pieszyc Na Przejściach. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, t. XXXIII, pp. 201–208. doi: 10.7862/rb.2016.76.
- Gaca, S., Suchorzewski, W., Tracz, M. (2008). *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*. Warszawa: WKŁ.
- Gallop, C., Tse, C., Zhao, J. (2012). A Seasonal Autoregressive Model of Vancouver Bicycle Traffic Using Weather Variables. *i-manager's Journal on Civil Engineering*, 1(4), pp. 9–18. doi: 10.266364/jce.1.4.1694.
- Gates, T. J., Savolainen, P. T., Stapleton, S., Kirsch, T., Miraskar, S. (2016). *Development of Safety Performance Functions and Other Decision Support Tools to Assess Pedestrian and Bicycle Safety*. Transportation Research Center for Livable Communities (TRCLC), Michigan. Dostępne na: https://wmich.edu/sites/default/files/attachments/u883/2016/TRCLC_14_06_Report.pdf [dostęp: 12.05.2018r.]
- GDDKiA (2004). *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej*. Warszawa.
- Gebhart, K., Noland, R. B. (2014). The impact of weather conditions on bikeshare trips in Washington, DC. *Transportation*, 41, pp. 1205–1225. doi: 10.1007/s11116-014-9540-7.

- Gilleland, E., Katz, R. (2005). *Extremes toolkit (extRemes): Weather and climate applications of extreme value statistics*. Dostępne na: <<https://opensky.ucar.edu/islandora/object/manuscripts%3A832/datastream/PDF/view>> [dostęp: 20.11.2020r.]
- Greń, J. (1972). *Modele i zadania statystyki matematycznej*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, pp. 65-66, 79-80.
- Harvey, F., Krizek, K. (2007). *Commuter Bicyclist Behavior and Facility Disruption*. Minnesota: Minnesota Department of Transportation. Dostępne na: <<https://www.lrrb.org/pdf/200715.pdf>> [dostęp: 12.05.2018r.]
- Hauer, E., Bamfo, J. (1997). *Two tools for finding what function links the dependent variable to the explanatory variables*. ICTCT, Lund, Sweden. Dostępne na: <<https://www.oocities.org/hauer@rogers.com/Pubs/ICTCT97TwoTools.pdf>> [dostęp: 10.08.2018r.]
- Hels, T., Orozova-Bekkevold, I. (2007). The effect of roundabout design features on cyclist accident rate. *Accident Analysis and Prevention*, 39(2), pp. 300–307. doi: 10.1016/j.aap.2006.07.008.
- Hood, J., Sall, E., Charlton, B. (2011). A GPS-based bicycle route choice model for San Francisco, California. *Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research*, 3(1), pp. 63–75. doi: 10.3328/TL.2011.03.01.63-75.
- Huber, S., Rust, C. (2016). osrmtime: Calculate Travel Time and Distance with OpenStreetMap Data Using the Open Source Routing Machine (OSRM). *The Stata Journal*, 16(2), pp. 1–8.
- Hunter, W. W., Stewart, J. R., Stutts, J. C. (1999). Study of Bicycle Lanes Versus Wide Curb Lanes. *Transportation Research Record*, 1674(1), pp. 70-77. doi: 10.3141/1674-10.
- Hunter, W. W., Srinivasan, R., Martell, C. A. (2009). *An Examination of Bicycle Counts and Speeds Associated with the Installation of Bike Lanes in St. Petersburg, Florida*. Florida Department of Transportation.
- Hyden, C. (1987). *The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish traffic conflicts technique*. Bulletin 70, Department of Traffic Planning and Engineering, Lund University.
- Imani, A. F., Eluru, N., El-Geneidy, A. M., Rabbat, M., Haq, U. (2014). How does land-use and urban form impact bicycle flows: Evidence from the bicycle-sharing system (BIXI) in Montreal. *Journal of Transport Geography*, 41, pp. 306–314. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2014.01.013
- ITS (2019) *Wytyczne organizacji bezpiecznego ruchu rowerowego. Podręcznik*. Ministerstwo Infrastruktury, Sekretariat Krajowej Rady Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego, Warszawa.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R.. (2013). *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*. New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer, pp. 92-101. doi: 10.1007/978-1-4614-7138-7.
- Jamroz, K., Kustra, W., Wachnicka, J., Berkowski, M. (2018). *Klasyfikacja ryzyka dla wybranych rodzajów wypadków drogowych na drogach wojewódzkich oraz dla obszarów województw i powiatów w latach 2015 – 2017 wraz przedstawieniem wyników na mapach Część I Klasyfikacja Ryzyka Zagrożeń Wypadkami Drogowymi Na Obszarach Województw I Powiatów*. Ministerstwo Infrastruktury, Sekretariat Krajowej Rady Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego, Warszawa/Gdańsk.
- Jensen, S. (2008). *Bicycle Tracks and Lanes: a Before-After Study*. Prezentacja na: 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C. Dostępne na:

<https://www.researchgate.net/publication/237524182_Bicycle_Tracks_and_Lanes_a_Before-After_Study> [dostęp: 15.06.2018r.]

- Johnston, R., Jones, K., Manley, D. (2018). Confounding and collinearity in regression analysis: a cautionary tale and an alternative procedure, illustrated by studies of British voting behaviour. *Quality and Quantity*, 52, pp. 1957–1976. doi: 10.1007/s11135-017-0584-6.
- Jónasson, Á., Eiriksson, H., Eðvarðsson, I., Helgason, K., Sæmundsson, T., Sigurgeirsson, D. B., Vilhjálmsson, H. H. (2013). *Optimizing expenditure on cycling roads using cyclists' GPS data*. School of Computer Science, Reykjavik University, Rejkiawik, Islandia.
- Joo, S., Oh, C., Jeong, E., Lee, G. (2015). Categorizing bicycling environments using GPS-based public bicycle speed data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 56, pp. 239–250. doi: 10.1016/j.trc.2015.04.012.
- Kaplan, S., Prato, C. G. (2015). A Spatial Analysis of Land Use and Network Effects on Frequency and Severity of Cyclist–Motorist Crashes in the Copenhagen Region. *Traffic Injury Prevention*, 16(7), pp. 724–731. doi: 10.1080/15389588.2014.1003818.
- Khan, S., Raksuntorn, W. (2001). Characteristics of Passing and Meeting Maneuvers on Exclusive Bicycle Paths. *Transportation Research Record*, 1776, pp. 220–228. doi: 10.3141/1776-28.
- Kieć, M., Pogodzińska, S. (2018). Ocena prędkości rowerzystów na różnych typach infrastruktury rowerowej z wykorzystaniem danych GPS. *Transport miejski i regionalny*, 4, pp. 20–24.
- Kim, J., Kim, S., Ulfarsson, G. F., Porrello, L. A. (2007). Bicyclist injury severities in bicycle – motor vehicle accidents, *Accident Analysis and Prevention*, 39, pp. 238–251. doi: 10.1016/j.aap.2006.07.002.
- Klassen, J., El-Basyouny, K., Islam, M. T. (2014). Analyzing the severity of bicycle-motor vehicle collision using spatial mixed logit models: A city of edmonton case stud. *Safety Science*, 62, pp. 295–304. doi: 10.1016/j.ssci.2013.09.007.
- Kolody, K., Perez-Bravo, D., Zhao, J., Neuman, T.R. (2014). *Highway Safety Manual User Guide*. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Kowalski, Ł., Miłosz, A., Peek, B. (2014). Mapowanie i analiza miejsc problemowych z perspektywy rowerzystów w Krakowie. *Transport Miejski i Regionalny*, 9, pp. .10-14.
- Kröyer, H. R. G. (2016). Pedestrian and bicyclist flows in accident modelling at intersections. Influence of the length of observational period. *Safety Science*, 82, pp. 315–324. doi: 10.1016/j.ssci.2015.09.015.
- Łastowska, A., Bryniarska, Z. (2015). Analiza funkcjonowania wypożyczalni rowerów miejskich w Krakowie. *Transport Miejski i Regionalny*, 3, pp. 30–35.
- Laureshyn, A., Goede, M. de, Saunier, N., Fyhri, A. (2017). Cross-comparison of three surrogate safety methods to diagnose cyclist safety problems at intersections in Norway. *Accident Analysis and Prevention*, 105, pp. 11–20. doi: 10.1016/j.aap.2016.04.035.
- Leden, L. (1997). *Has the City of Gothenburg Found the Concept to Encourage Bicycling by Improving Safety for Bicyclists?* Prezentacja na: 10th International Bicycle Planning Conference. Barcelona. Dostępne na: <https://www.researchgate.net/publication/38287814_Has_the_City_of_Gothenburg_found_the_concept_to_encourage_bicycling_by_improving_safety_for_bicyclists> [dostęp: 12.06.2018r.]
- Leden, L., Gårder, P., Pulkkinen, U. (2000). An expert judgment model applied to estimating the safety effect of a bicycle facility. *Accident Analysis and Prevention*, 32(4), pp. 589–599. doi:

10.1016/S0001-4575(99)00090-1.

