



Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Imię i nazwisko autora rozprawy: Lucyna Gumińska

Dyscyplina naukowa: Inżynieria lądowa, geodezja i transport

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: **Badania wpływu wybranych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych w miastach**

Tytuł rozprawy w języku angielskim: **The effects of selected factors on the performance of pedestrian crossings in urban areas**

Promotor	Drugi promotor
<i>podpis</i>	----- <i>podpis</i>
dr hab. inż. Kazimierz Jamroz, prof. uczelni	nie dotyczy
Promotor pomocniczy	Kopromotor
<i>podpis</i>	----- <i>podpis</i>
dr hab. inż. Jacek Oskarbski, prof. uczelni	nie dotyczy

The author of the doctoral dissertation: Lucyna Gumińska
Scientific discipline: Civil engineering, geodesy and transport

DOCTORAL DISSERTATION

Title of doctoral dissertation: **The effects of selected factors on the performance of pedestrian crossings in urban areas**

Title of doctoral dissertation (in Polish): **Badania wpływu wybranych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych w miastach**

Supervisor <i>signature</i>	Second supervisor ----- <i>signature</i>
DSc.PhD Eng. Kazimierz Jamroz associate professor	not applicable
Auxiliary supervisor <i>signature</i>	Cosupervisor ----- <i>signature</i>
DSc.PhD Eng. Jacek Oskarbski associate professor	not applicable

Gdańsk, year 2024



OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: **Lucyna Gumińska**

Ja, niżej podpisany(a), oświadczam, iż jestem świadomy(a), że zgodnie z przepisem art. 27 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2021 poz. 1062), uczelnia może korzystać z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej:

Badania wpływu wybranych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych w miastach.

do prowadzenia badań naukowych lub w celach dydaktycznych.¹

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2021.478 t.j.), a także odpowiedzialności cywilnoprawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem, drugim promotorem, promotorem pomocniczym, kopromotorem*.

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami, zgodnie z przepisem art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia
.....
podpis doktoranta

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/nie wyrażam zgody* na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej.

Gdańsk, dnia
.....
podpis doktoranta

*niepotrzebne usunąć

¹ Art. 27. 1. Instytucje oświatowe oraz podmioty, o których mowa w art. 7 ust. 1 pkt 1, 2 i 4–8 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, mogą na potrzeby zilustrowania treści przekazywanych w celach dydaktycznych lub w celu prowadzenia działalności naukowej korzystać z rozpowszechnionych utworów w oryginale i w tłumaczeniu oraz zwielokrotnić w tym celu rozpowszechnione drobne utwory lub fragmenty większych utworów. 2. W przypadku publicznego udostępniania utworów w taki sposób, aby każdy mógł mieć do nich dostęp w miejscu i czasie przez siebie wybranym korzystanie, o którym mowa w ust. 1, jest dozwolone wyłącznie dla ograniczonego kręgu osób uczących się, nauczających lub prowadzących badania naukowe, zidentyfikowanych przez podmioty wymienione w ust. 1.

STATEMENT

The author of the doctoral dissertation: **Lucyna Gumińska**

I, the undersigned, declare that I am aware that in accordance with the provisions of Art. 27 (1) and (2) of the Act of 4th February 1994 on Copyright and Related Rights (Journal of Laws of 2021, item 1062), the university may use my doctoral dissertation entitled:

The effects of selected factors on the performance of pedestrian crossings in urban areas.

for scientific or didactic purposes.²

Gdańsk, dnia
signature of the PhD student

Aware of criminal liability for violations of the Act of 4th February 1994 on Copyright and Related Rights and disciplinary actions set out in the Law on Higher Education and Science (Journal of Laws 2021, item 478), as well as civil liability,

I declare, that the submitted doctoral dissertation is my own work. I declare, that the submitted doctoral dissertation is my own work performed under and in cooperation with the supervision of , the second supervision of , the auxiliary supervision of , the cosupervision of *.

This submitted doctoral dissertation has never before been the basis of an official procedure associated with the awarding of a PhD degree.

All the information contained in the above thesis which is derived from written and electronic sources is documented in a list of relevant literature in accordance with Art. 34 of the Copyright and Related Rights Act.

I confirm that this doctoral dissertation is identical to the attached electronic version.

Gdańsk, dnia
signature of the PhD student

I, the undersigned, agree/do not agree* to include an electronic version of the above doctoral dissertation in the open, institutional, digital repository of Gdańsk University of Technology.

Gdańsk, dnia
signature of the PhD student

*delete where appropriate

² Art. 27. 1. Instytucje oświatowe oraz podmioty, o których mowa w art. 7 ust. 1 pkt 1, 2 i 4–8 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, mogą na potrzeby zilustrowania treści przekazywanych w celach dydaktycznych lub w celu prowadzenia działalności naukowej korzystać z rozpowszechnionych utworów w oryginale i w tłumaczeniu oraz zwielokrotnić w tym celu rozpowszechnione drobne utwory lub fragmenty większych utworów. 2. W przypadku publicznego udostępniania utworów w taki sposób, aby każdy mógł mieć do nich dostęp w miejscu i czasie przez siebie wybranym korzystanie, o którym mowa w ust. 1, jest dozwolone wyłącznie dla ograniczonego kręgu osób uczących się, nauczających lub prowadzących badania naukowe, zidentyfikowanych przez podmioty wymienione w ust. 1.

STRESZCZENIE

W rozprawie doktorskiej poświęcono uwagę funkcjonowaniu przejść dla pieszych w warunkach miejskich, zwracając szczególną uwagę na zależność fundamentalną pomiędzy podstawowymi parametrami potoku pieszych oraz sposób jej wykorzystania w procesie wyboru rodzaju przejścia.

Głównym celem pracy jest identyfikacja istotnych czynników wpływających na funkcjonowanie przejść dla pieszych oraz opracowanie modeli matematycznych zależności między podstawowymi parametrami ruchu, na przejściach dla pieszych w obszarze miejskim. Sformułowano także trzy cele naukowe i trzy cele praktyczne. Do realizacji tych celów wykonano serię badań ankietowych, terenowych i symulacyjnych oraz prac obliczeniowo-analitycznych.

Na podstawie zebranych danych, ustalono podstawowe parametry fundamentalnej zależności między parametrami ruchu pieszych (QP-VP-DP). Korzystając z modelu tej zależności, określono wpływ wybranych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych. Ponadto ustalono zależność pomiędzy natężeniem ruchu pieszego i natężeniem ruchu kołowego na przepustowość i straty czasu pieszych i pojazdów w obszarze przejść dla pieszych.

Implementację wyników przeprowadzonych prac przedstawiono w postaci koncepcji wielokryterialnej metody wyboru rodzaju przejścia dla pieszych, która w swoich założeniach uwzględnia wyniki z przeprowadzonych badań oraz wskazuje kierunki dalszych prac badawczych i rozwojowych umożliwiających rozwinięcie metody oraz rekomendacje dotyczące jej wdrożenia.

Słowa kluczowe: ruch pieszych, przejścia dla pieszych, badania ruchu pieszego, przepustowość, warunki ruchu, metody wyboru przejść.

SUMMARY

The doctoral dissertation focused on the functioning of pedestrian crossings in urban conditions, paying particular attention to the fundamental relationship between the basic parameters of the pedestrian flow and how it is used in the process of selecting the type of crossing.

The main aim of the work is to identify important factors influencing the functioning of pedestrian crossings and to develop mathematical models of the relationships between the basic traffic parameters at pedestrian crossings in urban areas. Three scientific goals and three practical goals were also formulated. To achieve these goals, a series of surveys, field and simulation studies, as well as computational and analytical works were carried out.

Based on the collected data, the basic parameters of the fundamental relationship between pedestrian traffic parameters (QP-VP-DP) were established. Using the model of this relationship, the impact of selected factors on the functioning of pedestrian crossings was determined. And the relationship between the intensity of pedestrian traffic and the intensity of road traffic on the throughput and time loss of pedestrians and vehicles in the area of pedestrian crossings was established.

The implementation of the results of the work carried out is presented in the form of a concept of a multi-criteria method for selecting the type of pedestrian crossing, which in its assumptions takes into account the results of the conducted research and indicates directions for further research and development work enabling the development of the method and recommendations for its implementation.

Keywords: pedestrian, pedestrian traffic, directional split coefficient, capacity of pedestrian crossings and roads, microsimulation models.

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	11
1. WPROWADZENIE	13
1.1. Charakterystyka problemu.....	13
1.2. Geneza pracy	14
1.3. Cel główny i zakres pracy.....	14
2. STAN ZAGADNIENIA	16
2.1. Wprowadzenie.....	16
2.1.1. Wstęp	16
2.1.2. Podróże piesze	16
2.2. Charakterystyka ruchu w obszarze przejść dla pieszych.....	19
2.2.1. Ruch pieszy	19
2.2.1.1. Ruch pojedynczego pieszego	19
2.2.1.2. Ruch potoku pieszych	21
2.2.1.3. Stan bezpieczeństwa pieszych w ruchu drogowym	22
2.2.1.4. Wymagania pieszych odnośnie organizacji ruchu	23
2.2.2. Ruch pojazdów w obszarze przejścia dla pieszych	24
2.2.2.1. Ruch pojedynczego pojazdu	24
2.2.2.2. Ruch potoku pojazdów.....	25
2.3. Modele opisujące ruch potoku pieszych	26
2.3.1. Modelowanie ruchu pieszego	26
2.3.2. Parametry potoku pieszych	26
2.3.3. Przegląd modeli opisujących ruch potoków pieszych	27
2.3.4. Zależność fundamentalna w teorii ruchu potoku pieszych.....	28
2.3.5. Uwzględnienie struktury kierunkowej w modelowaniu ruchu potoków pieszych	30
2.4. Główne problemy w ruchu pieszych i sposoby ich rozwiązywania	31
2.4.1. Utrudnienia w ruchu pieszych.....	31
2.4.2. Zagrożenia bezpieczeństwa ruchu	32
2.4.3. Zmniejszenie przepustowości urządzeń dla pieszych	34
2.4.4. Pogorszenie warunków ruchu pieszych i pojazdów	34
2.4.5. Podział środków usprawniających ruch pieszych	35
2.4.6. Przejścia dla pieszych	35
2.4.6.1. Podział przejść dla pieszych	35
2.4.6.2. Wymagania ogólne dla przejść dla pieszych.....	36
2.4.6.3. Przejścia dla pieszych zwykle	36
2.4.6.4. Przejścia sugerowane	37
2.4.6.1. Przejścia przez drogę w innym poziomie	37
2.4.6.2. Inne udogodnienia usprawniające ruch pieszych	38
2.5. Ocena funkcjonowania przejść dla pieszych	38
2.5.1. Metody oceny funkcjonowania przejść dla pieszych.....	38
2.5.1.1. Czynniki wpływające na funkcjonowanie przejść dla pieszych.....	38
2.5.2. Ocena sprawności przejść dla pieszych	39

2.5.2.1.	Przepustowość przejścia dla pieszych	39
2.5.2.1.	Luki czasowe wykorzystywane przez pieszych	41
2.5.3.	Ocena warunków ruchu na przejściach dla pieszych	43
2.5.3.1.	Metody oceny warunków ruchu pieszych	43
2.5.3.2.	Miary oceny warunków ruchu pieszych	44
2.5.3.3.	Wpływ ruchu pieszego na ruch pojazdów w obszarze przejścia	46
2.6.	Sposoby doboru urządzeń i działań w obszarze przejść dla pieszych	46
2.7.	Przegląd wybranych projektów badawczych dotyczących ruchu pieszych	48
2.8.	Wnioski i rekomendacje	50
3.	CEL I ZAKRES PRACY BADAWCZEJ	52
3.1.	Cele pracy	52
3.2.	Zakres pracy	52
3.3.	Metodyka realizacji pracy	53
4.	BADANIA ZACHOWAŃ UŻYTKOWNIKÓW DRÓG I OPINII EKSPERTÓW	56
4.1.	Metodyka badań	56
4.1.1.	Cel i zakres badań	56
4.1.2.	Metodyka badań	56
4.1.3.	Metodyka analizy wyników badań ankietowych	57
4.2.	Badania opinii pieszych	58
4.2.1.	Charakterystyka badań	58
4.3.	Badania opinii kierowców	60
4.4.	Badania ekspertów zajmujących się inżynierią ruchu drogowego	61
4.4.1.	Identyfikacja czynników wpływające na funkcjonowanie przejść dla pieszych	61
4.4.2.	Ocena poziomu zagrożenia wypadkami na przejściach dla pieszych	62
4.4.3.	Ocena istotności kryteriów wyboru rodzaju przejścia dla pieszych	66
5.	BADANIA TERENOWE WYBRANYCH PARAMETRÓW RUCHU PIESZYCH I POJAZDÓW NA PRZEJŚCIACH DLA PIESZYCH	68
5.1.	Metodyka badań	68
5.1.1.	Cel i zakres badań terenowych i analiz	68
5.1.2.	Poligon badawczy	68
5.2.	Identyfikacja stosowanych rodzajów przejść dla pieszych w Polsce	69
5.3.	Bezpieczeństwo ruchu na przejściach dla pieszych	70
5.4.	Wielkość ruchu pieszego i kołowego w obszarze przejść	72
5.4.1.	Wielkość ruchu pieszego i kołowego na przejściach różnego rodzaju	72
5.4.2.	Rozkłady natężenia ruchu pieszych i pojazdów w ciągu doby	74
5.4.3.	Struktura potoków pieszych i pojazdów w obszarze przejść dla pieszych	77
5.4.4.	Zależności pomiędzy natężeniem ruchu pieszego i kołowego	78
5.4.5.	Akceptowane przez pieszego luki w potoku pojazdów	80
5.5.	Badania prędkości pieszych na przejściach dla pieszych	85
5.5.1.	Charakterystyka badań terenowych	85
5.5.2.	Prędkość pieszego na przejściach bez sygnalizacji świetlnej	85
5.5.2.1.	Charakterystyka i wyniki badań	85

5.5.2.2.	Wpływ charakterystyk pieszego na średnią prędkość pieszego	86
5.5.2.3.	Wpływ rodzaju przekroju drogi na średnią prędkość pieszego	87
5.5.3.	Prędkość pieszego na przejściach z sygnalizacją świetlną	88
5.5.3.1.	Wpływ wieku i płci na średnią prędkość pieszego	89
5.5.3.2.	Wpływ przekroju ulicy na średnią prędkość pieszego	90
5.5.4.	Porównanie prędkości pieszych na przejściach z i bez sygnalizacji świetlnej	91
5.5.5.	Dyskusja wyników i rekomendacje	92
5.6.	Prędkość pojazdu na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych	93
5.6.1.	Charakterystyka badań	93
5.6.2.	Wyniki badań prędkości pojazdów na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych	94
5.6.3.	Badania wpływu wybranych czynników na prędkość pojazdów na odcinku dojazdowym ..	95
5.7.	Badania zależności pomiędzy prędkością, gęstością i natężeniem ruchu pieszego na kładce dla pieszych	97
5.7.1.	Charakterystyka badań	97
5.7.1.1.	Opis badań	97
5.7.1.2.	Cel i zakres badań	98
5.7.1.3.	Metodyka badań	98
5.7.2.	Pomiar parametrów ruchu pieszego	99
5.7.2.1.	Dobór przedziału analiz	99
5.7.2.2.	Pomiar natężeń ruchu pieszych	100
5.7.2.3.	Pomiar gęstości potoku pieszych	101
5.7.2.4.	Pomiar przestrzeni dla pieszych	102
5.7.2.5.	Pomiar prędkości	103
5.7.3.	Zależność pomiędzy natężeniem, gęstością i prędkością ruchu potoku pieszych	104
5.7.4.	Dyskusja wyników i rekomendacje	106
5.8.	Podsumowanie badań terenowych	106
6.	BADANIA MIKROSYMULACYJNE WYBRANYCH PRZEJŚĆ DLA PIESZYCH W MIASTACH	108
6.1.	Metodyka badań	108
6.1.1.	Wstęp	108
6.1.2.	Cel i zakres modelowania na poziomie mikroskopowym	108
6.1.3.	Założenia do opracowania modeli mikroskopowych	109
6.2.	Opis narzędzia do symulacji	109
6.2.1.	Model zachowań pieszych	109
6.2.2.	Narzędzia do modelowania ruchu	110
6.2.3.	Model zachowań kierowców	111
6.3.	Model przejścia dla pieszych	113
6.3.1.	Kalibracja modelu	114
6.4.	Wyniki badań	117
6.4.1.	Badania strat czasu pieszych i pojazdów na przejściach dla pieszych	117
6.4.2.	Badania przepustowości ruchu pieszego i kołowego na przejściu dla pieszych	118
6.4.3.	Badania zależności podstawowych parametrów ruchu pieszego w przypadku potoku pieszych przemieszczających się w jednym kierunku;	119

6.4.4.	Badania zależności podstawowych parametrów ruchu pieszego w przypadku potoku pieszych przemieszczających się w dwóch kierunkach	120
6.5.	Wnioski z badań symulacyjnych	121
7.	MODELOWANIE FUNDAMENTALNEJ ZALEŻNOŚCI OPISUJĄCEJ RUCHU POTOKU PIESZYCH NA PRZEJŚCIACH DLA PIESZYCH	122
7.1.	Charakterystyka, cel i zakres analiz	122
7.1.1.	Procedura modelowania	123
7.1.2.	Założenia do modelowania	123
7.1.3.	Dobór modeli, walidacja i weryfikacja	124
7.2.	Modelowanie zależności fundamentalnej QP-VP-DP w potoku pieszych przemieszczających się w jednym kierunku	125
7.2.1.	Charakterystyka i cel analiz	125
7.2.2.	Dobór danych do modelowania	125
7.2.3.	Określenie wielkości parametrów charakterystycznych modelu zależności fundamentalnej 126	
7.2.4.	Dobór modeli zależności pomiędzy podstawowymi parametrami	127
7.2.4.1.	Obszar i zakres modelowania	127
7.2.4.2.	Modele zależności między gęstością potoku i natężeniem ruchu pieszych	128
7.2.4.3.	Modele zależności między prędkością potoku i natężeniem ruchu pieszych	129
7.2.4.4.	Modele zależności między gęstością i prędkością potoku pieszych	130
7.2.5.	Konstrukcja trójosiowego modelu zależności fundamentalnej potoku ruchu pieszych	131
7.2.6.	Porównanie modeli (dyskusja wyników i rekomendacje)	132
7.3.	Modelowanie zależności fundamentalnej QP-VP-DP w potoku pieszych przemieszczających się w dwóch kierunkach	135
7.3.1.	Charakterystyka problemu i cel analiz	135
7.3.2.	Dobór danych do modelowania	136
7.3.3.	Określenie wielkości parametrów charakterystycznych w modelu zależności fundamentalnej 137	
7.3.4.	Dobór modeli zależności pomiędzy parametrami podstawowymi	137
7.3.4.1.	Obszar i zakres modelowania	137
7.3.5.	Modelowanie zmian natężenia maksymalnego w zależności od podziału kierunkowego .	138
7.3.5.1.	Modele zależności między prędkością, natężeniem i gęstością potoku ruchu pieszych 139	
7.3.6.	Wnioski	143
8.	BADANIA (MODELOWANIE) WPLYWU WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA SPRAWNOŚĆ ORAZ WARUNKI RUCHU PIESZYCH I POJAZDÓW NA WYBRANYCH RODZAJACH PRZEJŚĆ DLA PIESZYCH	145
8.1.	Przepustowość	145
8.1.1.	Założenia	145
8.1.2.	Przepustowość przejścia dla pieszych w przypadku pierwszeństwa pojazdów	145
8.1.3.	Przepustowość jezdni w obszarze przejścia w przypadku pierwszeństwa dla pieszych ..	146
8.1.4.	Podsumowanie	147
8.2.	Straty czasu na podstawie modeli mikrosymulacyjnych	147
8.2.1.	Średnie straty czasu pieszego	147
8.2.2.	Średnie straty czasu pojazdów	150

9.	IMPLEMENTACJA WYNIKÓW BADAŃ	152
9.1.	Metody szacowania prędkości pieszego	152
9.1.1.	Prędkość swobodna potoku pieszych przemieszczających się w jednym kierunku.....	152
9.1.2.	Natężenie krytyczne ruchu pieszych w zależności od prędkości potoku	152
9.2.	Szacowanie widoczności.....	153
9.3.	Metoda szacowania przepustowości pieszych i pojazdów w obszarze przejścia dla pieszych	155
9.3.1.	Metoda szacowania wpływu podziału struktury kierunkowej	155
9.3.2.	Metoda szacowania wpływ ruchu pojazdów na przepustowość przejścia	156
9.3.3.	Metoda szacowania wpływ ruchu pojazdów na przepustowość jezdni	157
9.4.	Metoda oceny warunków ruchu na przejściach dla pieszych	158
9.5.	Koncepcja wielokryterialnej metody wyboru rodzaju przejścia	159
9.5.1.	Wprowadzenie	159
9.5.2.	Założenia metody i procedura oceny rozwiązań dla pieszych	159
9.5.3.	Kryteria wyboru.....	161
9.5.4.	Ocena i wybór wariantu rozwiązania	162
10.	PODSUMOWANIE PRACY.....	164
10.1.	Wnioski.....	164
10.2.	Propozycje wykorzystania wyników badań.....	165
10.3.	Kierunki dalszych prac badawczych	166
11.	WYKAZ LITERATURY	167
	Załącznik nr 1	178
	Załącznik nr 2	188
	Załącznik nr 3	197

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

- B_E – ekwiwalentna szerokość kładki [m],
 C_d – przepustowość jezdni drogi
 C_{pc} – przepustowość łączna dla dwóch kierunków [P/ h], [P/min]
 C_{pk} – przepustowość w jednym kierunku [P/ h], [P/min]
 C_{pp} – przepustowość przejścia [P/ h], [P/min]
 C_{ppo} – przepustowość przejścia dla pieszych z priorytetem dla pojazdów
 D_p - gęstość pieszych [P/m²]
 DP_{opt} - optymalna gęstość pieszych [P/m²]
 $DT_{i,j}$ – teoretyczna luka czasowa umożliwiająca bezpieczne przekroczenie i-tej grupie pieszych jezdni na j-tym przejściu dla pieszych [s]
GEH (Geoffrey E. Havers) - miara oceny zgodności parametrów z modelu z danymi pomierzonymi w terenie
LP – długość przejścia dla pieszych [m]
MAPE (mean absolute percentage error) – średni bezwzględny błąd procentowy
OPP - teoretyczna luka przestrzenna umożliwiająca bezpieczne przekroczenie grupie pieszych jezdni przejściu dla pieszych [s], przy k-tej prędkości pojazdów,
 R^2_{sk} – stopień dopasowania estymowanych wartości do wartości empirycznych i symulacyjnych.
S – odległość pojazdu od przejścia dla pieszych [m]
SVK – średnia prędkość pojazdu [km/h]
TDp – straty czasu pieszego [s/P]
TDv – straty czasu pojazdu [s/P]
 VP_{opt} - optymalna prędkość pieszych [m/s], [m/min]
 VP_{sw} - prędkość pieszych w ruchu swobodnym [m/s], [m/min]
 V_p - prędkość pieszych [m/s], [m/min]
VDv - prędkość pojazdów dojeżdżających do przejścia dla pieszych [km/h]
 X_p – stopień wykorzystania przepustowości przejścia dla pieszych [-],
 QP_{max} – maksymalne natężenie ruchu pieszego [P/min/m] [P/s/m]
 Q_p - natężenie pieszych [P/h]
 Q_v - natężenie pojazdów [p/h]
WPK – wskaźnik podziału kierunkowego potoków pieszych na modelowym przejściu dla pieszych (-),
WWSK - Wartość współczynnika wpływu podziału struktury kierunkowej potoku
1x2 – droga jednojezdniowa o dwóch pasach ruchu z możliwością jazdy dwukierunkowej,
1x4 – droga jednojezdniowa o czterech pasach ruchu, z możliwością jazdy w dwóch kierunkach ruchu po dwa w każdym,
2x2 – droga dwujezdniowa, z dwoma pasami ruchu na każdej jezdni, które rozdzielone są torowiskiem lub pasem zieleni. Każda jezdni jest w jednym kierunku ruchu, ale o przeciwnym kierunku ruchu względem siebie,
2x3 – droga dwujezdniowa, z trzema pasami ruchu na każdej jezdni, które rozdzielone są torowiskiem lub pasem zieleni. Każda jezdni jest w jednym kierunku ruchu, ale o przeciwnym kierunku ruchu względem siebie.

Słownik podstawowych pojęć

Pieszy – osoba znajdująca się poza pojazdem na drodze i niewykonująca na niej robót lub czynności przewidzianych odrębnymi przepisami. Pieszymi są osoby przemieszczające się pieszo oraz prowadzące rower, motorower, motocykl, wózek dziecięcy, inwalidzki, na wózku inwalidzkim oraz osoby do 10 lat kierujące rowerem w towarzystwie dorosłego opiekuna [206].

Obszar miejski - obszar o silnym zurbanizowaniu, o dużym zagęszczeniu mieszkańców utrzymujących się w większości z zajęć nierolniczych.

Przejście dla pieszych – bezkolizyjne lub kolizyjne, oznaczone odpowiednimi znakami drogowymi lub kolizyjne sugerowane nieoznaczone.

Przejścia dla pieszych bezkolizyjne – podziemne lub nadziemne przejście dla pieszych przeznaczona do bezkolizyjnego przechodzenia przez pieszych na drugą stronę ulicy/drogi, drogi dla rowerów lub torowiska, .

Przejścia dla pieszych kolizyjne - wyznaczona w poziomie jezdni powierzchnia ulicy/drogi, drogi dla rowerów lub torowiska przeznaczona do przechodzenia przez pieszych na drugą stronę jezdni, która oznaczona jest odpowiednimi znakami drogowymi.

Przejścia sugerowane - urządzona w poziomie jezdni powierzchnia ulicy/drogi, drogi dla rowerów lub torowiska przeznaczona do przechodzenia przez pieszych na drugą stronę jezdni, która nie jest oznaczona znakami drogowymi.

Chodnik – jest to podstawowy rodzaj drogi służący do przemieszczania się pieszych.

Jezdnia – część drogi przeznaczoną do ruchu pojazdów jednak określenie to nie dotyczy torowisk wydzielonych z jezdni.

Zdarzenie drogowe - zdarzenie mające miejsce lub początek na drodze publicznej w wyniku ruchu jednego lub więcej pojazdów.

Wypadek drogowy - zdarzenie mające miejsce lub początek na drodze publicznej w wyniku ruchu jednego lub więcej pojazdów, które pociągnęło za sobą ofiary w ludziach, w tym także u sprawcy tego zdarzenia, bez względu na sposób zakończenia sprawy.

Kolizja drogowa - zdarzenie drogowe w wyniku, którego mają miejsce tylko straty materialne [190].

1. WPROWADZENIE

1.1. Charakterystyka problemu

Wiedza na temat przepływu pieszych oraz metod oceny warunków i komfortu przemieszczania się pieszych jest ważna przy planowaniu i projektowaniu geometrycznym oraz utrzymaniu obiektów infrastrukturalnych. Zrozumienie zachowań pieszych jest niezbędne przy planowaniu i projektowaniu m.in. lotniska, dworca transportu miejskiego, stadionu, centrum handlowego, ulicy. W ostatnich dziesięcioleciach problematyka badań ruchu pieszego stała się gorącym tematem. Naukowcy przeprowadzili wiele badań różnymi metodami, w tym empirycznymi, eksperymentami i symulacyjnymi. Badania empiryczne prowadzone na istniejących obiektach (chodniki, schody, przejścia dla pieszych itp.) umożliwiają określenie podstawowych parametrów ruchu pieszego i zachowań pieszych, jednakże nie dla wszystkich oczekiwanych zakresów i warunków otoczenia [246]. Dlatego uzupełnieniem badań empirycznych są badania laboratoryjne (eksperymentalne) lub symulacyjne. Badania eksperymentalne prowadzono głównie w obiektach zamkniętych symulując sztucznie szerokość korytarzy, zawężenia przekroju itp. badając zachowania pieszych i parametry charakteryzujące ruch pieszych [242]. Wyniki badań często służyły do opracowania modeli ruchu pieszego. Stosuje się dwa podejścia do modelowania ruchu pieszych: makroskopowe i mikroskopowe.

Podejście makro polega na traktowaniu potoku pieszych (tłumu) jako całości i stosuje się modele makroskopowe do opisu zachowań [97]. Korzystając z danych i obserwacji potoków pieszych opisywano ich ruch wykorzystując koncepcje traktujące potok pieszych jako płyn lub kontinuum [97]. Przy czym brano pod uwagę różne scenariusze: ruch jednokierunkowy, ruch dwukierunkowy [1], czy ruch krzyżowy. W wyniku takich badań budowano wykresy zależności pomiędzy podstawowymi parametrami tj. natężeniem – prędkością i gęstością podobnie jak w prawie fundamentalnym dla ruchu kołowego [246]. Jednym ze sposobów budowy modeli ruchu pieszego są modele regresyjne [22] uwzględniające statystycznie ustalone relacje między parametrami przepływu potoku pieszych i wykorzystywane do przewidywania ruchu pieszych w określonych warunkach. Modele regresyjne mają charakter raczej opisowy niż wyjaśniający i nie dostarczają nowych informacji na temat zachowań pieszych i wymagają dość dużych prób danych do ich budowy [147].

Podejście mikro polega na traktowaniu pieszych jako odrębnych jednostek i przeprowadzaniu ich przez analizowane urządzenia dla pieszych za pomocą w symulacji komputerowej i opisanii zachowań za pomocą modeli mikroskopowych. Korzystając z danych i obserwacji zachowań pojedynczych pieszych buduje się modeluje wykorzystujące różne podejścia: analogie do materiału ziarnistego, modelowanie obranej ścieżki przy założeniu, że piesi optymalizują swoje bezpośrednie lokalne zachowanie, lub przy założeniu, że piesi próbują poruszać się po wcześniej określonych, globalnie określonych ścieżkach, a także modele agentowe czy modele komórkowe [147].

Wyniki prowadzonych badań wykorzystano do opracowania metod szacowania przepustowości i oceny warunków ruchu pieszego. Jedną z najbardziej rozpowszechnionych jest amerykańska metoda HCM (Highway Capacity Manual), w której jedna część poświęcono zagadnieniom ruchu pieszego [30].

W Polsce problemy pieszych u użytkowników ruchu drogowego był traktowane drugoplanowo. Dopiero w ostatnich latach zaczęto dostrzegać ważność tego rodzaju transportu. Dopuszczenie parkowania samochodów na chodnikach w 1983 roku [112] i brak wyraźnego pierwszeństwa pieszych na przejściach dla pieszych spowodowało znaczne pogorszenie bezpieczeństwa i komfortu przemieszczania się pieszych po drogach i ulicach. Dopiero od 2021 roku zaczęto wprowadzać większe priorytety dla pieszych na wybranych elementach dróg i ulic (zwiększenie zakresu pierwszeństwa na przejściach dla pieszych, ograniczenie parkowania na chodnikach) [205]. Jednakże, wobec braku odpowiednich badań zachowań pieszych, metod szacowania przepustowości i warunków ruchu trudno jest przewidzieć skutki wprowadzanych zmian.

Nie prowadzono także szczegółowych badań zachowań pieszych i brakowało dobrych i wiarygodnych narzędzi do szacowania przepustowości, warunków ruchu pieszego i metod wyboru skutecznych i efektywnych urządzeń dla pieszych. Brakowało także wytycznych planowania i

projektowania urządzeń dla pieszych. Zmiany zaczęły następować po transformacji ustrojowej i wstąpieniu Polski do UE.

Pod koniec I dekady XXI wieku rozpoczęto badania ruchu pieszego w Polsce w ramach prac własnych lub projektów badawczych. Badania prowadziły zespoły naukowe:

1. Politechniki Warszawskiej dotyczące bezpieczeństwa ruchu pieszego na skrzyżowaniach i przejściach dla pieszych, metod badań zachowań pieszych [167], charakterystyk ruchu pieszego [165], [171];
2. Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie dotyczące zachowań pieszych i kierowców na przejściach dla pieszych [41];
3. Politechniki Krakowskiej dotyczące prędkości pojazdów obszarze przejść dla pieszych oraz wpływu zasad organizacji ruchu w obszarze przejść dla pieszych na przepustowość [24];
4. Politechniki Gdańskiej dotyczące bezpieczeństwa ruchu pieszego na skrzyżowaniach i przejściach dla pieszych, oceny funkcjonowania urządzeń dla pieszych [94], zachowań pieszych i kierowców na przejściach dla pieszych [133];

Pod koniec II dekady Ministerstwo Infrastruktury przystąpiło do zmiany standardów projektowania dróg i ulic ze względu na konieczność dostosowania zasad projektowania do wymogów Konwencji o Dostępności. Jednym z zagadnień ujętych w opracowywanych dokumentach są wytyczne planowania tras dla pieszych, projektowania dróg dla pieszych i projektowania przejść dla pieszych [214], [213], [213]. Konieczność przygotowania tych wytycznych spowodowało zapotrzebowanie na wyniki badań ruchu pieszego.

1.2. Geneza pracy

Pracując po zakończeniu studiów w biurze projektów oraz biorąc udział w projektach badawczych realizowanych w Katedrze Inżynierii Drogowej rozwijałam zainteresowania problematyką ruchu pieszego. Udział w zrealizowanych projektach badawczych i zdobyte doświadczenie, przyczyniło się do podjęcia tematów reprezentowanych w Rozprawie Doktorskiej.

W projekcie badawczym "Grant Łódzki", 2011-2012 [93] dotyczącym innowacyjnych środków i efektywnych metod poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju, zajmowałam się problematyką bezpieczeństwa ruchu pieszych na skrzyżowaniach ulic.

W projektach badawczych realizowanych na zlecenie Krajowej Rady BRD w latach 2013 i 2015 [133], [16] zajmowałam się opracowaniem metodologii systematycznych badań zachowań pieszych i relacji pieszy – kierowca oraz problematyką badań zachowań pieszych.

W ramach międzynarodowego projektu badawczego CIVITAS DYN@MO realizowanego w latach 2014-2016 [94] zajmowałam się oceną warunków ruchu na urządzeniach dla pieszych (chodniki, przejścia dla pieszych) a w projekcie FLOW realizowanym w latach 2015-2018 [95] modelowaniem ruchu pieszego.

W projekcie realizowanym w ramach Programu Operacyjnego Pomoc Techniczna w latach 2014-2020, dotyczącym między innymi opracowaniem wytycznych projektowania infrastruktury dla pieszych [66][68] zajmowałam się problematyką dotyczącą szacowania przepustowości i oceny warunków ruchu na wybranych urządzeniach dla pieszych.

Udział w wymienionych projektach badawczych pozwolił mi na ukierunkowanie badań i rozwinięcie ich w przygotowanej rozprawie doktorskiej.

1.3. Cel główny i zakres pracy

Doświadczenie pozyskane w realizacji projektów pozwoliło na zidentyfikowanie głównego celu Rozprawy Doktorskiej, jakim jest identyfikacja i badanie wpływu wybranych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych, ze szczególnym uwzględnieniem przepustowości przejść dla pieszych i warunków ruchu na przejściach dla pieszych. Cel ten, został zrealizowany m.in. poprzez realizację następujących badań i analiz:

- przegląd literatury polskiej i zagranicznej w zakresie charakterystyk ruchu pieszego i kołowego w obszarze przejść dla pieszych w miastach oraz identyfikacja czynników wpływających na funkcjonowanie przejść dla pieszych w miastach;
- wykonanie badań ankietowych i terenowych na zbiorze przejść dla pieszych wybranych miastach oraz na zwodzonej kładce dla pieszych wraz z budową bazy danych, analizą wyników oraz opracowanie modeli matematycznych wybranych parametrów ruchu na podstawie badań terenowych;
- opracowanie modeli symulacyjnych wybranych wraz z ich kalibracją, przeprowadzeniem badań numerycznych, wraz z budową bazy danych numerycznych i analizą ich wyników,
- opracowanie modeli matematycznych fundamentalnej zależności pomiędzy natężeniem, prędkością i gęstością potoku pieszych oraz modeli matematycznych wpływu wybranych czynników na zmiany parametrów ruchu pieszego; korzystając z wyników badań terenowych i symulacyjnych.