- Lewin, A. (2011). *Temporal and Weather Impacts on Bicycle Volumes*. Prezentacja na: 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Liggett, R., Huff, H., Taylor-Gratzer, R., Wong, N., Benitez, D., Douglas, T., Howe, J., Cooper, J., Griswold, J., Amos, D., Proulx, F. (2016). *Bicycle Crash Risk: How Does It Vary, and Why?* California Department of Transportation, Sacramento. Dostępne na: <<https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/research-innovation-system-information/documents/f0017149-ca16-2801-finalreport.pdf>> [dostęp: 14.04.2018r.]
- Ling, H., Wu, J. (2004). A study on cyclist behavior at signalized intersections. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 5(4), pp. 293–299. doi: 10.1109/TITS.2004.837812.
- Liu, X., Shen, D., Ren, F. (1993). Operational analysis of bicycle interchanges in Beijing, China. *Transportation Research Record*, 1396, pp. 18–21.
- Lu, T., Buehler, R., Mondschein, A., Hankey, S. (2017). Designing a bicycle and pedestrian traffic monitoring program to estimate annual average daily traffic in a small rural college town. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, pp. 193–204. doi: 10.1016/j.trd.2017.04.017.
- Luo, D., Ma, X. (2016). *Modeling of Cyclist Acceleration Behavior Using Naturalistic GPS Data*. Prezentacja na: 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C. Dostępne na: <https://www.researchgate.net/publication/297161844_Modeling_of_Cyclist_Acceleration_Behavior_Using_Naturalistic_GPS_Data> [dostęp: 14.04.2018r.]
- Lusk, A. C., Furth, P. G., Morency, P., Miranda-Moreno, L. F., Willett, W. C., Dennerlein, J. T. (2011). Risk of injury for bicycling on cycle tracks versus in the street. *Injury Prevention*, 17, pp. 131–135. doi: 10.1136/ip.2010.028696.
- Ma, X., Zhang, X., Li, X., Wang, X., Zhao, X. (2019). Impacts of free-floating bikesharing system on public transit ridership. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 76, pp. 100–110. doi: 10.1016/j.trd.2019.09.014.
- Ma, X., Luo, D. (2016). Modeling cyclist acceleration process for bicycle traffic simulation using naturalistic data. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 40, pp. 130–144. doi: 10.1016/j.trf.2016.04.009.
- Madsen, T. K. O., Lahrmann, H. (2017). Comparison of five bicycle facility designs in signalized intersections using traffic conflict studies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 46, pp. 438–450. doi: 10.1016/j.trf.2016.05.008.
- Manar, A., Cao, G. (2015). *Adapting Car Traffic Models and Concepts to Bicycle Traffic*. Prezentacja na: Standing Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics Summer Meeting, Portland.
- Mathisen, T. A., Annema, J. A., Kroesen, M. (2015). The effects of weather and climate change on cycling in Northern Norway. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 15(2), pp. 261–273. doi: 10.18757/ejtir.2015.15.2.3072.
- Menghini, G., Carrasco, N., Schüssler, N., Axhausen, K. W. (2010). Route choice of cyclists in Zurich. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(9), pp. 754–765. doi: 10.1016/j.tra.2010.07.008.
- Meuleners, L. B., Stevenson, M., Fraser, M., Oxley, J., Rose, G., Johnson, M. (2019). Safer cycling and the

urban road environment : A case control study. *Accident Analysis and Prevention*, 129, pp. 342–349. doi: 10.1016/j.aap.2019.05.032.

- Meuleners, L. B., Stevenson, M., Fraser, M., Oxley, J., Rose, G., Johnson, M. (2020). Characteristics of the road infrastructure and injurious cyclist crashes resulting in a hospitalisation. *Accident Analysis and Prevention*, 136, 105407. doi: 10.1016/j.aap.2019.105407.
- Miaou, S. P., Lu, A., Lum, H. S. (1996). Pitfalls of using R2 to evaluate goodness of fit of accident prediction models. *Transportation Research Record*, 1542, pp. 6–13. doi: 10.3141/1542-02.
- Minikel, E. (2012). Cyclist safety on bicycle boulevards and parallel arterial routes in Berkeley, California. *Accident Analysis and Prevention*, 45, pp. 241–247. doi: 10.1016/j.aap.2011.07.009.
- Miranda-Moreno, L. F., Nosal, T. (2011). Weather or Not to Cycle: Temporal Trends and Impact of Weather on Cycling in an Urban Environment. *Transportation Research Board: Journal of the Transportation Research Board*, 2247, pp. 42–52. doi: 10.3141/2247-06.
- Mohd Razali, N., Bee Wah, Y. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2, pp. 21–33.
- Mukoko, K. K., Pulugurtha, S. S. (2020). Examining the influence of network, land use, and demographic characteristics to estimate the number of bicycle-vehicle crashes on urban roads. *IATSS Research*, 44(1), pp. 8–16. doi: 10.1016/j.iatssr.2019.04.001.
- Ng, A., Kumar, A., Heesch, K. C. (2017). Cyclist' safety perceptions of cycling infrastructure at un-signalised intersections: Cross-sectional survey of Queensland cyclists. *Journal of Transport & Health*, 6, pp. 13–22. doi: 10.1016/j.jth.2017.03.001.
- Nicholson, A. J. (1987). The estimation of accident rates and countermeasure effectiveness. *Traffic Engineering and Control*, 28(10), pp. 518–523.
- Noland, R. B., Ishaque, M. M. (2006). Smart Bicycles in an Urban Area: Evaluation of a Pilot Scheme in London. *Journal of Public Transportation*, 9(5), pp. 71–95. doi: 10.5038/2375-0901.9.5.5.
- Nosal, T., Miranda-Moreno, L. F. (2012). *Cycle-Tracks, Bicycle Lanes, and On-street Cycling in Montreal, Canada: A Preliminary Comparison of the Cyclist Injury Risk*. Prezentacja na: 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C..
- O'Hern, S., Oxley, J., Stevenson, M. (2017). Validation of a bicycle simulator for road safety research. *Accident Analysis and Prevention*, 100, pp. 53–58. doi: 10.1016/j.aap.2017.01.002.
- Oh, J., Jun, J., Kim, E., Kim, M. (2008). *Assessing Critical Factors Associated with Bicycle Collisions at Urban Signalized Intersections*. Prezentacja na: 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Osama, A., Sayed, T. (2017). Evaluating the Impact of Socioeconomics, Land Use, Built Environment and Road Facility on Cyclist Safety. *Transportation Research Record*, 2659(1), pp. 33-42. doi: 10.3141/2659-04.
- Parkin, J., Rotheram, J. (2010). Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design and appraisal. *Transport Policy*, 17(5), pp. 335–341. doi: 10.1016/j.tranpol.2010.03.001.
- Parkin, J., Wardman, M., Page, M. (2007). Models of perceived cycling risk and route acceptability. *Accident Analysis and Prevention*, 39, pp. 364–371. doi: 10.1016/j.aap.2006.08.007.