Rozprawa Doktorska składa się z 11 rozdziałów:

- rozdział 2 – stanowi przegląd literatury polskiej i zagranicznej w zakresie problematyki przedstawionej w Rozprawie Doktorskiej. Przedstawiono charakterystyki ruchu w obszarze przejść dla pieszych, modele opisujące ruch pieszych wraz z głównymi problemami i środkami umożliwiającymi i usprawniającymi ruch pieszy. Przedstawiono także metody oceny funkcjonowania przejść dla pieszych i sposób doboru urządzeń i działań w obszarze przejść dla pieszych.
- rozdział 3 – zaprezentowano cele i zakres pracy badawczej. Cele zostały sformułowane z podziałem na główne, naukowe i praktyczne
- rozdział 4 – przedstawiono badania zachowań użytkowników dróg oraz badania ankietowe wśród grupy ekspertów. W rozdziale przedstawiono wyniki ankiety przeprowadzonej z pieszymi użytkownikami dróg dot. środków uspokojenia ruchu, wyniki ankiety przeprowadzonej z kierowcami dot. zachowań wobec pieszych i wpływu czynników które mają bardzo duży wpływ na funkcjonowanie przejść dla pieszych.
- rozdział 5 - przedstawiono badania terenowe ruchu pieszego i kołowego na wybranych przejściach dla pieszych w miastach, na kładce dla pieszych w Gdańsku. W rozdziale przedstawiono m.in. wyniki badań prędkości pieszych na przejściach., prędkości pojazdów na odcinku dojazdowym do przejścia.
- rozdział 6 – przedstawiono wyniki badań na podstawie modeli symulacyjnych wybranych przejść dla pieszych z wykorzystaniem wyników z badań terenowych. W rozdziale zaprezentowano opis narzędzi do symulacji ruchu pieszego oraz wyniki badań strat czasu pieszych i pojazdów oraz zależności podstawowych parametrów ruchu pieszego.
- rozdział 7 – zaprezentowano model zależności fundamentalnej pieszych z wykorzystaniem wyników z badań terenowych i modeli mikrosymulacyjnych. W rozdziale zaprezentowano zależność fundamentalną QP-VP-DP w potoku pieszych przemieszczających się w jednym kierunku oraz w dwóch kierunkach.
- rozdział 8 – przedstawiono badania wpływu wybranych czynników na sprawność oraz warunki ruchu pieszych i pojazdów na wybranych przejściach dla pieszych
- rozdział 9 – przedstawiono koncepcję metody oceny funkcjonowania przejścia dla pieszych
- rozdział 10 – stanowi podsumowanie pracy, zawiera wnioski, rekomendacje i kierunki dalszych badań
- rozdział 11 – wykaz literatury

2. STAN ZAGADNIENIA

2.1. Wprowadzenie

2.1.1. Wstęp

Pierwszym etapem prac zmierzających do realizacji postawionego na wstępie celu pracy doktorskiej był przegląd literatury przedmiotu, stanowiącej bazę wiedzy do realizacji rozprawy oraz identyfikację podstawowych problemów i luk w rozwiązaniach umożliwiających uszczegółowienie celów i zakresu pracy, a w szczególności zwrócenie uwagi na następujące zagadnienia:

- charakterystyka podróży pieszych (rozdział 2.1.1),
- charakterystyka ruchu pieszych w obszarze przejść dla pieszych (rozdział 2.2), w którym scharakteryzowano ruch pojedynczego pieszego oraz potoku pieszych;
- modele opisujące ruch potoku pieszych (rozdział 2.3), gdzie przedstawiono parametry potoku pieszych, przegląd modeli opisujących ruch potoku pieszych, zależność fundamentalną e w teorii ruchu potoku pieszych oraz uwzględnienie struktury kierunkowej w modelowaniu ruchu potoków pieszych;
- główne problemy w ruchu pieszych i sposoby ich rozwiązywania (rozdział 2.4), gdzie przedstawiono utrudnienia i sposób ich rozwiązywania w ruchu pieszym;
- ocenę funkcjonowania przejść dla pieszych (rozdział 2.5), w którym zaprezentowano metody oceny funkcjonowania przejść dla pieszych, ocenę sprawności i ocenę warunków ruchu na przejść dla pieszych;
- środki umożliwiające i usprawniające pieszym przekraczanie drogi (rozdział 2.6), gdzie przedstawiono podział środków uspokojenia ruchu oraz przedstawiono rodzaj przejść dla pieszych;
- przedstawiono przykłady sposobu doboru urządzeń i działań w obszarze przejść dla pieszych;
- wybrane projekty badawcze dotyczące ruchu pieszych (rozdział 2.7);
- wnioski i rekomendacje (rozdział 2.9);

2.1.2. Podróże piesze

Przemieszczanie się pieszo stanowi najstarszą metodę transportu, często niedocenianą, m.in. jest to transport ekologiczny, poprawiający stan zdrowia jego użytkowników, tani, potrzebujący mniej przestrzeni niż ruch kołowy, o czym pisali m.in. Appleyard, Clifton z zespołem, Kuzia, Litman, Moudon [18],[19],[137],[141],[153].

Ponad 50 % ludności świata mieszka w miastach, które ciągle się rozwijają i w wyniku prowadzonej działalności wytwarzają obecnie ok. 80% Produktu Krajowego Brutto. Szybki rozwój miast zwiększył liczbę pasażerów i ładunków przemieszczających się na obszarach miejskich, ale najwięcej podróży i najbardziej złożone warunki podróżowania związane są z obszarami centralnymi miast powodując wiele problemów demograficznych, społecznych, środowiskowych, gospodarczych, technologicznych i transportowych (mobilność, sprawność, niezawodność, bezpieczeństwo) [151]. Zaspokajanie potrzeb osób poruszających się po obszarze miasta, codziennie dojeżdżających do pracy, szkoły lub uczelni, turystów i innych przyjezdnych, wymaga wysokiej jakości, odpowiednio zorganizowanej i ukształtowanej przestrzeni oraz odpowiednio ukształtowanego systemu transportu zapewniającego sprawne, komfortowe i bezpieczne przemieszczanie się mieszkańców i osób przyjezdnych.

Poszukuje się, zatem zintegrowanego systemu transportu w miastach zbudowanego na trzech zasadniczych podsystemach transportu zbiorowego, transportu drogowego i transportu alternatywnego (pieszego, rowerowego, osobistego). Udział podróży pieszych (o długości powyżej 0,2 km) w miastach różni się dość znacznie i wynosi od 3 % w Dallas do 35 % w Madrycie, aż do 88% w centrum Tokio [191]. W polskich miastach udział podróży pieszych wynosi ok. 20 – 25 % ogółu podróży, ponadto przemieszczanie pieszo stanowi element łańcucha podróży multimodalnych, w szczególności w obszarze ostatniej mili [114], [18].

Wiele krótkich podróży w obszarach miejskich można z łatwością pokonywać pieszo lub na rowerze. Nawet użytkownicy transportu publicznego i prywatnego transportu zmotoryzowanego często

muszą pokonać pieszo ostatnią milę. Dobra infrastruktura piesza i rowerowa zwiększa także atrakcyjność transportu publicznego. Urządzenia dla pieszych i rowerzystów zapewniają niedrogie podróże wszystkim grupom społecznym w celu dotarcia do pracy, edukacji, rekreacji i innych codziennych zajęć. Zapewniają także odporność w trudnych czasach, takich jak kryzys naftowy, wybuch pandemii i klęski żywiołowe.

Niechronieni uczestnicy ruchu są najbardziej narażeni na obrażenia i ofiary śmiertelne w wyniku wypadków drogowych w miastach. Brak bezpiecznej i wygodnej infrastruktury dla pieszych zniechęca do chodzenia i skutkuje zwiększoną zależnością od osobistych pojazdów silnikowych, szczególnie w przypadku krótkich podróży. Zwiększone wykorzystanie prywatnych pojazdów silnikowych powoduje zatory i zanieczyszczenie powietrza w miastach. Ma to negatywny wpływ na zdrowie, środowisko i gospodarkę. Natomiast dobrze wybrane i zaprojektowane urządzenia dla pieszych, które są bezpieczne, wygodne, ciągłe i przyjemne, przyciągają pieszych. Urządzenia i obiekty transportowe (ulice, węzły przesiadkowe, place miejskie) powinny zapewniać dostępność i płynny ruch wszystkim, w tym użytkownikom niechronionym, takim jak piesi, osoby niepełnosprawne, opiekunowie z wózkami dziecięcymi, dzieci i osoby starsze.

Do lat 50 XX w. głównym założeniem w planowaniu przestrzeni było takie kształtowanie miasta, aby to ruch pieszy i rowerowy stanowiły priorytet. Niestety od roku 1950, w imię postępu i uwzględniając priorytet dla indywidualnego transportu samochodowego, przebudowano wiele miast i ich obszarów centralnych. Powstały wówczas wielopasmowe ulice przecinające zabytkowe dzielnice, bezkolizyjne skrzyżowania czy podziemne lub nadziemne przejścia dla pieszych. Planując przestrzeń miejską kierowano się przede wszystkim oddzieleniem różnych funkcji miejskich, czego rezultatem stały się martwe w ciągu dnia osiedla – sypialnie i puste w nocy obszary usługowe i przemysłowe. Działania te zdecydowanie utrudniły ruch pieszy i rowerowy, który musiał zostać podporządkowany uprzywilejowanemu ruchowi drogowemu [151].

Przyjęcie idei nowego urbanizmu (początek XXI wieku) i uzupełnienie Celów Globalnych Zrównoważonego Rozwoju (SDG) znacznie poprawiło sytuację pieszych uczestników ruchu w miastach [122]. W 2015 roku wszystkie państwa członkowskie Organizacji Narodów Zjednoczonych zaakceptowały między innymi cele dotyczące konieczności zapewnienia bezpieczeństwa (cel 3.6) i dostępu do bezpiecznych, niedrogich, przystępnych i zrównoważonych systemów transportu, ze szczególnym uwzględnieniem potrzeb osób znajdujących się w trudnej sytuacji, kobiet, dzieci, osób niepełnosprawnych i osób starszych (cel 11.2) do roku 2030 [122]. Kilka modeli miast wpisuje się w proponowane koncepcję budowania miast przyszłości uwzględniające zasady Nowego Urbanizmu i realizacji Głównych Celów Zrównoważonego Rozwoju, są to modele: miasta zwarte (kompaktowego), miasta oszczędne, miasta techniczne, miasta krótkich odległości czy też miasta 15 – minutowego [180], [16].

Idea nowego urbanizmu zakłada poprawę tej sytuacji niechronionych użytkowników, ograniczenie przestrzeni dostępnej samochodom i oddanie jej do użytku pieszym i rowerzystom między innymi poprzez:

- planowanie urbanistyczne zorientowane na pieszych, pomagające uczynić miasto przyjaznym dla pieszych,
- projektowanie kompleksowych (zdrowych) ulic.

Zaproponowane działania umożliwią przywracanie znowu priorytetu dla ruchu pieszego, wnosząc go na górę piramidy priorytetów transportowych. Projektowanie kompleksowych (zdrowych) ulic rozprzestrzenia się i doczekało się już wielu wytycznych, podręczników i przykładów dobrej praktyki [160],[77],[75]. Kompleksowe ulice umożliwiają przemieszczają ludzi skutecznie i bezpiecznie oraz pomagają zmniejszyć zatory, promując ruch pieszy, rowerowy i transport publiczny [102]. Poprawia się też to, jakość środowiska oraz zwiększa się dostęp mieszkańcom do przebywania, siedzenia i spotkań towarzyskich na ulicy. Zaleca się, aby jezdnia, droga dojazdowa i parking łącznie nie zajmowały więcej niż 50% całkowitej szerokości pasa drogowego, tak, aby zapewnić przestrzeń dla ruchu pieszego, rowerowego i innych elementów ulicy.

Wiedza na temat przepływu pieszych oraz metod oceny warunków i komfortu przemieszczania się pieszych jest ważna przy planowaniu i projektowaniu geometrycznym oraz utrzymaniu obiektów

infrastrukturalnych. Zrozumienie zachowań pieszych jest niezbędne przy planowaniu i projektowaniu m.in. lotniska, dworca transportu miejskiego, stadionu, centrum handlowego, ulicy. Badania zachowań pieszych rozpoczęły się w latach sześćdziesiątych, kiedy badano przepływ pieszych w obszarach miejskich. Głównym celem tych wczesnych badań było opracowanie wytycznych dotyczących optymalnego projektowania infrastruktury dla pieszych (chodników, przejść dla pieszych). W międzyczasie badacze rozważyli różne aspekty przepływu pieszych. Przepływ dużych rzesz pieszych będzie prawdopodobnie zyskiwał na znaczeniu wraz ze wzrostem populacji naszych dużych miast. Jednakże wiedza na temat przepływu potoków pieszych jest niewystarczająca i ustępuje wiedzy na temat innych rodzajów transportu. Zainteresowanie modelowaniem przepływu potoków pieszych obejmuje systemy transportowe, wydarzenia sportowe, miejsca kultu, demonstracje polityczne, urządzenia ewakuacyjne, które różnią się rodzajem obiektu, charakterystyką i zachowaniami uczestników, ale mają także wspólne cechy, gdyż dotyczą pieszego [147],[97].

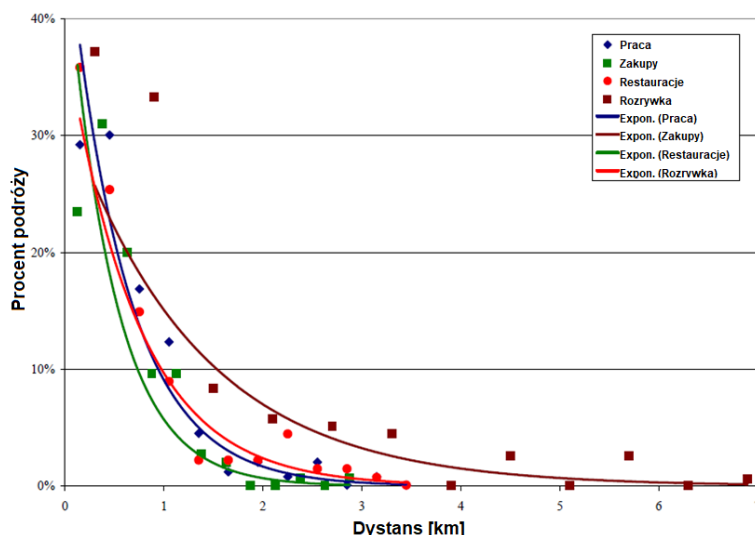
Na podstawie badań zachowań transportowych realizowanych stwierdzono, że w Polsce podróże piesze w niektórych miastach osiągają 20-25% ogółu wszystkich podróży w mieście [99],[170],[234]. W miastach europejskich, takich jak Lyon (Francja), Oslo (Norwegia), Helsinki (Finlandia), Walencja (Hiszpania) udział transportu pieszego jest większy niż 30% [55]. Kompleksowe Badania Ruchu [228] przeprowadzone w Gdańsku w 2016 roku, wykazały że podróże piesze stanowiły około 21% w strukturze zadań przewozowych. Podróże piesze odgrywają bardzo ważną rolę w życiu codziennym różnych grup społecznych. Ich liczba oraz długość podróży zależą m.in. od predyspozycji psychofizycznych człowieka, motywacji podróży, ukształtowania terenu i zamożności społeczeństwa. Cele podróży pieszych są zróżnicowane w zależności od lokalizacji tj.: obszar typowo miejski – duże i średnie miasta,

- obszar zabudowany – miejscowości i małe miasta,
- obszar zamiejski – tereny wiejskie.

Na terenie typowo miejskim do głównych celów zalicza się: dojście do szkoły, miejsca pracy, realizację spraw służbowych, wykonanie zakupów, w celach turystycznych, w celach religijnych, rozrywka, dojście do transportu zbiorowego, dojście do parkingu itp.

W obszarze mniejszych miast i miejscowości, podróże odbywają się na dłuższych dystansach aniżeli w obszarze typowo miejskim, niejednokrotnie przy niesprzyjających warunkach pogodowych, często po zmroku. Do głównych celów w tych obszarach możemy zaliczyć: dojście do szkoły, miejsca pracy, wykonanie zakupów, podróż w celach religijnych, dojście do transportu zbiorowego itp. Podobnie przedstawia się sytuacja na terenach niezabudowanych, przy czym pokonywane odległości mogą być jeszcze większe, a zagrożenia w ruchu pieszych związane są przede wszystkim z dużymi brakami w infrastrukturze, oraz niebezpiecznymi zachowaniami pieszych i kierujących [134],[17]. W latach siedemdziesiątych XX wieku, pojawiły się pierwsze, bardziej obszerne badania w zakresie ruchu pieszego poruszające kwestię celu i zasięgu podróży pieszych przedstawione przez Fruina oraz Pushkareva i Zupana [182],[121].

Badania wykonane w Wielkiej Brytanii wykazały, iż podróże piesze do 5 km stanowią do 45 % spośród wszystkich podróży pieszych. Natomiast średnia długość podróży pieszych waha się od 1 km w Wielkiej Brytanii do 2,8 km w Finlandii [202]. Badania podróży w Gdańsku z 2009 roku wykazały, że około 75 % wszystkich podróży odbywa się na dystansie do 2 km [23]. Należy zwrócić uwagę na fakt, iż definicja podróży piesza w niektórych krajach jest ustalona w różny sposób, co utrudnia porównanie wyników. Przykładowo w Danii w klasyfikacji do 1 km, ujmowane są wszystkie podróże piesze w zakresie od 300 do 1500 m, natomiast w Anglii również te poniżej 300m [202]. Na rys 2.1 przedstawiono zasięg podróży pieszych w zależności od ich charakteru, opracowane na podstawie [100], [166].



Rys. 2.1 Zasięg podróży pieszych w zależności od ich charakteru, opracowane na podstawie [100]

2.2. Charakterystyka ruchu w obszarze przejść dla pieszych

2.2.1. Ruch pieszy

Ruch pieszy odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu miejskich systemów transportowych. Piesi wykazują różne zachowania w zależności od sytuacji, w której się znaleźli oraz od tego czy przemieszczają się pojedynczo, czy w grupie. Charakteryzując ruch w obszarze przejść dla pieszych należy rozpatrywać ruch pojedynczego pieszego oraz potoku ruchu pieszych, które uwzględniają interakcję pomiędzy uczestnikami potoku. Warto także rozpatrywać stan bezpieczeństwa ruchu drogowego z uwzględnieniem pieszych użytkowników drogi, a także wymagania pieszych odnośnie organizacji ruchu.

2.2.1.1. Ruch pojedynczego pieszego

Ruch pieszy charakteryzujemy, jako laminarny lub turbulentny. Laminarny to ten, który jest płynny, niezakłócony, a pieszy porusza się swobodnie. Występuje tam gdzie pieszy nie jest ograniczony przez innych pieszych, pojazdy czy przeszkody. Turbulentny występuje, gdy jest zakłócony, gdy pieszy porusza się w tłumie, napotyka przeszkody architektoniczne lub pojazdy. W 1985 roku został opisany ruch laminarny w odniesieniu do pieszego, przez Gipps'a i Marksjo [72] w następujący sposób: pieszy porusza się po najkrótszej możliwej drodze od źródła do celu, unika kolizji z przeszkodami i zachowuje od nich dystans, ale ma tendencję do ruchu w pobliżu bocznego ograniczenia, w ruchu pieszy unika gwałtownych zmian kierunku.

Na ruch laminarny i turbulentny mają wpływ cechy fizyczne pieszego (wymiar pieszego, sprawność fizyczna), parametry ruchu (prędkość ruchu pieszego, przyspieszenie), cechy psychofizyczne pieszego (wzrok, zmysł słuchu, czas reakcji, niepełnosprawność, wiek).

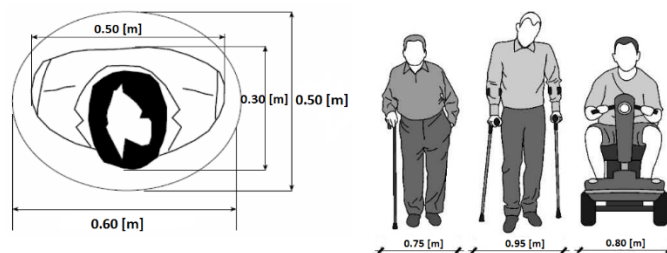
Na podstawie badań przeprowadzonych w latach '70 XX wieku przez Fruina [65] określono reprezentatywne cechy fizyczne człowieka. Przyjęto, że obszar zajmowany przez pieszego przyjmuje kształt elipsy o wymiarze 0.50m na 0.60m (0.24m²), a typowy zarys samego pieszego różni się w zależności od płci (tab.2.1).

Tab.2.1 Zestawienie wymiarów pieszego

Autor	Kraj	Mężczyzna		Kobieta	
		Grubość	Szerokość	Grubość	Szerokość
Fruin [65]	USA	0,30	0,50	-	-
Buchmueller [21]	Wielka Brytania	0,325	0,510	0,305	0,435
	Japonia	0,285	0,410	0,235	0,425

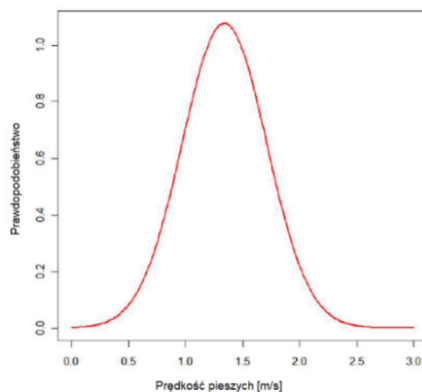
Wymiar wydaje się nie różnić znacząco, jednak może mieć wpływ na porównywalność przedstawianych wyników w pracach dotyczących grupy pieszych np. gęstości pieszych. Dla pieszych

z niepełnosprawnością fizyczną przyjmowane są inne wymiary w zależności, czy porusza się o kulach czy na wózku inwalidzkim. Przykładowe wymiary pieszych przedstawiono na rys. 2.2.



Rys. 2.2 Wymiary pieszych w zależności od sposobu przemieszczania się, opracowano na podstawie [65], [239].

Cechy fizyczne to także, sprawność fizyczna, która wpływa na sposób poruszania się pieszego i warunkuje prędkość przemieszczania się pieszego. Prędkość, jest jedną z najważniejszych cech związanych z ruchem pieszego. Jest istotną zmienną przy projektowaniu parametrów sygnalizacji świetlnej oraz urządzeń dla pieszych. Na prędkość pieszego wpływa wiele czynników. Jak przedstawili Witkowski, Fruin, Buchmueller i Weidmann [20], [121], [235], [21], do najbardziej istotnych kwalifikuje się: wiek, stan zdrowia, predyspozycje fizyczne, motywacja przemieszczania się, charakter podróży, dystans, który musi pokonać pieszy oraz czynniki atmosferyczne warunki drogowe i ruchowe. Znaczący wpływ na prędkość pieszego ma także ukształtowanie terenu. Na podstawie badań przeprowadzonych na próbie 967 pieszych w New York City [23] przemieszczających się w ruchu swobodnym zaobserwowano, iż 78% badanych porusza się z prędkością mniejszą niż 1,4 [m/s]. Mediana prędkości wynosi 1,2 [m/s], natomiast mężczyźni w wieku starszym poruszali się z prędkością 1,1 [m/s] i stanowili 25 percentyl rozkładu dystrybuanty. Według Federal Highway Administration of United States (HCM 2000) jeżeli osoby starsze w badanej populacji stanowią nie więcej aniżeli 20% średnia prędkość wynosi 1,2 [m/s], gdy więcej niż 20% wówczas 1.0 [m/s]. W ruchu swobodnym na chodnikach piesi przemieszczają się ze średnią prędkością 1,5 [m/s]. Na rys.2.3 przedstawiono przykład rozkładu prędkości pieszych.



Rys. 2.3 Rozkład normalny prędkości pieszych według Buchmueller i Weidmann, opracowane na podstawie [199]

Kolejną istotną cechą związaną z ruchem pieszego jest przyspieszenie, które, jak podają Zębala, Cięпка i Reza, charakteryzuje się nie liniowym wzrostem prędkości w czasie [244]. Największy wzrost jest na początku, kiedy pieszy rozpoczyna przemieszczanie się.

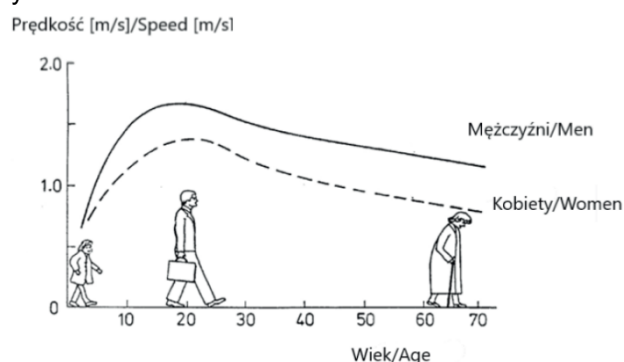
Na przyspieszenie wpływają cechy fizyczne i psychofizyczne pieszego. Olson [164] podaje, że do najważniejszych cech psychofizycznych należy wzrok pieszego. Wpływa on na sprawność sensomotoryczną, a ta na sposób poruszania się człowieka w otaczającej go przestrzeni. Wzrok pozwala rozpoznawać otoczenie, potencjalne zagrożenia, oceniać sytuację, dystans względem przeszkód i innych osób. Do najważniejszych cech prawidłowo funkcjonującego narządu wzroku, można uznać [69] [209] rozpoznawanie kształtów, rozróżnianie barw, spostrzeganie ruchu, ocenę położenia przedmiotów w przestrzeni, przystosowanie źrenic do zmiennych warunków oświetlenia zewnętrznego, zakres pola widzenia, ostrość wzroku, widzenie stereoskopowe, koordynację wzrokowo ruchową, szybki refleks, spostrzegawczość. Kolejną ważną cechą psychofizyczną jest zmysł słuchu, który ma istotny

wpływ na postrzeganie przestrzeni szczególnie przez osoby z upośledzonym narządem wzroku. Umożliwia lokalizowanie źródła dźwięku oraz jego pochodzenia. Kolejną ważną cechą jest czas reakcji pieszego, który definiowany jest, jako czas, który potrzebny jest, aby zareagować na daną sytuację.

Czas reakcji jest uzależniony od sytuacji, na którą ma zareagować człowiek oraz od liczby wariantów możliwego działania, co przedstawia Bąk [9]. Proces reakcji można podzielić na trzy etapy: czas dostrzeżenia przeszkody/potencjalnego zagrożenia, czas rozpoznania i identyfikacji zagrożenia, czas działania.

Istotna jest także niepełnosprawność pieszego, która warunkuje parametry ruchowe pieszego. Rozróżniamy niepełnosprawność ruchową (m.in., gdy pieszy porusza się o kulach, na wózku inwalidzkim) intelektualną (m.in. pieszy, który posiada trudności w analizie otoczenia i przestrzeni) oraz sensoryczną (m.in. osoby niewidome i słabo widzące poruszające się z białą laską).

Ważny jest także, wiek pieszego, który powiązany jest ze sprawnością fizyczną, zdolnością percepcji i czasem reakcji. Wiek pieszego wpływa na parametry związane z ruchem pieszego, w szczególności prędkością, rys. 2.4.



Rys. 2.4 Prędkość pieszych w zależności od wieku [168].

Na prędkość pieszego mają wpływ warunki środowiskowe, takie czynniki jak temperatura, pogoda lub pora dnia. Na podstawie przeprowadzonych badań przez Choi z zespołem [129], w zakresie temperatur od -10 do $+25$ stopni Celsjusza stwierdzono, że piesi osiągają wyższą prędkość przy temperaturach ujemnych, powyżej $1,5$ [m/s], a niższą $1,25$ [m/s] przy temperaturach wyższych.

Ważne są także warunki związane z ukształtowaniem terenu, które stanowią utrudnienie w przemieszczaniu w szczególności dla osób z niepełnosprawnością ruchową. Określono, że na ruch pod górę powodują o 12% większe zużycie energii do pokonania określonego dystansu, w odniesieniu do przemieszczania się po terenie płaskim. Jeżeli ruch odbywa się w dół, zużycie energii jest mniejsze do 25% [129].

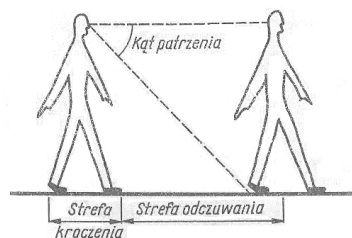
2.2.1.2. Ruch potoku pieszego

Potok pieszego definiowany, jako zbiór pojedynczych pieszego tworzących grupę. Rozpatrując grupę pieszego należy uwzględnić oddziaływanie między nimi, ponieważ inaczej kształtują się parametry ruchu niż przy analizie pojedynczego pieszego przemieszczającego się swobodnie. Ruch grupy pieszego jest złożony, występują w nim zakłócenia i nazywamy go turbulentnym.

Na parametry ruchu grupy pieszego mają wpływ indywidualne cechy jednostki (opisane w punkcie 2.2.1.1):

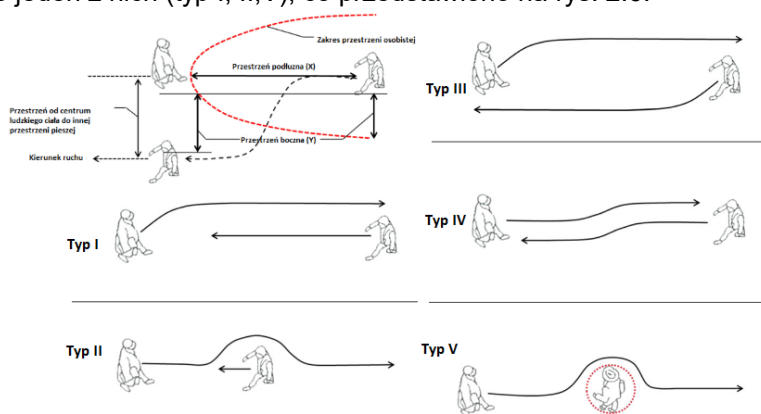
- fizyczne,
- parametry ruchu pieszego,
- psychofizyczne.

Oprócz indywidualnych cech jednostki, w analizach należy uwzględnić oddziaływania między pieszymi (rys. 2.5). Istotnym elementem jest przestrzeń wokół idącego człowieka i zachowany dystans względem innych.



Rys. 2.5 Przestrzeń wokół idącego człowieka

Przestrzeń pieszych ma wpływ na trajektorię poruszania się pieszych. Choi wraz zespołem [129], wyodrębnił kilka typów trajektorii ruchu pieszych, gdy oboje pieszych wykonuje manewr uniku (typ III, IV) lub tylko jeden z nich (typ I, II, V), co przedstawiono na rys. 2.6.

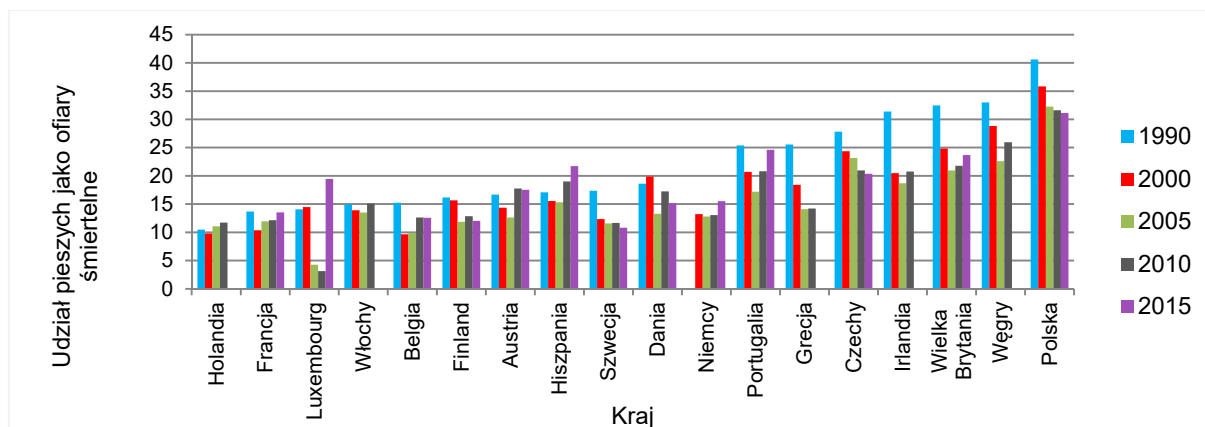


Rys. 2.6 Kategorie uników wśród pieszych, opracowano na podstawie [129]

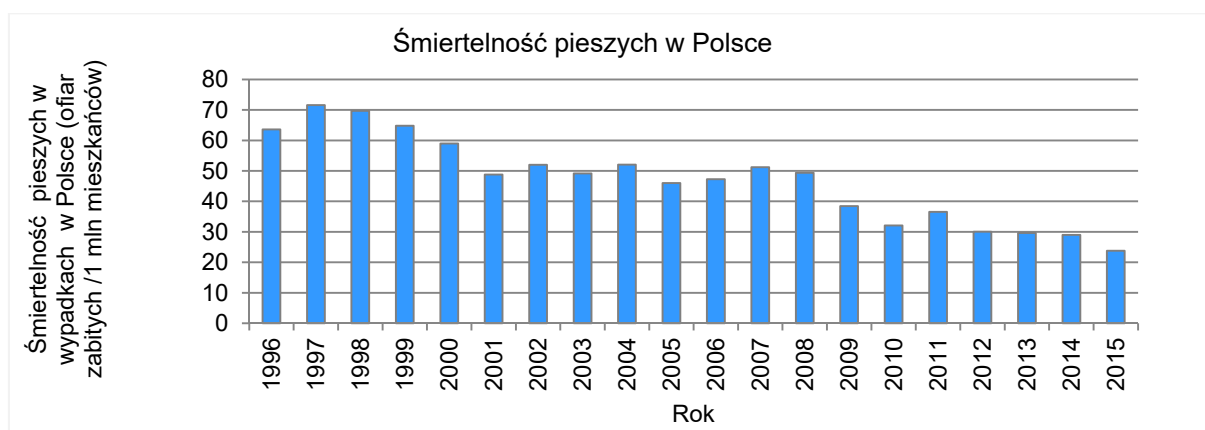
Na parametry ruchu potoku pieszych mają także wpływ ograniczenia związane z ukształtowaniem terenu, architektoniczne lub psychofizyczne w sytuacji paniki i zagrożenia. Inaczej będą kształtowały się parametry ruchu pieszych mierzone w tunelu czy na schodach niż te w otwartej przestrzeni nieograniczonej przeszkodami architektonicznymi (rozdział 2.3.4). Ta wiedza ma znaczenie dla projektanta lub zarządcy drogi przy wymiarowaniu urządzeń dla pieszych m.in. szerokości przejścia dla pieszych, tunelu, liczby schodów dla przejść w drugim poziomie jezdni, nachyleniu chodników. Na ruch pieszy, mają wpływ cechy fizyczne i psychofizyczne opisane w rozdziale 2.3.1. Wyróżniamy następujące parametry ruchu potoku pieszych: prędkość potoku ruchu, natężenie ruchu pieszych, gęstość pieszych.

2.2.1.3. Stan bezpieczeństwa pieszych w ruchu drogowym

Rozpatrując dane krajowe dotyczące bezpieczeństwa pieszych uczestników ruchu drogowego, w Polsce obserwuje się, bardzo wysoki udział pieszych, jako ofiar śmiertelnych w ruchu drogowym. W roku 2015 udział pieszych, jako ofiary śmiertelne przekroczył 30%, co przedstawiono na rys. 2.7 [112], [161]. Pomimo znacznej różnicy między latami '90 XX wieku, gdzie śmiertelność pieszych w wypadkach w Polsce w przeliczeniu na 1 mln mieszkańców wynosiła około 70 osób, a tymi po roku 2010 na poziomie 30 osób, (rys. 2.8). Wciąż liczba ta jest bardzo wysoka i utwierdza w przekonaniu, że konieczne jest poszukiwanie przyczyn i czynników wpływających na ten stan.



Rys. 2.7 Udział pieszych, jako ofiary śmiertelne w krajach Unii Europejskiej



Rys. 2.8 Śmiertelność pieszych w wypadkach w Polsce

Podsumowując, udział pieszych w wypadkach drogowych stawia Polskę w niechlubnej czołówce na tle innych krajów europejskich. Konieczne jest zidentyfikowanie i naprawa problemów wpływających na ten stan, m.in. poprawa widoczności pieszego po zmroku, weryfikacja poprawności zastosowanych rozwiązań umożliwiających przekraczanie drogi przez pieszego, stosowanie ograniczeń prędkości dla pojazdów. Za wzór działań do naśladowania w tym obszarze, można stawiać kraje skandynawskie, które w latach XX wieku zaczęły wdrażać działania poprawiające bezpieczeństwo ruchu drogowego skierowane na pieszych uczestników ruchu.