- Pazdan, S. (2020). The impact of weather on bicycle risk exposure. *Archives of Transport*, 56(4), pp. 89–105. doi: 10.5604/01.3001.0014.5629.
- Pazdan, S., Kiec, M., D'Agostino, C. (2021). Impact of environment on bicycle travel demand—Assessment using bikeshare system data. *Sustainable Cities and Society*, 67. doi: 10.1016/j.scs.2021.102724.
- Phung, J., Rose, G. (2007). *Temporal variations in usage of Melbourne's bike paths*. Prezentacja na: Australasian Transport Research Forum, Melbourne, Australia. Dostępne na: <https://www.australasiantransportresearchforum.org.au/sites/default/files/2007_Phung.pdf> [dostęp: 12.04.2018r.]
- Pogodzińska, S. (2018). Szacowanie natężenia ruchu rowerowego na podstawie danych z systemu rowerów miejskich. *Transport Miejski i Regionalny*, 1, pp. 5–11.
- Pogodzinska, S., Kiec, M., D'Agostino, C. (2020). Bicycle Traffic Volume Estimation Based on GPS Data. *Transportation Research Procedia*, 45, pp. 874–881. doi: 10.1016/j.trpro.2020.02.081.
- Popescu, B., Sayed, T. (2017). Developing macrolevel collision prediction models to evaluate bicycle safety in Vancouver, British Columbia, Canada. *Transportation Research Record*, 2659 (1), pp. 25–32. doi: 10.3141/2659-03.
- Pulugurtha, S. S., Thakur, V. (2015). Evaluating the effectiveness of on-street bicycle lane and assessing risk to bicyclists in Charlotte, North Carolina. *Accident Analysis and Prevention*, 76, pp. 34–41. doi: 10.1016/j.aap.2014.12.020.
- Reynolds, C. C., Harris, M. A., Teschke, K., Cripton, P. A., Winters, M. (2009). The impact of transportation infrastructure on bicycling injuries and crashes: a review of the literature. *Environmental Health*, 8(47). doi: 10.1186/1476-069X-8-47.
- Richardson, A. J. (2000). *Seasonal and Weather Impacts on Urban Cycling Trips*. The Urban Transport Institute, Victoria, Australia,
- Rothenberg, H., Goodman, D., Sundstrom, C. (2015). *Separated Bike Lane Crash Analysis*. Prezentacja na: 95th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C..
- Sabir, M. (2011). *Weather and Travel Behaviour*. Rozprawa doktorska, Amsterdam: Tinbergen Institute, 152p. Dostępne na: <https://research.vu.nl/ws/portalfiles/portal/42203407/complete+dissertation.pdf> [dostęp: 15.09.2017r.]
- Saneinejad, S., Roorda, M. J., Kennedy, C. (2012). Modelling the impact of weather conditions on active transportation travel behaviour. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(2), pp. 129–137. doi: 10.1016/j.trd.2011.09.005.
- Sayed, T., Zaki, M. H., Autey, J. (2013). Automated safety diagnosis of vehicle-bicycle interactions using computer vision analysis. *Safety Science*, 59, pp. 163–172. doi: 10.1016/j.ssci.2013.05.009.
- Schepers, J. P., Kroeze, P. A., Sweers, W., Wüst, J. C. (2011). Road factors and bicycle-motor vehicle crashes at unsignalized priority intersections. *Accident Analysis and Prevention*, 43(3), pp. 853–861. doi: 10.1016/j.aap.2010.11.005.
- Schoon, C., Van Minnen, J. (1994). The Safety of Roundabouts in the Netherlands. *Traffic Engineering & Control*, 35(3), pp. 142–148.
- Shinar, D., Valero-Mora, P., van Strijp-Houtenbos, M., Haworth, N., Schramm, A., De Bruyne, G., Cavallo, V., Chliaoutakis, J., Dias, J., Ferraro, O. E., Fyhri, A., Hursa Sajatovic, A., Kuklane, K., Ledesma,

- R., Mascarell, O., Morandi, A., Muser, M., Otte, D., Papadakaki, M., Sanmartín, J., Dulf, D., Saplioglu, M., Tzamalouka, G. (2018). Under-reporting bicycle accidents to police in the COST TU1101 international survey: Cross-country comparisons and associated factors. *Accident Analysis and Prevention*, 110, pp. 177–186. doi: 10.1016/j.aap.2017.09.018.
- Sik, D., Csorba, K., Ekler, P. (2017). *Implementation of a geographic information system with big data environment on common data model*. Prezentacja na: 8th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), Debrecen, Hungary. Dostępne na: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8268238>> [dostęp: 18.10.2018r.]
- Songchitruksa, P., Tarko, A. P. (2004) *Using imaging technology to evaluate highway safety*. Indiana Department of Transportation, Indianapolis. Dostępne na: <<https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1691&context=jtrp>> [dostęp: 10.10.2020r.]
- Songchitruksa, P., Tarko, A. P. (2006). The extreme value theory approach to safety estimation. *Accident Analysis and Prevention*, 38(4), pp. 811–822. doi: 10.1016/j.aap.2006.02.003.
- St-Aubin, P., Saunier, N., Miranda-Moreno, L. (2015). Large-scale automated proactive road safety analysis using video data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.*, 58, pp. 363–379. doi: 10.1016/j.trc.2015.04.007.
- Stanisz, A. (2007) *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny. Tom 2. Modele liniowe i nieliniowe*. Kraków: StatSoft Polska Sp. z o.o. pp. 42, 271-285, 401-402, 777-778, 790.
- Strauss, J., Zangenehpour, S., Miranda-Moreno, L. F., Saunier, N. (2017). Cyclist deceleration rate as surrogate safety measure in Montreal using smartphone GPS data. *Accident Analysis and Prevention*, 99, pp. 287–296. doi: 10.1016/j.aap.2016.11.019.
- Strauss, J., Miranda-Moreno, L. F. (2017). Speed, travel time and delay for intersections and road segments in the Montreal network using cyclist Smartphone GPS data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57, pp. 155–171. doi: 10.1016/j.trd.2017.09.001.
- Strauss, J., Miranda-Moreno, L. F., Morency, P. (2013). Cyclist activity and injury risk analysis at signalized intersections: A Bayesian modelling approach. *Accident Analysis and Prevention*, 59, pp. 9–17. doi: 10.1016/j.aap.2013.04.037.
- Strauss, J., Miranda-Moreno, L. F., Morency, P. (2014). Multimodal injury risk analysis of road users at signalized and non-signalized intersections. *Accident Analysis and Prevention*, 71, pp. 201–209. doi: 10.1016/j.aap.2014.05.015.
- Strauss, J., Miranda-Moreno, L. F., Morency, P. (2015). Mapping cyclist activity and injury risk in a network combining smartphone GPS data and bicycle counts. *Accident Analysis and Prevention*, 83, pp. 132–142. doi: 10.1016/j.aap.2015.07.014.
- Summala, H., Pasanen, E., Räsänen, M., Sievänen, J. (1996). Bicycle accidents and drivers' visual search at left and right turns. *Accident Analysis and Prevention*, 28(2), pp. 147–153.
- Suzuki, M., Miyanou, K., Takagawa, T., Yai, T. (2011). *Bicycle Collision Analysis Using a Vehicle Driving Simulator "MOVIC-T4"*. Prezentacja na: 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, Indianapolis. Dostępne na: <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/conferences/2011/RSS/3/Suzuki,M.pdf> [dostęp: 12.04.2018r.]
- Teschke, K., Harris, M. A., Reynolds, C. C., Winters, M., Babul, S., Chipman, M., Cusimano, M. D.,

Brubacher, J. R., Hunte, G., Friedman, S. M., Monro, M., Shen, H., Vernich, L., Crompton, P. A. (2012). Route Infrastructure and the Risk of Injuries to Bicyclists: A Case-Crossover Study. *American Journal of Public Health*, 102(12), pp. 2336–2343. doi: 10.2105/AJPH.2012.300762.

THE PEP (2021) *Pan-European Master Plan for Cycling Promotion, 5th High-level Meeting on Transport, Health and Environment, May 2021*. Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology, Vienna, Austria. Dostępne na: <https://thepep.unece.org/sites/default/files/2021-05/MASTERPLAN_2021-05-16_BF.pdf> [dostęp: 014.07.2021r.]

Thomas, B., DeRobertis, M. (2013). The safety of urban cycle tracks : A review of the literature. *Accident Analysis and Prevention*, 52, pp. 219–227. doi: 10.1016/j.aap.2012.12.017.

Thomas, T., Jaarsma, R., Tutert, B. (2013). Exploring temporal fluctuations of daily cycling demand on Dutch cycle paths: The influence of weather on cycling. *Transportation*, 40, pp. 1–22. doi: 10.1007/s11116-012-9398-5.

Thompson, D. C., Rebolledo, V., Thompson, R. S., Kaufman, A., Rivara, F. P. (1997). Bike speed measurements in a recreational population: Validity of self reported speed. *Injury Prevention*, 3, pp. 43–45. doi: 10.1136/ip.3.1.43.

Tilahun, N. Y., Levinson, D. M., Krizek, K. J. (2007). Trails , lanes, or traffic : Valuing bicycle facilities with an adaptive stated preference survey. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(4), pp. 287–301. doi: 10.1016/j.tra.2006.09.007.

Tin Tin, S., Woodward, A., Robinson, E., Ameratunga, S. (2012). Temporal, seasonal and weather effects on cycle volume: an ecological study. *Environmental Health*, 11(12), pp. 1–9. doi: 10.1186/1476-069X-11-12.

Turner, S., Roozenburg, A., Francis, T. (2006) *Predicting Accident Rates for Cyclists and Pedestrians*. Land Transport New Zealand Research Report 289. Dostępne na: <<https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/289/docs/289-Predicting-accident-rates-for-cyclists-and-pedestrians.pdf>> [dostęp: 13.03.2018r.]

UM Gdańsk (2020) *Punkty pomiaru ruchu rowerowego na obszarze Gdańska*. Dostępne na: <<https://www.rowerowygdansk.pl/pomiar-ruchu>> [dostęp: 20.07.2021r.]

Ustawa z dnia 20 czerwca 1997r. Prawo o ruchu drogowym, Dz. U. 1997 Nr 98 poz. 602.

Vandenbulcke, G., Thomas, I., Int Panis, L. (2014). Predicting cycling accident risk in Brussels: A spatial case – control approach. *Accident Analysis and Prevention*, 62, pp. 341–357. doi: 10.1016/j.aap.2013.07.001.

Vaughan, R. J. (1970). The Distribution of Traffic Volumes. *Transportation Science*, 4(1), pp. 97–110. doi: 10.1287/trsc.4.1.97.

Virkler, M., Balasubramanian, R. (1998). Flow Characteristics on Shared Hiking/Biking/Jogging Trails. *Transportation Research Record*, 1636(1), pp. 43–46. doi: 10.3141/1636-07.

Wachtel, A., Lewiston, D. (1994). Risk Factors for Bicycle-Motor Vehicle Collisions at Intersections. *Journal of ITE*, 64(9), pp. 30–35. doi: 10.1016/0022-4375(96)82241-9.

Wang, Y. H., Nihan, N. L. (2004). Estimating the risk of collisions between bicycles and motor vehicles at signalized intersections. *Accident Analysis and Prevention*, 36(3), pp. 313–321. doi: 10.1016/S0001-4575(03)00009-5.

- Wasserstein, R. L., Lazar, N. A. (2016). The ASA's Statement on p-Values: Context, Process, and Purpose. *The American Statistician*, 70(2), pp. 129–133. doi: 10.1080/00031305.2016.1154108.
- Wawrzonek, T. (2009). Zagrożenia brd w relacjach rowerzysta - pieszy. Sposoby uspokojenia ruchu rowerowego w Gdańsku. *Stowarzyszenie Klub Inżynierii Ruchu*, 66, pp. 41–60.
- Wei, H., Huang, J., Wang, J. (1997). *Models for estimating traffic capacity on urban bicycle lanes*. Prezentacja na: 76th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Włodarek, P., Olszewski, P. (2020). Traffic safety on cycle track crossings – traffic conflict technique. *Journal of Transportation Safety & Security*, 12(1), pp. 194-209. doi: 10.1080/19439962.2019.1622615
- Woodcock, J., Tainio, M., Cheshire, J., O'Brien, O., Goodman, A. (2014). Health effects of the London bicycle sharing system: health impact modelling study. *BMJ*, 348. doi: 10.1136/bmj.g425.
- Xu, C., Yang, Y., Jin, S., Qu, Z., Hou, L. (2016). Potential risk and its influencing factors for separated bicycle paths', *Accident Analysis and Prevention*, 87, pp. 59–67. doi: 10.1016/j.aap.2015.11.014.
- Yeboah, G., Albanides, S. (2015). Route Choice Analysis of Urban Cycling Behaviors Using OpenStreetMap: Evidence from a British Urban Environment. w: *Jokar Arsanjani, J., i in.(eds.), OpenStreetMap in GIScience*, pp. 189-210. doi: 10.1007/978-3-319-14280-7_10.
- Zaki, M. H., Sayed, T., Cheung, A. (2013). Automated collection of cyclist data using computer vision techniques. *Transportation Research Record*, 2387, pp. 10–19. doi: 10.3141/2387-02.
- Zangenehpour, S., Strauss, J., Miranda-Moreno, L. F., Saunier, N. (2016). Are signalized intersections with cycle tracks safer? A case-control study based on automated surrogate safety analysis using video data. *Accident Analysis and Prevention*, 86, pp. 161–172. doi: 10.1016/j.aap.2015.10.025.
- Zarządzenie Nr 31 Komendanta Głównego Policji z dnia 22 października 2015 r. w sprawie metod i form prowadzenia przez Policję statystyki zdarzeń drogowych
- Zhao, J., Guo, C., Zhang, R., Guo, D., Palmer, M. (2019). Impacts of weather on cycling and walking on twin trails in Seattle. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, pp. 573–588. doi: 10.1016/j.trd.2019.09.022.
- Zheng, L., Ismail, K., Sayed, T., Fatema, T. (2018). Bivariate extreme value modeling for road safety estimation. *Accident Analysis and Prevention*, 120, pp. 83–91. doi: 10.1016/j.aap.2018.08.004.
- Zilske, M. (2011). *OpenStreetMap for traffic simulation OpenStreetMap For Traffic Simulation*. Prezentacja na: 1st European state of the map: OpenStreetMap conference, Vien, Austria. Dostępne na: <https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/4976/2/zilske_neumann_nagel.pdf> [dostęp: 12.04.2019r.]
- Zimmermann, M., Mai, T., Frejinger, E. (2017). Bike route choice modeling using GPS data without choice sets of paths. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 75, pp. 183-196. doi: 10.1016/j.trc.2016.12.009.
- ZTP Kraków (2017) *POMIARY RUCHU ROWEROWEGO*. Dostępne na: <<https://ztp.krakow.pl/rower/pomiary-ruchu-rowerowego>> [dostęp: 13.02.2021r.].

Spis tabel:

Tab. 4-1 Fragment bazy danych punktów GPS z systemu Wavelo.	30
Tab. 4-2 Wyróżnione kategorie danych o infrastrukturze i zagospodarowaniu terenu z OSM.....	33
Tab. 5-1 Wskaźniki sezonowej zmienności natężenia ruchu dla stacji pomiaru ruchu i liczby wypożyczeń rowerów systemu Wavelo w 2018r. i 2019r.	38
Tab. 5-2 Wyniki analizy wariancji ANOVA wpływu lokalizacji na wskaźnik sezonowej zmienności ruchu rowerowego w poszczególnych miesiącach 2018r.	44
Tab. 5-3 Wyniki analizy wariancji ANOVA wpływu lokalizacji na wskaźnik sezonowej zmienności ruchu rowerowego w poszczególnych miesiącach 2019r.	45
Tab. 5-4 Jednorodność pod względem wskaźników sezonowej zmienności ruchu rowerowego grupy lokalizacji dla poszczególnych miesięcy 2018r.....	46
Tab. 5-5 Jednorodność pod względem wskaźników sezonowej zmienności ruchu rowerowego grupy lokalizacji dla poszczególnych miesięcy 2019r.....	47
Tab. 5-6 Wyniki testu istotności dla dwóch wartości średnich sezonowych wskaźników zmienności natężenia ruchu i liczby wypożyczeń rowerów miejskich.	49
Tab. 5-7 Statystyki opisowe parametrów pogody w latach 2018-2019.....	52
Tab. 5-8 Współczynniki korelacji Spearman'a dla parametrów pogody.....	56
Tab. 5-9 Wartości parametrów modelu dla systemu Wavelo ($R^2=0.858$) i stacji pomiaru ruchu ($R^2=0.707$).	57
Tab. 5-10 Natężenie ruchu rowerów systemu miejskiego oraz ogółu rowerzystów w miejscach lokalizacji stacji pomiaru ruchu [R/24h].....	62
Tab. 5-11 Udział rowerów Wavelo w całym potoku rowerzystów w poszczególnych lokalizacjach, dniach tygodnia, w trakcie wakacji i roku szkolnego – wartości średnie.	63
Tab. 5-12 Wartości parametrów modelu.	64
Tab. 5-13 Wyniki badań empirycznych prędkości chwilowej w ruchu rowerowym.....	70
Tab. 5-14 Wyniki badań prędkości chwilowej rowerów Wavelo.....	70
Tab. 5-15 Wyniki testu istotności dla dwóch wartości średnich.....	71
Tab. 5-16 Wartości parametrów modelu	72
Tab. 6-1 Liczba zidentyfikowanych przejazdów rowerowych/liczba zdarzeń drogowych na przejazdach rowerowych.....	79
Tab. 6-2 Wartości kryterium AIC oraz istotność analizowanych miar pośrednich bezpieczeństwa ruchu rowerowego.....	83
Tab. 6-3 Statystyki opisowe niezależnych zmiennych ilościowych.	84
Tab. 6-4 Współczynniki korelacji Spearman'a dla niezależnych zmiennych ilościowych.	84
Tab. 6-5 Wartości czynnika wzrostu wariancji VIF dla niezależnych zmiennych ilościowych.....	85
Tab. 6-6 Wartości parametrów modelu.....	86