2.2.1.4. Wymagania pieszych odnośnie organizacji ruchu

Najbardziej pożądaną sytuacją dla pieszego jest, aby jego podróż była bezpieczna, sprawna i komfortowa. W praktyce nie każdy z tych warunków jest spełniony. Zaobserwowano szereg błędów i usterek w infrastrukturze dla ruchu pieszego [176],[57],[61] w zakresie planistycznym, niewłaściwego wykonania, zaprojektowania lub eksploatacji:

- brak ciągów pieszych – niewystarczająca liczba chodników wzdłuż dróg, brak ciągłości chodników,
- wąskie chodniki – brak możliwości swobodnego poruszania się, wymijania pieszych,
- zły stan nawierzchni chodników - nawierzchnia z ubytkami, nierówna, pokryta piaskiem, gruzem z wrośniętymi kępami roślin,
- przeszkody na szlakach pieszych – na szlakach pieszych znajdują się przeszkody np. zaparkowane pojazdy, wiaty, stojaki dla rowerów, reklamy, pojemniki na śmieci itp.,
- skomplikowane skrzyżowania – duże, rozległe skrzyżowania znacznie wydłużają i komplikują drogę pieszego, długie przejścia dla pieszych, brak wysp azylu, bariery w przemieszczaniu się z powodu braku obniżonych krawężników itp.,
- nieprawidłowe oświetlenie urządzeń dla pieszych – pieszy jest niedostatecznie oświetlony, przez co słabo widoczny dla osób kierujących pojazdy [220],

- nieprawidłowa organizacja ruchu pieszego – brak wystarczającej liczby znaków drogowych w obszarze objętym pracami budowlanymi, która mają na celu pomóc pieszym odnaleźć cel podróży, itp.,
- konflikty z rowerzystami – rowerzyści, którzy poruszają się po chodniku lub ciągach pieszo-rowerowych przyczyniają się do konfliktów z pieszymi [203],[131],
- brak obszaru separacji pomiędzy krawędzią jezdni i chodnika, co w szczególności przy drogach o większym natężeniu pojazdów powoduje brak komfortu wśród pieszych poruszających się po chodniku,
- nieefektywne połączenia ciągów pieszych - pieszy musi nadłożyć drogi, aby okrężną drogą dojść do celu, mała dostępność skrzyżowań.

W otoczeniu przystanków i węzłów transportu zbiorowego do najczęstszych błędów i usterek związanych z urządzeniami dla ruchu pieszego, można zaliczyć [211],[158],[156]:

- przejścia dla pieszych zlokalizowane przed zatoką autobusową – autobus, który znajduje się w zatoce zasłania pieszego, którzy przechodzą na drugą stronę drogi,
- brak chodników – brak chodników doprowadzających ruch pieszy do przystanków,
- słaba dostępność – przystanki autobusowe często znajdują się w miejscach trudno dostępnych dla pieszych,
- ograniczenie przejścia – wiaty przystankowe, miejsca siedzące, bariery wygradzające zlokalizowane na chodniku,
- miejsca dla oczekujących na autobus zbyt blisko krawędzi jezdni – niewłaściwe usytuowanie np. wiat przystankowych zawęża przestrzeń do przemieszczania się pieszych,
- niedostateczne oświetlenie obszaru przystanków i przejść dla pieszych,
- niebezpieczne skrzyżowania w pobliżu przystanków – brak lub niedogodne przejścia dla pieszych.

2.2.2. Ruch pojazdów w obszarze przejścia dla pieszych

Zagadnienia związane z ruchem kołowym powiązane są ruchem pieszych w szczególności na przejściach dla pieszych gdzie dochodzi do interakcji między użytkownikami drogi. Taka interakcja wpływa na efektywność i bezpieczeństwo ruchu pieszego oraz kierowców. Poniżej przedstawiono wybrane charakterystyki ruchu pojedynczego pojazdu oraz potoku pojazdów, które uwzględniają interakcję pomiędzy uczestnikami potoku.

2.2.2.1. Ruch pojedynczego pojazdu

Na podstawie przeprowadzonych badań dotyczących udziału poszczególnych rodzajów transportu w poszczególnych miastach Europy, w zdecydowanej większości ruch kołowy jest dominujący nad innymi użytkownikami [154]. Na podstawie Kompleksowych Badań Ruchu Drogowego przeprowadzonych w Gdańsku, ruch kołowy, stanowi około 41 % spośród wszystkich użytkowników. Jest rodzajem transportu mającym znaczący wpływ na bezpieczeństwo pieszych użytkowników w ruchu drogowym, poprzez liczbę i ciężkość wypadków. Kierowca dostosowując jazdę do danej sytuacji ruchowej wykonuje manewry, wpływające na dynamikę ruchu pojazdu w tym na bezpieczeństwo w ruchu drogowym w obrębie przejść dla pieszych, wyróżniamy przyspieszenie, opóźnienie, hamowanie, zmianę pasa ruchu.

W trakcie jazdy, kierowca może przyspieszać m.in. przy wyprzedzaniu lub gdy widzi, że zmianie ulega wyświetlany sygnał w komorze sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniu. Przyspieszenie jest wielkością opisującą, jak szybko zmienia się prędkość pojazdu w jednostce czasu:

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta t} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (2.1)$$

gdzie:

ΔV – różnica prędkości końcowej i początkowej [m/s],

Δt – czas, w jakim zmienia się prędkość [s].

Opóźnienie jest odczuciem potrzeby zmniejszenia prędkości pojazdu przez kierowcę. Z opóźnieniem powiązane jest hamowanie pojazdu, gdy na jezdni pojawi się przeszkoda, w wyniku, której

zachodzi potrzeba zatrzymania pojazdu. Zależność drogi hamowania od prędkości, możemy wyznaczyć poprzez przyrównanie porównanie energii kinetycznej pojazdu w chwili poprzedzającej hamowanie do pracy hamowania:

$$L_h = \Delta E_k = E_k - 0 = (m \cdot v^2)/2 \quad (2.2)$$

gdzie:

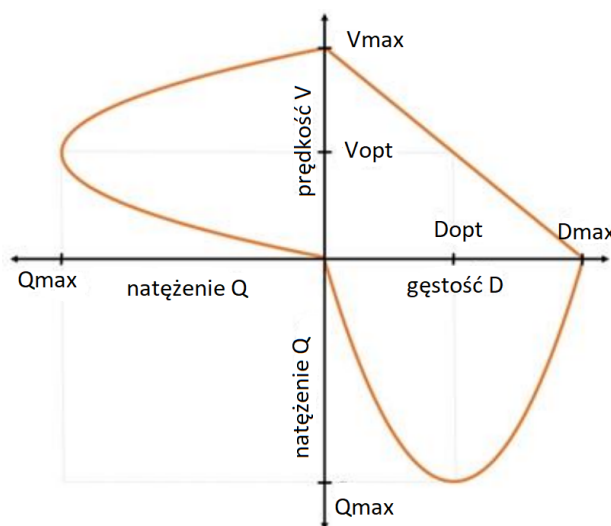
v – prędkość pojazdu [m/s],

m – masa pojazdu [kg].

2.2.2.2. Ruch potoku pojazdów

Oceniając ruch drogowy i infrastrukturę drogową, wykorzystuje się zależność opisywaną, jako system klasyczny „droga – człowiek – pojazd”. Każdy z tych elementów w systemie klasycznym może być opisany przez szereg czynników, które mają wpływ na ocenę. Do najważniejszych dla charakterystyk drogi zaliczamy geometrię i stan nawierzchni, dla człowieka/kierowcy czas reakcji, doświadczenie, stan zdrowia, dla pojazdu parametry techniczne pojazdu, stan techniczny pojazdu. Jednym z ważniejszych parametrów ruchu pojazdów jest ich prędkość, którą charakteryzujemy, jako swobodną lub zakłóconą. Prędkość w ruchu swobodnym występuje, gdy ruch pojazdu jest nieograniczony innymi uczestnikami ruchu.

Na rys. 2.9 przedstawiono model zależności pomiędzy natężeniem, prędkością i gęstością pieszych, opracowany przez Greenshields'a w xx roku [76]. Model ten zwany jest fundamentalnym prawem ruchu drogowego. Wraz ze wzrostem gęstości pojazdów K natężenie ruchu Q wzrasta do wartości Q_{max} . Czym bliżej wartości Q_{max} ruch pojazdów jest bardziej zakłócony. Jako zakłócenie, rozumie się czynniki wpływające na zmianę parametrów ruchu pojazdów. Na zakłócenia ruchu pojazdów mogą mieć wpływ także inni użytkownicy drogi tj. pojazdy, piesi, rowerzyści oraz zakłócenia wynikające z geometrii drogi lub warunków atmosferycznych. Ważnym dla funkcjonowania przejść dla pieszych jest natężenie ruchu pojazdów. Jest to liczba pojazdów w przekroju drogi, ulicy liczona w jednostce czasu [p/h]. Od natężenia ruchu kołowego zależy gęstość pojazdów, która jest średnią liczbą pojazdów przypadających na jednostkę długości drogi [p/km]. $Q - V - K$. Do opracowania takiego modelu niezbędne jest określenie punktów charakterystycznych zależności: V_{sw} , Q_{max} , K_{max} , V_{opt} , K_{opt} oraz funkcje zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami [135].



Rys. 2.9 Wykres podstawowej postaci zależności fundamentalnej ruchu potoku pojazdów według modelu Greenshields'a [76], [192]

2.3. Modele opisujące ruch potoku pieszych

2.3.1. Modelowanie ruchu pieszego

W ostatnich dziesięcioleciach problematyka badań ruchu pieszego stała się gorącym tematem. Naukowcy przeprowadzili wiele badań różnymi metodami, w tym empirycznymi, eksperymentami i symulacyjnymi. Wyniki badań często służyły do opracowania modeli ruchu pieszego. Stosuje się dwa podejścia do modelowania ruchu pieszych: podejście makro i podejście mikro.

Podejście makro polega na traktowaniu potoku pieszych (tłumu), jako całości i stosuje się modele makroskopowe do opisu zachowań [97]. Korzystając z danych i obserwacji potoków pieszych opisywano ich ruch wykorzystując koncepcje traktujące potok pieszych, jako płyn lub kontinuum [97]. Przy czym brano pod uwagę różne scenariusze: ruch jednokierunkowy, ruch dwukierunkowy [1], czy ruch krzyżowy. W wyniku takich badań budowano wykresy zależności pomiędzy podstawowymi parametrami tj. natężeniem – prędkością i gęstością podobnie jak w prawie fundamentalnym dla ruchu kołowego [246]. Jednym ze sposobów budowy modeli ruchu pieszego są modele regresyjne wykorzystujące statystycznie ustalone relacje między parametrami przepływu potoku pieszych i wykorzystywane są do przewidywania ruchu pieszych w określonych warunkach. Modele regresyjne mają charakter raczej opisowy niż wyjaśniający i nie dostarczają nowych informacji na temat zachowań pieszych i wymagają dość dużych prób danych do ich budowy [147].

Podejście mikro polega na traktowaniu pieszych, jako odrębnych jednostek i przeprowadzaniu ich przez analizowane urządzenia dla pieszych za pomocą w symulacji komputerowej i opisanie zachowań za pomocą modeli mikroskopowych. Korzystając z danych i obserwacji zachowań pojedynczych pieszych buduje się modeluje wykorzystujące różne podejścia: analogie do materiału ziarnistego, modelowanie obranej ścieżki przy założeniu, że piesi optymalizują swoje bezpośrednie lokalne zachowanie, lub przy założeniu, że piesi próbują poruszać się po wcześniej określonych, globalnie określonych ścieżkach, a także modele agentowe czy modele komórkowe [147].

W niniejszej pracy skupiono się na makroskopowym podejściu do modelowania ruchu pieszych.

2.3.2. Parametry potoku pieszych

Użytkownicy drogi wykazują zachowania, które możemy opisać, za pomocą wzorów matematycznych i fizycznych zawierających parametry charakteryzujące ruch. Na parametry charakteryzujące ruch wpływają cech fizyczne, psychofizyczne, parametry ruchu pieszego opisane w rozdziale 2.2.1.1.

Charakterystyka ruchu może być wykonana na trzech poziomach, [117]:

- poziom makroskopowy – do opisu stanu potoku użytkowników ruchu za pomocą charakterystyk ruchu,
- poziom mezoskopowy – wykorzystujący parametry z poziomu mikroskopowego do wyznaczania m.in. odstępów między użytkownikami drogi,
- poziom mikroskopowy – opisujący cechy użytkownika związane z przemieszczaniem.

Na potrzeby rozprawy doktorskiej, w pracy przedstawiono parametry użytkowników, charakteryzujące ruch na poziomie makroskopowym.

Makroskopowe parametry ruchu pieszych określane są poprzez uśrednianie parametrów indywidualnych pieszych poruszających się w grupie. Za najbardziej istotne, makroskopowe parametrów ruchu pieszych, uznaje się:

- prędkość pieszych V ,
- natężenie pieszych Q ,
- gęstość pieszych D .

Prędkość pieszych, określana jest w ten sam sposób jak w przypadku pojedynczego pieszego, ale nie jest prędkością swobodną. Uzależniona jest m.in. od natężenia i gęstości potoku ruchu, co przedstawia wykres fundamentalny (rys. 2.11).

Natężenie ruchu pieszych, jest to liczba pieszych w przekroju urządzenia dla pieszych (tj. chodnik, kładki, schody, przejścia podziemne), wyrażana w jednostce liczby osób na jednostkę czasu np. godzinę.

Gęstość pieszych mierzona, jako średnia liczba pieszych przypadających na metr kwadratowy urządzenia dla ruchu pieszych. Uzależniona jest m.in. od natężenia i prędkości pieszych, co przedstawia wykres fundamentalny. Przy dużej gęstości pieszych przemieszczanie pieszych jest utrudnione, a przy gęstości maksymalnej niemożliwe. Gęstość jest parametrem do określania warunków ruchu, co przedstawiono w rozdziale.

2.3.3. Przegląd modeli opisujących ruchu potoków pieszych

Rozwój modeli zachowań pieszych w ruchu drogowym przeszedł długą drogę od wczesnych badań nad przepustowością i podstawowymi modelami grawitacyjnymi do zaawansowanych modeli agentowych i sieciowych, które uwzględniają skomplikowane interakcje pieszych. Modele zachowań potoku pieszych obejmują różne podejścia pozwalające przewidzieć i zrozumieć zachowania pieszych w różnych warunkach i sytuacjach. Dzielimy je na modele makroskopowe, mikroskopowe i mezoskopowe.

Modele makroskopowe skupiają się na ogólnych wzorcach przepływu na poziomie globalnym. Jednym z pionierów w badaniach nad przepustowością pieszych i ich zachowań był John Fruin, który w pracy badawczej [65] przedstawił koncepcję poziomu usług (LOS) dla pieszych, podobnie jak stosowane w ruchu drogowym, oraz zajmował się analizą gęstości, przepływów i przestrzeni potrzebnej dla pieszych.

W grupie modeli makroskopowych wyróżniamy:

- modele grawitacyjne. Prawdopodobnie pierwszym modelem grawitacyjnym opisującym zjawiska społeczno ekonomiczne jest Carey w pracy pt. "Principles of Social Science" [34]. Jego prace skupiały się na wykorzystaniu analogii do prawa grawitacji Newtona, im większa liczba ludzi zebranych w danym obszarze, tym większa siła przyciągania. Grawitacja istnieje wprost proporcjonalnie do masy i odwrotnie do odległości. Modele grawitacyjne były rozwijane przez uwzględnienie wpływu jednego obszaru na ich sąsiedztwo, model Chojnacki [34], [136].

- modele potencjału, modele te stosowane do planowania urbanistycznego, które uwzględniają strefę wpływu, atrakcyjność danego ośrodka np. miejsca pracy, usług i miejsca zamieszkania. Przykładem jest model Huffa [136], [14].

Modele mikroskopowe analizujące zachowania indywidualnych pieszych, w których wyróżniamy:

- modele społeczne (Social Force Model). Na początku lat '90 ubiegłego wieku, Dirk Helbing zajmował się badaniami [82], [87] w dziedzinie dynamiki tłumów i ruchu pieszych. Jego modele matematyczne i symulacyjne obejmują zastosowanie równań różniczkowych do opisanie ruchu pieszych. Wprowadził model społecznych sił, który opisuje interakcje między pieszymi, jako siły przyciągające i odpychające, co pozwala na realistyczne symulacje ich zachowań w różnych sytuacjach.

- modele bazujące na agentach (Agent-Based Models) [231], w których decyzje podejmowane są przez indywidualnych agentów na podstawie określonych reguł i preferencji.

Modelowaniem ruchu pieszych za pomocą modeli agentowych, zajmował się Betty [37], [12].

Rozwijał teorie dotyczące zachowań pieszych w zależności od struktury sieci miejskiej oraz interakcji z innymi użytkownikami przestrzeni. W latach 2000, Nishinari [130] zajmował się badaniem dynamiki tłumów opartych na komórkach automatycznych i modelowaniem agentowym ruchu pieszych. Wprowadził modele, które uwzględniają skomplikowane zachowania pieszych w tłumach, takie jak formowanie się grup i reakcje na przeszkody.

Modele mezoskopowe analizujące ruch pieszych na poziomie pośrednim, łącząc elementy mikroskopowe i makroskopowe. Wyróżniamy:

- modele sieciowe, umożliwiające analizowanie pieszych np. w centrach handlowych
- modele ekonomiczne, analizujące wybory tras w zależności od warunków środowiskowych

W literaturze, można odnaleźć także modele łączące elementy makroskopowe i mikroskopowe tworząc grupę modeli mieszanych (hybrydowych) [130]. Określają one ogólne wzorce przepływów pieszych na poziomie globalnym, z uwzględnieniem interakcje między pieszymi oraz ich indywidualne decyzje ruchowe.

2.3.4. Zależność fundamentalna w teorii ruchu potoku pieszych

Pierwszym modelem przedstawiającym zależności fundamentalną, zależność pomiędzy natężeniem, prędkością i gęstością był model Greenshields'a z 1935 roku [189],[76] zastosowany do odwzorowania zależności parametrów ruchu między pojazdami. Ponieważ ruch pieszy wykazuje empiryczne zależności parametrów ruchu podobne do ruchu pojazdów początkowo zaczęto stosować Greenshields'a do modelowania i analiz ruchu pieszego. Zaletą tego modelu jest jego nieskomplikowana postać i relatywnie duża dokładność. Autor, założył, że wartości prędkość i gęstość są powiązane liniowo:

$$Q = V \cdot D \quad (2.3)$$

przy czym

$$V = a + b \cdot D \quad (2.4)$$

$$Q = (a + b \cdot D) \cdot D \quad (2.5)$$

V – prędkość [km/h],

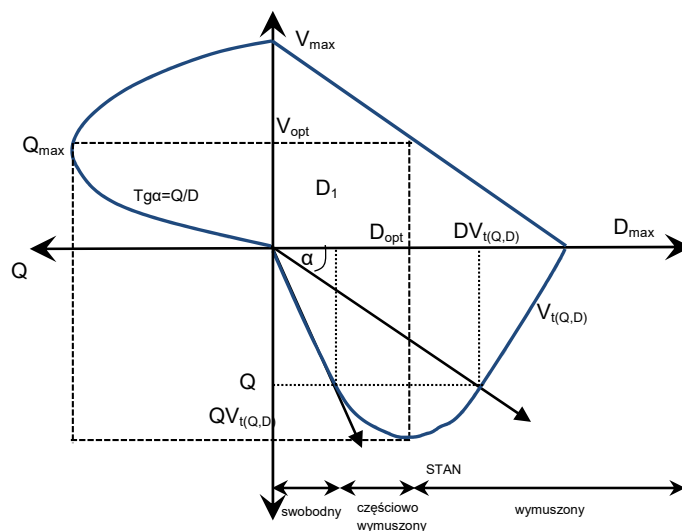
D – gęstość [P/km],

Q – natężenie [P/m/s],

a,b – stałe określane na podstawie obserwacji terenowych.

Interpretację graficzną fundamentalnego modelu ruchu w odniesieniu do ruchu potoku pieszych przedstawiono na rys.2.10. Model fundamentalny zależności Q-V-D można opisać następująco:

- 1) Gdy wzrasta gęstość potoku pieszych w zakresie od $D = 0$ do $D = D_{opt}$, natężenie wzrasta od $Q = 0$ do Q_{max} , wówczas mamy stan swobodny, a czym bliżej wartości Q_{max} stan ruchu pogarsza się do częściowo wymuszonego.
- 2) Po przekroczeniu wartości natężenia dopływu potoku pieszych do natężenia maksymalnego Q_{max} , natężenie ruchu, w krytycznym przekroju, zmniejsza się od Q_{max} do $Q = 0$, które występuje w przypadku wzrostu gęstości do D_{max} , Gdy gęstość $D = 0$ świadczy to o braku pieszych na drodze dla pieszych.



Rys. 2.11 Empiryczny model zależności pomiędzy natężeniem, prędkością i gęstością pieszych, opracowanie własne – opracowanie własne na podstawie [69]

W kolejnych latach powstawały modyfikacje pierwotnego modelu wraz z odniesieniem do pieszych użytkowników, które zostały przedstawione tab.2 i rys.2.12.

John J. Fruin w swojej pracy [121],[22], na podstawie wyników dotyczących ruchu pojazdów realizowanych przez Greenshields'a [76], wykazał, że prędkość, natężenie i gęstość ruchu pieszych są ze sobą ściśle powiązane. Swoje badania realizował w Nowym Jorku, miejscach o wysokim natężeniu ruchu pieszych takich jak dworce kolejowe, ulice handlowe i centra miejskie. Jego badania dostarczyły cennych danych, które stały się podstawą do wytycznych, takich jak Highway Capacity Manual [30], które są używane do projektowania przestrzeni publicznych, jak chodniki, przejścia dla pieszych, stacje metra, dworce kolejowe i inne miejsca o dużym natężeniu ruchu pieszych. Fruin, który określił prędkość optymalną pieszych $V_{Popl} = 42$ [m/min] oraz maksymalnej gęstości około $D_{max} = 4,05$ [P/m²] [121],[22]. Pieszy zmniejsza prędkość wraz ze wzrostem gęstości pieszych z powodu mniejszych odstępów w odniesieniu do innych pieszych. Maksymalne natężenie pieszych QP_{max} jest osiągnięte przy około 85,6 [P/m].

Tab.2.2 Wybrane zależności pomiędzy natężeniem, gęstością i prędkością ruchu pieszych [22],[21]

Autor	Rok	Źródło	Miejsce przeprowadzonych badań	Wzór matematyczny	
Fruin	1971 a	[121]	Godzina szczytu natężenia pieszych przy terminalu autobusowym	$Vp = 1.43 - 0.35 \cdot Dp$	
				$Qp = 1.43 \cdot Dp - 0,35 \cdot Dp^2$	
				$Qp = 4.08 \cdot Vp - 2.86 \cdot Vp^2$	
Older	1968	[163]	Ulica ze sklepami	$Vp = 1.31 - 0.34 \cdot Dp$	
				$Qp = 1.32 \cdot Dp - 0,34 \cdot Dp^2$	
				$Qp = 3.85 \cdot Vp - 2.94 \cdot Vp^2$	
Sarkar & Janardhan	1997	[200]	Obszar Metropolii Calcutta	$Vp = 1.46 - 0.35 \cdot Dp$	
				$Qp = 1.46 \cdot Dp - 0,35 \cdot Dp^2$	
				$Qp = 4.17 \cdot Vp - 2.86 \cdot Vp^2$	
Tanariboon	1986	[217]	Singapore	$Vp = 1.23 - 0.26 \cdot Dp$	
				$Qp = 1.23 \cdot Dp - 0,26 \cdot Dp^2$	
				$Qp = 4.73 \cdot Vp - 3.85 \cdot Vp^2$	
Weidmann	1993	[232]	Szwajcaria	$Vp = V_0 \cdot [1 - e^{-1.913 \cdot [\frac{1}{Dp} - \frac{1}{d_{jam}}]}]$	
Virkler & Elayadath	1994	[227]	Tunel pieszy za obszarem boisk piłki nożnej Uniwersytetem Missouri	$Dp < 1.07$ [P/m ²]	$Dp > 1.07$ [P/m ²]
				$Vp = 1.01 \cdot \exp(-Dp/4.17)$	
				$Qp = 4.17 \cdot Vp \cdot \ln(1.01/Vp)$	$Vp = 0.61 \cdot \ln(4.32/Dp)$ $Qp = 4.32 \cdot Vp \cdot \exp(-Vp/0.61)$
				$Qp = 1.01 \cdot Dp \cdot \exp(-Dp/4.17)$	$Qp = 0.61 \cdot Dp \cdot \ln(4.32/Dp)$

Gdzie:

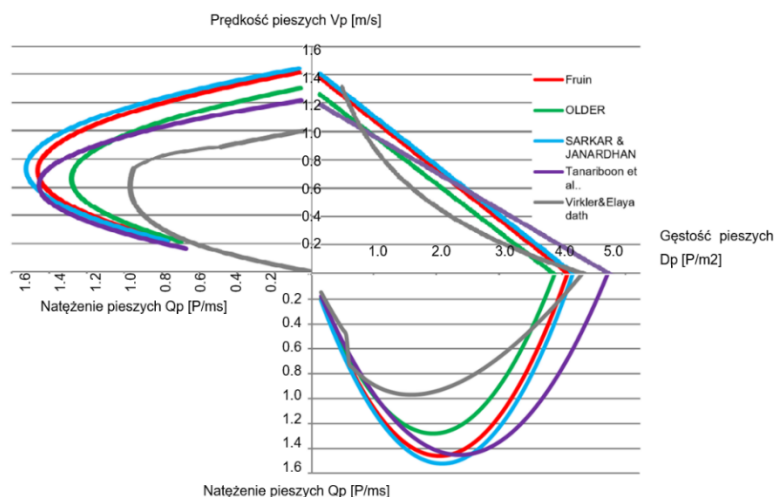
Qp – natężenie pieszych [P/m/s],

Vp – prędkość pieszych [m/s],

Dp – gęstość pieszych [P/m²],

V_0 – prędkość w ruchu swobodnym pieszego [m/s],

$d_{jam} = 5.4$ [P/m²].



Rys.2.12 Zależność prędkości, natężenia i gęstości pieszych – opracowanie własne

2.3.5. Uwzględnienie struktury kierunkowej w modelowaniu ruchu potoków pieszych

Podczas wykonania bardziej szczegółowych analiz, parametrów ruchu potoku pieszych, uwzględnia się współczynnik podziału kierunkowego WPK. Jak podał Alhajyaseen, Nakamura i Yuan z zespołem [1], [237], współczynnik WPK, określa proporcję między pieszymi idącymi w tym samym kierunku, a relacją z naprzeciwka i ma zastosowanie w analizach na dwukierunkowych odcinkach przepływu pieszych (rys.2.13). Według Alhajyaseen i Nakamura [1], im współczynnik r bliższy jest bliższy jedności, tym bardziej dominującą grupą potoku pieszych jest Q1. Jeżeli wartość r jest bliższa zeru tym bardziej dominująca jest grupa potoku pieszych Q2.

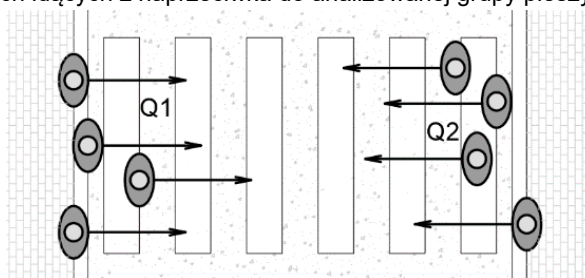
$$WPK = \frac{Q1}{Q1+Q2} [-] \quad (2.5)$$

gdzie:

WPK - współczynnik podziału kierunkowego,

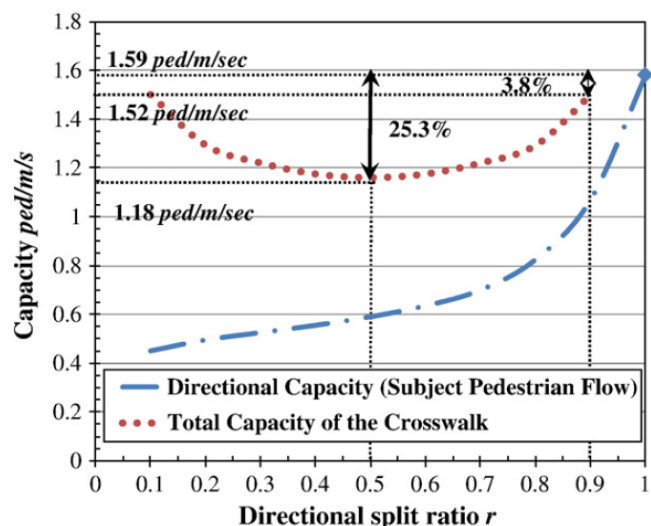
Q1 – analizowane natężenie grupy pieszych [P/m/s],

Q2 – natężenie grupy pieszych idących z naprzeciwka do analizowanej grupy pieszych Q1 [P/m/s].

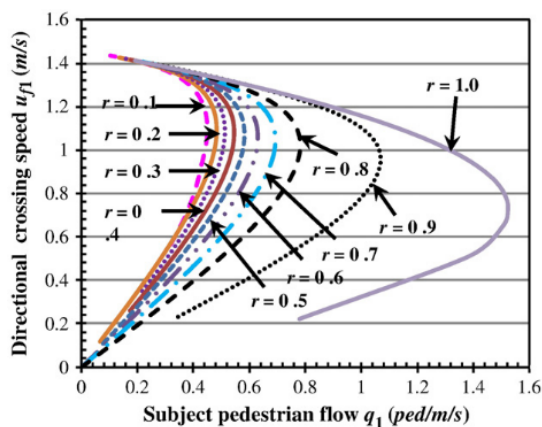


Rys.2.13 Współczynnik podziału kierunkowego r – oznaczenia natężenia grup pieszych, opracowanie własne.

Z badań przeprowadzonych na przejściach dla pieszych z sygnalizacją świetlną w Japonii, wyznaczono zależność przepustowości przejścia dla pieszych w zależności od współczynnika podziału kierunkowego r (WPK) [1]. Im współczynnik r bliższy wartości 0,5, tym przepustowość przejścia spada w wyniku większego oddziaływania między pieszymi (rys.2.14, rys.2.15).



Rys.2.14 Zależność przepustowości przejścia dla pieszych w zależności od współczynnika podziału kierunkowego [1].



Rys.2.15 Zależność prędkości i natężenia w zależności od współczynnika podziału kierunkowego – piesi w wieku średnim [1].

Tak jak w przypadku pieszych, makroskopowe parametry ruchu pojazdów określane są poprzez uśrednianie parametrów indywidualnych pojazdów poruszających się na drodze. Do głównych makroskopowych parametrów ruchu pojazdów należą:

- prędkość pieszych V ,
- natężenie pieszych Q ,
- gęstość pieszych D .

Opisane parametry pojazdów natężenie (Q), prędkość (V) i gęstość (D), tak jak w przypadku pieszych, charakteryzują przepływ pojazdów nazywany modelem fundamentalnym oznaczonym, jako Q - V - D . Szczegółowe analizy dla dróg zamiejskich zostały przedstawione w rozprawie doktorskiej - Romanowska [192].

Analizując warunki ruchu użytkowników, należy uwzględnić m.in. lokalizację prowadzonych analiz. W lokalizacjach jak przejścia dla pieszych, ma miejsce interakcja pomiędzy pieszymi, a pojazdami. Wzajemne oddziaływanie między uczestnikami ruchu wpływa m.in. na ich parametry ruchu, przepustowość drogi i urządzeń dla pieszych, bezpieczeństwo użytkowników [248].

2.4. Główne problemy w ruchu pieszych i sposoby ich rozwiązywania

2.4.1. Utrudnienia w ruchu pieszych

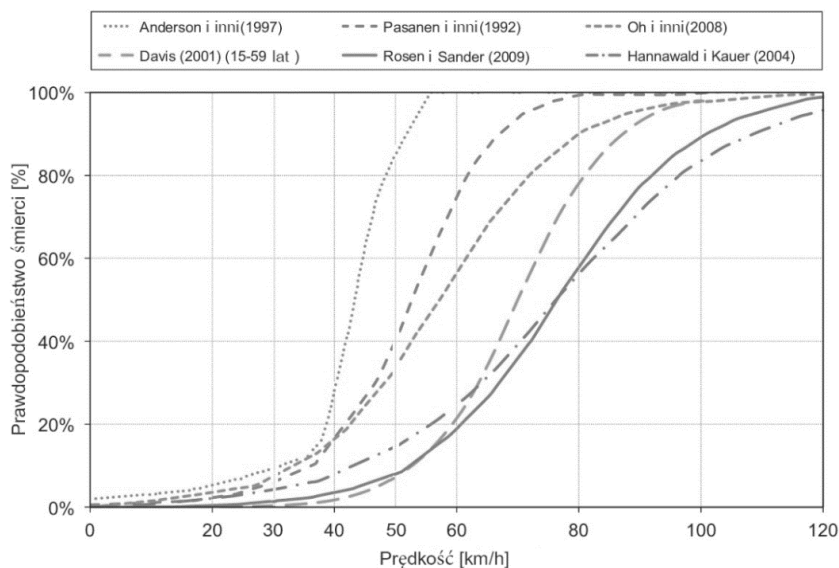
Problemy w ruchu pieszych mogą mieć różnorodne przyczyny, a ich rozwiązanie wymaga kompleksowego podejścia. Piesi przemieszczając się napotykają utrudnienia, które można sklasyfikować, jako będące wynikiem oddziaływania:

- innych użytkowników,
- warunków środowiskowych,
- warunków terenowych,
- architektury urządzeń dla pieszych.

Wymienione utrudnienia mają istotny wpływ na bezpieczeństwo ruchu, warunki ruchu pieszych i pojazdów oraz sprawność urządzeń dla pieszych.

2.4.2. Zagrożenia bezpieczeństwa ruchu

W zdarzeniach drogowych pomiędzy pojazdem, a pieszymi uczestnikami ruchu duże znaczenie odgrywa prędkość pojazdu, która wpływa na ciężkość wypadku. Na rys.2.16 przedstawiono prawdopodobieństwo śmierci pieszego w zależności od prędkości pojazdu. Szwedzcy badacze, Rsen i Sander w swoich badaniach stwierdzili, że ich poprzednicy opierali się na danych, w których pieszy był ofiarą ciężko ranną lub śmiertelną, co przeszacowywało ryzyko bycia ofiarą śmiertelną [193],[96]. Według ich badań bezwzględne ryzyko bycia ofiarą śmiertelną ma miejsce przy prędkości pojazdu około 120 km/h, gdzie u innych badaczy jak R. Anderson prędkość ta wynosiła około 57 km/h, E. Pasanen, G.Davis i C.Oh około 100 [km/h] [16],[17],[148], [198].

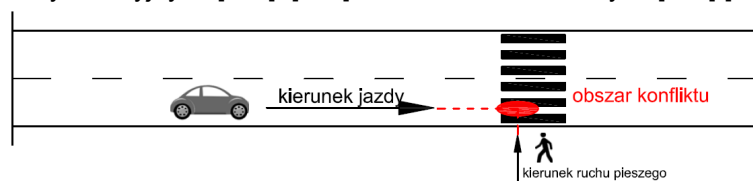


Rys.2.16 Prawdopodobieństwo śmierci pieszego, opracowane na podstawie [96]

Istotnym zagadnieniem są konflikty ruchowe pomiędzy użytkownikami wspólnej przestrzeni, będące ważnym czynnikiem wpływającym na ich bezpieczeństwo. Konfliktem ruchowym nazywamy sytuację (rys.2.17), w której jeden lub więcej użytkowników ruchu wykonali akcję, która ma zapobiec zdarzeniu [184]:

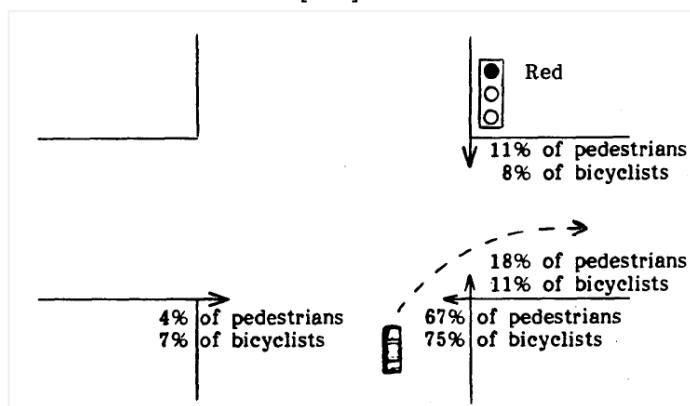
- w przypadku pojazdów: hamowanie, przyspieszenie, zmiana toru jazdy,
- w przypadku pieszych: zatrzymanie się, cofnięcie, uskok, przyspieszenie kroku, rozpoczęcie biegu.

Początkowo konflikty ruchowe badano poprzez bezpośrednią obserwację i notowanie takich sytuacji w notatniku. Z rozwojem technologii, metoda pomiaru opierała się na analizie obrazu filmowego lub analizie modeli mikrosymulacyjnych [143], [238] lub modeli komórkowych [138],[240],[167].