Tab. 7-1 Liczba wystąpień danego czynnika infrastrukturalnego w pobliżu punktów o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty oraz miejsc występowania zdarzeń drogowych dla różnych wielkości obszaru analizy.....	92
Tab. 7-2 Wyniki testu istotności dwóch wskaźników struktury dla porównania punktów o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty.....	96
Tab. 7-3 Wyniki testu istotności dwóch wskaźników struktury dla porównania punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem i zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów.	97
Tab. 7-4 Wskaźniki zagrożenia RF dla porównania punktów o małym i zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym z udziałem rowerzysty.....	98
Tab. 7-5 Wskaźniki zagrożenia RF dla porównania punktów o zwiększonym zagrożeniu zdarzeniem drogowym i zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów.....	99
Tab. 8-1 Parametry ruchu rowerów Wavelo oraz dane o liczbie zdarzeń drogowych dla wybranej grupy przejazdów rowerowych.....	109
Tab. 8-2 Postaci poszukiwanych parametrów rozkładu wartości ekstremalnych dla analizowanych modeli.....	112
Tab. 8-3 Logarytmy funkcji wiarygodności $LogL$ i wartości statystyki D_{Mi-Mj} modeli dla rozkładu GPD.	116
Tab. 8-4 Logarytmy funkcji wiarygodności $LogL$ i wartości statystyki D_{Mi-Mj} modeli dla rozkładu GEV.	117
Tab. 8-5 Logarytmy funkcji wiarygodności $LogL$ i wartość statystyki D_{Mi-Mj} modeli niestacjonarnych dla rozkładu GEV.....	119
Tab. 8-6 Wartości logarytmów funkcji wiarygodności wraz z wartościami statystyki D dla porównania modeli stacjonarnych z modelami niestacjonarnymi dla rozkładu GEV.	120
Tab. 8-7 Wartości logarytmów funkcji wiarygodności wraz z wartościami statystyki D dla porównania modeli stacjonarnych z modelami niestacjonarnymi dla rozkładu GPD.	121
Tab. 8-8 Wartości parametrów rozkładu GEV dla przyjętych modeli.....	121
Tab. 8-9 Wartości parametrów rozkładu GPD dla przyjętych modeli.....	122
Tab. 8-10 Przedziały ufności poziomu bezpieczeństwa ruchu.	122
Tab. 8-11 Liczba opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach nie mniejszych od zadana w okresie analizy 2017-2019 dla rozkładu GEV.....	124
Tab. 8-12 Liczba opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach nie mniejszych od zadanej w okresie analizy 2017-2019 dla rozkładu GPD.....	125

Spis rysunków:

Rys. 1.1 Redukcja liczby ofiar śmiertelnych wypadków drogowych względem 2010r.	2
Rys. 1.2 Liczba wypadków drogowych i udział wypadków z rowerzystami w Polsce w latach 2010-2020.	2
Rys. 2.1 Piramida bezpieczeństwa ruchu drogowego.....	10
Rys. 3.1 Schemat blokowy rozprawy doktorskiej.....	20
Rys. 4.1 Liczba zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów w Krakowie w latach 2016-2019.....	24
Rys. 4.2 Liczba ofiar zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów w Krakowie w latach 2016-2019... ..	25
Rys. 4.3 Najczęściej występujące rodzaje zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów w Krakowie w latach 2016-2019.....	25
Rys. 4.4 Główne przyczyny zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów w Krakowie w latach 2016-2019.	26
Rys. 4.5 Główne miejsca występowania zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów w Krakowie w latach 2016-2019 a) element infrastruktury drogowej; b) rodzaj skrzyżowania; c) występowanie sygnalizacji świetlnej.	26
Rys. 4.6 Lokalizacja stacji ciągłego automatycznego pomiaru natężenia ruchu rowerowego 1) Bulwary Wiślane, 2) ul. Kotlarska, 3) ul. Mogilska, 4) ul. Wadowicka, 5) ul. Wilecka, 6) Dworzec Główny, 7) ul. Monte Casino, 8) ul. Smoleńsk, 9) ul. Tyniecka, 10) ul. Bora-Komorowskiego, 11) ul. Klimeckiego, 12) ul. Kopernika, 13) ul. Nowohucka, 14) ul. Armii Krajowej, 15) ul. Grzegorzeczka, 16) ul. Kamieńskiego, 17) ul. Niepołomska.	27
Rys. 4.7 Całkowita liczba wypożyczeń rowerów miejskich Wavelo w latach 2017-2019.....	28
Rys. 4.8 Fragment pliku danych GPS z systemu rowerów miejskich Wavelo.	29
Rys. 4.9 Wykres a) prędkości b) przyspieszenia w punktach GPS.....	31
Rys. 4.10 Infrastruktura ruchu rowerowego w Krakowie.	35
Rys. 5.1 Wskaźniki sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego (średnie dla wszystkich stacji pomiaru ruchu) i liczby wypożyczeń rowerów Wavelo w latach 2018-2019.....	49
Rys. 5.2 Wskaźniki sezonowej zmienności natężenia ruchu rowerowego (średnia ze stacji pomiarowych) i liczby wypożyczeń rowerów Wavelo.	50
Rys. 5.3 Zmiana wskaźników dobowej zmienności natężenia ruchu w miejscach lokalizacji stacji pomiaru ruchu i liczby wypożyczeń rowerów systemu Wavelo na skutek zmiany a) średniej temperatury powietrza b) ilości opadów deszczu.....	58
Rys. 5.4 Zmiana wskaźników dobowej zmienności natężenia ruchu w miejscach lokalizacji stacji pomiaru ruchu i liczby wypożyczeń rowerów systemu Wavelo w a) dni ustawowo wolne od pracy (w tym weekendy); b) wakacje i ferie szkolnych, dla różnych średnich temperatur powietrza.	59
Rys. 5.5 Zależność pomiędzy predykowanymi wartościami $\dot{S}DRR_{wskaż}$ wyznaczonymi na podstawie modelu dla systemu Wavelo i modelu dla stacji pomiaru ruchu.	59

Rys. 5.6 Zależność pomiędzy predykowanym i obserwowanym wskaźnikiem dobowej zmienności a) liczby wypożyczeń rowerów Wavelo b) natężenia ruchu w miejscach lokalizacji stacji pomiaru ruchu.....	60
Rys. 5.7 Zależność pomiędzy obserwowanym wskaźnikiem dobowej zmienności natężenia ruchu w miejscach kontrolnych i wskaźnikiem predykowanymi na podstawie a) modelu dla systemu Wavelo b) modelu dla stacji pomiaru ruchu.....	60
Rys. 5.8 Zależność pomiędzy obserwowanymi, a predykowanymi na podstawie opracowanego modelu wartościami dobowego natężenia ruchu rowerowego.....	65
Rys. 5.9 Lokalizacja poligonów pomiarowych (punkty ponumerowane zgodnie z Tab. 5-13).....	66
Rys. 5.10 Widok z kamery z naniesionymi przekrojami pomiarowymi.....	67
Rys. 5.11 Sposób wyznaczenie prędkości chwilowej rowerzystów za pomocą aplikacji komputerowej.....	68
Rys. 5.12 Zależność pomiędzy obserwowanymi, a predykowanymi na podstawie opracowanego modelu wartościami prędkości chwilowej w ruchu rowerowym.....	73
Rys. 6.1 Sposób przygotowania bazy danych w programie QGIS.....	77
Rys. 6.2 Wpływ a) natężenia rowerów Wavelo; b) prędkości średniej rowerów Wavelo w ruchu swobodnym, c) liczby opóźnień w ruchu rowerowym o wartościach co najmniej równych $0,6\text{m/s}^2$; d) wielkości obszaru analizy; na liczbę zdarzeń drogowych z udziałem rowerzystów dla poszczególnych klas dróg samochodowych.....	87
Rys. 6.3 Wykres reszt skumulowanych dla pierwszej grupy przejazdów rowerowych.....	88
Rys. 6.4 Wykres reszt skumulowanych dla drugiej grupy przejazdów rowerowych.....	88
Rys. 8.1 Wybór wartości ekstremalnych a) w metodzie maksimów blokowych b) w metodzie przekroczeń.....	102
Rys. 8.2 Funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla rozkładów wartości ekstremalnych.....	104
Rys. 8.3 Wpływ zmiany wartości parametrów rozkładu na kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu Fréchet'a.....	104
Rys. 8.4 Wpływ zmiany wartości parametrów rozkładu na kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu Pareto.....	105
Rys. 8.5 Wykres średnich przekroczeń.....	106
Rys. 8.6 Wykres stabilności parametrów a) skali b) kształtu.....	106
Rys. 8.7 Lokalizacja wybranych poligonów badawczych.....	109
Rys. 8.8 Wykres średnich przekroczeń dla przejazdu ID=42.....	111
Rys. 8.9 Wykres stabilności parametrów a) skali, b) kształtu, dla przejazdu ID=42.....	111
Rys. 8.10 Godzinowa zmienność natężenia ruchu rowerowego w poszczególnych dniach tygodnia na przejeździe ID=42 (dane z czerwca 2017r.).....	115

Załącznik 1

Sprawdzenie założeń analizy wariancji ANOVA – zmienność sezonowa

Tab. Z1-1 Wyniki testu Shapiro-Wilka normalności rozkładu wskaźników sezonowej zmienności ruchu w poszczególnych miesiącach 2018r.

Źródło: opracowanie własne

Lokalizacja		Styczeń			Luty			Marzec			Kwiecień			Maj			Czerwiec		
		W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p
Stacja	Bulwary Wiślane	0.967	31	0.442	0.961	28	0.361	0.794	31	<0.001	0.975	30	0.675	0.982	31	0.863	0.962	30	0.352
	Dworzec Główny	0.909	31	0.012	0.919	28	0.033	0.975	31	0.667	0.942	30	0.102	0.863	31	0.001	0.944	30	0.115
	ul. Kotlarska	0.908	31	0.012	0.947	28	0.170	0.971	31	0.543	0.919	30	0.025	0.967	31	0.437	0.900	17	0.067
	ul. Mogilska	0.926	31	0.035	0.937	28	0.094	0.972	31	0.573	0.930	30	0.049	0.928	31	0.039	0.945	30	0.126
	ul. Monte Casino	0.951	31	0.165	0.971	28	0.606	0.958	31	0.251	0.900	30	0.008	0.946	31	0.117	0.935	30	0.067
	ul. Smoleńsk	0.944	31	0.107	0.935	28	0.083	0.970	31	0.520	0.899	30	0.008	0.952	31	0.181	0.944	30	0.114
	ul. Tyniecka	0.933	31	0.053	0.971	28	0.609	0.634	31	<0.001	0.854	30	0.001	0.904	31	0.009	0.915	30	0.020
	ul. Wadowicka	0.957	31	0.247	0.946	28	0.153	0.775	31	<0.001	0.943	30	0.106	0.934	31	0.055	0.946	30	0.135
	ul. Wielicka	0.976	31	0.710	0.977	28	0.762	0.962	31	0.333	0.900	30	0.008	0.956	31	0.225	0.948	30	0.151
Średnia_pętla	0.951	31	0.171	0.964	28	0.423	0.963	31	0.351	0.880	30	0.003	0.937	31	0.069	0.942	30	0.106	
Wawelo	0.932	31	0.049	0.982	28	0.897	0.960	31	0.285	0.882	30	0.003	0.952	31	0.175	0.915	30	0.020	
Lokalizacja		Lipiec			Sierpień			Wrzesień			Październik			Listopad			Grudzień		
		W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p
Stacja	Bulwary Wiślane	0.969	31	0.480	0.941	31	0.085	0.959	30	0.300	0.939	31	0.076	0.895	30	0.007	0.946	31	0.124
	Dworzec Główny	0.921	31	0.026	0.845	31	<0.001	0.894	30	0.006	0.920	31	0.023	0.933	30	0.060	0.941	31	0.087
	ul. Kotlarska	0.953	31	0.187	0.883	31	0.003	0.916	30	0.021	0.939	31	0.079	0.923	30	0.033	0.931	31	0.046
	ul. Mogilska	0.940	31	0.085	0.857	31	0.001	0.907	30	0.012	0.943	31	0.099	0.929	30	0.047	0.935	31	0.060
	ul. Monte Casino	0.963	31	0.352	0.881	31	0.003	0.926	30	0.038	0.921	31	0.024	0.924	30	0.033	0.951	31	0.170
	ul. Smoleńsk	0.957	31	0.247	0.865	31	0.001	0.913	30	0.018	0.933	31	0.053	0.932	30	0.057	0.957	31	0.238
	ul. Tyniecka	0.936	31	0.064	0.862	31	0.001	0.882	30	0.003	0.870	31	0.001	0.844	30	<0.001	0.957	31	0.248
	ul. Wadowicka	0.969	31	0.504	0.977	31	0.737	0.958	30	0.272	0.923	31	0.028	0.705	30	<0.001	0.924	31	0.029
	ul. Wielicka	0.956	31	0.224	0.878	31	0.002	0.919	30	0.025	0.942	31	0.095	0.937	30	0.077	0.921	31	0.025
Średnia_pętla	0.951	31	0.163	0.858	31	0.001	0.911	30	0.016	0.928	31	0.038	0.923	30	0.033	0.946	31	0.123	
Wawelo	0.945	24	0.214	0.880	25	0.007	0.896	29	0.008	0.941	31	0.088	0.895	30	0.006	0.935	31	0.060	

gdzie: kolorem zielonym oznaczono wyniki testu, na podstawie których można stwierdzić normalność rozkładu zmiennej losowej, zaś kolorem czerwonym wyniki wskazujące na to, że rozkład zmiennej losowej nie jest normalny;

Tab. Z1-2 Wyniki testu Shapiro-Wilka normalności rozkładu wskaźników sezonowej zmienności ruchu w poszczególnych miesiącach 2019r.

Źródło: opracowanie własne

Lokalizacja		Styczeń			Luty			Marzec			Kwiecień			Maj			Czerwiec		
		W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p
Stacje	Bulwary Wiślane	0.959	31	0.267	0.800	28	<0.001	0.721	31	<0.001	0.952	30	0.189	0.945	31	0.113	0.944	30	0.119
	Dworzec Główny	0.927	31	0.037	0.955	28	0.265	0.961	31	0.317	0.922	30	0.030	0.973	31	0.594	0.796	30	<0.001
	ul. Kotlarska	0.927	31	0.037	0.964	28	0.441	0.906	31	0.010	0.935	30	0.065	0.966	31	0.416	0.849	30	0.001
	ul. Mogilska	0.935	31	0.062	0.961	28	0.363	0.909	31	0.012	0.931	30	0.054	0.974	31	0.639	0.825	30	<0.001
	ul. Monte Casino	0.960	31	0.301	0.963	28	0.403	0.955	31	0.212	0.960	30	0.309	0.977	31	0.732	0.891	30	0.005
	ul. Smoleńsk	0.949	31	0.146	0.972	28	0.645	0.831	31	<0.001	0.951	30	0.181	0.983	31	0.894	0.872	30	0.002
	ul. Tyniecka	0.950	31	0.159	0.661	28	<0.001	0.598	31	<0.001	0.958	30	0.269	0.861	31	0.001	0.779	30	<0.001
	ul. Wadowicka	0.946	31	0.117	0.954	28	0.254	0.939	31	0.078	0.947	30	0.140	0.867	31	0.001	0.879	30	0.003
	ul. Wielicka	0.902	31	0.008	0.972	28	0.642	0.961	31	0.309	0.942	30	0.101	0.966	31	0.410	0.883	30	0.003
	ul. Bora-Komorowskiego	0.960	31	0.288	0.954	28	0.242	0.952	31	0.172	0.957	30	0.263	0.975	31	0.655	0.944	30	0.119
	ul. Klimeckiego	0.949	31	0.150	0.971	28	0.620	0.950	31	0.161	0.949	30	0.162	0.973	31	0.602	0.899	30	0.008
	ul. Kopernika	0.919	31	0.022	0.966	28	0.489	0.895	31	0.005	0.933	30	0.059	0.977	31	0.717	0.826	30	<0.001
	ul. Nowohucka	0.963	31	0.343	0.927	28	0.051	0.931	31	0.046	0.959	30	0.290	0.963	31	0.360	0.914	30	0.019
Średnia_pętla	0.968	31	0.464	0.947	27	0.180	0.964	27	0.464	0.971	30	0.561	0.974	31	0.628	0.860	30	0.001	
Wavelo	0.954	31	0.203	0.971	28	0.621	0.968	31	0.475	0.954	30	0.215	0.980	31	0.818	0.880	30	0.003	
Lokalizacja		Lipiec			Sierpień			Wrzesień			Październik			Listopad			Grudzień		
		W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p	W	df	wartość p
Stacje	Bulwary Wiślane	0.967	31	0.429	0.981	31	0.846	0.911	30	0.015	0.979	31	0.787	0.933	30	0.059	0.907	31	0.011
	Dworzec Główny	0.877	31	0.002	0.857	31	0.001	0.937	30	0.075	0.939	31	0.079	0.892	30	0.005	0.854	31	0.001
	ul. Kotlarska	0.913	31	0.015	0.925	31	0.033	0.940	30	0.093	0.955	31	0.212	0.885	30	0.004	0.844	31	<0.001
	ul. Mogilska	0.893	31	0.005	0.895	31	0.005	0.941	30	0.095	0.947	31	0.132	0.881	30	0.003	0.850	31	0.001
	ul. Monte Casino	0.951	31	0.164	0.961	31	0.311	0.946	30	0.132	0.940	31	0.082	0.898	30	0.008	0.871	31	0.001
	ul. Smoleńsk	0.920	31	0.023	0.910	31	0.013	0.954	30	0.214	0.953	31	0.189	0.881	30	0.003	0.912	31	0.015
	ul. Tyniecka	0.967	31	0.439	0.889	31	0.004	0.871	30	0.002	0.870	31	0.001	0.820	30	<0.001	0.944	31	0.109
	ul. Wadowicka	0.967	31	0.432	0.966	31	0.408	0.941	30	0.099	0.964	31	0.360	0.898	30	0.008	0.862	31	0.001
	ul. Wielicka	0.925	31	0.031	0.929	31	0.041	0.949	30	0.157	0.944	31	0.106	0.877	30	0.002	0.889	31	0.004
	ul. Bora-Komorowskiego	0.963	31	0.350	0.977	31	0.733	0.890	30	0.005	0.949	31	0.150	0.943	30	0.107	0.913	31	0.016
	ul. Klimeckiego	0.951	31	0.164	0.949	31	0.148	0.934	30	0.061	0.947	31	0.125	0.879	30	0.003	0.890	31	0.004
	ul. Kopernika	0.900	31	0.007	0.902	31	0.008	0.945	30	0.123	0.951	31	0.162	0.904	30	0.011	0.867	31	0.001
	ul. Nowohucka	0.964	31	0.365	0.967	31	0.440	0.908	30	0.013	0.953	31	0.184	0.937	30	0.078	0.891	31	0.004
Średnia_pętla	0.954	31	0.200	0.937	31	0.067	0.936	30	0.070	0.931	31	0.047	0.905	30	0.011	0.882	31	0.003	
Wavelo	0.923	31	0.028	0.949	31	0.146	0.923	30	0.032	0.959	31	0.278	0.950	30	0.173	0.912	31	0.015	