Rys.2.17 Przykładowy schemat obszaru konfliktu

Istotne znaczenie dla bezpieczeństwa pieszych, ma również organizacja i sposób sterowania ruchem w otoczeniu przejścia dla pieszych. Na przejściach dla pieszych zlokalizowanych na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną bardzo często dopuszcza się skręcanie pojazdów w kierunku wskazanym zieloną strzałką na sygnalizatorze S-2, gdy w tym samym momencie piesi mają sygnał zielony na sygnalizatorze S-5. Kierujący mimo obowiązku nie zawsze zatrzymają pojazd, aby upewnić się czy mogą bezkonfliktowo skręcić w prawo, co stwarza niebezpieczeństwo dla niechronionych użytkowników drogi. Wraz ze wzrostem natężenia rośnie liczba konfliktów i sytuacji niebezpiecznych [123],[79] Natomiast eliminacja kolizyjnych relacji między kierowcą (rys.2.18), a pieszym poprawia bezpieczeństwo ruchu, ale wpływa na sprawność funkcjonowania przejścia lub skrzyżowania. Jak wykazały analizy przy ponad 1 tys. wypadków z udziałem pojazdu skręcającego w prawo, wypadki z pieszymi stanowiły 67%, a z rowerami około 75% [179].



Rys.2.18 Udział pieszych i rowerzystów w wypadkach z pojazdami skręcającymi w prawo [179]

Równie niebezpieczna sytuacja jest, gdy dopuszcza się sygnał zielony ogólny dla pojazdów jadących jednocześnie na wprost i skręcających w lewo, gdy w tym samym czasie na jezdni prostopadłej, sygnał zielony mają piesi. Jak wykazały badania, w takiej sytuacji wypadki z pieszymi stanowią od 13% do 32% [142].

Przeszkoda w użytkowaniu może być architektura urządzeń przeznaczonych do ruchu pieszego. W szczególności tyczy się przejść dla pieszych w drugim poziomie jedni, które wymagają od pieszego pokonania drogi po schodach. Określono, że na prędkość pieszego idącego po schodach, obok cech fizycznych i psychofizycznych, ma wpływ liczba stopni, ich wymiar i kat nachylenia ciągu schodów oraz czy pieszy idzie w dół czy w górę [129],[209]. Te czynniki mają także wpływ na przepustowość tych urządzeń.

Duże wpływ na bezpieczeństwo i funkcjonowanie skrzyżowania ma niedostateczna widoczność innych użytkowników drogi w tym pieszych. Ograniczona widoczność występuje z uwagi na zachowanie innych użytkowników jak i na dynamikę poruszania się obserwatora. W otoczeniu przejść dla pieszych ważne jest zachowanie wolnej przestrzeni na i poza jezdnią. W Polsce temat ten jest pomijany, jedyne wytyczne w tym zakresie można odnaleźć w Prawie o Ruchu Drogowym w Art.49 [204], zabrania się zatrzymywania pojazdu na przejściu dla pieszych oraz w odległości mniejszej niż 10m. W niektórych krajach [6],[212],[197],[127],[225], widoczność zarazem pieszego jak i kierowcy jest podstawowym kryterium przy wyborze lokalizacji przejścia dla pieszych i uzależniona od prędkości pojazdów poruszających się po drodze.

W wyniku analizy zdarzeń drogowych oraz obserwacji terenowych wyodrębniono najczęściej występujące niebezpieczne zachowania kierowców, które niosą ze sobą ryzyko powstania zdarzenia drogowego względem pieszych [112], [113]:

- nieustąpienie pierwszeństwa pieszemu przez kierowcę – mimo wejścia pieszego na przejście kierowca nie ustąpił i nie zatrzymał się,
- kierowca jedzie z nadmierną prędkością – szacuje się, że 40 do 60% kierowców nie stosuje się do ograniczeń prędkości, z czego około 10-20% przekracza ją o więcej niż 10 [km/h] [56],
- jazda na skróty - w celu ominięcia zatorów na głównych ulicach kierowcy bardzo często przejeżdżają na skróty przez dzielnice osiedli,

- przejazd podczas wyświetlanego sygnału czerwonego na sygnalizacji świetlnej - kierowca przejeżdża mimo wyświetlanego sygnału czerwonego, co stwarza niebezpieczeństwo wobec innych użytkowników drogi,
- nielegalne wymijanie innych pojazdów – kierowcy wymijają pojazdy stojące przy przejściu dla pieszych lub autobusy, które zatrzymały się na przystanku,
- nietrzeźwi i rozkojarzeni kierowcy – kierowcy pod wpływem alkoholu oraz kierowcy, którzy coraz częściej rozproszeni są rozmową z innymi pasażerami lub używaniem telefonów, itp..

2.4.3. Zmniejszenie przepustowości urządzeń dla pieszych

Zmniejszenie przepustowości urządzeń dla pieszych jest poważnym problemem w planowaniu urbanistycznym i zarządzaniu ruchem drogowym. Przyczyny można sklasyfikować, jako będące wynikiem :

- dobór nieodpowiedniego rodzaju przejścia dla pieszych np. w poziomie jezdni o dużym natężeniu ruchu pojazdów, zamiast w drugim poziomie np. kładka lub tunel dla pieszych, może skutkować pogorszeniem przepustowości zarówno pieszych jak i pojazdów,
- nieodpowiednie parametry geometryczne przejścia dla pieszych np. za mała szerokość przejścia względem natężenia pieszych,
- lokalizacja w nieodpowiednich miejscach np. na dojeźdżach do przejścia małej architektury (śmietniki, ławki), może spowodować zmniejszeniem powierzchni akumulacji przed przejściem dla pieszych i wpływać na przepustowość samego przejścia,
- nieodpowiednia organizacja ruchu, na przejściach dla pieszych, przebiegających przez kilka pasów ruchu lub o sporym natężeniu pojazdów, czy zbyt dużej prędkości pojazdów, z powodu braku sygnalizacji świetlnej, może przyczynić się do obniżenia komfortu w przekraczaniu ulicy. Pieszy będzie długo oczekiwał przy krawędzi jezdni, na możliwość przejścia, z czasem będą dochodzić kolejni piesi, a w efekcie przepustowość przejścia ze względu na pieszych użytkowników może być zmniejszona,
- przejścia zlokalizowane w miejscach o dużym ruchu pojazdów lub o znacznej długości [62], bez zastosowania odpowiednich środków bezpieczeństwa np. progów zwalniających, azyli dla pieszych, podnoszące komfort i ułatwiające przekraczanie jezdni pieszemu [112],
- nieodpowiednie zachowania uczestników ruchu w obrębie przejścia dla pieszych np. pieszy przechodzi na czerwonym świetle, co wymusza hamowanie pojazdów i zmniejszenie przepustowości jezdni [248];
- nieodpowiedni dobór długości światła zielonego, zarazem dla pojazdów jak i pieszych, może skutkować zmniejszeniem przepustowości urządzenia dla użytkowników [248],
- problem dostępności urządzenia dla pieszych wynikający z nieodpowiedniej lokalizacji lub utrudnionej dostępności dla osób o szczególnych potrzebach.

2.4.4. Pogorszenie warunków ruchu pieszych i pojazdów

Problemy związane z pogorszeniem warunków ruchu pieszych i pojazdów na przejściach dla pieszych, są istotnym zagadnieniem w kontekście bezpieczeństwa, komfortu i płynności ruchu drogowego. Na warunki ruchu wpływają czynniki ruchowe, drogowe i behawioralne, wybrane zostały przedstawione w rozdziale 2.4.3.

Do kryteriów oceny warunków ruchu zaliczamy:

- przepustowość urządzenia dla pieszych lub jezdni;
- komfort ze względu na innych użytkowników korzystających z urządzenia dla pieszych [53];
- czas potrzebny do przejścia na drugą stronę ulicy w przypadku pieszych lub przejazd przez przejścia w przypadku kierowców;
- komfort pieszych dotyczy wygody poruszania się, swobodę ruchów i dostateczną przestrzeń wolną od przeszkód;
- dostępność odnosi się do możliwości korzystania z infrastruktury pieszej przez osoby o różnych umiejętnościach i potrzebach, w tym przez osoby niepełnosprawne, starsze osoby, czy rodziców z dziećmi;

- efektywność sygnalizacji świetlnej jest istotna dla płynności ruchu pieszych na skrzyżowaniach. Obejmuje ona odpowiedni czas cyklu świateł, dostępność sygnalizacji dla pieszych, czy też synchronizację świateł w przypadku pojazdów;
- jakość nawierzchni chodników [53] (dojścia do przejścia dla pieszych) lub jezdni, wpływa na komfort i bezpieczeństwo użytkowników. Preferowane są nawierzchnie równe, pozbawione ubytków.

2.4.5. Podział środków usprawniających ruch pieszych

Ruch pieszych odbywa się wzdłuż i w poprzek drogi. W tym celu konieczne jest stosowanie obiektów, urządzeń oraz udogodnień służących bezpiecznemu, sprawnemu i komfortowemu przemieszczaniu pieszych. Do obiektów przeznaczonych dla ruchu pieszego zaliczamy konstrukcje inżynierskie, tunele do przekraczania drogi w poprzek oraz kładki (wiadukty) do przeprowadzanie ruchu pieszych nad ciągami komunikacyjnymi lub przeszkodami terenowymi. Geometria tuneli i kładek powinna być w maksymalnym stopniu dostosowana do rzeźby terenu celem minimalizacji liczby stopni oraz ramp ułatwiają tym samym, sprawne i komfortowe przemieszczanie się różnych grup pieszych.

Pod pojęciem urządzenia przeznaczonego do ruchu pieszych rozumiemy te części w przekroju drogi, służące poruszaniu się pieszych, które nie są obiektami. Podstawowymi urządzeniami służącymi pieszym do przemieszczania się wzdłuż drogi są chodnik oraz ciągi pieszo rowerowe, a w poprzek, przejście dla pieszych. Urządzenia dzielimy w zależności od:

- a) sposobu użytkowania ich przez pieszych: umożliwiające poruszanie się pieszych i ich ochronę wzdłuż drogi, umożliwiające pieszym przechodzenie w poprzek drogi,
- b) miejsca stosowania: miejskie, zamiejskie,
- c) zakresu stosowania: punktowe, liniowe, obszarowe.

Udogodnieniami dla pieszych, są te elementy w przekroju drogi, których celem jest zapewnienie jeszcze większego bezpieczeństwa, sprawności i komfortu w przemieszczaniu się pieszych. Do podstawowych udogodnień służących przemieszczaniu pieszych służy np. oświetlenie wzdłuż chodnika.

W projekcie wytycznych projektowania infrastruktury dla pieszych WR-D-41 [66], miejsca przekraczania drogi przez pieszych, zostały sklasyfikowane, jako:

- rozwiązania kolizyjne:
 - o wyznaczone przejścia dla pieszych z sygnalizacją świetlną i bez sygnalizacji,
 - o urządzenia alternatywne, w których zawierają się sugerowane przejścia dla pieszych, chodniki poprzeczne i pas neutralny.
- rozwiązania bezkolizyjne: infrastruktura punktowa dla pieszych poprowadzone w innym poziomie względem drogi poprzez [196].
 - o wiadukty,
 - o tunele dla pieszych lub pieszych i rowerzystów.

Ponadto miejsca przekraczania drogi przez pieszych można sklasyfikować ze względu na:

- lokalizację: przejścia w obszarze miejskim, przejścia w obszarze zamiejskim,
- usytuowanie: w poziomie terenu, nadziemne kładki, podziemne tunele,
- kolizyjność z innymi użytkownikami ruchu: bezkolizyjne (nadziemne kładki, podziemne tunele), kolizyjne (w poziomie terenu),
- organizację ruchu: z sygnalizacją świetlną, bez sygnalizacji świetlnej,

Do niedawna klasyfikacja miejsc przekraczania drogi przez pieszych w Polsce, nie uwzględniała rozwiązań alternatywnych, które z powodzeniem funkcjonowały w krajach, w których od dawna działa się na rzecz poprawy bezpieczeństwa pieszych jak m.in. Holandia, USA, Nowa Zelandia [245], [98] [159].

2.4.6. Przejścia dla pieszych

2.4.6.1. Podział przejść dla pieszych

Przejście dla pieszych znajdują się w poziomie drogi, stanowią powierzchnią jezdni, torowiska lub drogi rowerowej umożliwiającym pieszemu uczestnikowi ruchu przejście na drugą stronę jezdni w jak

najbezpieczniejszy sposób i jest miejscem newralgicznym w sieci ulicznej [112]. Mogą być zlokalizowane na skrzyżowaniu dróg lub między skrzyżowaniami.

Wyróżnia się przejścia dla pieszych [204]:

- bez sygnalizacji świetlnej, gdzie ruch pieszych i pojazdów regulowany jest na zasadach ruchu drogowego,
- z sygnalizacją świetlną, gdzie ruch pieszych i pojazdów regulowany jest za pomocą sygnalizacji świetlnej,

Na przejściach zlokalizowanych w poziomie jezdni dochodzi do interakcji między pieszymi, a kierującymi pojazdy [4], co może powodować sytuacje niebezpieczne oraz konflikty w ruchu drogowym. Takie wzajemne oddziaływanie użytkowników infrastruktury przekłada się na funkcjonowanie przejść dla pieszych, a w przypadku bliskiej lokalizacji skrzyżowania także na nie. Przejścia dla pieszych mogą być wyposażone w środki organizacji ruchu i urządzenia ochrony pieszych stosowane dla usprawnienia i zwiększenia bezpieczeństwa ruchu. Można, zatem wyodrębnić [66], [178]:

- a) środki organizacji ruchu, tj: sygnalizacja świetlna, znaki informacyjne, aplikacje wpływające na usprawnienie ruchu np. dla osób niewidomych,
- b) fizyczne środki służące ochronie pieszych tj.: redukujące prędkość pojazdów, separujące ruch, wyniesione przejścia dla pieszych,

2.4.6.2. Wymagania ogólne dla przejść dla pieszych

Dobrze zlokalizowane, wybudowane i zorganizowane przejścia dla pieszych powinny charakteryzować się wysokim poziomem bezpieczeństwa pieszych i być dostosowana do potrzeb i charakteru ruchu pieszego oraz użytkowników, których trasę pieszy przekracza. W szczególności zaś, przejścia te powinny spełniać następujące wymagania [124]:

- wysoki poziom bezpieczeństwa: zapewniona widoczność, minimalna długość, wymagana luka czasowa, niska prędkość pojazdów,
- wysoka sprawność: wystarczająca przepustowość, niskie straty czasu zarówno pieszych, jak i pojazdów,
- wygoda (komfort): krótkie czasy oczekiwania na przejście, brak presji ze strony kierowców, prędkość przemieszczania się pieszych dostosowana do możliwości poszczególnych grup pieszych, a nawierzchnia o wysokim standardzie,
- dobra dostępność: zapewnienie możliwie jak największej bezpośredniości i kontynuacji tras dla pieszych, rampy oraz inne w urządzenia ułatwiające przekraczanie barier, systemy wspomagające dla osoby ze szczególnymi potrzebami.

Przygotowanie zasad planowania i projektowania przejść dla pieszych uwzględniających te wymagania, wymusza wykonanie wielu badań i analiz dotyczących charakterystyk i miar ruchu pieszych, identyfikacji czynników wpływających na zmiany charakterystyk i miar ruchu pieszych, oceny skuteczności i efektywności stosowanych usprawnień.

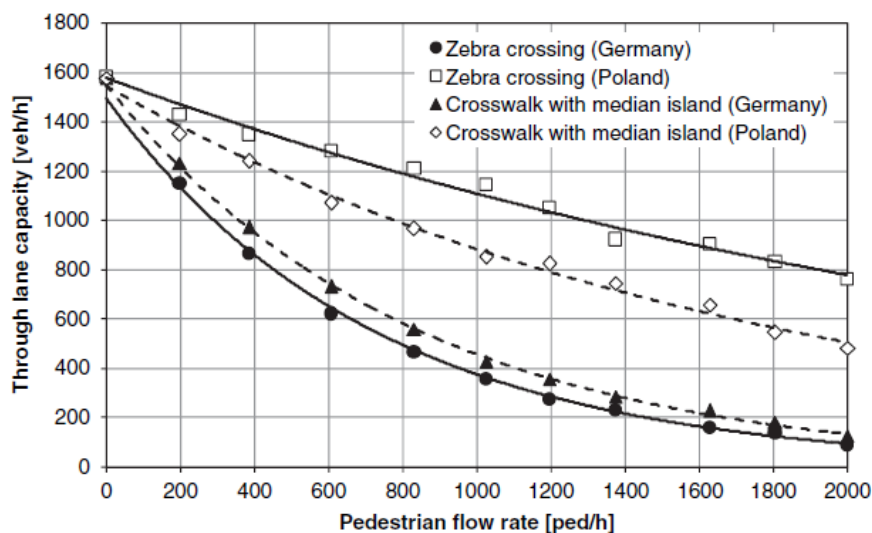
2.4.6.3. Przejścia dla pieszych zwykłe

Przejścia dla pieszych bez dodatkowych rozwiązań wspomagających to przejścia dla pieszych zwykłe.

Do powszechnych problemów spotykanych w przestrzeni miejskiej w zakresie przejść dla pieszych, należą:

- nieprawidłowa lokalizacja przejść dla pieszych względem przystanków transportu zbiorowego lub na łukach pionowych i poziomych drogi, ograniczające widoczność kierowca-pieszy, co stwarza realne zagrożenie jego bezpieczeństwa,
- parkowanie pojazdów zbyt blisko przejść dla pieszych, przez co pieszy przekraczający je jest niewidoczny, co stwarza realne zagrożenie jego bezpieczeństwa,
- lokalizacja na przejściach dla pieszych studzienek kanalizacyjnych,
- degradacja oznakowania pionowego i poziomego,
- brak lub niedostateczne oświetlenie przejścia dla pieszych.

Sposób organizacji ruchu poprzez zastosowany priorytet dla danego użytkownika drogi, wpływa istotnie na uzyskane wartości maksymalnego natężenia. Na rys.2.19, przedstawiono wyniki badań i symulacji określających wpływ wielkości natężenia ruchu pieszego na przepustowość jezdni w obszarze przejścia dla pieszych w zależności od poziomu priorytetu dla pieszych w Niemczech i w Polsce (priorytet dla pojazdów) [10]. Wyniki tych badań wskazują, że im większy priorytet dla pieszych na przejściach dla pieszych tym mniejsza przepustowość jezdni dla pojazdów.



Rys.2.19 Zależność pomiędzy natężeniem ruchu pieszego i kołowego [10],[112]

2.4.6.4. Przejścia sugerowane

Przejścia sugerowane należą do grupy urządzeń alternatywnych. Są to rozwiązania ułatwiające przekraczanie pieszemu drogi, ale nie będące przejściami dla pieszych w rozumieniu ustawy o ruchu drogowym [204], [66]. Wobec powyższego pieszy przekraczający drogę nie ma pierwszeństwa. Przejścia sugerowane nie są oznaczone znakami pionowymi i poziomymi, ale ich przestrzeń jest urządzona przez zastosowanie obniżonego krawężnika ułatwiającego przekraczanie pieszemu drogi dla pojazdów, torowiska lub drogi dla rowerów. Rozwiązania te mogą posiadać azyl dla pieszych umożliwiający przekraczanie dwuetapowe drogi [111]. Przejścia sugerowane mają zastosowanie na drogach miejskich o niewielkim natężeniu pojazdów lub dopuszczalnej prędkości pojazdów do 30km/h oraz na drogach zamiejskich o niewielkim natężeniu ruchu pieszego i prędkości nieprzekraczającej 70km/h. Zaleca się dla dróg zamiejskich należy umieścić znak informujący kierowców o możliwości przekraczania drogi przez pieszych za pomocą znaku A-16 oraz zmniejszyć lokalnie dopuszczalną prędkość [111].

2.4.6.1. Przejścia przez drogę w innym poziomie

Kładki dla pieszych i tunele [112], to przejścia przez drogę w innym poziomie, które umożliwiają pieszym bezpieczne pokonanie drogi o dużym natężeniu ruchu pojazdów, zapewniają ciągłość ruchu pieszych, zwiększając ich bezpieczeństwo oraz płynność ruchu drogowego. Takie rozwiązania drogowe stosuje się na skrzyżowaniach i drogach o dużym natężeniu ruchu (drogi klasy GP i G), w trudnych warunkach terenowych tj. jak wykopy, nasypy gdzie lokalizacja przejść w poziomie jezdni może nie być możliwa do zrealizowania w sposób bezpieczny dla użytkowników drogi.

Najważniejszymi zaletami stosowania kładek i tuneli jest zwiększenie bezpieczeństwa pieszych i płynność ruchu pojazdów. Wadami, wyższe niż w przypadku przejść dla pieszych w poziomie ulicy, koszty budowy i utrzymania, mogą być mniej atrakcyjne dla pieszych szczególnie, jeśli są źle oświetlone.

2.4.6.2. Inne udogodnienia usprawniające ruch pieszych

Wśród urządzeń dla pieszych możemy wyodrębnić te, które przyczyniają się do poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz mające zastosowanie w sterowaniu ruchem. Do pierwszej grupy, wpływającej na wzrost poziomu bezpieczeństwa zaliczamy, m.in:

- wygradzenia takie jak: ogrodzenia, słupki wygradzające i szpalery zieleni – stosuje się w celu ochrony pieszych poprzez fizyczne oddzielenie ich od jezdni oraz skanalizowaniu ruchu pieszych; ograniczają parkowanie pojazdów na chodnikach i w obszarze przejść dla pieszych oraz najeżdżanie kołami przy manewrach skrętnych w obrębie skrzyżowania,
- zwalniające (liniowe, płytowe i wyspowe) – to środki uspokojenia ruchu, którego celem jest wymuszenie na kierowcy zmniejszenia prędkości przy dojeździe do przejścia dla pieszych,
- skrzyżowania z wyniesioną tarczą oraz wyniesione przejścia dla pieszych – fizyczne urządzenia do wymuszania na kierowcy przejazdu w obszarze stref konfliktowych z mniejszą prędkością,
- wyspa azylu – jest to urządzenie dla pieszych, które umożliwia przekraczanie jezdni etapowo [146],
- oświetlenie przejść dla pieszych – sztuczne oświetlenie przejść dla pieszych w przypadku słabej widoczności, złych warunków atmosferycznych lub po zmierzchu ułatwia dostrzec przez kierowcę sylwetkę pieszego,
- urządzenia sterowania ruchem umożliwiające segregację kolizyjnych ze sobą strumieni uczestników ruchu dla zredukowania liczby punktów kolizji za pomocą sygnalizatorów sygnalizacji świetlnej, przycisków dla pieszych lub detekcji automatycznej, sygnalizatorów akustycznych i wibracyjnych [195].

2.5. Ocena funkcjonowania przejść dla pieszych

2.5.1. Metody oceny funkcjonowania przejść dla pieszych

2.5.1.1. Czynniki wpływające na funkcjonowanie przejść dla pieszych

Poziom funkcjonowania obiektów i urządzeń dla pieszych zależy od wielu czynników takich jak: czynniki atmosferyczne, środowiskowe, oświetlenie lub rozwiązania prawne. Na podstawie analizy literatury oraz doświadczenia zdobyte przy realizacji badań terenowych, wytypowano najbardziej istotne czynniki, które wpływają na funkcjonowanie przejść dla pieszych i zostały one podzielone na grupy (rys.2.20):

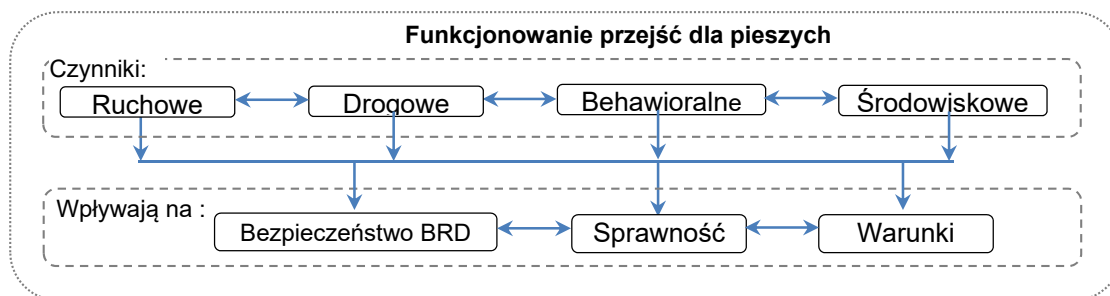
- czynniki ruchowe – natężenie, struktura i rozkład kierunkowy uczestników ruchu, prędkość, z jaką przemieszcza się użytkownicy, gęstość ruchu, luki akceptowalne, konflikty ruchowe, organizacja ruchu,
- czynniki drogowe – długość i szerokość przejścia dla pieszych, przekrój ulicy, szerokość pasa ruchu, ukształtowanie drogi w planie i przekroju podłużnym, wyposażenie przejścia dla pieszych w środki bezpieczeństwa ruchu drogowego, widoczność pieszego i pojazdu, rodzaj i stan nawierzchni,
- czynniki behawioralne - czas reakcji, wiek, płeć, niepełnosprawność, stan zdrowia, koordynacja fizyczna i psychiczna, motywacja i długość podróży, skłonność do podejmowania ryzyka,
- czynniki środowiskowe – warunki atmosferyczne, pora dnia.

Wymienione czynniki wpływają na funkcjonalność analizowanych urządzeń dla pieszych, która jest oceniana za pomocą następujących kryteriów:

Skuteczność stosowania urządzeń dla pieszych może być mierzona na wielu poziomach:

- bezpieczeństwo ruchu drogowego – miarami bezpieczeństwa są: liczba wypadków lub poziom ryzyka wypadków z pieszymi [67],
- sprawność – miarą jest przepustowość, która ma zastosowanie przy projektowaniu przejść dla pieszych,
- warunki ruchu – określone są miarą jakościową PSR (poziom swobody ruchu) uwzględniająca sprawność, komfort użytkowników i płynność ruchu,

- wpływ na środowisko – mierzone kosztem emisji zanieczyszczeń przy produkcji energii służącej do doświetlenia przejścia dla pieszych [110] lub emisją spalin od pojazdów wynikającą z płynności ruchu pojazdów (hamowanie, ruszanie),
- efektywność ekonomiczną – jej celem jest maksymalizowanie efektów kosztowych przy określonych nakładach, w ujęciu drogowym może być mierzona przez ponoszone nakłady w czasie cyklu życia inwestycji celem osiągnięcia zamierzonego efektu np. odpowiedniej przepustowości dla zapewnienia dobrych i bardzo dobrych warunków ruchu [210].



Rys.2.20 Czynniki, które wpływają na funkcjonowanie przejść dla pieszych

2.5.2. Ocena sprawności przejść dla pieszych

2.5.2.1. Przepustowość przejścia dla pieszych

Miarą sprawności jest przepustowość. Przepustowość została określona, jako maksymalną wartością natężenia pieszych lub pojazdów, która może przekroczyć określony przekrój tj. przejście dla pieszych, pas ruchu, w określonym czasie i warunkach drogowych, ruchowych, geometrycznych oraz środowiskowych. Najczęściej jednostką przepustowości są piesi lub pojazdy na godzinę. Ze względu na fakt, iż na wartość przepustowości C wpływają różne czynniki f_n , wyróżnia się pojęcie przepustowości rzeczywistej C_r uwzględniającej ich wpływ.

$$C_r = C \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_n \quad (2.6)$$

gdzie:

C_r – przepustowość rzeczywista [P/h], [poj./h],

C_0 – przepustowość bazowa [P/h], [poj./h],

$f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_n$ – współczynniki 1,2...n, redukujące przepustowość C . Związane z rzeczywistymi warunkami ruchowymi, drogowymi, środowiskowymi itd.

Ocena przepustowości przejścia dla pieszych jest ważnym elementem analizy, która umożliwia planowanie, projektowanie i wdrażanie usprawnień ruchu drogowego. Powinna być rozpatrywana całościowo, z uwzględnieniem wszystkich użytkowników.

Do oceny sprawności ruchu, wykorzystuje się stopień wykorzystania przepustowości X [33], zdefiniowany, jako:

$$X = \frac{Q}{C} \quad [-] \quad (2.7)$$

gdzie:

Q – natężenie ruchu pieszych lub pojazdów w jednostce czasu [P/m/s],

C – przepustowość w tej jednostce czasu, co natężenie [P/m/s].

Metoda analizy przepustowości zawiera procedurę postępowania z wykorzystaniem miar i kryteriów jej oceny. Analiza przepustowości ma zastosowanie na etapie planowania, projektowania lub wdrażania usprawnień w ruchu drogowym m.in. do:

- doboru rodzaju przejścia dla pieszych,
- oceny warunków ruchu dla planowanego przejścia dla pieszych przy założonych natężeniach prognozowanych,
- ustaleniu szerokości przejścia dla pieszych przy przejściu określonych kryteriów warunków ruchu,
- ustaleniu maksymalnej długości przejścia dla pieszych lub etapowania długości, poprzez zastosowanie azylu dla pieszych,

- poprawy warunków ruchu poprzez wdrożenie usprawnień m.in. zmiana szerokości przejścia dla pieszych, zmiana rodzaju przejścia dla pieszych,
- eliminacji ruchu pojazdów z obszaru przejścia dla pieszych i poprowadzenie drogami alternatywnymi.

Analizę przepustowości należy wykonać z uwzględnieniem wszystkich użytkowników, na których oddziałuje przejście dla pieszych. Analizę należy wykonać z uwzględnieniem następujących elementów:

- wyznaczyć maksymalną wartość natężenia pieszych w przekroju przejścia dla pieszych,
- wyznaczyć maksymalną wartość natężenia pojazdów w przekroju ulicy, tuż przed przejściem dla pieszych,
- jeżeli przejście dla pieszych jest poprowadzone przez torowisko, należy uwzględnić oddziaływanie pojazdów szynowych,
- jeżeli przejście dla pieszych jest poprowadzone przez drogę rowerową, należy przeanalizować przepustowość rowerzystów.

W celu określenia przepustowości obiektu, urządzenia dla pieszych należy w pierwszej kolejności wykonać pomiary terenowe zawierające:

- pomiar natężenia pieszych i pojazdów,
- pomiar prędkości pieszych i pojazdów,
- pomiar geometrii (szerokość i długość) obiektu, urządzenia dla pieszych,
- weryfikacja czy nie ma przeszkód i przewężeń na ciągu pieszym a jeżeli występują należy je zwymiarować.

Zgromadzone dane należy zweryfikować pod względem poprawności i wykonać podstawowe analizy statystyczne m.in. określenie prędkości i natężenia maksymalnego. Dla obiektów nowoprojektowanych nie mamy możliwości pozyskania danych z pomiarów terenowych, wówczas należy wykonać prognozy natężenia ruchu pieszych i pojazdów. Dysponując danymi o natężeniu i prędkości użytkowników, należy wykonać analizy przepustowości, a na tej podstawie ocenę warunków ruchu. Ostatnim elementem analizy jest ocena stopnia wykorzystanie przepustowości.

Analizując funkcjonowanie przejść dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej, ważne jest określenie sprawności urządzenia przeznaczonego do ruchu pieszych. W tym celu określa się maksymalną liczbę pieszych, która może bezpiecznie przejść na drugą stronę jezdni przez analizowane przejście dla pieszych, gdy po jezdni poruszają się pojazdy oraz maksymalną liczbę pojazdów, która może przejechać przez przekrój ulicy znajdujący się przy przejściu dla pieszych, gdy po nim przemieszczają się piesi. Model Griffiths'a z 1981 roku do obliczania przepustowości na przejściach dla pieszych [174] ma postać (2.8):

$$C = \frac{\mu}{\mu\beta + (e^{\mu\alpha} - 1)(1 - e^{-\mu\beta})} \quad (2.8)$$

gdzie:

C – przepustowość przejścia dla pieszych [pojazd/s],

μ - natężenie pieszych [P / s],

α – czas potrzebny do przejścia pieszego przez przejście dla pieszych [s],

β – średni czas przejazdu pojazdu przez przejście, gdy nie ma pieszego [s].

Kim w 2003 roku [128], zaprezentował model umożliwiający obliczanie przepustowości przejścia dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej, dla ulicy jednokierunkowej z uwzględnieniem luk krytycznych według wzoru (2.9). Z przedstawionych badań wynika, że wraz ze wzrostem natężenia pojazdów, zmniejsza się maksymalna liczba pieszych, która może przejść przez przejście dla pieszych.

$$C_p = q \sum_{i=0}^{\infty} (i + 1) \cdot P[T + iH \leq t < T + (i + 1)H] \quad (2.9)$$

gdzie:

C_p – maksymalne natężenie pieszych [P/s],

q – dopływ pieszych do przejścia [P/s],

T – akceptowalny odstęp czasu [s],

H – kolejna akceptowalny odstęp czasu przy dopływie pieszych do przejścia wchodzących pieszych [s]

$P[T + iH \leq t < T + (i + 1)H]$ – prawdopodobieństwo czasu przejścia, pomiędzy wartościami T+iH oraz T+(i+1)H.

Dla chodników, przejść nadziemnych i podziemnych, przepustowość wylicza się ze wzoru [103]:

$$C = G \cdot V \cdot b \quad (2.10)$$

gdzie:

C – maksymalne natężenie pieszych [P/s],

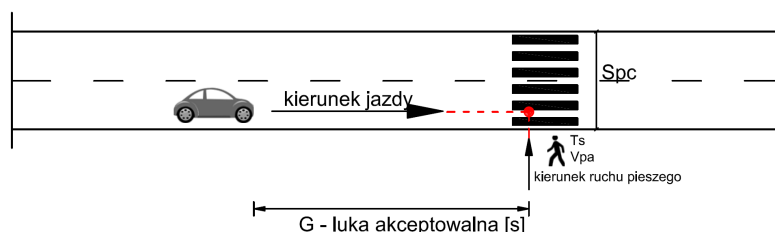
G – gęstość pieszych [P/m²],

V – prędkość pieszych [m/s],

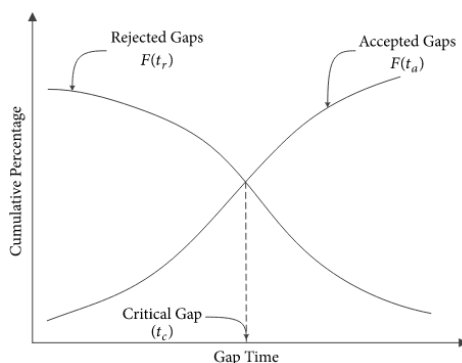
b – szerokość ciągu pieszego [m].

2.5.2.1. Luki czasowe wykorzystywane przez pieszych

Jednym z podstawowych elementów koncepcji obliczania przepustowości przejść dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej, jest uwzględnienie faktu, że piesi przechodzą przez jezdnię, wykorzystując luki czasowe w potoku pojazdów. Jest to czas, jaki jest w stanie zaakceptować pieszy na podstawie własnego osądu, w zależności od odległości między nadjeżdżającym pojazdem, a swoją lokalizacją, aby bezpiecznie przejść przez jezdnię. Czas ten nazywany jest luką akceptowalną i został przedstawiony na rys.2.21 i rys.2.22. Akceptowalny odstęp czasu jest uzależniony od indywidualnych cech behawioralnych pieszego, parametrów związanych z ruchem pojazdu i jego typem oraz dystansem drogi, jaki musi pokonać pieszy [19],[175],[80]. Luki akceptowalne są też jednym z ważniejszych parametrów związanych z bezpieczeństwem niechronionych użytkowników dróg. Czas krytyczny (luka krytyczna) to czas wyrażony w sekundach, poniżej którego pieszy nie podejmie próby przejścia na drugą stronę jezdni [19]. Znajduje się na przecięciu krzywej luk akceptowanych (accepted gaps) i luk odrzuconych (rejected gaps) – rys.2.22.



Rys.2.21 Przykładowy schemat przejścia wraz z oznaczeniami



Rys.2.22 Luka krytyczna [208] [15]

Czas akceptowalny wyznaczamy jako zależność długości przejścia dla pieszych, prędkości pieszego i czasu dojazdu pieszego do potencjalnego punktu kolizji

[30]

$$G = \frac{Spc}{Vps} + Ts \quad (2.11)$$

gdzie:

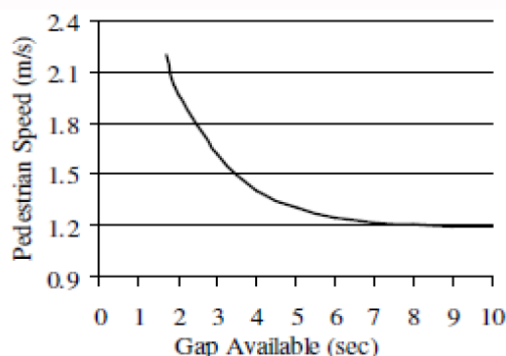
G - luka akceptowalna [s]

Vps – średnia prędkość pieszego [m/s]

Ts – czas dojazdu pieszego do potencjalnego punktu kolizji [s]

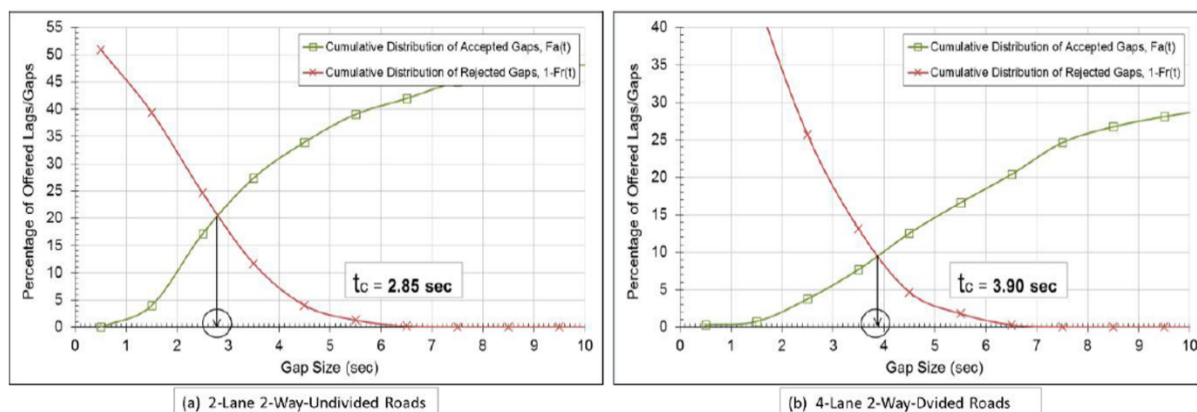
Spc – długość przejścia [m]

Zależność między prędkością pieszych, a odstępami akceptowalnymi dla przejścia o długości 5.5m, przedstawiono na rys.2.23.



Rys.2.23 Zależność między prędkością pieszych, a odstępami akceptowalnymi dla przejścia o długości 5.5m, na podstawie Moore 1953 [80].

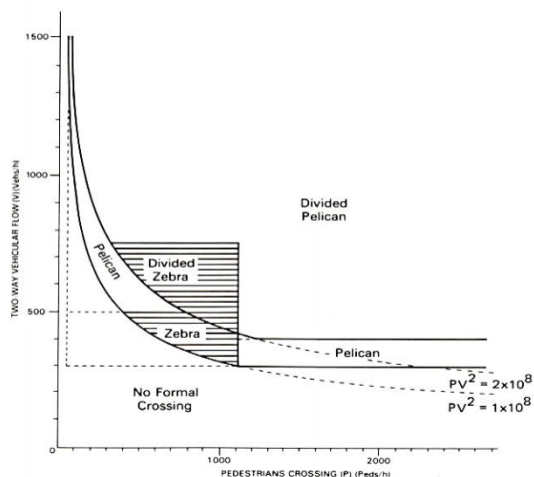
Na rys.2.24 przedstawiono wyniki badań terenowych luk krytycznych dla różnych przekrojów ulicy. Na podstawie badań stwierdzono, że im większa liczba pasów ruchu, które musi pokonać pieszy, tym większa jest luka krytyczna [106].



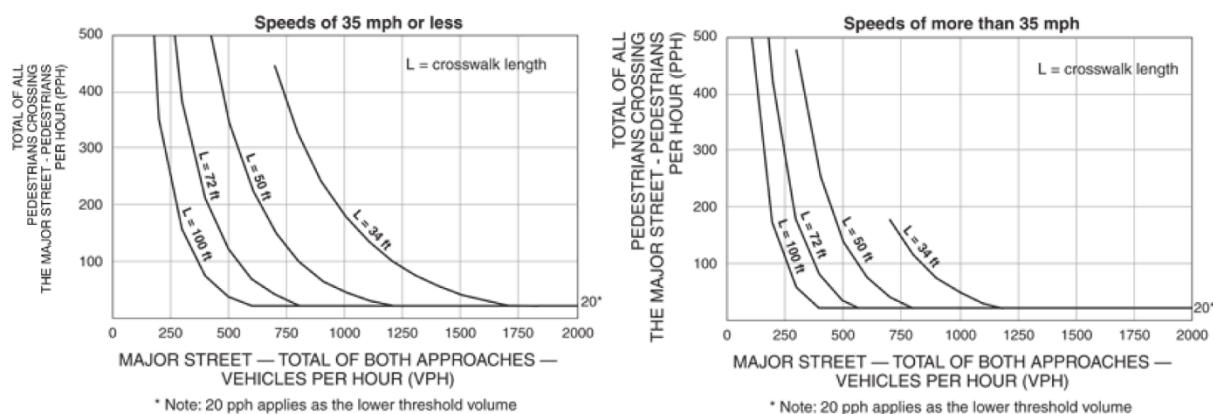
Rys.2.24 Luka krytyczna na podstawie badań terenowych [106]

Pomiędzy ruchem pieszych, a ruchem pojazdów występują zależności. Długość przejścia dla pieszych to suma liczby pasów o określonej szerokości, która wpływa na czas przebywania pieszego na przejściu. W tym czasie pieszy jest narażony na konflikty ruchowe z pojazdami. Długość przejścia skraca się, jeżeli na przejściu występują azyl dla pieszych. Jak wykazały badania Kim'a [128], wraz ze wzrostem długości przejścia i wzrostem natężenia ruchu pojazdów, maleje przepustowość przejścia. W odniesieniu do pojazdów, przepustowość spada o około 20% dla szerokości pasów ruchu 2.5 m, w odniesieniu do 3,5 m [81]. W badaniach brytyjskich [27],[107],[106] przedstawiono zależność natężenia pojazdów od natężenia pieszych. Wraz ze wzrostem natężenia pieszych maleje przepustowość ulicy (rys.2.25). W badaniach amerykańskich [35],[62] przeanalizowano przepustowość przejścia dla pieszych, która maleje wraz ze wzrostem natężenia pojazdów (rys.2.26).

Gdy piesi mają utrudnione przejście przez przejście dla pieszych, zaczynają się grupować. Analizując przepustowość przejścia dla pieszych należy uwzględnić priorytet użytkowników [10], o którym decydują przepisy prawa. Ta grupa użytkowników, która jest uprzywilejowana, pieszy lub pojazd, zdecydowanie łatwiej przekracza obszar przejścia dla pieszych.



Rys.2.25 Zależność natężenia pojazdów od natężenia pieszych [27], [107], [106]



Rys.2.26 Zależność natężenia pieszych od natężenia pojazdów [35], [62]

2.5.3. Ocena warunków ruchu na przejściach dla pieszych

2.5.3.1. Metody oceny warunków ruchu pieszych

Warunki ruchu pieszych są to warunki, w jakich odbywa się ich przemieszczanie i odzwierciedlają, jakość ruchu. Do oceny warunków ruchu służą miary, jakości podróży wyrażone przez swobodę przemieszczania tj. poziom swobody ruchu, uwzględniający płynność, komfort i sprawność przemieszczania pieszych. Na warunki ruchu wpływają czynniki ruchowe, drogowe i behawioralne, które mają szerokie zastosowanie w projektowaniu, studiach transportowych, organizacji ruchu i analizach ekonomicznych. Służą także do planowania strategii działań dla zarządców dróg, mogą one być określane, jako bardzo dobre, średnie albo złe. Bardzo dobre warunki ruchu są wtedy, kiedy pieszy nie napotyka ograniczeń, posiadając pełną swobodę w przemieszczaniu się. Warunki średnie, gdy jego przemieszczanie wymaga większej uwagi, napotyka ograniczenia, ale nadal się przemieszcza w założonym kierunku. Warunki złe, gdy przemieszczanie jest bardzo ograniczone albo wręcz niemożliwe do pokonania określonego dystansu. Poprzez ograniczenia można rozumieć przeszkody np. natężenie innych użytkowników ruchu drogowego na przejściach dla pieszych lub innych urządzeniach służących pieszym do przemieszczania, zmiana przekroju drogi dla pieszych, stan nawierzchni drogi pieszej. Miarami warunków ruchu są, prędkość, z jaką przemieszczają się piesi, natężenie ruchu pieszych, gęstość potoku pieszych oraz stopień wykorzystania przepustowości [119], [30].

Warunki ruchu pojazdów tak jak w przypadku pieszych, mogą one być określane, jako bardzo dobre, średnie albo złe. Warunki bardzo dobre są wtedy, kiedy jazda jest swobodna, a pojazd porusza się z pożądaną prędkością. Warunki ruchu pojazdów definiowane są przez straty czasu, poziom swobody ruchu, uwzględniający płynność, komfort i sprawność ruchu. Miarami warunków ruchu są,

prędkość przejazdu, natężenie ruchu, gęstość potoku pojazdu oraz stopień wykorzystania przepustowości

Jedne z pierwsze badań dotyczące funkcjonowania skrzyżowań i analizy warunków ruchu prowadzone były w latach pięćdziesiątych XX wieku, a ich wyniki posłużyły do opracowania podręcznika HCM (Highway Capacity Manual) w Stanach Zjednoczonych. Podręcznik ten stanowił zbiór definicji oraz zasad obliczania przepustowości i oceny poziomu obsługi LOS (Level of Service) [20],[121],[222],[155]. Zaprezentowany w metodzie poziom swobody ruchu w odniesieniu do pieszych użytkowników infrastruktury wskazuje stała wartość wykorzystania przestrzeni, łatwość poruszania się i komfort użytkowników. W opracowaniu wskazano czynniki wpływające na warunki ruchu tj. prędkość przemieszczania się pieszych, natężenie, gęstość ruchu pieszego liczona, jako średnia liczba pieszych przypadających na metr kwadratowy urządzenia dla ruchu pieszych. [167],[168]. Wskaźnik LOS (PSR poziom swobody ruchu) opiera się na skali ocen stosowanych w Amerykańskich szkołach GPA (Grade Point Average) [59], w której „A” najwyższą ocenę, a „F” odpowiada braku zaliczenia. LOS jest parametrem, określającym komfort oraz swobodę poruszania się i wyboru prędkości przez pieszych, a także stopień wzajemnego wpływu potoków pieszych na siebie. Zaprezentowano kryteria LOS w zależności od skrzyżowania bez lub z sygnalizacją świetlną. Warto nadmienić, że inne kryteria wartości LOS przyjmuje się dla chodników czy schodów. Kryteria LOS z instrukcji HCM, posiadają swoje odpowiedniki w innych krajach i zostały dostosowane do lokalnych warunków ruchowych pieszych. Jednym z przykładów są niemieckie wytyczne HBS [64], w których zaadaptowano skalę oceny od A do F. Porównanie kryteriów LOS zostało przedstawione w tab.2.

2.5.3.2. Miary oceny warunków ruchu pieszych

Do ustalania klas warunków ruchu stosuje się wiele miar, z których najczęściej stosuje się: gęstość potoku pieszych k , powierzchnię dostępną dla pieszego P_d , natężenie krytyczne pieszych N oraz straty czasu pieszego D

Gęstości k szacuje się na podstawie zależności [30], według wzoru (2.12):

$$k = \frac{N^{walk}}{A_a^{net}} \quad (2.12)$$

gdzie:

k – gęstość potoku pieszych [pieszych/m²],

N^{walk} – liczba pieszych na analizowanym obszarze

A_a^{net} – efektywna powierzchnia analizowanego obszaru a.

Powierzchnia dostępna dla pieszego P_d [m²/pieszych], obliczana, jako odwrotność gęstości k [66].

$$P_d = \frac{1}{k} \quad (2.13)$$

Natężenie krytyczne $Q_{p,x}$ odpowiadające natężeniu na przyjętym poziomie X , obliczane na podstawie zależności [222] (2.14):

$$Q_{p,x} = Q_{p,max} \cdot X_x \quad (2.14)$$

gdzie:

$Q_{p,x}$ - natężenie krytyczne dla poziomu x [P/h; P/min],

$Q_{p,max}$ - natężenie ruchu pieszych, maksymalne [P/h; P/min],

X_x - stopień wykorzystania przepustowości na poziomie x warunków ruchu.

Gęstość pieszych, powierzchnię dostępną dla pieszego oraz stopień wykorzystania przepustowości lub natężenie krytyczne wykorzystuje się do oceny warunków ruchu na chodnikach i przejściach dla pieszych bez sygnalizacji. Przykładową klasyfikację warunków ruchu przedstawiono w tab.2 Natomiast straty czasu wykorzystuje się do oceny warunków ruchu na przejściach dla pieszych z sygnalizacją świetlną.

Tab.2.3 Wartości graniczne miar warunków ruchu dla poszczególnych klas warunków [66]

Warunki ruchu pieszego		Powierzchnia dostępna dla pieszego	Natężenie krytyczne ruchu pieszego	
Klasa	PSR	[m ² /P]	[P/h/m]	[P/min/m]
Bardzo dobre	A	>5,6	< 960	<16
Dobre	B	3,7 - 5,6	960 - 1380	16-23
Średnie	C	2,2 - 3,7	1380-1980	23-33
Umiarkowane	D	1,4 - 2,2	1980-2940	33-49
Złe	E	0,75 - 1,2	2940-4500	49-75
Bardzo złe	F	< 0,75	>4500	>75

Straty czasu pieszego na przejściach dla pieszych określa się, jako czas oczekiwania pieszego na możliwość przejścia przed wejściem na jezdnię wyrażone w sekundach dla przejść dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej i z sygnalizacją świetlną.

W przypadku przejść dla pieszych bez sygnalizacji straty czasu zależą od wielkości ruchu pojazdów na jezdni, przez które poprowadzono przejście dla, długości przejścia, rodzaju urządzeń usprawniających przechodzenie. Jednym z najstarszych modeli stosowanych do szacowania strat czasu pieszego był model Adamsa z 1936 roku [39]. We wzorze uwzględniał lukę β między pojazdami o natężeniu q , jaką potrzebuje pieszy, aby przejść na drugą stronę jezdni.

$$D = \frac{e^{q\beta} - 1}{q} - \beta \quad (2.14)$$

W roku 1981 Roddin [194], przedstawił model strat czasu opisany wzorem (2.15), którym uzależnił straty czasu pieszego D od natężenia ruchu pojazdów w dwóch kierunkach Q . W 1996 roku Virkler [63] potwierdził ten model.

$$D = 6.7 \cdot 10^{-4} \cdot (Qv - 0.3) \quad (2.15)$$

gdzie:

D - średnia strata czasu pieszego [s],

Qv – natężenie pojazdów w obu kierunkach, jeżeli jest mniejsze niż 1600 [poj./h].

W podręczniku HCM [30] przyjęto model opisujący straty czasu pieszego d_p od natężenia pojazdów V i luk krytycznych t , przedstawiony wzorem (2.16):

$$d_p = \frac{1}{Qv} (e^{Qvt_G} - Qvt_G - 1) \quad (2.16)$$

gdzie:

d_p – średnia strata czasu pieszego [s],

Qv – natężenie pojazdów przejeżdżających przez przejście [poj./s],

t_G – luka krytyczna [s], $t_G = t_c + 2(N_p - 1)$, gdzie

t_c – luka krytyczna dla pojedynczego pieszego [s].

Igazvölgyi [63], przedstawiła wykładniczy model średnich strat czasu pieszego na przejściu dla pieszych, na ulicy o przekroju 1x2, uzależniając je od wielkości natężenia ruchu pojazdów Qv i występowania lub nie azylu dla pieszych według wzoru (2.18):

$$y = A \cdot e^{(0,0018Qv)} \quad (2.18)$$

gdzie:

y - średnie straty czasu pieszego [s],

A – współczynniki uwzględniające występowanie azylu dla pieszych,

Qv – natężenie pojazdów [poj./h/przekrój].

W przypadku przejść dla pieszych z sygnalizacją straty czasu zależą głównie od parametrów programów sygnalizacji świetlnej czasu trwania cyklu i czasu zielonego dla pieszych. Do szacowania strat czasu pieszego na przejściach dla pieszych z sygnalizacją świetlną [30] najczęściej stosuje się wzór (2.19):

$$d_p = \frac{0.5(c-g)^2}{c} \quad (2.19)$$

gdzie:

d_p – średnia strata czasu pieszego [s],

g – efektywny sygnał zielony dla pieszych na przejściu [s],
C – długość cyklu świateł na przejściu dla pieszych [s].

W tab.2 zaprezentowano kryteria LOS dla pojazdu w zależności od skrzyżowania bez lub z sygnalizacją świetlną.

Tab.2.4 Kryteria LOS dla pieszych w zależności strat czasu, gęstości i rodzaju skrzyżowania [222], [121],[64]

LOS	Starty czasu pieszego [s/P]		Gęstość pieszych [P/m ²]	
	HCM - bez sygnalizacji świetlnej [30]	HCM -z sygnalizacją świetlną [30]	HBS	Fruin
A	< 5	< 10	< 0.10	< 0.18
B	≥ 5-10	≥ 10-20	0.10-0.25	0.18-0.27
C	> 10-20	> 20-30	0.25- 0.40	0.27 – 0.45
D	> 20-30	> 30-40	0.40 – 0.70	0.45 – 0.71
E	> 30-45	> 40-60	0.70 – 1.80	0.71 – 1.33
F	> 45	> 60	> 1.80	> 1.33

2.5.3.3. Wpływ ruchu pieszego na ruch pojazdów w obszarze przejścia

Przejście dla pieszych jest miejscem gdzie dochodzi do interakcji między ruchem pieszym, a ruchem pojazdów, w wyniku czego każdy z użytkowników wpływa na siebie. Tak jak w przypadku pieszych, jedną z miar oceny warunków ruchu są straty czasu pojazdu określane, jako czas oczekiwania na możliwość przejechania przez pojazd obszaru przejścia dla pieszych, tak, aby pieszy w sposób bezpieczny mógł je pokonać. Starty czasu wyrażone są w jednostce czasu, najczęściej w sekundach. Igazvölgyi [63], przedstawiła wykładniczy model średnich strat czasu pojazdów w zależności od natężenia pieszych, na ulicy o przekroju 1x2 według wzoru (2.20).

$$y=B \cdot e^{(0,0019Q_v)} \quad (2.20)$$

gdzie:

Q_v – natężenie pojazdów [P/h/przekrój].

W tab.2 zaprezentowano kryteria LOS dla pojazdu w zależności od skrzyżowania bez lub z sygnalizacją świetlną.

Tab.2.5 Zestawienie granicznych wartości poziomów swobody ruchu LOS mierzone stratami czasu pojazdów w zależności od rodzaju przejścia dla pieszych w metodzie HCM [30].

LOS	Starty czasu przypadające na pojazd [s/ poj.] [30]	
	HCM - bez sygnalizacji świetlnej	HCM -z sygnalizacją świetlną
A	0-10	≤ 10
B	≥ 10-15	> 10-20
C	> 15-25	> 20-35
D	> 25-35	> 35-55
E	> 35-50	> 55-80
F	> 50	> 80

2.6. Sposoby doboru urządzeń i działań w obszarze przejść dla pieszych

Zagrożenie pieszych użytkowników drogi w Polsce jest bardzo duże, przez co kraj znajduje się wysoko w statystykach europejskich pod względem liczby pieszych ofiar śmiertelnych. Zwiększenie ochrony pieszych powinno, zatem stać się priorytetem. Jednak w Polsce nie prowadzi się systematycznych badań zagrożeń pieszych uczestników ruchu drogowego na obszarach miejskich i zamiejskich, co uniemożliwia wykonywanie ocen podejmowanych działań i utrudnia podejmowanie

trafnych decyzji dotyczących stosowania środków poprawy bezpieczeństwa pieszego w ruchu drogowym.

Na podstawie analizy literatury zidentyfikowano wdrażanie dobrych praktyk, które przyniosły pozytywne rezultaty w zakresie poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego. Do tych działań należy m.in. zarządzanie prędkością pojazdów poprzez jej obniżenie na drogach, w tym wprowadzanie stref 30 [km/h], stref zamieszania lub stref ruchu współdzielonego (shared-space) z limitem prędkości do 20 [km/h], które przyczyniły się m.in.:

- w Szwajcarii do redukcji liczby wypadków o 15%, ciężkości wypadków o 27 % [140],
- w Wielkiej Brytanii na przykładzie miasta Londyn odnotowano zmniejszenie liczby ofiar wypadków drogowych o ok.42 %, natomiast w hrabstwie Lancashire wprowadzono ogólne ograniczenie prędkości do 30km/h we wszystkich obszarach mieszkalnych co zmniejszyło ogólną liczbę rannych i ofiar śmiertelnych [78],[236].

W Australii wykazano, że wymuszenie zmniejszenia prędkości pojazdów przed przejściem dla pieszych poprzez stosowanie progów zwalniających lub przejść wyniesionych może zredukować liczbę wypadków z pieszymi do 94% [25]. Projektowanie ulic z wykorzystaniem elementów uspokojenia ruchu, poprawy widoczności pieszych np. skrzyżowania typu ronda, redukujące liczbę ciężko rannych o 70-90 % [54].

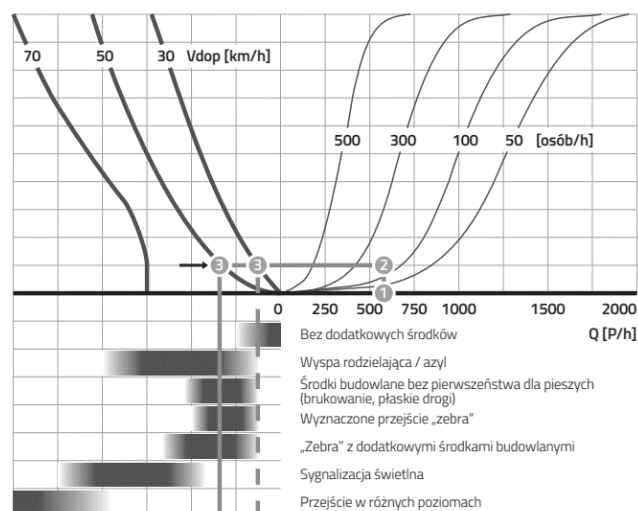
Edukacja wprowadzana już na etapie wczesnoszkolnym w zakresie bezpieczeństwa ruchu drogowego w tym przekraczania jezdni zmniejszyła liczbę hospitalizowanych w Nowej Zelandii młodzież w wieku od 15 do 19 lat o 23 % [13].

W wyniku prowadzonego przeglądu literatury zidentyfikowano najczęściej stosowane procedury doboru urządzeń dla pieszych. Przy wyborze rodzaju urządzenia dla pieszych bierze się najczęściej pod uwagę następujące kryteria: bezpieczeństwo ruchu pieszych i pojazdów, sprawność przejścia liczoną przepustowością przejścia dla pieszych i przepustowością pojazdów na jezdni w obszarze przejścia, warunki ruchu pieszych i pojazdów oraz koszty drogowe i koszty użytkowników [73]. W niektórych analizach bierze się także pod uwagę wpływ funkcjonowania wybranych urządzeń dla pieszych na środowisko oraz wielkość energii zużytej przez pieszych do pokonania drogi dla pieszych z uwzględnieniem ocenianego urządzenia. Ocenia się także efektywność ekonomiczną i możliwości wykonania zaproponowanego rozwiązania.

Procedura wyboru stosowania środków ochrony i informacji o pieszych stosowana w Nowej Zelandii składa się z dwóch etapów [159]:

1. etap pierwszy - określa się sposób, w jaki pieszy uczestnik ruchu jest zagrożony pod względem bezpieczeństwa z podziałem na przekrój drogi, występowanie pasów dzielących, parkowanie i dopuszczalną prędkość pojazdów na drodze. Po zidentyfikowaniu zagrożenia wybiera się rodzaj urządzenia ochrony pieszych na przejściu z podziałem na środki fizyczne usprawniające, środki regulujące ruch, środki separujące konfliktowe potoki ruchu. Każdy rodzaj urządzenia ma określoną zasadność stosowania w zależności od zagrożenia pieszych.
2. etap drugi – szczegółowej analizie poddawane jest urządzenie wybrane w pierwszym etapie w czterech krokach:
 - a) poprawa dostępności pieszych i warunki ich poruszania się,
 - b) poprawa bezpieczeństwa pieszych,
 - c) uwzględnienie indywidualnych wymagań dla dzieci i osób niepełnosprawnych,
 - d) integracja i priorytety dla ruchu pieszego w zarządzaniu ruchem na sieci ulic.

Metoda stosowana w Niemczech [60],[38] uzależnia dobór urządzenia dla pieszych od natężenia pieszych, pojazdów oraz dopuszczalnej prędkości dla pojazdów w miejscu planowanego przejścia. Uwzględnia się także rodzaj przekroju poprzecznego drogi, zagospodarowanie otoczenia, występowanie przystanków transportu zbiorowego, widoczność oraz rozpoznawalność miejsc przekroczenia jedni przez pieszego (rys.2.27).



Rys.2.27 Schemat doboru typu przejścia dla pieszych na obszarach miejskich - Niemcy [10],[112].

2.7. Przegląd wybranych projektów badawczych dotyczących ruchu pieszych

Na przestrzeni lat realizowane były liczne projekty badawcze dedykowane pieszym uczestnikom ruchu drogowego. Poniżej przedstawiono wybrane projekty, w których uczestniczyła autorka Rozprawy Doktorskiej oraz projekty innych badaczy, które poświęcone były tematyce pieszych uczestników ruchu.

W projekcie ZEUS [42], realizowanym na Politechnice Gdańskiej, określono, że dla obszarów miejskich głównym miejscem zagrożenia bezpieczeństwa w ruchu drogowym pieszych uczestników ruchu, są przejścia dla pieszych. Przeanalizowano, że na liczbę wypadków z udziałem pieszych uczestników ruchu wpływ mają następujące zmienne [127]:

- natężenie ruchu kołowego i pieszego (im większa liczba pojazdów i pieszych tym więcej konfliktów między tymi uczestnikami ruchu),
- stosunek natężenia ruchu kołowego na drogach podrzędnych do natężenia na drogach głównych (liczba wypadków rośnie proporcjonalnie do wielkości tego stosunku),
- liczba pasów ruchu do przejścia przez pieszych (im większa szerokości jezdni do przejścia przez pieszych tym większa liczba potencjalnych konfliktów).

Prowadzono badania, realizowane na zlecenie Krajowej Rady Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego [133], których celem było opracowanie metodologii systematycznych badań zachowań pieszych i relacji pieszy-kierowca, które pozwolą na wdrożenie działań zwiększających atrakcyjność i bezpieczeństwo ruchu pieszego. W projekcie określono m.in. sposób wyboru miejsc pomiarowych, metodę pomiaru, metodę określania obszaru dobrej widoczności w obszarze przejść dla pieszych w Polsce. Zbadano i wyodrębniono najważniejsze czynniki mające wpływ na bezpieczeństwo użytkowników tj. prędkość, natężenie, konflikty ruchowe, widoczność użytkowników, urządzenia w otoczeniu przejść dla pieszych np. progi zwalniające. Badano i analizowano zachowania niebezpieczne oraz konflikty ruchowe [112]. Celem pracy było zaprezentowanie problemu bezpieczeństwa pieszych w Polsce. Przedstawiono metody identyfikacji zagrożeń i najbardziej istotnych problemów do rozwiązania. W pracy zebrano i przedstawiono zasady stosowania urządzeń ochrony pieszych. Wykazano także, że oświetlenie przejścia dla pieszych [221] i określenie widzialności pieszego ma bardzo duży wpływ na jego bezpieczeństwo. Wyniki tych prac znalazły zastosowanie w wytycznych oświetlenia przejść dla pieszych [118], gdzie przedstawiono założenia dotyczące wyboru rozwiązań i utrzymania oświetlenia przejść dla pieszych.

W badaniach zrealizowanych w projekcie Civitas, w ramach 6 Programu Ramowego UE, przeprowadzono wywiady ankietowe z użytkownikami urządzeń dla pieszych, które pozwoliły uzyskać informację, w jaki sposób piesi przemieszczają się po mieście Gdynia, czy wykorzystują też inne środki transportu, jak długie są to podróże, jaki jest ich cel. Badania ankietowe zostały przeprowadzone w 15 punktach pomiarowych w Gdyni, z których uzyskano 2900 wywiadów ankietowych. Tak zgromadzone

dane dotyczące podróży pieszych, pozwoliły na uzyskanie rozkładu przestrzennego tej gałęzi transportu pomiędzy wszystkimi rejonami komunikacyjnymi analizowanego obszaru

Piesi przemieszczający się po chodnikach, bardzo często spotykają się z niedogodnościami wynikającymi ze stanem nawierzchni, zwężeniami chodników, przeszkodami na nich ustawionymi jak słupki, reklamy czy kosze na śmieci, parkowaniem na chodnikach. Wszystkie te niedogodności mają wpływ bezpośredni lub pośredni na ich bezpieczeństwo i komfort przemieszczania się. Szczególnie narażeni są piesi z niepełnosprawnością ruchową i niewidomi. W celu zobrazowania problemu wytypowano dwa obszary w Gdyni, które zostały poddane szczegółowej analizie [51]. Na podstawie wykonanej inwentaryzacji stanu technicznego chodników otrzymano dane, dzięki którym możliwe było dokonanie analizy zagrożeń wraz z ich klasyfikacją na wybranych ulicach.

Na zlecenie Ministra infrastruktury prowadzono prace w ramach Konsorcjum z udziałem zespołu badawczego Politechniki Gdańskiej, których efektem są projekty wytycznych projektowania infrastruktury dla pieszych [66]. Na potrzeby tych prac, poszerzono niektóre elementy rozprawy doktorskiej autorki. Wykorzystano między innymi wcześniej zrealizowane badania terenowe wraz z badaniami symulacyjnymi dla wybranych przejść dla pieszych. Do najważniejszych celów wytycznych należało ujednoczenie zasad planowania, projektowania, realizacji, odbioru i utrzymania urządzeń dla ruchu pieszego, osiągnięcie wysokiej jakości projektów i realizacji urządzeń dla pieszych, podniesienie poziomu bezpieczeństwa niechronionych użytkowników ruchu w miejscach kolizji z ruchem kołowym oraz dostarczenie narzędzia ułatwiającego podejmowanie optymalnych decyzji dotyczących wyboru urządzeń dla pieszych.

W Polsce i na Świecie stosuje się metody i narzędzia, które mają wpływ na bezpieczeństwo użytkowników dróg. Mają one za zadanie zmniejszyć przyczyny i ciężkość wypadków użytkowników dróg, a docelowo dążyć do ich wyeliminowania. Wybór odpowiedniej metody, czy narzędzia zależy od przyczyny powstania wypadku. Konieczne jest, zatem zidentyfikowanie przyczyny i czynników, które wpływają na bezpieczeństwo ruchu drogowego a następnie do nich dobrać odpowiednie narzędzia i metody, które będą im przeciwdziałały. Możemy wyodrębnić metody i narzędzia tj. przepisy prawne, strategie analizy i ekspertyzy, narzędzia zarządzania bezpieczeństwem ruchu drogowego oraz przewodniki dobrej praktyki. Ich zasięg oddziaływania może być krajowy, regionalny oraz lokalny. Przykładem narzędzia zarządzania bezpieczeństwem ruchu drogowego o szerokim zasięgu jest System Wspomagania Decyzji Bezpieczeństwa Drogowego dla polityków i zarządców dróg poprzez wdrożenie najbardziej odpowiednich strategii, środków, aby zmniejszyć liczbę ofiar na drogach (SafeCube 2015-2018) [224],[172]. Jest to system wytycznych dotyczących określenia liczby poważnych obrażeń na drogach, który może być przyjęty, jako dodatkowy wskaźnik bezpieczeństwa na drogach. W projekcie ustalono najważniejsze czynniki ryzyka wpływające na bezpieczeństwo ruchu drogowego i zostały one sklasyfikowane, jako ryzykowne, prawdopodobnie ryzykowne oraz niejasne np. natężenie ruchu, liczba pasów, słaba widoczność, warunki atmosferyczne, parametry geometryczne.

W innych badaniach pod kierownictwem Profesora Olszewskiego MOBIS (2012-2015) [167], wykorzystano wideodetekcję. Zauważono mniejszą skuteczność w detekcji pieszych szczególnie przy niesprzyjających warunkach pogodowych i oświetleniowych. Kolejnym projektem pod kierownictwem Profesora Olszewskiego jest InDev (2015-2018) [165], który koncentruje się na poznaniu przyczyny wypadku, w których wykorzystuje się najnowszą technologię automatycznej analizy obrazu do oceny sytuacji konfliktowych między pieszymi, a pojazdami na przejściu dla pieszych. Efektami tych badań jest metoda stosowania zastępczych wskaźników bezpieczeństwa z naciskiem na ryzyko wypadku, aplikacja mobilna na telefony dla pieszych i rowerzystów oraz narzędzie do automatycznego wykrywania konfliktów drogowych oraz metoda kalkulacji kosztów wypadków [171].

Badania ankietowe są dość powszechne i stosuje się je także wśród kierowców. W jednym z projektów (SARTRE 1996, 2002) [26] badano i monitorowano postawy europejskich użytkowników dróg, a także ich deklarowanych zachowań i opinii na temat zagrożeń występujących w ruchu drogowym. Sprawdzano m.in. zachowania związane z jazdą z niebezpieczną prędkością, ustępowanie pierwszeństwa pieszym, używanie telefonów komórkowych podczas podróży. W czwartej i ostatniej edycji programu (SARTRE-4), badaniami zostali objęci m.in. piesi, rowerzyści. Za pomocą 33 pytań sprawdzano ich zachowania i postawy. Badanie te wyłoniło następujące trzy grupy pieszych o „pozytywnych zachowaniach i postawach”, „negatywnych zachowaniach i postawach” i „pozytywne

zachowania oraz mieszane postawy”. Pytania w kwestionariuszu miały za zadanie wyłonić podstawowe informacje o respondentach takie jak: płeć, wiek, zawód, stan cywilny, wykształcenie oraz miejsce zamieszkania. Dodatkowo podczas badań zbierano informacje dotyczące motywacji podróży, interakcji typu pieszy-kierowca oraz związanych z zachowaniem pieszych tj: przechodzenia na czerwonym sygnale, przechodzenie w miejscu niewyznaczonym, słuchanie muzyki rozmowa telefoniczna, stosowanie odblaskowych ubrań.

Wraz z dostępem do nowych technologii, otworzyły się nowe możliwości pozyskiwania informacji poprzez zastosowanie innych sposobów badawczych tj. symulator jazdy [221]. Za jego pomocą możliwe jest odtworzenie sieci ulicznej i badanie reakcji kierowców na pieszego wchodzącego z prawej strony w symulatorze jazdy samochodem. Badanie wykonano w zainscenizowanej sytuacji zagrożenia polegającej na wtargnięciu pieszego na jezdnię pieszego, po której porusza się pojazd. Autorzy badań wykazali pewne mankamenty takiego podejścia z uwagi na np. "sztuczność sytuacji" czy też animowany obraz, jedna widząc potencjał w możliwość testowania zachowań kierowców w sytuacji niemożliwej do wykonania w warunkach rzeczywistych z uwagi na zbyt duże ryzyko wypadku.

2.8. Wnioski i rekomendacje

Wiedza na temat przepływu pieszych oraz metod oceny warunków oraz bezpieczeństwa i komfortu przemieszczania się pieszych jest ważna przy planowaniu, projektowaniu geometrycznym i utrzymaniu obiektów infrastruktury transportowej. Zainteresowanie modelowaniem przepływu potoków pieszych obejmuje systemy transportowe, wydarzenia sportowe, miejsca kultu, demonstracje polityczne, urządzenia ewakuacyjne, które różnią się rodzajem obiektu, charakterystyką i zachowaniami uczestników, ale mają także wspólne cechy, gdyż dotyczą pieszego. Wraz z rozwojem miast przepływ dużych potoków (tłumów) pieszych będzie zyskiwał na znaczeniu. Jednakże wiedza na temat przepływu potoków pieszych jest niewystarczająca i ustępuje wiedzy na temat ruchu i przewozów innych rodzajów transportu. Badania zachowań pieszych rozpoczęły się w latach sześćdziesiątych, kiedy badano przepływ pieszych w obszarach miejskich. Głównym celem tych wczesnych badań było opracowanie wytycznych dotyczących optymalnego projektowania infrastruktury dla pieszych (chodników, przejść dla pieszych). W międzyczasie badacze rozważyli różne aspekty przepływu pieszych. Badania te wzmocniono po przyjęciu idei nowego urbanizmu (początek XXI wieku) i uzupełnieniu Celów Globalnych Zrównoważonego Rozwoju (SDG) znacznie poprawiło sytuację pieszych uczestników ruchu w miastach. Konieczność zapewnienia bezpieczeństwa (cel 3.6) i dostępu do bezpiecznych, niedrogich, przystępnych i zrównoważonych systemów transportu, ze szczególnym uwzględnieniem potrzeb osób znajdujących się w trudnej sytuacji, kobiet, dzieci, osób niepełnosprawnych i osób starszych (cel 11.2) do roku 2030 zwróciło większą uwagę na problemy ruchu pieszych.