gdzie: kolorem zielonym oznaczono wyniki testu, na podstawie których można stwierdzić normalność rozkładu zmiennej losowej, zaś kolorem czerwonym wyniki wskazujące na to, że rozkład zmiennej losowej nie jest normalny;

Tab. Z1-3 Wyniki testu Lavene'a jednorodności wariancji wskaźników sezonowej zmienności ruchu w poszczególnych miesiącach 2018r. i 2019r.

Źródło: opracowanie własne

Rok	Miesiąc	Statystyka F_L	df1	df2	wartość p
2018	1	7.231	10	330	0.000
	2	7.068	10	297	0.000
	3	1.753	10	330	0.068
	4	5.852	10	319	0.000
	5	10.177	10	330	0.000
	6	1.333	10	306	0.212
	7	2.549	10	323	0.006
	8	1.285	10	324	0.238
	9	2.920	10	318	0.002
	10	1.665	10	330	0.088
	11	2.925	10	319	0.002
	12	9.671	10	330	0.000
2019	1	4.146	14	450	0.000
	2	1.785	14	404	0.039
	3	8.139	14	446	0.000
	4	0.569	14	435	0.889
	5	4.254	14	450	0.000
	6	3.515	14	435	0.000
	7	1.275	14	450	0.219
	8	5.457	14	450	0.000
	9	2.289	14	435	0.005
	10	2.627	14	450	0.001
	11	4.292	14	435	0.000
	12	19.773	14	450	0.000

gdzie: kolorem zielonym oznaczono wyniki testu, na podstawie których można stwierdzić, że wariancje zmiennej losowej są jednorodne, zaś kolorem czerwonym wyniki wskazujące na to, że rozkład zmiennej losowej nie jest normalny;

Tab. 22-2a Wyniki testu post hoc Tukeya dla wskaźników sezonowej zmienności ruchu w miesiącach styczni, lut, marzec, czerwiec, lipiec i październik 2019r.
 Źródło: opracowanie własne

Miejsce	Dworec Główny	ul. Kolarska	ul. Mogińska	ul. Monte Casino	ul. Sniadek	ul. Tynecka	ul. Witwicka	ul. Borawski	Kilmeckie	ul. Kopernika	ul. Nowoludka	Wawelo	Czerwiec														
													Dworec Główny	ul. Kolarska	ul. Mogińska	ul. Monte Casino	ul. Sniadek	ul. Tynecka	ul. Witwicka	ul. Borawski	Kilmeckie	ul. Kopernika	ul. Nowoludka	Wawelo			
Dworec Główny	0,084 (p=0,0001)																										
ul. Kolarska	0,084 (p=0,0001)	0 (p=0,999)																									
ul. Mogińska	0,084 (p=0,0001)	0,67 (p=0,0001)	0,67 (p=0,0001)																								
ul. Monte Casino	0,084 (p=0,0001)	0,34 (p=0,0001)	0,34 (p=0,0001)	0,05 (p=0,999)																							
ul. Sniadek	0,084 (p=0,0001)	0,02 (p=0,999)	0,117 (p=0,0001)	0,095 (p=0,0001)	0,167 (p=0,0001)																						
ul. Tynecka	0,084 (p=0,0001)	0,02 (p=0,999)	0,117 (p=0,0001)	0,095 (p=0,0001)	0,167 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)																					
ul. Witwicka	0,084 (p=0,0001)	0,02 (p=0,999)	0,117 (p=0,0001)	0,095 (p=0,0001)	0,167 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)	0,044 (p=0,999)																				
ul. Borawski	0,084 (p=0,0001)	0,02 (p=0,999)	0,117 (p=0,0001)	0,095 (p=0,0001)	0,167 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)	0,044 (p=0,999)																			
Kilmeckie	0,084 (p=0,0001)	0,02 (p=0,999)	0,117 (p=0,0001)	0,095 (p=0,0001)	0,167 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)	0,044 (p=0,999)	0,185 (p=0,0001)																		
ul. Kopernika	0,084 (p=0,0001)	0,02 (p=0,999)	0,117 (p=0,0001)	0,095 (p=0,0001)	0,167 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)	0,044 (p=0,999)	0,185 (p=0,0001)	0,044 (p=0,999)																	
ul. Nowoludka	0,084 (p=0,0001)	0,02 (p=0,999)	0,117 (p=0,0001)	0,095 (p=0,0001)	0,167 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)	0,044 (p=0,999)	0,185 (p=0,0001)	0,044 (p=0,999)	0,044 (p=0,999)																
Wawelo	0,084 (p=0,0001)	0,02 (p=0,999)	0,117 (p=0,0001)	0,095 (p=0,0001)	0,167 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)	0,044 (p=0,999)	0,185 (p=0,0001)	0,044 (p=0,999)	0,044 (p=0,999)	0,044 (p=0,999)															
Średnia stajle	0,084 (p=0,0001)	0,02 (p=0,999)	0,117 (p=0,0001)	0,095 (p=0,0001)	0,167 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)	0,185 (p=0,0001)	0,044 (p=0,999)	0,185 (p=0,0001)	0,044 (p=0,999)	0,044 (p=0,999)	0,044 (p=0,999)	0,044 (p=0,999)														
Dworec Główny	0,072 (p=0,999)																										
ul. Kolarska	0,072 (p=0,999)	0,045 (p=0,999)																									
ul. Mogińska	0,045 (p=0,999)	0,045 (p=0,999)	0,027 (p=0,999)																								
ul. Monte Casino	0,045 (p=0,999)	0,045 (p=0,999)	0,027 (p=0,999)	0,08 (p=0,999)																							
ul. Sniadek	0,045 (p=0,999)	0,045 (p=0,999)	0,027 (p=0,999)	0,08 (p=0,999)	0,199 (p=0,0001)																						
ul. Tynecka	0,045 (p=0,999)	0,045 (p=0,999)	0,027 (p=0,999)	0,08 (p=0,999)	0,199 (p=0,0001)	0,171 (p=0,0001)																					
ul. Witwicka	0,045 (p=0,999)	0,045 (p=0,999)	0,027 (p=0,999)	0,08 (p=0,999)	0,199 (p=0,0001)	0,171 (p=0,0001)	0,033 (p=0,999)																				
ul. Borawski	0,045 (p=0,999)	0,045 (p=0,999)	0,027 (p=0,999)	0,08 (p=0,999)	0,199 (p=0,0001)	0,171 (p=0,0001)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)																			
Kilmeckie	0,045 (p=0,999)	0,045 (p=0,999)	0,027 (p=0,999)	0,08 (p=0,999)	0,199 (p=0,0001)	0,171 (p=0,0001)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)																		
ul. Kopernika	0,045 (p=0,999)	0,045 (p=0,999)	0,027 (p=0,999)	0,08 (p=0,999)	0,199 (p=0,0001)	0,171 (p=0,0001)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)																	
ul. Nowoludka	0,045 (p=0,999)	0,045 (p=0,999)	0,027 (p=0,999)	0,08 (p=0,999)	0,199 (p=0,0001)	0,171 (p=0,0001)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)																
Wawelo	0,045 (p=0,999)	0,045 (p=0,999)	0,027 (p=0,999)	0,08 (p=0,999)	0,199 (p=0,0001)	0,171 (p=0,0001)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)															
Średnia stajle	0,045 (p=0,999)	0,045 (p=0,999)	0,027 (p=0,999)	0,08 (p=0,999)	0,199 (p=0,0001)	0,171 (p=0,0001)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)	0,033 (p=0,999)														

Pazdan S.: Ocena wykorzystania danych GPS z systemu rowerów miejskich w analizach ruchu rowerowego i jego bezpieczeństwa

Tab. Z2-2b Wyniki testu post hoc Tukey'a dla wskaźników sezonowej zmienności ruchu w miesiącach listopad i grudzień 2019r.