W ostatnich dziesięcioleciach naukowcy przeprowadzili wiele badań ruchu pieszego różnymi metodami empirycznymi, eksperymentami i symulacyjnymi. Wyniki badań często służyły do opracowania modeli ruchu pieszego. Do opisu zachowań pieszych stosuje się modele matematyczne na trzech poziomach dokładności modele makro, mezo i mikro. Modele makro stosowane są do opisu przepływu dużych potoków pieszych i skupiają się na ogólnych wzorcach przepływu na poziomie globalnym, podobnie jak stosowane w ruchu drogowym do opisu zależności pomiędzy natężeniem gęstością i prędkością przepływów potoków pieszych zastosowano zależność fundamentalną. Duża przejrzystość, łatwa interpretacja i szeroki zakres stosowania zarówno do opisu ruchu jednokierunkowego jak i dwukierunkowego powodują, że zależność fundamentalna jest wykorzystywana dość powszechnie w metodach wyznaczania przepustowości urządzeń dla pieszych i oceny warunków ruchu pieszego.

Przejścia dla pieszych są jednym z istotnych urządzeń usprawniających poruszanie się pieszych. Wielkość ruchu pieszych i pojazdów, sposób organizacji ruchu (z priorytetem lub bez priorytetu dla pieszych), konstrukcja i wyposażenie przejść dla pieszych wpływają istotnie na bezpieczeństwo i komfort pieszych oraz sprawność funkcjonowania przejść dla pieszych. Stąd w wielu krajach opracowano metody oceny warunków i bezpieczeństwa ruchu pieszych, a także metody szacowania

przepustowości ruchu pieszego i kołowego na przejściach dla pieszych. Te kategorie oceny służą, jako kryteria wyboru urządzeń dla pieszych.

W Polsce problemy pieszych użytkowników ruchu drogowego był traktowane drugoplanowo. Dopiero w ostatnich latach zaczęto dostrzegać ważność tego rodzaju transportu. Nie prowadzono szczegółowych badań zachowań pieszych i brakowało dobrych i wiarygodnych narzędzi do szacowania przepustowości, warunków ruchu pieszego i metod wyboru skutecznych i efektywnych urządzeń dla pieszych. Brakowało także wytycznych planowania i projektowania urządzeń dla pieszych. Zmiany zaczęły następować po transformacji ustrojowej i wstąpieniu Polski do UE.

Jednakże brak polskich badań spowodował, że przez wiele lat w Polsce korzystano z zagranicznych metod szacowania przepustowości urządzeń dla pieszych i metod oceny warunków ruchu (np. HCM), których nie weryfikowano dla warunków polskich. Konieczność powstania takiej polskiej metody wymaga przeprowadzenia badań empirycznych, a także poszukiwania modelu zależności fundamentalnej, który w najlepszy sposób będzie opisywał zależność między podstawowymi parametrami ruchu potoku pieszych, tj. natężeniem, prędkością i gęstością potoku pieszych. Brakuje także metod szacowania wpływu podstawowych czynników (np. poziom priorytetów dla pieszych, rodzaj i geometria przejścia, wielkość ruchu pojazdów, wielkość i struktura ruchu pieszych) na przepustowość i warunki ruchu pieszych na przejściach dla pieszych oraz przepustowości i warunków ruchu pojazdów na jezdniach ulic w obszarze przejść dla pieszych.

Zidentyfikowane problemy ruchu pieszego w Polsce na tle rozwiązań światowych pozwoliły na sformułowanie celów, założeń i zakresu realizacji niniejszej pracy.

3. CEL I ZAKRES PRACY BADAWCZEJ

3.1. Cele pracy

Wyniki studiów literatury przedstawione w rozdziale drugim oraz dotychczasowe badania własne, pozwoliły na zgłębienie zagadnień związanych z pieszymi uczestnikami ruchu oraz identyfikację problemów badawczych, które wymagają rozwiązania. Na tej podstawie zostały sformułowane cele główne, naukowe i praktyczne, które zostały zrealizowane w następujących rozdziałach pracy.

Celem głównym rozprawy doktorskiej jest identyfikacja najbardziej istotnych czynników wpływających na funkcjonowanie przejść dla pieszych oraz opracowanie modeli matematycznych zależności między podstawowymi parametrami ruchu na przejściach dla pieszych w obszarze miejskim. Cel główny został zrealizowany za pomocą celów naukowych i praktycznych.

Celami naukowymi rozprawy są:

1. Opracowanie charakterystyki ruchu pieszego i kołowego na przejściach dla pieszych w miastach na podstawie badań terenowych, ankietowych i symulacyjnych na wybranych przejściach dla pieszych;
2. Opracowanie matematycznych modeli fundamentalnej zależności pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu potoku pieszych natężeniem, prędkością i gęstością na wybranych przejściach dla pieszych w miastach w Polsce .
3. Badania wpływu wybranych czynników na sprawność i warunki ruchu na przejściach dla pieszych z wykorzystaniem opracowanych modeli.

Celami praktycznymi rozprawy są:

1. Wykonanie badań ruchu niezbędnych do opisanego charakterystyk ruchu pieszego i kołowego na wybranych przejściach dla pieszych w miastach.
2. Opracowanie metody szacowania przepustowości przejść dla pieszych w miastach z uwzględnieniem struktury kierunkowej potoku pieszych
3. Implementacja wyników badań wytycznych projektowania przejść dla pieszych w ramach Wzorców i Standardów rekomendowanych przez Ministra Infrastruktury.

3.2. Zakres pracy

W rozprawie doktorskiej, w rozdziale drugim, przedstawiono wyniki studiów literatury, a w rozdziale czwartym zaprezentowano wyniki badań ankietowych dotyczących zachowań użytkowników dróg oraz opinii ekspertów. Wyniki badań terenowych wybranych parametrów ruchu pieszych i pojazdów w obszarze miejskim, przedstawiono w rozdziale piątym. Pod pojęciem obszaru miejskiego rozumie się obszar o silnym zurbanizowaniu, o dużym zagęszczeniu mieszkańców utrzymujących się w większości z zajęć nierolniczych. Badania terenowe posłużyły do zbudowania modeli matematycznych opisujących rozkład prędkości ruchu pieszego w zależności od rodzaju przekroju ulicy oraz sposobu sterowania ruchem na przejściu dla pieszych (podrozdział 5.5), prędkości pojazdu na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych (podrozdział 5.6), badania zależności pomiędzy prędkością, gęstością i natężeniem ruchu pieszego (podrozdział 5.7). W dalszej części pracy (rozdział 6) poświęcono uwagę zagadnieniom związanym z budową modeli mikrosymulacyjnych ruchu pieszego na przejściach dla pieszych, w których zastosowano wcześniej opracowane modele matematyczne z rozkładu prędkości pieszych. W rozdziale siódmym, przedstawiono model zależności fundamentalnej, przedstawiono współczynnik podziału kierunkowego pieszych, zależność pomiędzy natężeniem ruchu pieszego i kołowego oraz analizę przepustowości, strat czasu pieszego i pojazdu. Finalnym efektem pracy jest metoda oceny funkcjonowania przejścia dla w obszarze miejskim, która została przedstawiona w rozdziale ósmym. Wnioski oraz kierunki dalszych prac przedstawiono w, rozdziale dziewiątym.

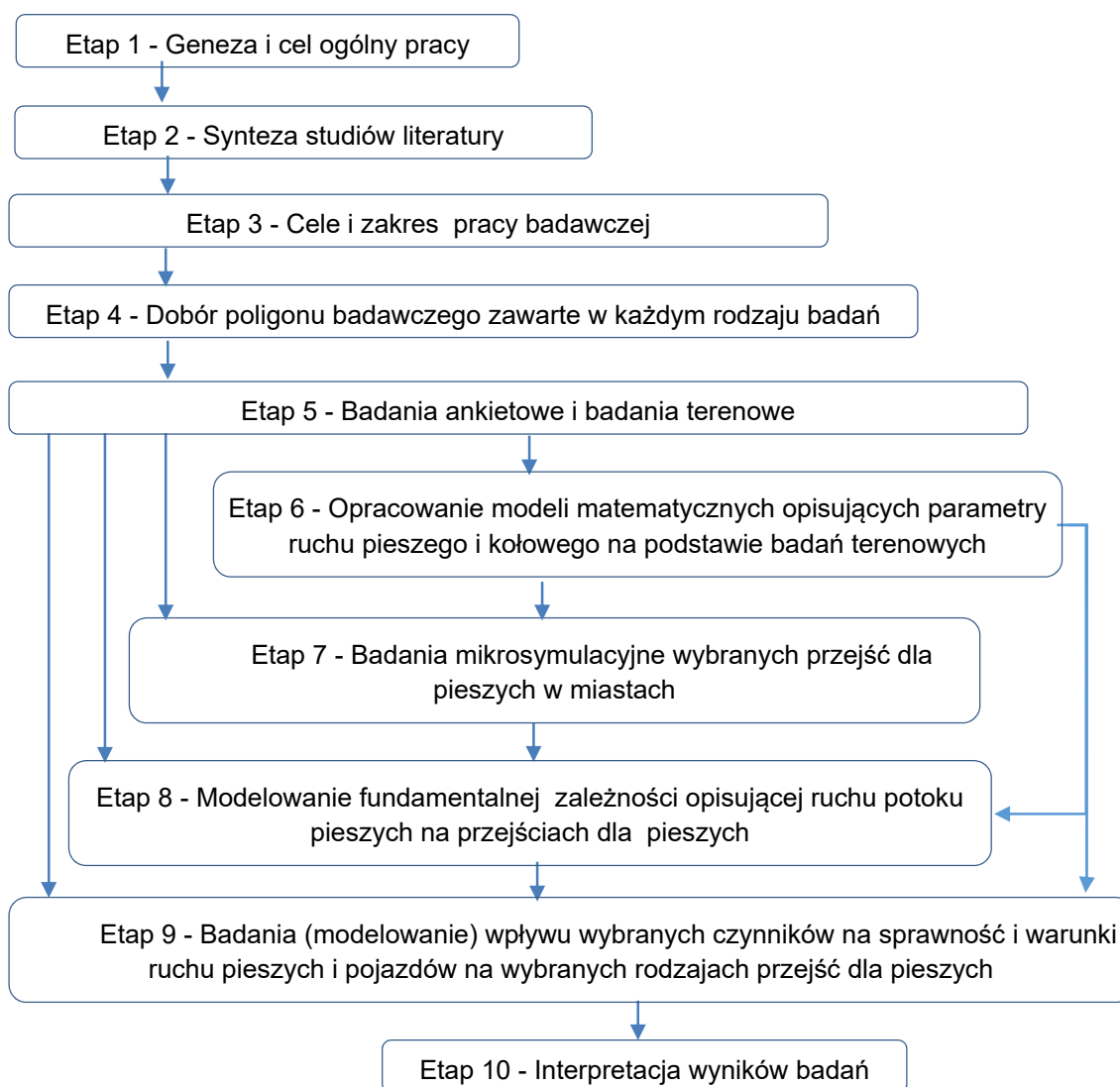
W zakres pracy wchodzi następujące badania:

- 1) przegląd literatury w zakresie niezbędnym do realizacji celów określonych w rozprawie doktorskiej,
- 2) wykonanie badań terenowych wraz z budową bazy danych i analizą wyników,
- 3) identyfikacja czynników wpływających na funkcjonowanie przejść dla pieszych w miastach,
- 4) opracowanie modeli matematycznych na podstawie badań terenowych,
- 5) opracowanie modeli mikrosymulacyjnych,

- 6) budowa modelu zależności fundamentalnej w ruchu pieszym,
- 7) opracowanie modeli matematycznych przepustowości urządzeń dla pieszych, współczynnik podziału kierunkowego pieszych, strat czasu pieszego i pojazdu.

3.3. Metodyka realizacji pracy

Metodyka postępowania prowadząca do zrealizowania celów przedstawionych w rozprawie doktorskiej, obejmuje dziesięć etapów i została przedstawiona na rys.3.1. Poszczególne etapy metodyki postępowania obejmują: studia literatury, badania wstępne, identyfikację problemów, przyjęcie celów i metodyki pracy, dobór poligonu badawczego, badania terenowe i ankietowe, opracowanie modeli matematycznych opisujących parametry ruchu pieszego i kołowego, identyfikację istotnych czynników wpływających na funkcjonowanie przejść dla pieszych w miastach, opracowanie modeli symulacyjnych wybranych przejść dla pieszych, badania symulacyjne funkcjonowania przejść dla pieszych, opracowanie modeli matematycznych przepustowości przejść dla pieszych i strat czasu oraz interpretację wyników badań.



Rys.3.1 Metodyka postępowania prowadząca do zrealizowania celów przedstawionych w rozprawie doktorskiej

Etap 1 - Geneza pracy

Wybór zagadnienia realizowanego w Rozprawie Doktorskiej był efektem udziału Autorki w projektach badawczych realizowanych w ramach Zespołu Naukowo-Badawczego Inżynierii Drogowej w Katedrze Inżynierii Transportowej, Politechniki Gdańskiej. Uczestnictwo w projektach, zaprezentowanych w rozdziale pierwszym, umożliwiło rozpoznanie problematyki transportu pieszego i dało początek do poszukiwania rozwiązań tej grupy użytkowników ruchu drogowego.

Etap 2 - Synteza studiów literatury

Przeprowadzono studia literatury obejmujące zagadnienia związane z badaniami w zakresie ruchu pieszego. Szczególną uwagę zwrócono na zagadnienia poświęcone zachowaniu kierowców w obrębie przejść dla pieszych, bezpieczeństwu ruchu pieszego, infrastrukturze ruchu pieszego, makro i mikroskopowym cechom ruchu pieszego, parametrom ruchu pieszego oraz zależnościom pomiędzy ruchem pieszym i kołowym. Synteza obecnego stanu wiedzy została przedstawiona w rozdziale drugim. Na podstawie studiów literatury, zidentyfikowano problemy i wyciągnięto wnioski, które w dalszej części pracy posłużyły do określenia celów i zakresu pracy badawczej

Etap 3 - Cele i zakres pracy badawczej

W rozdziale trzecim, przedstawiono cele główne, naukowe i praktyczne realizowane w rozprawie doktorskiej.

Etap 4 - Dobór poligonu badawczego

W etapie czwartym, przedstawiono dobór poligonu badawczego dla badań ankietowych i terenowych opisujących parametry ruchu pieszego i kołowego, których wyniki przedstawiono w etapie 5. Do realizacji badań ankietowych wytypowano przejścia dla pieszych zlokalizowane w miastach Gdynia, Gdańsk, Sopot, Pruszcz Gdański, Tczew, Kartuzy. Badania terenowe opisujące parametry ruchu pieszego i kołowego realizowano w trzech miastach Gdańsk, Gdynia i Warszawa. Lokalizacja poligonu badawczego nie była przypadkowa i wynikała z realizacji projektu „Badania skuteczności środków zarządzania prędkością” [112], w której autorka rozprawy doktorskiej brała udział oraz praktyk doktoranckich realizowanych w Centrum Sterowania Ruchem Tristar w Gdyni.

Etap 5 - Badania terenowe i badania ankietowe

Po zdefiniowaniu celów realizowanych w rozprawie doktorskiej, określono rodzaj badań niezbędnych do realizacji Rozprawy Doktorskiej. Po określeniu w Etapie 4 poligonu badawczego, wykonano badania terenowe i badania ankietowe. Badania terenowe w swoim zakresie obejmowały badania prędkości pieszych na przejściach z sygnalizacją i bez, badania prędkości pojazdów na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych, badania zależności pomiędzy prędkością, gęstością i natężeniem ruchu pieszych. Badania ankietowe zostały przeprowadzone w formie anonimowej ankiety na grupie pieszych, kierowców i Audytorów Ruchu Drogowego. Wyniki badań terenowych i badań ankietowych zostały przedstawione w rozdziale czwartym i piątym.

Etap 6 - Opracowanie modeli matematycznych opisujących parametry ruchu pieszego i kołowego na podstawie badań terenowych

Na podstawie badań terenowych oraz w oparciu o zgromadzoną wiedzę ze studiów literatury, wykonano analizy wybranych charakterystyk ruchu pieszego i kołowego. W kroku 6, porównano prędkość pieszych w różnych grupach wiekowych na przejściach z sygnalizacją świetlną i bez, przeanalizowano luki akceptowalne dla różnych typów przekrojów ulicy, straty czasu pieszych na przejściach dla pieszych w zależności od typu przekroju ulicy oraz prędkość pojazdów przed przejściem dla pieszych. Wyniki opracowanych modeli matematycznych opisujących ruch pieszego i kołowy na podstawie badań terenowych został przedstawiony w rozdziale piątym.

Etap 7 - Badania mikrosymulacyjne wybranych przejść dla pieszych w miastach

W rozdziale szóstym, wykorzystano narzędzie do tworzenia modeli mikrosymulacyjnych odwzorowując przejście dla pieszych w różnych wariantach geometrii ulicy. Do tak wykonanego modelu, wdrożono dystrybuanty rozkładu prędkości pieszych na podstawie badań terenowych z kroku 5. Następnie model mikrosymulacyjny poddano weryfikacji. Wykonane modele mikrosymulacyjne posłużyły do poszerzenia analiz wykonanych w badaniach terenowych.

Etap 8 - Modelowanie fundamentalnej zależności opisującej ruchu potoku pieszych na przejściach dla pieszych.

Otrzymane wyniki z modeli mikrosymulacyjnych, poddano analizie i wykonano modele matematyczne zależności fundamentalnej pieszych i przyrównano do modeli matematycznych przedstawionych w syntezie studiów literatury. W kroku 8, przedstawiono także wpływ współczynnika kierunkowego r na przepustowość przejścia dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej. Wyniki przedstawiono w rozdziale szóstym.

Etap 9 - Badania (modelowanie) wpływu wybranych czynników na sprawność, warunki ruchu pieszych i pojazdów na wybranych rodzajach przejść dla pieszych

W rozdziale siódmym zaprezentowano wyniki badań wybranych czynników na przepustowość i straty czasu pieszych i pojazdów.

Etap 10 - Interpretacja wyników badań

W ostatnim etapie rozprawy doktorskiej, zaproponowano koncepcję praktycznego wykorzystania wyników do oceny przejść dla pieszych w zakresie sprawności i warunków ruchu pieszego.

4. BADANIA ZACHOWAŃ UŻYTKOWNIKÓW DRÓG I OPINII EKSPERTÓW

4.1. Metodyka badań

4.1.1. Cel i zakres badań

Do wstępnego rozpoznania wybranych zagadnień i problemów związanych funkcjonowaniem przejść dla pieszych zastosowano metodę ankietyzacji różnych zainteresowanych grup użytkowników przejść dla pieszych oraz ekspertów zajmujących się projektowaniem dróg oraz zarządzaniem ruchem drogowym. Celem badań było rozpoznanie opinii:

1. pieszych o stosowanych urządzeniach uspokojenia ruchu przyczyniających do zmniejszenia prędkości przejazdu pojazdów przez przejścia dla pieszych, a tym samym zmniejszenia zagrożenia wypadkami z udziałem pieszych,
2. kierowców o ich postawach wobec pieszych znajdujących się w różnych strefach przejścia dla pieszych,
3. ekspertów zajmujących się projektowaniem dróg i zarządzających infrastrukturą drogową lub ruchem drogowym o:
 - a) czynnikach wpływających na funkcjonowanie przejść dla pieszych,
 - b) wpływie rodzaju przejścia na poziom zagrożenia bezpieczeństwa pieszych,
 - c) wpływie kryteriów na wybór rodzaju przejścia dla pieszych.

Wyniki tych badań posłużą do:

1. identyfikacji podstawowych problemów związanych z funkcjonowaniem przejść dla pieszych,
2. potwierdzenia wyboru rodzaju przejścia dla pieszych do dalszych badań,
3. potwierdzenia wyboru funkcjonalności przejścia dla pieszych do dalszych badań.

4.1.2. Metodyka badań

Zachowania użytkowników dróg można określić na podstawie obserwacji terenowych lub badań ankietowych. Na podstawie badań terenowych określa się rzeczywiste zachowania użytkowników dróg, natomiast na podstawie badań ankietowych pieszych i kierowców określa się ich postawy w przestrzeganiu prawa oraz wskazanie na czynniki stwarzających zagrożenie wypadkami czy wskazanie na poziom akceptacji udogodnień w przekraczaniu jezdni drogi.

Do określenia postaw pieszych i kierowców w obszarze przejść dla pieszych wykorzystano wyniki badań zachowań uczestników ruchu przeprowadzonych, przy aktywnym udziale autorki, w 2015 roku w ramach projektu badawczego pt. "Opracowanie metodologii systematycznych badań zachowań pieszych i relacji pieszy-kierowca wraz z przeprowadzeniem badań pilotażowych" realizowanego na zlecenie Krajowej Rady Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego, w zakresie:

- a) badania ankietowe opinii pieszych realizowane w miastach Gdańsk i Kartuzy,
- b) badania ankietowe z kierowcami pojazdów realizowane w miastach Gdynia, Gdańsk, Sopot, Pruszcz Gdański, Tczew, Kartuzy.

Opinie ekspertów zajmujących się projektowaniem dróg i zarządzających infrastrukturą drogową lub ruchem drogowym o czynnikach wpływających na funkcjonowanie przejść dla pieszych można poznać na podstawie bezpośrednich wywiadów lub ankiet rozesłanych do wybranej grupy ekspertów. Przeprowadzono dwie tury badań ankietowych wśród ekspertów: w roku 2015 wśród grupy audytorów brd biorących udział w kursie audytorów oraz w roku 2023 wśród grupy audytorów brd i poszerzonej o projektantów, naukowców i pracowników zarządów dróg. Wytypowano grupę ekspertów z posiadanych przez Katedrę Inżynierii Transportowej baz danych (dotyczących szkoleń audytorów i uczestników Konferencji BRD GAMBIT). Opracowano projekty ankiet dla ekspertów, które różniły się w poszczególnych turach badań. Na bazie zebranych danych przeprowadzono analizę ich wyników.

Szczegółowy opis badań i zestawienie podstawowych wyników przedstawiono w załączniku Z.1

4.1.3. Metodyka analizy wyników badań ankietowych

Do oceny zachowań użytkowników dróg i oczekiwań ekspertów przyjęto kilka syntetycznych miar oceny.

1. Sumaryczna liczba odpowiedzi SLO liczona według wzoru:

$$SLO_i = \sum_{j=1}^m LO_{i,j} \quad (4.1)$$

2. Sumaryczna liczba punktów rangowych SPR liczona według wzoru:

$$SPR_i = \sum_{j=1}^m LO_{i,j} \cdot PW_j \quad (4.2)$$

3. Średnia wartość punktów rangowych SWPR liczona według wzoru:

$$SWPR_i = \frac{SPR_i}{SLO_i} = \frac{\sum_{j=1}^m LO_{i,j} \cdot PW_j}{\sum_{j=1}^m LO_{i,j}} \quad (4.3)$$

4. Udział wybranej klasy wpływu ULO w zbiorze odpowiedzi, liczony według wzoru:

$$ULO_j = \frac{\sum_{i=1}^n LO_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m LO_{i,j}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

5. Udział wybranej klasy wpływu USP w zbiorze odpowiedzi z uwzględnieniem rang, liczony według wzoru:

$$USP_j = \frac{\sum_{i=1}^n LO_{i,j} \cdot PW_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m LO_{i,j}} \cdot 100 \quad (4.5)$$

6. Udział opinii pozytywnych UOP i opinii negatywnych UON w zbiorze odpowiedzi, liczony według wzoru:

$$UOP_i = \frac{\sum_{3=k}^m LO_{i,j}}{\sum_{j=1}^m LO_{i,j}} \cdot 100 \quad (4.6)$$

$$UON_i = \cdot 100 - UOP_i \quad (4.7)$$

7. Udział analizowanego czynnika w zbiorze odpowiedzi UO liczony według wzoru

$$UO_i = \frac{\sum_{j=1}^m LO_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m LO_{i,j}} \cdot 100\% \quad (4.8)$$

8. Wielkość próby szacowano na podstawie wzoru

$$N_{min} = \frac{P(1-P)}{\frac{e^2}{Z^2} + \frac{P(1-P)}{N}} \quad (4.9)$$

gdzie:

SWPR_i – średnia wartość punktów rangowych, wskaźnik wielkości wpływu wybranego czynnika na funkcjonowanie przejścia dla pieszych,

SPR_i – suma punktów rangowych odpowiedzi respondentów,

SLO_i – suma liczby odpowiedzi respondentów,

LO_{i,j} – liczba odpowiedzi respondentów,

PW_{i,j} – ranga (liczba punktów) dla danej klasy poziomu wpływu,

i – numer badanego czynnika (1 ... n),

j - numer klasy (rangi) dla analizowanego rodzaju oceny (1 ... m),

UO_i - udział analizowanego czynnika w zbiorze odpowiedzi [%],

ULO – udział liczby uzyskanych odpowiedzi dla poszczególnych klas wpływu [%],

USP - udział sumy liczby odpowiedzi pomnożonych przez rangę przypisaną poszczególnym klasom [%],

UOP_i – udział „opinii pozytywnych” – grupa reprezentująca pozytywny lub istotny wpływ analizowanego zachowania, czynnika, rodzaju przejścia na funkcjonowanie przejścia dla pieszych, do tej grupy zaliczono odpowiedzi z rangami 3,4 i 5,

UON_i – udział „opinii negatywnych” – grupa reprezentująca negatywny lub małoistotny wpływ analizowanego zachowania, czynnika, rodzaju przejścia na funkcjonowanie przejścia dla pieszych, do tej grupy zaliczono odpowiedzi z rangami 0, 1 i 2,

P – szacowana wielkość frakcji,

z – wartość wynikająca z przyjętego poziomu istotności (α), obliczana przy pomocy dystrybuanty rozkładu normalnego,

N – liczebność populacji generalnej (w przypadku populacji skończonej),

e – maksymalny błąd oszacowania.

Dla potrzeb wartościowania wielkości wpływu zachowań użytkowników drogi, czynników i rodzaju przejścia na funkcjonowanie przejścia dla pieszych, wyróżniono trzy klasy wpływu, dla których wartości graniczne, ustalone metodą probabilistyczną zestawiono w tab.4.

Tab.4.1 Wartości graniczne klas wpływu zachowań użytkowników drogi, czynników i rodzaju przejścia na funkcjonowanie przejścia dla pieszych

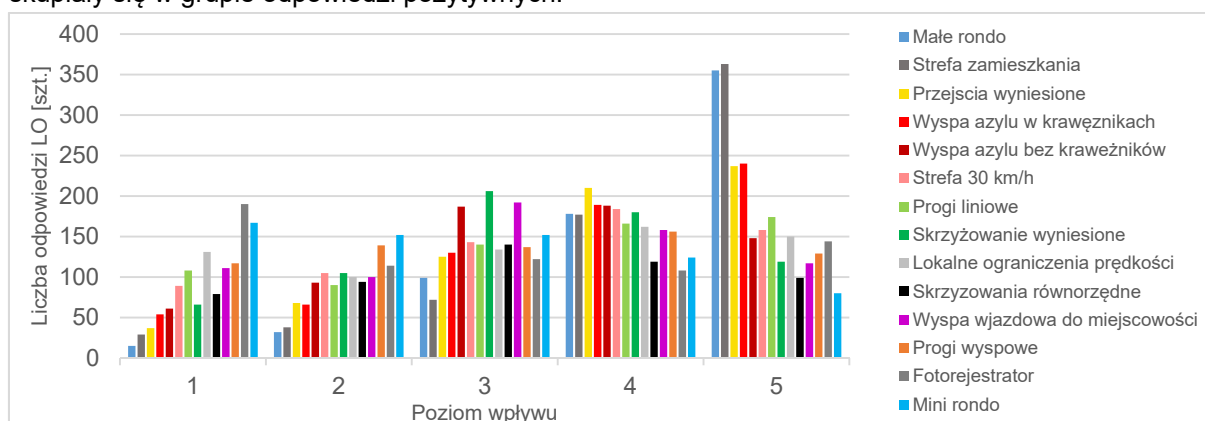
Klasa wpływu	Rodzaj wpływu				Granice klas wpływu		
	Zagrożenie wypadkami	Akceptowalność	Istotność wpływu	Wielkość wpływu	SWPR	UOP [%]	UON [%]
A	Brak lub bardzo małe	Bardzo duża	Bardzo duża	Bardzo duża	≥ 4,0	≥ 80,0	< 20,0
B	Małe	Duża	Duża	Duża	≥ 3,0	≥ 60,0	< 40,0
C	Średnie	Średnia	Średnia	Średnia	≥ 2,0	≥ 40,0	< 60,0
D	Duże lub bardzo duże	Mała lub brak	Mała lub brak	Mała lub brak	< 2,0	< 40,0	≥ 60,0

4.2. Badania opinii pieszych

4.2.1. Charakterystyka badań

Badania ankietowe pieszych prowadzono na sieci ulic w Gdańsku oraz Kartuzach, w obrębie skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej i z sygnalizacją świetlną [133]. Badanie akceptacji środków uspokojenia ruchu przeprowadzono metodą analizy ilościowej PAPI (Paper & Pen Personal Interview) [48]. Badanie dotyczyło oceny zachowań kierowców przez pieszych na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych. Celem badania wśród pieszych użytkowników drogi było rozpoznanie, które środki uspokojenia ruchu drogowego, w ocenie pieszego, mają istotny wpływ na zagrożenie wypadkami pieszych użytkowników drogi. Część pytań dotyczyła między innymi oceny poziomu akceptowalności wybranych 14 środków uspokojenia ruchu drogowego wpływających na zagrożenie wypadkami pieszych użytkowników drogi (tab. Z.1.1).

Wyniki badań przedstawiono w załączniku Z.1.1. Przyjęto pięć klas (rang) akceptowalności PW analizowanych środków uspokojenia ruchu wpływających na zmniejszenie prędkości pojazdów w obszarze przejść dla pieszych. W tab.Z.1.2 zestawiono charakterystykę przyjętych klas akceptowalności PW wraz z udziałem uzyskanych odpowiedzi przypisanych poszczególnym klasom akceptowalności. Natomiast w tab.Z.1.1 i na (rys.4.1). przedstawiono rozkład liczby odpowiedzi ekspertów z podziałem na poszczególne środki wraz z przypisaniem poziomu akceptowalności (rangi). Uzyskano dość równomierny rozkład odpowiedzi dotyczących akceptowalności wpływu analizowanych środków uspokojania ruchu na zagrożenie wypadkami drogowymi w grupie opinii pozytywnych. Odpowiedzi skupiały się w grupie odpowiedzi pozytywnych.



Rys.4.1 Rozkład odpowiedzi z uwzględnieniem wielkości wpływu poszczególnych czynników

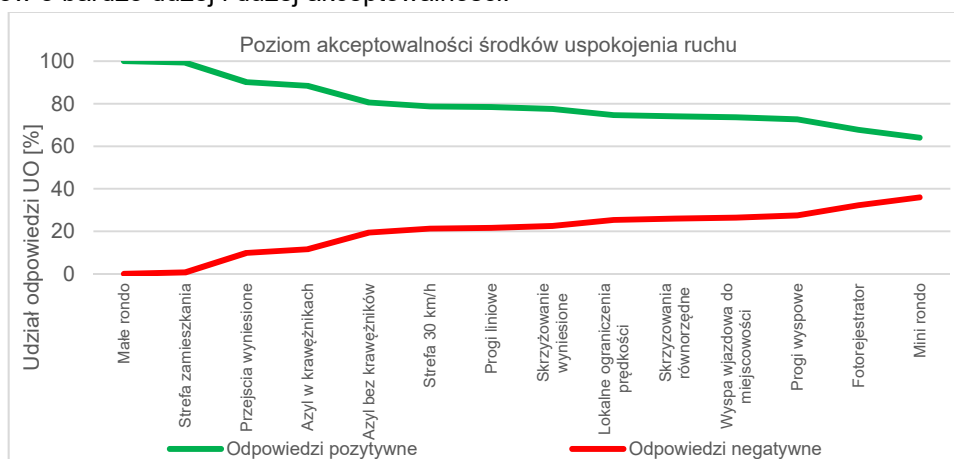
Wyniki przeprowadzonych badań ankietowych umożliwiły sprecyzowanie poniższych stwierdzeń.

1.Opinie respondentów pozwoliły na rozpoznanie, które środki uspokojenia ruchu drogowego postrzegane są, jako najbardziej akceptowane w celu zmniejszenia prędkości pojazdów na dojeździe do przejścia dla pieszych i tym samym zmniejszenie zagrożenia wypadkami z udziałem pieszych. Ponad

73 % odpowiedzi wskazuje wprost na wysoką akceptowalność (opinii pozytywnych UOP) analizowanych środków uspokojenia ruchu.

2. Średnia wartość punktów rangowych SWPR (tab. Z.1.3 i rys. Z.1.1), którą przyjęto, jako wskaźnik poziomu akceptowalności wybranego środka uspokojenia ruchu zainstalowanego w obszarze wpływu przejścia zawiera się w przedziale 4,2 – 2,7. Według opinii respondentów największy wpływ na zmniejszenie prędkości pojazdów dojeżdżających do przejścia dla pieszych mają: strefa zamieszkania oraz małe rondo, które uzyskały bardzo duży poziom akceptacji (SWPR > 4,0), także kolejne 10 środków w tym: wyniesione przejścia dla pieszych, przejścia z wyspami azylu, strefa 30 i lokalne obniżenia limitów prędkości, progi zwalniające liniowe i wyspowe oraz skrzyżowania równorzędne uzyskały duży poziom akceptacji (SWPR > 3,0). Natomiast do grupy średnio akceptowanych środków (SWPR > 2,0), zaliczono: fotorejestratory prędkości i skrzyżowanie mini rondo.

3. Na rys.4.2 przedstawiono wykres zmian opinii pozytywnych i opinii negatywnych dotyczących akceptowalności poszczególnych środków uspokojenia ruchu przez pieszych użytkowników dróg. Każdy z 14 przedstawionych do oceny środków uspokojenia ruchu ma uzyskać pozytywną ocenę ponad 50% uzyskanych odpowiedzi. Z czego najwięcej pozytywnych opinii (ponad 80%) uzyskały: małe rondo, strefa zamieszkania, wyniesione przejście dla pieszych, azyl dla pieszych w krawężnikach i bez krawężników. Analiza udziału opinii pozytywnych i negatywnych potwierdziła zaproponowany podział środków o bardzo dużej i dużej akceptowalności.



Rys.4.2 Rozkład odpowiedzi o pozytywnym i negatywnym wpływie uwzględniających poszczególnych czynników

Badanie zachowań kierowców i pieszych prowadzone w ramach projektu SARTRE 4' w Polsce wykazały, że tylko 22% pieszych czuło się bezpiecznie podczas przechodzenia przez jezdnię na przejściach dla pieszych, a 32% czuło się niebezpiecznie. Jednym największych zagrożeń wskazywane przez pieszych było brak udzielenia pierwszeństwa pieszym (33 % badanych wskazywało takie zachowanie) [41].

Z badań prowadzonych w Polsce [24],[169] 78% polskich pieszych i 72% kierowców w wyrażonych opiniach opowiedziało się za wymogiem dla kierowcy zmniejszenia prędkości samochodu zbliżającego się do przejścia dla pieszych, aby nie narażać przechodzących lub wchodzących na to przejście. Przedstawione wyniki badań pozwoliły na określenie poziomu akceptacji przez pieszych dotyczące środków uspokojenia ruchu powodujące zmniejszenie prędkości pojazdów na odcinkach dojazdowych do przejścia, co ułatwia kierowcom podjęcie decyzji o zatrzymaniu pojazdu u ustąpienia pierwszeństwa pieszemu. Ponadto wyniki tych badań pozwoliły na wskazanie w sposób pośredni na preferowane rodzaje zwykłych przejść dla pieszych. Wstępne określenie czynników wpływających na funkcjonowanie skrzyżowań w punkcie widzenia audytorów bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Wyniki przeprowadzonych badań opinii pieszych na zachowania kierowców, wskazują, że na zmniejszenie prędkości pojazdu na dojeździe do przejścia dla pieszych duży wpływ ma:

- lokalizacja przejścia dla pieszych: w strefie zamieszkania, w strefie 30 lub na wlocie skrzyżowania małe rondo,
- zastosowanie: przejścia wyniesionego lub przejścia z wyspą azylu w krawężniku,

- c) zlokalizowanie progów liniowych lub wyspowych przed przejściem dla pieszych w przypadku zwykłego przejścia dla pieszych bez innych udogodnień.

Takie rozwiązania rekomenduje się do stosowane w obszarach mieszkaniowych i na sieci ulic lokalnych.

4.3. Badania opinii kierowców

W Gdyni, Gdańsku, Sopocie, Pruszczu Gdańskim, Tczewie i w Kartuzach przeprowadzono badania ankietowe kierowców, których celem było wstępne rozpoznanie zachowań kierowców dojeżdżających do różnych urządzeń stosowanych dla obsługi ruchu pieszego w Polsce. Celem badań ankietowych z kierowcami było określenie zachowań kierowców (jadącego z kierunku X lub Y) w obrębie przejścia dla pieszych, gdy widzą pieszego. Szczegółową charakterystykę badań przedstawiono w załączniku Z.1.2. Wyniki przeprowadzonych badań ankietowych kierowców zestawiono w tab. Z.1.5 i Z.1.6 i na rys. Z.1.2 (zał. Z.1) oraz na rys.4.3.



Rys.4.3 Rozkład odpowiedzi pozytywnych dotyczących zachowań kierowcy w zależności od lokalizacji pieszego na przejściu dla pieszych i na dojeździe do przejścia.

Uzyskane wyniki przeprowadzonych badań ankietowych pozwoliły na sprecyzowanie poniższych stwierdzeń.

1. Odpowiedzi respondentów pozwoliły na wstępne rozpoznanie, jak zachowują się kierowcy w przypadku dochodzenia pieszego do przejścia dla pieszych. Badania wykazały, że na zachowania kierującego (zatrzymać się przed przejściem, czy przejechać przez przejście?) istotny wpływ ma strefa, w której znajduje się pieszy, (czyli odległość pieszego od toru jazdy pojazdu) i pas ruchu, na którym znajduje się lub do którego zbliża się pieszy.
2. W przypadku pieszego znajdującego się na przejściu dla pieszych (strefa D) na pasie sąsiednim jezdni 98 % pytanym kierowców wskazywało, że kierowca powinien się zatrzymać, a 94 % potwierdziło, że się zatrzymuje,
3. W przypadku pieszego wchodzącego na przejście dla pieszych (strefa C): 96 % na pasie sąsiednim i 97 % (na pasie ruchu pojazdu) pytanym kierowców wskazywało, że kierowca powinien się zatrzymać przed przejściem. Natomiast w 73 % kierowców w przypadku, gdy pieszy znajduje się na pasie sąsiednim i 87 % kierowców w przypadku, gdy pieszy znajduje się na pasie ruchu pojazdu, potwierdziło, że zatrzymuje się przed przejściem.
4. W przypadku pieszego znajdującego się na krawędzi przejścia dla pieszych (strefa B): 72 % na pasie sąsiednim i 90 % (na pasie ruchu pojazdu) respondentów wskazywało, że kierowca powinien się zatrzymać przed przejściem, a 42 % (na pasie sąsiednim) i 57 % (na pasie ruchu pojazdu) potwierdziło, że zatrzymuje się przed przejściem w takim przypadku.
5. W przypadku pieszego dochodzącego do przejścia dla pieszych (strefa A): 37 % na pasie sąsiednim i 48 % (na pasie ruchu pojazdu) respondentów wskazywało, że kierowca powinien się zatrzymać przed przejściem, a 19 % (na pasie sąsiednim) i 29 % (na pasie ruchu pojazdu) potwierdziło, że zatrzymuje się przed przejściem w takim przypadku.

6. W przypadku, gdy pieszy dochodzi do przejścia dla pieszych od strony sąsiedniego pasa ruchu o 22 % mniej kierowców zatrzymuje się przed przejściem dla pieszych, gdy pieszy zbliża się do przejścia lub wchodzi na nie.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że w opinii kierowców identyfikują oni sytuację, w których powinni się zatrzymać celem umożliwienia bezpiecznego przekroczenia ulicy przez pieszego. Na podejmowaną decyzję, ma wpływ lokalizacja pieszego względem przejścia dla pieszych. Znacząca większość respondentów wskazała, że w sytuacjach, gdy pieszy dochodzi do przejścia lub znajduje się przy jego krawędzi to kierujący pojazdem powinien ustąpić pierwszeństwa. Wyniki badań ankietowych przeprowadzonych w grupie kierowców, potwierdziły poparcie dla wprowadzenia przeprowadzonych w 2021 roku zmian prawa pierwszeństwa pieszym znajdującym się na przejściu i wchodzącym na nie.

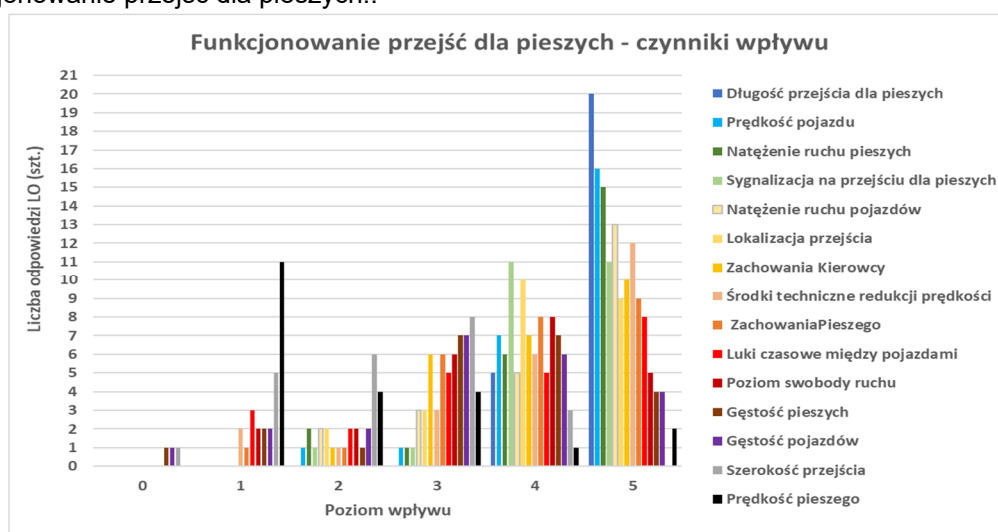
4.4. Badania ekspertów zajmujących się inżynierią ruchu drogowego

4.4.1. Identyfikacja czynników wpływające na funkcjonowanie przejść dla pieszych

Przeprowadzono badania ankietowe opinii ekspertów inżynierii ruchu dotyczące funkcjonowania urządzeń dla pieszych. Celem wstępnego badania ekspertów zajmujących się inżynierią ruchu drogowego było rozpoznanie i identyfikacja czynników wpływających na funkcjonowanie przejść dla pieszych oraz uzyskanie opinii ekspertów dotyczących poziomu zagrożenia wypadkami pieszych na wybranych rodzajach przejść dla pieszych. Ankieta dotyczyła oceny wpływu 15 czynników wybranych na podstawie studiów literatury i doświadczeń własnych ułożonych w trzech grupach czynników: ruchowych, drogowych i behawioralnych, na funkcjonowanie przejścia dla pieszych. Charakterystykę badań przedstawiono w załączniku Z.1.3.

Przyjęto sześć klas (rang) wielkości wpływu PW analizowanych czynników drogowych, ruchowych i behawioralnych na funkcjonowanie przejść dla pieszych. W tab.Z.1.8. zestawiono charakterystykę przyjętych klas wielkości wpływu PW wraz z udziałem uzyskanych odpowiedzi przypisanych poszczególnym klasom. Natomiast w tab.Z.1.9 i na rys.Z.1.4 (w zał. Z.1.3) i rys.4.4, przedstawiono rozkład liczby odpowiedzi ekspertów z podziałem na poszczególne czynniki wraz z przypisaniem poziomu akceptowalności (rangi).

Uzyskano dość zróżnicowane rozkłady odpowiedzi dla poszczególnych rang z wyraźnym wskazaniem na dużą wielkość wpływu na funkcjonowanie przejść dla pieszych większości analizowanych czynników. Przedstawione wyniki wskazują, że długość przejścia dla pieszych, prędkość pojazdów oraz natężenie ruchu pieszych są czynnikami, które mają bardzo duży wpływ na funkcjonowanie przejść dla pieszych..

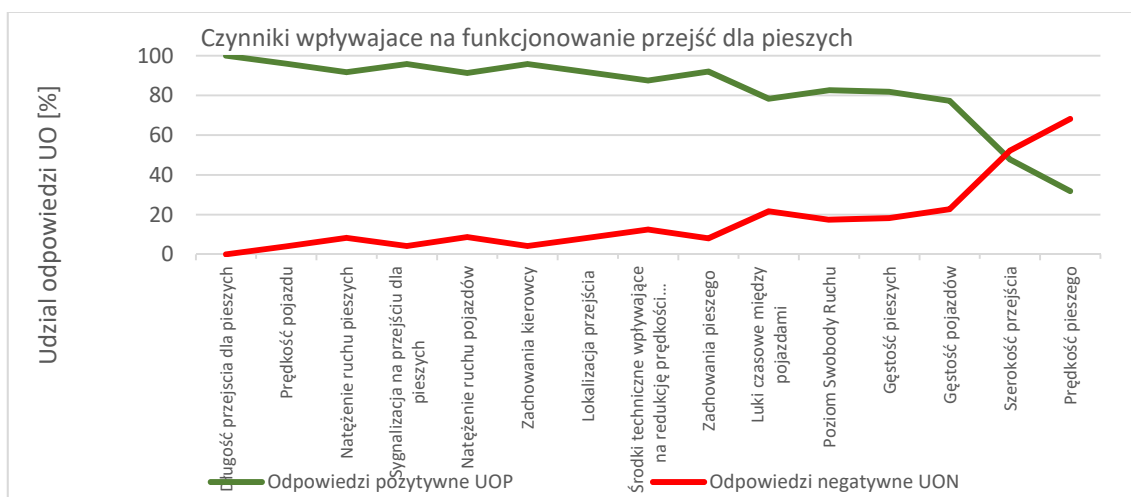


Rys.4.4 Rozkład odpowiedzi z uwzględnieniem wielkości wpływu poszczególnych czynników

Analizując wyniki przeprowadzonych pozwoliły na sprecyzowanie poniższych stwierdzeń.

1. Odpowiedzi respondentów pozwoliły na ocenę wpływu 15 wybranych czynników. Ponad 83 % odpowiedzi wskazuje wprost (ULO) na istotny wpływ wybranych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych, a biorąc pod uwagę sumę rang (USP) to wpływ ten wskazuje na 93 % odpowiedzi (tab.Z.1.10 i rys.4.4).
2. Średnia wartość punktów rangowych SWPR (tab. Z.1.9 i rys. Z.1.4), którą przyjęto, jako wskaźnik wielkości wpływu wybranego czynnika na funkcjonowanie przejścia dla pieszych zawiera się w przedziale 4,8 – 2,3 punkty. Przy czym na funkcjonowanie przejść dla pieszych:
 - a) bardzo duży wpływ (SWPR $\geq 4,0$) mają: długość przejścia dla pieszych, prędkość pojazdów, natężenie ruchu pieszych, występowanie sygnalizacji świetlnej na przejściu dla pieszych, natężenie ruchu pojazdów oraz lokalizacja przejścia, środki uspokojenia ruchu oraz zachowania kierowcy na odcinku dojazdowym do przejścia,
 - b) duży wpływ (SWPR $\geq 3,0$) mają: zachowania pieszego, luka czasowa w potoku pojazdów, poziom swobody ruchu, prędkość pieszych i prędkość pojazdów.
 - c) średni wpływ (SWPR $\geq 3,0$) według opinii ekspertów mają: szerokość przejścia oraz prędkość pieszego.
3. Rozkład udziału odpowiedzi pozytywnych (UOP) (tab.Z.1.9 i rys.4.5), potwierdza, przyjętą klasyfikację gdyż czynniki zakwalifikowane do klasy:
 - a) bardzo duży wpływ uzyskały UOP = 87,5 – 100,0 % opinii,
 - b) duży wpływ uzyskały UOP = 77,0 – 92,0 % opinii,
 - c) średni wpływ uzyskały UOP = 32,0 - 46,0 % opinii.

Przedstawione wyniki badań pozwoliły na wstępne określenie czynników wpływających na funkcjonowanie skrzyżowań w punktu widzenia audytorów bezpieczeństwa ruchu drogowego. Przeprowadzone badania wskazują, że najważniejszymi czynnikami wpływającymi na funkcjonowanie przejść dla pieszych, według opinii inżynierów ruchu są: długość przejścia dla pieszych, prędkość pojazdów, natężenie ruchu pieszych, występowanie sygnalizacji świetlnej na przejściu dla pieszych, natężenie ruchu pojazdów, co zbieżne jest z identyfikacją czynników uzyskaną w ramach studiów literatury. Natomiast najniższą rangę uzyskały takie czynniki jak szerokość przejścia dla pieszych oraz prędkość pieszego. Ten ostatni czynnik ma jednak znacznie wyższą rangę w odpowiedziach pieszych, szczególnie osób ze szczególnymi potrzebami (niepełnosprawność ruchowa czy niepełnosprawność wzrokowa) [108]. Do dalszych prac rekomenduje się wzięcie tych czynników pod uwagę.



Rys.4.5 Rozkład odpowiedzi pozytywnych i negatywnych uwzględniających wielkość wpływu poszczególnych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych

4.4.2. Ocena poziomu zagrożenia wypadkami na przejściach dla pieszych

Przeprowadzono także badania ankietowe (wstępne i uzupełniające) opinii ekspertów inżynierii ruchu dotyczące poziomu zagrożenia wypadkami na różnych rodzajach przejść dla pieszych. W badaniu

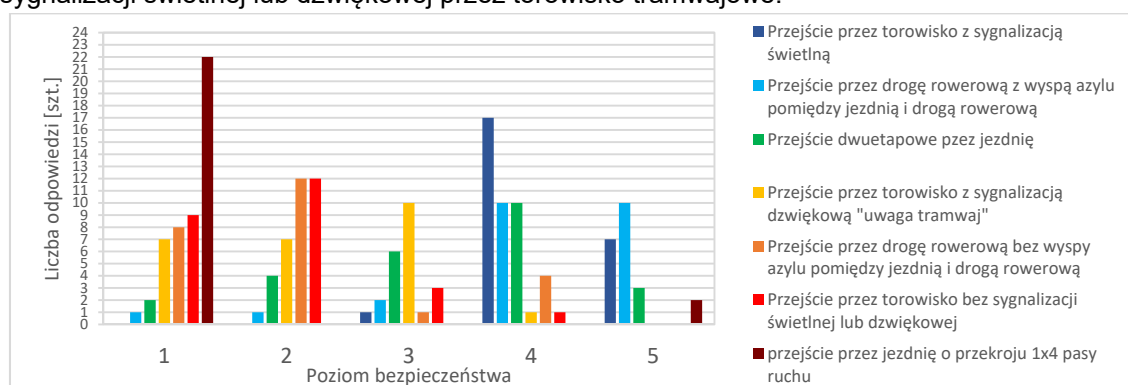
wstępnym wybrano 7 rodzajów przejść dla pieszych występujących na przecięciach z ulicami, torowiskami tramwajowymi i drogami dla rowerów, różniące się także wyposażeniem w urządzenia.

W badaniu uzupełniającym wybrano 6 rodzajów przejść dla pieszych (inne niż w badaniu wstępnym) różniące się zasadami funkcjonowania i wyposażeniem w urządzenia: a tym przejścia: dwupoziomowe, przejścia zwykłe i przejścia sugerowane. Szczegółową charakterystykę badań i uzyskane wyniki przedstawiono w załączniku Z.1.3.2.

W tabl. Z.1.10 zestawiono charakterystykę przyjętych klas poziomu wpływu PW wraz z udziałem uzyskanych odpowiedzi przypisanych poszczególnym klasom wpływu. Wyniki badań ankietowych dotyczących określenia wielkości wpływu rodzaju przejścia dla pieszych na ich funkcjonowanie, a przede wszystkim zagrożenie wypadkami zestawiono w tab. Z.1.10 oraz na rys.4.6.

Analiza wyników przeprowadzonych badań pozwoliły na sprecyzowanie poniższych stwierdzeń.

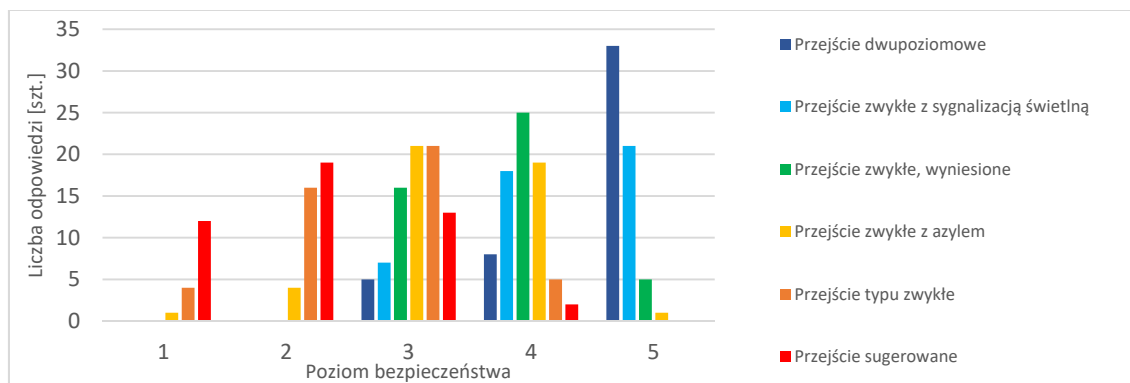
1. Odpowiedzi respondentów pozwoliły na ocenę wpływu 7 wybranych rodzajów przejść dla pieszych na bezpieczeństwo ruchu. Prawie 51 % odpowiedzi wskazuje wprost (ULO) na istotny (tj., bardzo duży, duży i średni) wpływ wybranych przejść na bezpieczeństwo ruchu czynników, a biorąc pod uwagę sumę rang (USP) to wpływ ten wskazuje na 64 % .
2. Średnia wartość punktów rangowych SWPR, którą przyjęto, jako wskaźnik wielkości wpływu wybranego przejścia na bezpieczeństwo ruchu zawiera się w przedziale 4,2 – 1,3. Przy czym największy wpływ na zagrożenie wypadkami (najwyższy poziom bezpieczeństwa) z analizowanych rodzajów przejść według ekspertów mają: przejście z sygnalizacją przez torowisko tramwajowe, przejście przez drogę rowerową z wyspą azylu pomiędzy jezdnią i drogą rowerową oraz przejście dwuetapowe przez jezdnię. Natomiast najniższy poziom bezpieczeństwa występuje na przejściu dla pieszych przez jezdnię ulicy o przekroju 1x4 pasy ruchu oraz na przejściu dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej lub dźwiękowej przez torowisko tramwajowe.



Rys.4.6 Rozkład odpowiedzi z uwzględnieniem wielkości wpływu poszczególnych przejść dla pieszych

Uzupełniające badania ankietowe pozwoliły na uzyskanie opinii ekspertów inżynierii ruchu drogowego dotyczących określenia wielkości wpływu podstawowych rodzajów przejść dla pieszych na bezpieczeństwo ruchu w warunkach miejskich. Wybrano 6 rodzajów przejść dla pieszych (inne niż w badaniu wstępnym) różniące się zasadami funkcjonowania i wyposażeniem w urządzenia: a tym przejścia: dwupoziomowe, przejścia zwykłe i przejścia sugerowane.

Przyjęto pięć klas poziomu wpływu PW analizowanych czynników na zagrożenie wypadkami na analizowanych rodzajach przejść dla pieszych. W tabl. Z.1.11 zestawiono charakterystykę przyjętych klas poziomu wpływu PW wraz z udziałem uzyskanych odpowiedzi przypisanych poszczególnym klasom wpływu. W tabl. Z.1.10 i na rys.4.7 zestawienie odpowiedzi z uwzględnieniem wielkości wpływu badanych rodzajów przejść na zagrożenie wypadkami uzyskanych w badaniu uzupełniającym.

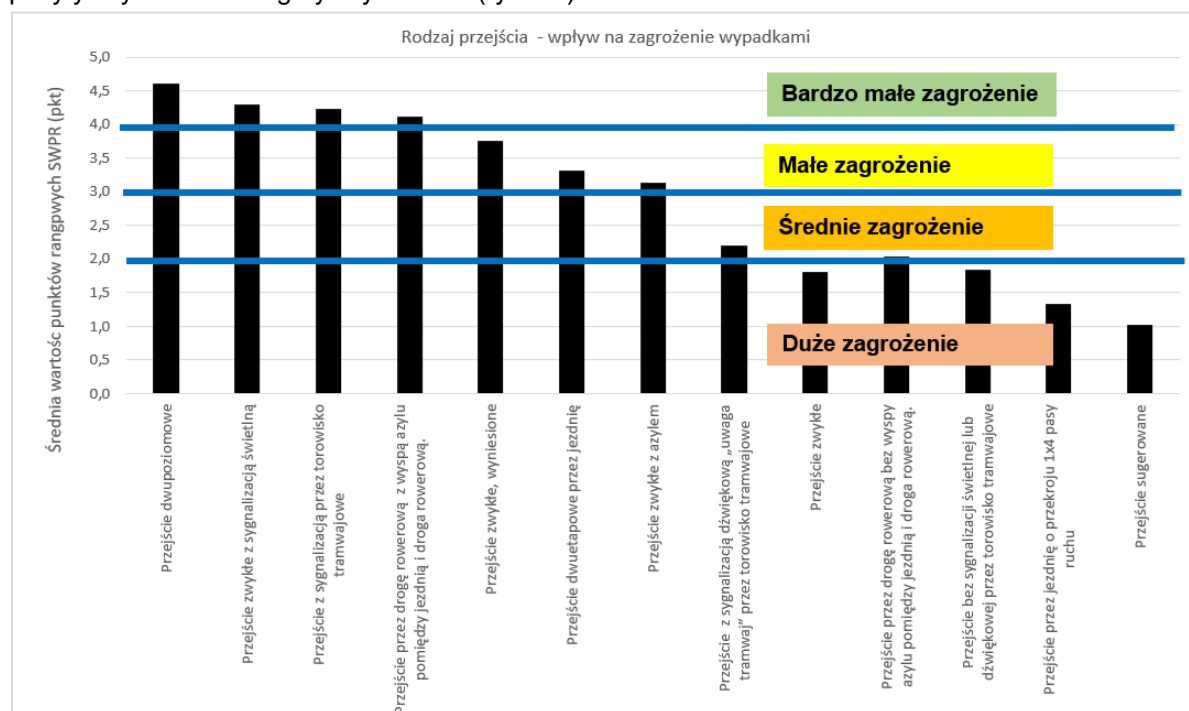


Rys.4.7 Rozkład odpowiedzi ekspertów z uwzględnieniem wielkości wpływu na zagrożenie wypadkami poszczególnych rodzajów przejść dla pieszych – badanie uzupełniające

Analiza wyników przeprowadzonych badań pozwoliła na sprecyzowanie poniższych stwierdzeń.

1. Odpowiedzi ankietowanych ekspertów pozwoliły na ocenę wpływu 6 podstawowych rodzajów przejść dla pieszych na bezpieczeństwo ruchu w warunkach miejskich. Prawie 80 % odpowiedzi wskazuje wprost (ULO) na istotny (tj., bardzo duży, duży i średni) wpływ analizowanych przejść na bezpieczeństwo ruchu w warunkach miejskich, a biorąc pod uwagę sumę rang (USP) to wpływ ten wskazuje na 64 %.
2. Średnia wartość (waga) punktów rangowych SWPR, którą przyjęto, jako wskaźnik wielkości wpływu wybranego przejścia na bezpieczeństwo ruchu zawiera się w przedziale 4,6 – 1,0. Przy czym najmniejszy wpływ na zagrożenie ma wypadkami (najwyższy poziom bezpieczeństwa) według opinii ekspertów mają: przejście dwupoziomowe, przejście zwykłe z sygnalizacją, przejście wyniesione i przejście z wyspą azylu. Natomiast najniższy poziom bezpieczeństwa (największe zagrożenie wypadkami) według opinii ekspertów występuje na przejściu sugerowanym i przejściu zwykłym.

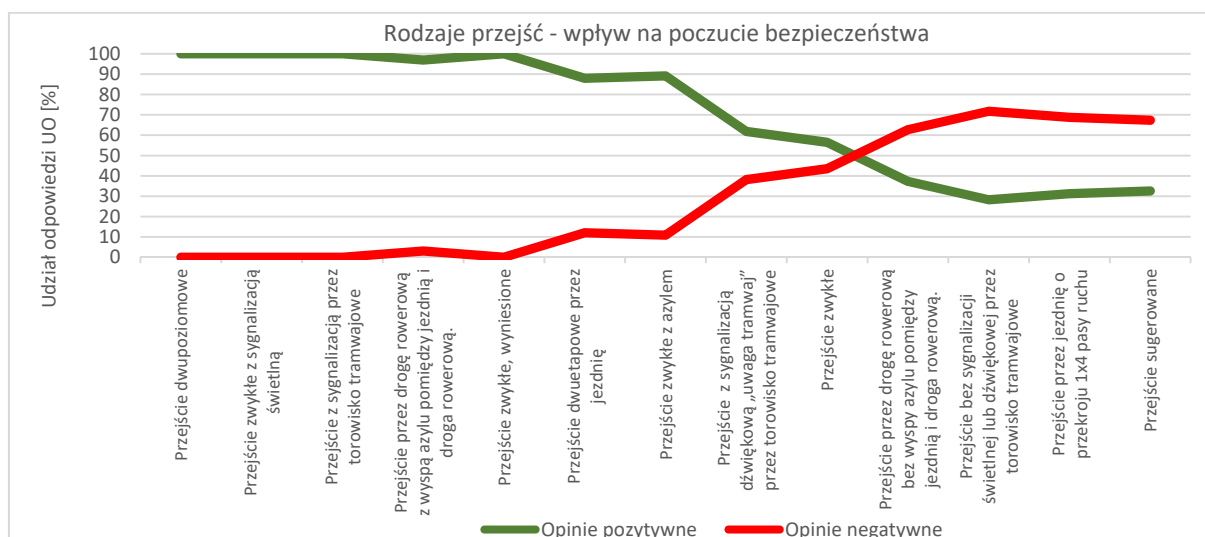
Dla potrzeb uzasadnienia wyboru rodzaju przejścia dla pieszych do analiz zagregowano wyniki badań wstępnych i uzupełniających. Jako miarę oceny przyjęto średni poziom zagrożenia wypadkami mierzony średnią wartością (waga) punktów rangowych SWPR rys.4.8 oraz udział odpowiedzi pozytywnych UOP i negatywnych UON (rys.4.9)



Rys.4.8 Rozkład średniej wagi wpływu poszczególnych przejść dla pieszych na zagrożenie wypadkami w warunkach miejskich – wyniki zagregowane

Według opinii ekspertów:

- bardzo małe zagrożenie wypadkami (najwyższy poziom bezpieczeństwa) ($SWPR \geq 4,0$) mają: przejście dwupoziomowe, przejście zwykłe z sygnalizacją, przejście z sygnalizacją przez torowisko tramwajowe, przejście przez drogę rowerową z wyspą azylu pomiędzy jezdnią i droga rowerową
- małe zagrożenie wypadkami (wysoki poziom bezpieczeństwa) ($SWPR \geq 3,0$) mają: przejście wyniesione, przejście dwuetapowe przez jezdnię i przejście zwykłe z wyspą azylu,
- średnie zagrożenie wypadkami (średni poziom bezpieczeństwa) ($SWPR \geq 2,0$) mają: przejście z sygnalizacją przez torowisko tramwajowe, przejście przez drogę rowerową z wyspą azylu pomiędzy jezdnią i droga rowerową,
- duże zagrożenie wypadkami (najniższy poziom bezpieczeństwa) ($SWPR < 2,0$) występuje na przejściu sugerowanym i przejściu zwykłym oraz na przejściu dla pieszych przez jezdnię ulicy o przekroju 1x4 pasy ruchu oraz na przejściu dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej lub dźwiękowej przez torowisko tramwajowe.
- Rozkład pozytywnych i negatywnych odpowiedzi ekspertów potwierdził, przyjętą klasyfikację gdyż przejścia dla pieszych zakwalifikowane do klasy:
 - bardzo małe zagrożenie uzyskały UOP = 97,0 – 100,0 % pozytywnych opinii,
 - małe zagrożenie uzyskały UOP = 62,0 – 88,0 % pozytywnych opinii,
 - średnie zagrożenie uzyskały UOP = 56,0 - 62,0 % pozytywnych opinii,
 - duże zagrożenie uzyskały UOP = 28,0 - 37,0 % pozytywnych opinii.



Rys.4.9 Rozkład odpowiedzi pozytywnych i negatywnych uwzględniających wielkość zagrożenia wypadkami na wybranych rodzajach przejść dla pieszych – dane zagregowane

Przeprowadzone badania wstępne wpływu rodzaju przejścia dla pieszych ograniczone było to przejść, o których nie było informacji w literaturze, dlatego zarejestrowano zbyt mało wskazań, że analizowane przejścia należą do grupy bezpiecznych przejść. Zabrakło w ankiecie pytań dotyczących wielu innych rodzajów przejść np. przejść w innym poziomie, przejść typu zebra czy przejść sugerowanych. Dlatego w badaniach uzupełniających poszerzono listę analizowanych przejść dla pieszych. Zgodnie z oczekiwaniami bardzo małe i małe zagrożenie wypadkami mają: przejście dwupoziomowe, przejście zwykłe z sygnalizacją (przez jezdnię i przez torowisko tramwajowe, przejście przez drogę rowerową z wyspą azylu pomiędzy jezdnią i droga rowerową, przejście wyniesione, przejście dwuetapowe przez jezdnię i przejście zwykłe z wyspą azylu, Tego rodzaju przejścia uwzględniając przepustowość i warunki ruchu pieszego o pojazdów, zaleca się stosować.

Jednakże w badaniach uzupełniających zaskakująca była bardzo niska ocena wystawiana przez ekspertów dla przejść sugerowanych, które w ocenach ekspertów z krajów zachodnich mają znacznie większy wpływ na bezpieczeństwo ruchu pieszych [245]. Biorąc pod uwagę, że rozwiązanie to zaczyna

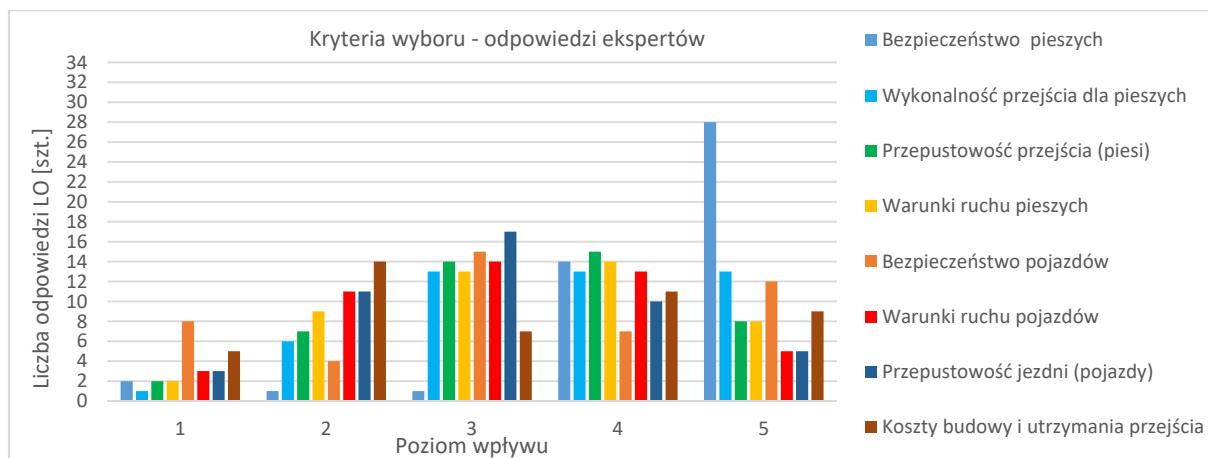
być dopiero stosowane w Polsce, stąd nieznanne jeszcze wielu ekspertom IRD. Należy, zatem obserwować funkcjonowanie tego rodzaju przejść w Polsce.

4.4.3. Ocena istotności kryteriów wyboru rodzaju przejścia dla pieszych

Przeprowadzone także badania ankietowe wśród ekspertów IRD dotyczących określenia wpływu kryteriów stosowanych przy wyborze rodzaju przejścia dla pieszych. Wstępnie wybrano 8 kryteriów, które mogą być stosowane przy wyborze rodzaju przejścia dla pieszych, a tym: bezpieczeństwo ruchu, przepustowość przejść i jezdni, warunki ruchu koszty budowy i utrzymania oraz możliwość wykonania przejścia. Przyjęto pięć klas poziomu wpływu PW analizowanych kryteriów. Opis i podstawowe wyniki badań przedstawiono w załączniku tab.Z.1.13 w tab.Z.1.14, i tab. Z.1.12, na rys. Z.1.5, rys. Z.1.6 i rys. Z.1.7, a także na rys.4.10, rys.4.11.i rys.4.12.

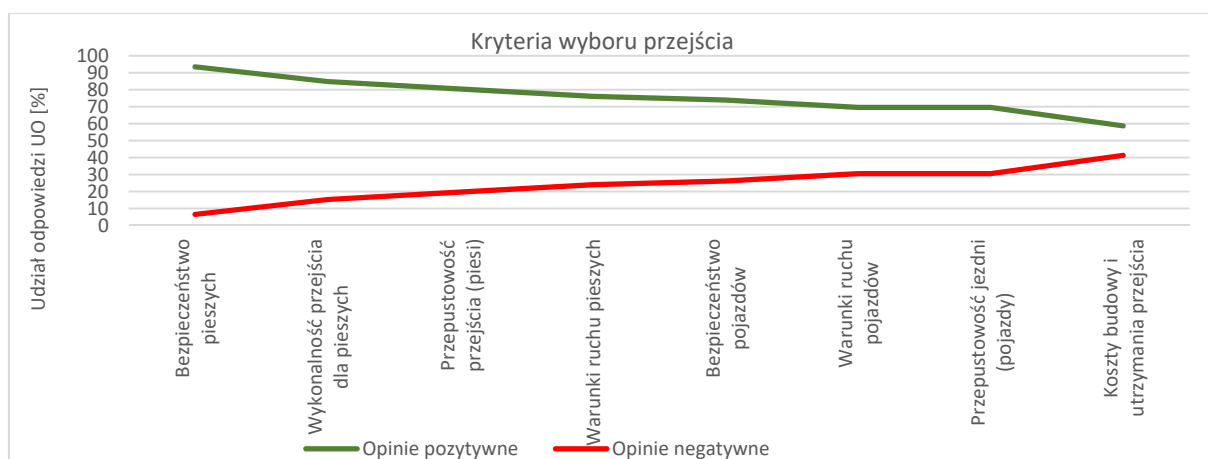
Wyniki przeprowadzonych pozwoliły na sprecyzowanie poniższych stwierdzeń.

1. Odpowiedzi respondentów pozwoliły na ocenę istotności 8 wybranych kryteriów oceny czynników. Ponad 76 % odpowiedzi wskazuje wprost (ULO) na istotny wpływ wybranych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych, a biorąc pod uwagę sumę rang (USP) to wpływ ten wskazuje na 93 %
2. Średnia wartość punktów rangowych SWPR, którą przyjęto, jako wskaźnik istotności wpływu wybranego kryterium wyboru przejścia dla pieszych zawiera się w przedziale 4,4 – 3,1. Przy czym istotność kryterium wyboru przejścia dla pieszych:
 - a) bardzo dużą (SWPR \geq 4,0) ma bezpieczeństwo pieszych,
 - b) duży wpływ (SWPR \geq 3,0) mają pozostałe kryteria.
3. Rozkład udziału odpowiedzi pozytywnych (UOP) potwierdza, przyjętą klasyfikację gdyż kryteria zakwalifikowane do klasy:
 - a) bardzo duży wpływ uzyskały UOP = 93,5 % opinii,
 - b) duży wpływ uzyskały UOP = 59,0 – 85,0 % opinii.



Rys.4.10 Rozkład odpowiedzi ekspertów z uwzględnieniem wielkości wpływu na bezpieczeństwo ruchu poszczególnych rodzajów przejść dla pieszych.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że według opinii ekspertów udział wszystkich analizowanych kryteriów w wyborze rodzaju przejścia dla pieszych jest dość wysoki, gdyż USP zawiera się w przedziale 16,0 – 11,0 % (tab. Z.1.15 i rys. Z.1.5.). Zatem w przypadku zastosowania wszystkich ośmiu kryteriów do wyboru rodzaju przejścia, proponuje się zastosowanie wag według udziału procentowego USP przedstawionego na tym rysunku



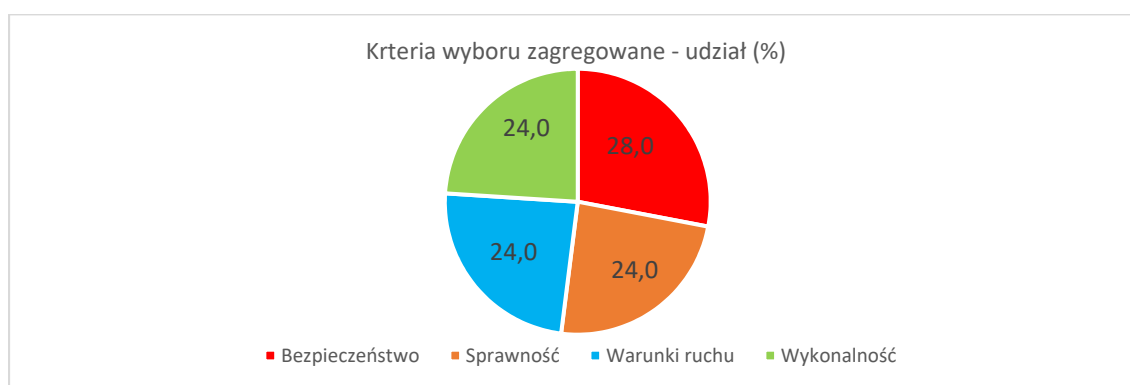
Rys.4.11 Rozkład odpowiedzi pozytywnych i negatywnych uwzględniających istotność kryterium wyboru rodzaju przejścia dla pieszych.