Źródło: opracowanie własne

	Bulwary Wiślane	Dworzec Główny	ul. Kotlarska	ul. Mogilska	ul. Monte Casino	ul. Smoleńsk	ul. Tyniecka	ul. Wadowicka	ul. Wielicka	ul. Bora- Komorowskiego	ul. Klimeckiego	ul. Kopernika	ul. Nowohucka	Wawelo
Listopad														
Dworzec Główny	0.213 (p=0.19)													
ul. Kotlarska	0.174 (p=0.522)	0.039 (p>0.999)												
ul. Mogilska	0.176 (p=0.503)	0.037 (p>0.999)	0.002 (p>0.999)											
ul. Monte Casino	0.164 (p=0.621)	0.048 (p>0.999)	0.01 (p>0.999)	0.012 (p>0.999)										
ul. Smoleńsk	0.277 (p=0.013)	0.064 (p>0.999)	0.103 (p=0.985)	0.101 (p=0.988)	0.113 (p=0.968)									
ul. Tyniecka	0.112 (p=0.97)	0.325 (p=0.001)	0.286 (p=0.008)	0.288 (p=0.008)	0.276 (p=0.014)	0.389 (p<0.001)								
ul. Wadowicka	0.113 (p=0.966)	0.099 (p=0.99)	0.061 (p>0.999)	0.063 (p>0.999)	0.051 (p>0.999)	0.164 (p=0.628)	0.225 (p=0.124)							
ul. Wielicka	0.156 (p=0.705)	0.057 (p>0.999)	0.018 (p>0.999)	0.02 (p>0.999)	0.008 (p>0.999)	0.121 (p=0.942)	0.268 (p=0.021)	0.043 (p>0.999)						
ul. Bora- Komorowskieg	0.031 (p>0.999)	0.182 (p=0.441)	0.143 (p=0.815)	0.145 (p=0.8)	0.134 (p=0.881)	0.247 (p=0.054)	0.143 (p=0.821)	0.083 (p=0.998)	0.125 (p=0.926)					
ul. Klimeckiego	0.085 (p=0.998)	0.128 (p=0.912)	0.089 (p=0.996)	0.091 (p=0.996)	0.08 (p=0.999)	0.193 (p=0.342)	0.196 (p=0.309)	0.029 (p>0.999)	0.071 (p>0.999)	0.054 (p>0.999)				
ul. Kopernika	0.194 (p=0.332)	0.019 (p>0.999)	0.02 (p>0.999)	0.018 (p>0.999)	0.029 (p>0.999)	0.084 (p=0.998)	0.306 (p=0.003)	0.08 (p>0.999)	0.038 (p>0.999)	0.163 (p=0.636)	0.109 (p=0.976)			
ul. Nowohucka	0.035 (p>0.999)	0.178 (p=0.48)	0.14 (p=0.843)	0.141 (p=0.83)	0.13 (p=0.903)	0.243 (p=0.063)	0.146 (p=0.791)	0.079 (p=0.999)	0.121 (p=0.941)	0.004 (p>0.999)	0.05 (p>0.999)	0.159 (p=0.674)		
Wawelo	0.098 (p=0.991)	0.311 (p>0.002)	0.272 (p=0.017)	0.274 (p=0.016)	0.262 (p=0.027)	0.375 (p<0.001)	0.014 (p=0.999)	0.211 (p=0.2)	0.254 (p=0.04)	0.128 (p=0.911)	0.182 (p=0.439)	0.291 (p=0.006)	0.132 (p=0.89)	
Średnia stacje	0.116 (p=0.96)	0.097 (p=0.992)	0.058 (p>0.999)	0.06 (p>0.999)	0.049 (p>0.999)	0.161 (p=0.652)	0.228 (p=0.113)	0.002 (p>0.999)	0.04 (p>0.999)	0.085 (p=0.998)	0.031 (p>0.999)	0.078 (p=0.999)	0.081 (p=0.999)	0.214 (p=0.185)
Grudzień														
Dworzec Główny	0.179 (p=0.162)													
ul. Kotlarska	0.132 (p=0.664)	0.047 (p>0.999)												
ul. Mogilska	0.134 (p=0.641)	0.045 (p>0.999)	0.002 (p>0.999)											
ul. Monte Casino	0.103 (p=0.926)	0.076 (p=0.995)	0.029 (p>0.999)	0.031 (p>0.999)										
ul. Smoleńsk	0.276 (p=0.001)	0.097 (p=0.955)	0.144 (p=0.517)	0.142 (p=0.541)	0.172 (p=0.211)									
ul. Tyniecka	0.061 (p>0.999)	0.24 (p=0.006)	0.193 (p=0.088)	0.195 (p=0.08)	0.164 (p=0.284)	0.337 (p<0.001)								
ul. Wadowicka	0.128 (p=0.708)	0.051 (p>0.999)	0.004 (p>0.999)	0.006 (p>0.999)	0.025 (p>0.999)	0.148 (p=0.471)	0.189 (p=0.105)							
ul. Wielicka	0.117 (p=0.822)	0.062 (p=0.999)	0.015 (p>0.999)	0.017 (p>0.999)	0.014 (p>0.999)	0.158 (p=0.344)	0.178 (p=0.167)	0.011 (p>0.999)						
ul. Bora- Komorowskieg	0.03 (p>0.999)	0.149 (p=0.452)	0.102 (p=0.932)	0.104 (p=0.922)	0.073 (p=0.997)	0.246 (p=0.004)	0.091 (p=0.973)	0.098 (p=0.949)	0.087 (p=0.981)					
ul. Klimeckiego	0.066 (p=0.999)	0.113 (p=0.859)	0.066 (p=0.999)	0.068 (p=0.998)	0.037 (p>0.999)	0.21 (p=0.038)	0.127 (p=0.722)	0.062 (p=0.999)	0.051 (p>0.999)	0.036 (p>0.999)				
ul. Kopernika	0.147 (p=0.478)	0.032 (p>0.999)	0.015 (p>0.999)	0.013 (p>0.999)	0.044 (p>0.999)	0.129 (p=0.702)	0.208 (p=0.041)	0.019 (p>0.999)	0.03 (p>0.999)	0.117 (p=0.825)	0.081 (p=0.991)			
ul. Nowohucka	0.035 (p>0.999)	0.144 (p=0.518)	0.097 (p=0.956)	0.098 (p=0.948)	0.068 (p=0.999)	0.24 (p=0.006)	0.096 (p=0.956)	0.093 (p=0.968)	0.082 (p=0.99)	0.005 (p>0.999)	0.031 (p>0.999)	0.112 (p=0.871)		
Wawelo	0.195 (p=0.079)	0.374 (p<0.001)	0.327 (p<0.001)	0.329 (p<0.001)	0.298 (p<0.001)	0.471 (p<0.001)	0.134 (p=0.637)	0.323 (p<0.001)	0.312 (p<0.001)	0.225 (p=0.016)	0.261 (p=0.002)	0.342 (p<0.001)	0.231 (p=0.011)	
Średnia stacje	0.099 (p=0.946)	0.08 (p=0.992)	0.033 (p>0.999)	0.035 (p>0.999)	0.004 (p>0.999)	0.177 (p=0.179)	0.16 (p=0.327)	0.029 (p>0.999)	0.018 (p>0.999)	0.069 (p=0.998)	0.033 (p>0.999)	0.048 (p>0.999)	0.064 (p=0.999)	0.294 (p<0.001)