Natomiast w przypadku agregacji liczby kryteriów do czterech uwzględniających: bezpieczeństwo ruchu pieszego i kołowego, sprawność przejścia, warunki ruchu pieszych i pojazdów w obszarze przejścia dla pieszych oraz możliwość wykonania proponuje się przyjęcie wag procentowych USP przedstawionych na rys.4.12. To oznacza, że udział bezpieczeństwa ruchu powinien mieć wagę 0,28, natomiast pozostałe trzy kryteria wagę 0,24 każde.

W systemach oceny i wyboru projektów drogowych bierze się pod uwagę trzy sposoby ustalania wag kryteriów i wyboru projektów [90],[90]:

1. wagi przypisane równo do każdego kryterium lub grupy kryteriów;
2. wagi przypisane kryteriom lub grupom kryteriów w drodze konsensusu uzyskanego w grupie zainteresowanych interesariuszy;
3. wagi dedykowane tylko dla analizowanego projektu.

Porównując otrzymane wyniki badań dla warunków polskich z wagami stosowanymi w metodach analizy wielokryterialnej stosowanej przy wyborze projektów drogowych w innych krajach można stwierdzić, że otrzymane wyniki są najbliższe pierwszemu sposobowi ustalania wag kryteriów wyboru projektu.



Rys.4.12 Rozkład istotności zagregowanych kryteriów wyboru rodzaju przejścia dla pieszych

5. BADANIA TERENOWE WYBRANYCH PARAMETRÓW RUCHU PIESZYCH I POJAZDÓW NA PRZEJŚCIACH DLA PIESZYCH

5.1. Metodyka badań

5.1.1. Cel i zakres badań terenowych i analiz

Celem badań terenowych i analiz było określenie podstawowych parametrów ruchu pieszego i kołowego oraz ich rozkładów i zależności w obszarze wybranych przejść dla pieszych; a w szczególności:

1. Identyfikacji rodzajów stosowanych przejść dla pieszych w Polsce oraz problemów występujących na tych przejściach,
2. Określenia wielkości ruchu pieszego i kołowego na przejściach dla pieszych w zależności od ich rodzaju.
3. Rozkładów dobowych natężeń ruchu pieszego i kołowego, zależności natężenia ruchu pieszego od natężenia ruchu kołowego oraz wielkości akceptowanych luk czasowych przez pieszych.
4. Rozkładów prędkości pieszych na przejściach dla pieszych.
5. Zmian prędkości pojazdów na dojazdach do obszaru przejścia dla pieszych.
6. Zależności pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu pieszego na kładce dla pieszych.

Wyniki przeprowadzonych badań terenowych będą służyły do:

1. Identyfikacji podstawowych parametrów ruchu na przejściach dla pieszych
2. Budowy modeli symulacyjnych przejść dla pieszych wykorzystywanych w dalszych pracach,
3. Budowy modeli matematycznych wpływu wybranych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych.
4. Opracowania fundamentalnej zależności ruchu pieszych Q-V-D (natężenie-prędkość-gęstość).

5.1.2. Poligon badawczy

Wymiennie badania przeprowadzono na kilku poligonach badawczych: dostępnych baz danych, wybranych przejściach dla pieszych oraz kładce dla pieszych.

1. Pierwszą część analiz wykonano korzystając z dostępnych zbiorów i baz danych, a w szczególności:
 - a. Identyfikację stosowanych rodzajów przejść dla pieszych w Polsce wykonano, korzystając ze zbiorów danych z 16 Oddziałów Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad oraz danych Zarządu Dróg Miejskich w Warszawie.
 - b. Ocenę bezpieczeństwa ruchu na przejściach dla pieszych wykonano korzystając z danych o wypadkach drogowych zawartych w Policijnej Bazie Danych o Wypadkach Drogowych SEWIK.
 - c. Rozpoznanie wielkości ruchu pieszego i kołowego w obszarze różnego rodzaju przejść dla pieszych przeprowadzono korzystając z wyników kompleksowych badań ruchu zrealizowanych w Gdańsku w latach 1998 – 1999.
 - d. Dobowe profile natężeń ruchu pieszego i kołowego na wybranych przejściach dla pieszych określono na podstawie zbioru danych zebranych w trakcie realizacji innych projektów w latach 2018-2022 w Gdańsku i we Władysławowie.
2. Drugą część analiz wykonano na podstawie badań terenowych przeprowadzonych na wybranych dziesięciu przejściach dla pieszych w przejściach dla pieszych zlokalizowanych w Gdańsku Gdyni i Warszawie. Szczegółowy opis poligonu i wybrane wyniki badań przedstawiono w załączniku Z.2.1.
3. Trzecią część analiz wykonano na podstawie badań terenowych wykonanych na zwodzonej kładce dla pieszych przez rzekę Motława w Gdańsku. Szczegółowy opis poligonu i wybrane wyniki przedstawiono w załączniku Z.2.2.

5.2. Identyfikacja stosowanych rodzajów przejść dla pieszych w Polsce

Celem analizy było określenie najczęściej stosowanych rozwiązań infrastruktury drogowej przeznaczonej dla pieszych służącej do przekraczania ulic..

Analizę wykonano w oparciu o uzyskana dane z GUS oraz z 16 Oddziałów Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad i z Zarządu Dróg Miejskich w Warszawie w 2021 roku. Analizowane przejścia podzielono na następujące grupy:

1. Przejścia dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej,
2. Przejścia aktywne, wyposażone w aktywne urządzenia ostrzegające kierowców o zbliżaniu się do przejścia,
3. Przejścia sugerowane,
4. Przejścia dla pieszych z sygnalizacją świetlną,
5. Kładki dla pieszych,
6. Przejścia podziemne.

Na podstawie danych GUS na koniec 2021 roku, sieć dróg publicznych w Polsce wynosiła 429,8 tys. km. Największy udział stanowiły drogi gminne ok. 257 tys. km (59,8%), drogi powiatowe ok. 124 tys. km (28,9%), drogi wojewódzkie ok. 29 tys. km (6,8%) i drogi krajowe ok. 20 tys. km (4,5%). Brakuje jednak informacji o infrastrukturze dla pieszych na tych drogach.

Korzystając z dostępnych danych o drogach krajowych zarządzanych przez GDDKiA oraz o sieci ulic zarządzanych przez Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie oszacowano strukturę przejść dla pieszych na tych drogach. Wyniki analiz zestawiono w tab.5 oraz na rys.5.1

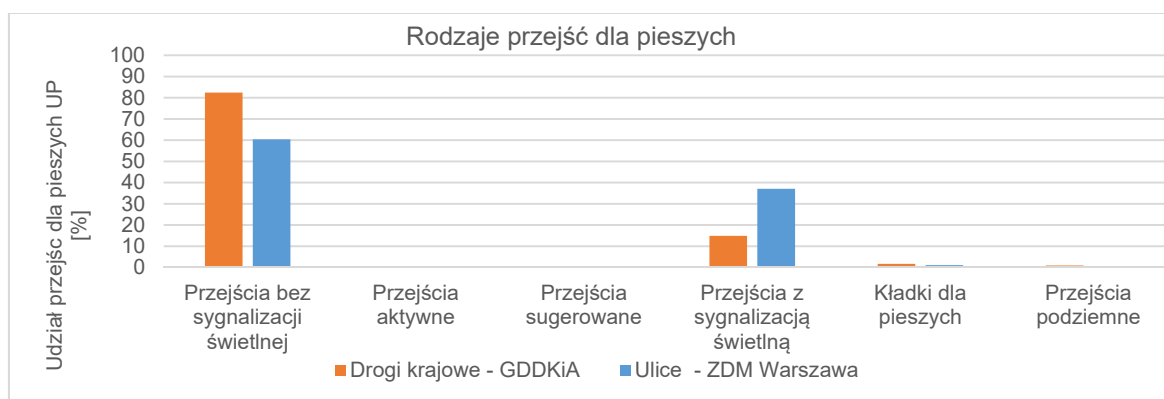
Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że:

1. Przejścia dla pieszych bez sygnalizacji stanowią podstawową grupę przejść dla pieszych na drogach zamiejskich (> 80 %) i ulicach dużych miast (> 60 %).
2. Przejścia dla pieszych z sygnalizacją świetlną stanowią znaczący udział na ulicach dużych miast (> 37 %), a mniejszy na drogach zamiejskich (> 15 %).
3. Przejścia dla pieszych z krzyżującymi się dużymi potokami pieszych z dużymi potokami pojazdów lub dużym ruchem pociągów, na których stosuje się kładki lub tunele dla pieszych, stanowią ok. 2 % ogółu przejść dla pieszych.
4. W polskiej praktyce zaczynają się pojawiać także rozwiązania alternatywne, w tym przejścia sugerowane, które stanowią 0,2 – 0,4 % ogólnej liczby awizowanych przejść dla pieszych. Tego rodzaju przejścia bardziej rozpowszechnione są na obszarach osiedli mieszkaniowych i strefach ograniczonej prędkości. Biorąc pod uwagę przykłady miast w Szwecji, Anglii i Niemczech należy spodziewać się rozwoju tego rodzaju przejść dla pieszych także w Polsce.

Tab.5.1 Zestawienie liczby przejść dla pieszych w wybranych zarządach dróg

Rodzaj przejścia dla pieszych	Drogi w zarządzie GDDKiA		Drogi w zarządzie ZDM Warszawa	
	Liczba przejść LP [szt.]	Udział przejść UP [%]	Liczba przejść LP [szt.]	Udział przejść UP [%]
Przejścia bez sygnalizacji świetlnej	9080	82,4	4070	60,4
Przejścia aktywne	bd	0,0	19	0,3
Przejścia sugerowane	26	0,2	30	0,4
Przejścia z sygnalizacją świetlną	1637	14,9	2500	37,1
Kładki dla pieszych	186	1,7	73	1,1
Przejścia podziemne	94	0,9	43	0,6
Razem	11023	100,0	6735	100,0

*bd – brak danych



Rys.5.1 Wykresy udziału poszczególnych rodzajów przejść dla pieszych na sieci: a) dróg zarządzanych przez GDDKiA, b) ulic zarządzanych przez ZDM Warszawa

5.3. Bezpieczeństwo ruchu na przejściach dla pieszych

Najeżdżanie na pieszego to najtragiczniejszy rodzaj wypadków na drogach. Pieszcy uczestniczy (najczęściej, jako ofiara), w co trzecim wypadku drogowym w Polsce. Do tego rodzaju wypadków dochodzi, gdy [125]:

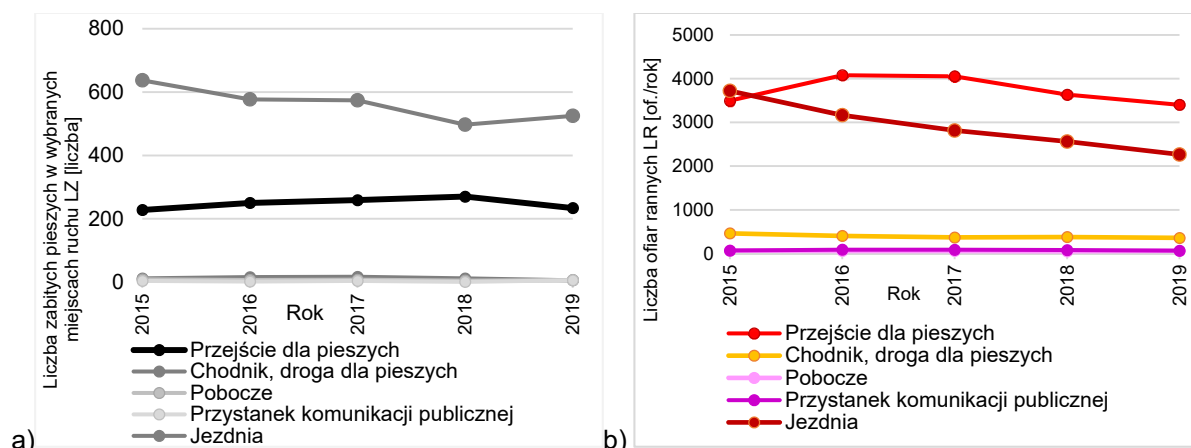
- pieszy porusza się wzdłuż drogi i jako niechroniony, często niewidoczny uczestnik ruchu potrącony jest przez jadące pojazdy,
- pieszy przekracza jezdnię drogi, po której poruszają się pojazdy z dużą prędkością.

Celem analizy jest zrozumienie mechanizmów powstawania zagrożenia pieszych uczestników ruchu oraz czynników wpływających na zagrożenie pieszych na przejściach dla pieszych w Polsce. Analizę przeprowadzono korzystając z danych o wypadkach drogowych zawartych w Policyjnej Bazie Danych o Wypadkach Drogowych SEWIK [112].

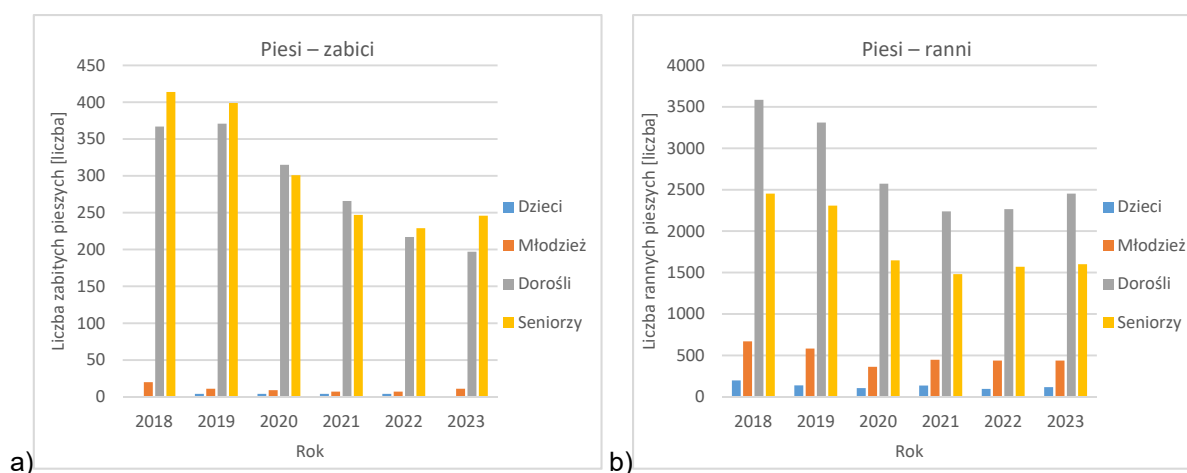
Wypadki z udziałem pieszych należą do największych problemów bezpieczeństwa ruchu drogowego w Polsce. W ostatnich latach (2015 – 2019) na polskich drogach rocznie ginęło około 800 pieszych (prawie 30% wszystkich ofiar śmiertelnych wypadków drogowych), a 2.700 było ciężko-rannych (tj. ok 26% wszystkich ofiar ciężko rannych). Od wielu lat liczba pieszych, jako ofiar śmiertelnych wypadków drogowych w Polsce jest największa wśród krajów UE [112], [115]. Na przykład w 2016 roku wskaźnik demograficzny liczby pieszych, jako ofiar śmiertelnych (RFRp) liczony w stosunku do 1 mln mieszkańców dla pieszych ogółem wynosił: w Polsce - 22,8; w Czechach - 12,3; w Niemczech - 6,0, w Szwecji - 4,2. Na obszarze Polski wypadki z pieszymi koncentrują się w województwach położonych w południowo - wschodniej części kraju, szczególnie w obszarach gęstej zabudowy. W latach 2015 – 2019 największy udział pieszych, jako ofiar wypadków miało miejsce:

- na drogach i ulicach w miastach na prawach powiatów (powiatach grodzkich): 24% ofiar śmiertelnych i 49% ofiar rannych,
- na odcinkach dróg dwupasowych, dwukierunkowych (przekrój 1x2) występuje większość ofiar śmiertelnych wypadków drogowych z udziałem pieszych (83 %) i ofiar rannych (79 %), ponad 67 % wypadków z ofiarami śmiertelnymi i ponad 55 % z ofiarami rannymi wśród pieszych ma miejsce na jezdniach.

W ciągu 5 lat (2015 – 2019) zmniejszyła się liczba wypadków i ofiar wypadków z pieszymi na jezdniach (o ok. 30 %), natomiast prawie na niezmiennym poziomie pozostała liczba wypadków i ofiar wypadków na przejściach dla pieszych (rys.5.2). W kontekście analizowanej pracy ważny jest udział poszczególnych grup wiekowych w populacji oraz udział pieszych, jako ofiar śmiertelnych i rannych w wypadkach drogowych w tych grupach. Wyniki przeprowadzonej analizy wskazują, że największymi grupami ryzyka bycia ofiarą śmiertelną lub ranną w wypadku drogowym wśród pieszych są seniorzy [145] i osoby dorosłe (rys.5.3). Bardzo niebezpieczny dla pieszych jest okres jesienno – zimowy (październik – grudzień), w którym wypadki z ofiarami wśród pieszych stanowią 40% wypadków i ofiar tych wypadków. Także niebezpieczna dla pieszego jest pora ograniczonej widoczności (noc), wówczas ryzyko bycia ofiarą śmiertelną wypadku drogowego jest znacznie większe niż w porze dziennej



Rys.5.2 Rozkład zmian liczby ofiar wypadków z pieszymi w latach 2015 – 2019 : a) ofiar śmiertelnych, b) ofiar rannych



Rys.5.3 Liczba zabitych (a) i rannych (b) pieszych z podziałem na grupy wiekowe w latach 2018-2023

Podobnie jak na odcinkach dróg zagrożenie wypadkami na przejściach dla pieszych w Polsce jest bardzo wysokie. W 2016 roku wskaźnik demograficzny liczby pieszych, jako ofiar śmiertelnych (RFRp) liczony w stosunku do 1 mln mieszkańców wynosił na przejściach dla pieszych: w Polsce - 6,5; w Czechach - 2,7; w Szwecji - 0,9 i w Niemczech - 0,27. Ryzyko bycia ofiarą śmiertelną w wypadkach na przejściach w Polsce jest kilkukrotnie większe niż w Czechach i w Szwecji, a kilkanaście razy większe niż w Niemczech.

W Polsce większość ofiar śmiertelnych (71 %) i rannych (73 %) występuje na przejściach dla pieszych zlokalizowanych na drogach dwupasowych, dwukierunkowych; ale dość duży udział mają także drogi (i ulice) dwujezdniowe: 26 % ofiar śmiertelnych i 21 % rannych w wypadkach z udziałem pieszych.

Najbardziej istotnymi źródłami zagrożeń (czynnikami) wpływającymi na bezpieczeństwo pieszych uczestników ruchu drogowego są: rodzaj urządzeń dla pieszych, wielkość ruchu pojazdów i pieszych, prędkość pojazdów.

Rodzaj przejścia dla pieszych różni się: konstrukcją i poziomem separacji pieszych od pojazdów, poziomem pierwszeństwa dla pieszych, długością przejścia, obszarem dobrej widoczności. Z badań krajowych [115] i zagranicznych wynika, że przejścia dwupoziomowe przyczynia się do redukcji 70 – 90 % wypadków, przejście z sygnalizacją świetlną (preferowane przez osoby z niepełnosprawnością wzroku) przyczynia się do redukcji 30 – 45 % wypadków, a przejścia wyniesione, na skrzyżowaniach typu rondo oraz z wyspą azylu przyczyniają się do redukcji 30 – 80 % wypadków. Natomiast przejścia zwykłe typu „zebra” w niektórych przypadkach przyczyniają się do redukcji liczby wypadków o ok. 20 %, a w innych przypadkach do wzrostu liczby wypadków z pieszymi nawet o 30 %.

Największe zagrożenie wypadkami występuje na zwykłych przejściach dla pieszych bez sygnalizacji zlokalizowanych na drogach (ulicach) dwupasowych dwukierunkowych, także duże zagrożenia występuje na ulicach wielopasowych.

Poziom zagrożenie wypadkami na przejściach dla pieszych zależy od trzech podstawowych czynników: rodzaju przejścia charakteryzującego się: długością przejścia, poziomem pierwszeństwa pieszego na przejściu, prędkością pieszego i rodzajem urządzeń wspomagających zastosowanych na przejściu; wielkości natężenia ruchu pieszego i natężenia ruchu pojazdów (im większy jest iloczyn natężenia ruchu pieszych i pojazdów tym większe prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku z pieszymi) oraz prędkości miarodajnej pojazdów na przejściu dla pieszych (konsekwencje wypadków zależą od prędkości uderzenia pojazdu w pieszego, im wyższa prędkość pojazdów przejeżdżających przez przejście dla pieszych, prędkość pojazdu na dojeździe do przejścia, tym większa musi być luka w potoku pojazdów umożliwiającą bezpieczne przejście pieszego).

Prędkość pojazdu dojeżdżającego do przejścia wpływa na wielkość potrzebnej luki w potoku pojazdów. Z badań prowadzonych zlecenie Sekretariatu KRBRD [24],[41] wynika, że na odcinku poprzedzającym przejście dla pieszych pojazdy poruszają się z dużymi prędkościami i często przekraczając prędkość dozwoloną w danym obszarze:

- a) na odcinkach ulic w obszarach zabudowanych (o dopuszczalnej prędkości 50 km/h), ok. 85% kierowców przekracza dozwoloną prędkość,
- b) na odcinkach dróg poza obszarami zabudowanymi (o dopuszczalnej prędkości 70 km/h) aż 90% kierowców przekracza dozwolony limit prędkości.

5.4. Wielkość ruchu pieszego i kołowego w obszarze przejść

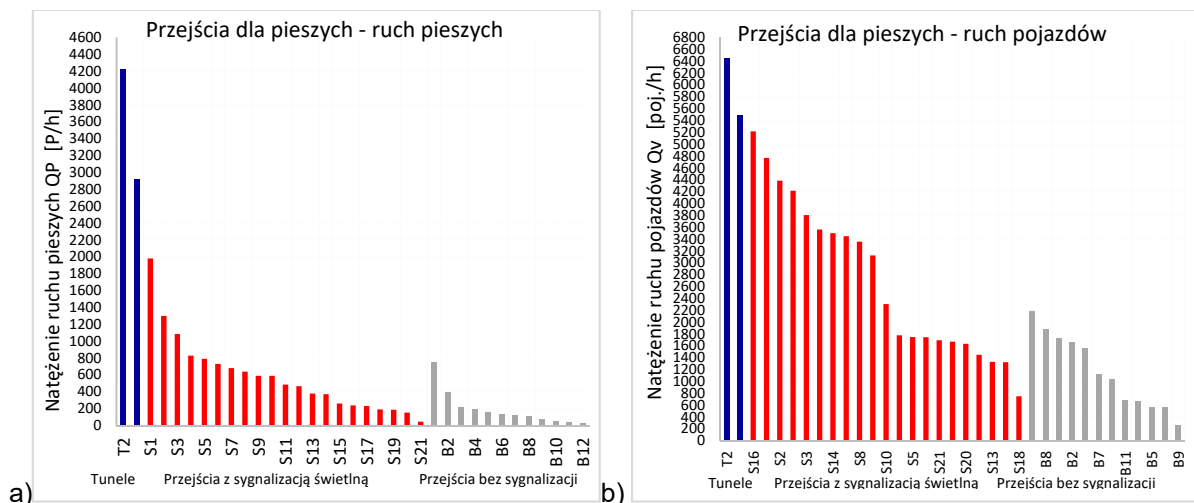
5.4.1. Wielkość ruchu pieszego i kołowego na przejściach różnego rodzaju

Do określenia wielkości ruchu pieszego i kołowego na przejściach dla pieszych wykorzystano wyniki badań kompleksowych prowadzonych na obszarze miasta Gdańska w latach 1998 – 1999 [114]. Wówczas przeprowadzono badania ruchu na prawie 500 przejściach dla pieszych (10 na przejściach wydzielonych, w tym w tunelach oraz na 487 przejściach położonych na 177 skrzyżowaniach z sygnalizacją i bez sygnalizacji). Pomiaru ruchu pieszego i kołowego prowadzone były w różnych przedziałach czasowych (2 4h, 20 h, 16 h, 8 h i 2 h), w ciągu doby, a także w różnych dniach tygodnia oraz miesiącach w roku, w zależności od roli skrzyżowania i przejścia dla pieszych w sieci ulicznej.

Wykorzystując dostępne dane, w niniejszej pracy określono wielkość ruchu pieszego i kołowego na wybranych rodzajach przejść dla pieszych. Wybrano 35 przejść dla pieszych: 2 w tunelu (T), 21 z sygnalizacją świetlną (S) i 12 bez sygnalizacji świetlnej (B), dla których zestawiono wielkości natężeń ruchu pieszego NP, natężeń ruchu kołowego NK i ilorazu natężenia ruchu pieszego i kołowego IKP w okresie godziny szczytu popołudniowego. Wyniki przedstawiono na rys.5.4, rys.5.5 i w tab.5.

Tab.5.2 Zakresy wielkości ruchu pieszego i kołowego na przejściach dla pieszych w Gdańsku w 1998 roku [KBR-1998]

Rodzaj przejścia dla pieszych	Natężenie ruchu pieszego	Natężenie ruchu kołowego	Proporcja ruchu pieszego do kołowego	Iloczyn ruchu pieszego i kołowego	
	QP [P/h]	Qv [poj./h]	WPK (-)	IPK1 [mln P*poj./h]	IPK2 [mld P*poj. ² /h]
Tunel	2920 - 4230	5480 - 6450	0,53 – 0,66	16,0 – 21,3	87,8-176,1
Z sygnalizacją	50 - 1980	750 - 5220	0,03 – 0,63	0,08 – 6,8	0,11 – 23,6
Bez sygnalizacji	30 - 750	270 - 2180	0,02 – 0,34	0,02 – 1,6	0,01 – 3,6



Rys.5.4 wielkości ruchu w godzinie szczytu na wybranych przejściach dla pieszych w Gdańsku w 1998 roku: a) natężenie ruchu pieszego, b) natężenie ruchu kołowego

Użyte do analiz wskaźniki obliczono według wzorów:

$$WPK_i = \frac{QP_i}{NK_i} \quad (5.1)$$

$$IPK1_i = \frac{QP_i \cdot Qv_i}{1000000} \quad (5.2)$$

$$IPK2_i = \frac{QP_i \cdot Qv_i^2}{100000000} \quad (5.3)$$

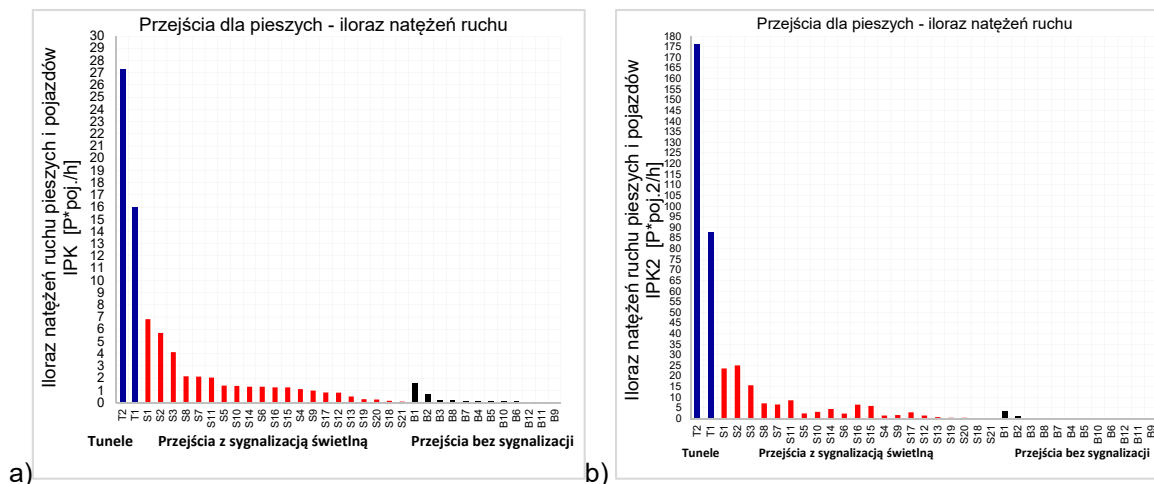
Gdzie:

QP_i – natężenie ruchu pieszego na i – tym przejściu dla pieszych [P/h],

Qv_i – natężenie ruchu pojazdów na i – tym przejściu dla pieszych [poj./h],

WPK_i – stosunek natężenia ruchu pieszego do ruchu kołowego na i – tym przejściu dla pieszych,

IPK_i – iloczyn natężenia ruchu pieszego i ruchu kołowego na i – tym przejściu dla pieszych [mln P · poj./h].



Rys.5.5 Wykresy wielkości iloczyn natężeń ruchu w godzinie szczytu na wybranych przejściach dla pieszych w Gdańsku w 1998 roku: IPK1, b) IPK2

Uzyskane wyniki analiz wskazują, że dla analizowanych przejść dla pieszych na przykładzie Gdańska:

1. Tunele dla pieszych stosowane są, gdy występuje bardzo duże natężenie ruchu pieszego ($QP > 2,9$ tys.P/h) i kołowego ($Qv > 5,5$ tys. poj./h). Przy czym stosunek natężenia ruchu pieszego do kołowego wynosi $WPK > 0,53$, natomiast iloczyn ruchu wynosił $IPK > 16,0$ mln P* poj. /h.
2. Przejścia dla pieszych z sygnalizacją stosowane są, gdy występuje duże natężenie ruchu pieszego ($QP < 2,0$ tys. P/h) i kołowego ($Qv > 5,2$ tys. poj./h). Przy czym stosunek natężenia ruchu pieszego

- do kołowego wynosi $WPK < 0,63$, natomiast iloczyn ruchu wynosił $IPK < 6,8$ mln P^* poj./h tj. kilkakrotnie mniejszy niż w przypadku przejść dla pieszych w drugim poziomie. Obserwuje się także mniejsze natężenie ruchu na przejściach dla pieszych z sygnalizacją, które zlokalizowane są na skrzyżowaniach gdzie sygnalizację zastosowano ze względu na potrzeby ruchu kołowego.
3. Przejścia dla pieszych bez sygnalizacji stosowane są, gdy występuje małe lub średnie natężenie ruchu pieszego ($QP < 0,8$ tys. P/h) i kołowego ($Qv < 2,2$ tys. p/h). Przy czym stosunek natężenia ruchu pieszego do kołowego wynosi $WPK < 0,34$, natomiast iloczyn ruchu wynosił $IPK < 1,6$ mln P^* poj./h tzn., że jest kilkanaście razy mniejszy niż w przypadku przejść dla pieszych w tunelach, a kilka razy mniejszy niż w przypadku przejść dla pieszych z sygnalizacją świetlną.
 4. Z przeprowadzonych analiz wynika, że wskaźnik obciążenia ruchem przejścia dla pieszych, jakim jest iloraz natężenia ruchu pieszego i kołowego IPK można by przyjąć, jako wskaźnik sprawności przejścia dla pieszych. Szacując wielkość dobowego iloczynu natężenia ruchu pieszego i kołowego na przejściach dla pieszych można stwierdzić, że:
 - a) zwykłe przejścia dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej stosuje się, gdy wskaźnik $IPK < 15,0$ mln P^* poj./ 24h;
 - b) przejścia dla pieszych z sygnalizacją świetlną stosuje się, gdy $IPK < 60,0$ mln P^* poj./ 24h;
 - c) przejścia dla pieszych bezkolizyjne (tunele dla pieszych) stosuje się, gdy wskaźnik $IPK > 60,0$ mln P^* poj./ 24h.
 5. Przeprowadzone analizy wskazują także, iż wielkość iloczynu natężenia ruchu pieszego i kołowego IPK zależy: rodzaju przejścia dla pieszych (w tym zasad organizacji ruchu), przepustowości i wielkości natężenia ruchu pieszych oraz przepustowości jezdni ulicy i wielkości natężenia ruchu pojazdów na jezdni ulicy w obszarze przejścia dla pieszych. Zatem istotnym problemem jest opracowanie metody doboru wielkości natężeń pieszych i pojazdów oraz szacowania przepustowości przejścia dla pieszych i jezdni w obszarze tego przejścia.

5.4.2. Rozkłady natężenia ruchu pieszych i pojazdów w ciągu doby

Z analizy literatury wynika, że na wielkość natężenia ruchu na przejściach dla pieszych ma wpływ rodzaj zagospodarowania terenu, na którym zlokalizowane jest przejście (rodzaj zagospodarowania, gęstość zaludnienia), dostępność transportu publicznego (stacje metra, przystanki tramwajowe i autobusowe), klasa i funkcja drogi, na której znajduje się przejście dla pieszych, zdolność do chodzenia pieszo (celu i pory przemieszczania się), środki transportu używane w łańcuchu podróży przed lub po przemieszczaniu się pieszo oraz rodzaj i dostępność urządzeń dla pieszych [69].

Korzystając z danych zebranych w trakcie realizacji innych projektów w latach 2018-2022, określono dobowe profile rozkładów natężeń ruchu pieszego i kołowego na wybranych przejściach dla pieszych. Wybrano trzy przejścia dla pieszych w Gdańsku (na ulicach klasy G i klasy Z) i jedno we Władysławowie (na ulicy klasy Z), na których pomiar natężeń ruchu pieszego i kołowego prowadzono w okresie doby. Zestawienie podstawowych parametrów ruchu dla tych przejść zestawiono w tab.5. Przejścia dla pieszych scharakteryzowano za pomocą: klasy ulicy, liczby pasów ruchu i rodzaju rozdzielania jezdni (PD – pas dzielący, W – wyspa azylu). Przejścia dla pieszych w Gdańsku były z sygnalizacją świetlną, a we Władysławowie bez sygnalizacji. Przejścia na al. Grunwaldzkiej i ul. Do Studzienki w Gdańsku zlokalizowane były w centrum obszaru usługowo – akademickiego, przy przystankach transportu zbiorowego, przejście na ul. Jaśkowa Dolina w Gdańsku na osiedlu mieszkaniowym, a przejście na ul. Szyprów we Władysławowie w centrum miasta turystycznego. Wstępna analiza wyników skazuje, że przejście położone przy al. Grunwaldzkiej było obciążone bardzo dużym ruchem pieszych i pojazdów, przejścia na ul. Do Studzienki i ul. Jaśkowa Dolina średnim ruchem pieszych i pojazdów, a przejście na ul. Szyprów bardzo małym ruchem.

Tab.5.3 Zestawienie parametrów ruchu dobowego na wybranych przejściach dla pieszych

Parametr	Jednostka	Gdańsk			Władysławowo	
		Al. Grunwaldzka	ul. Do Studzienki	ul. Jaśkowa Dolina	ul. Szyprów	
Charakterystyka przejść dla pieszych		G (5+PD+3)	Z (3+W+2)	Z (2+PD+2)	Z (1+W+1)	
Ruch pieszych	QPsum	tys. P/24h	11,99	3,80	1,46	0,28
	QPśr	P/h	500	158	61	12

na przejściu	QPmin	P/h	12	5	0	0
	QPmax	P/h	1172	421	188	31
	WSGP		0,098	0,111	0,129	0,109
Ruch pojazdów na I jezdni	QVsum	tys. p./24h	30,3	8,05	12,6	5470
	QVśr	poj./h	1264	336	525	228
	QVmin	poj./h	96	15	14	5
	QVmax	poj./h	2382	555	1065	529
	WSGK		0,078	0,069	0,085	0,097
Ruch pojazdów na II jezdni	QVsum	tys. poj./24h	30,9	7,0	13,1	5788
	QVśr	poj./h	1288	292	545	241
	QVmin	poj./h	87	10	14	5
	QVmax	poj./h	2672	503	1088	518
	WSGK		0,086	0,072	0,081	0,090
Iloczyn ruchu pieszych i pojazdów	IPKsum	mln P* poj./24h	43,2	3,4	2,3	0,21
	IPKśr	mln P* poj./h	1,80	0,14	0,10	0,009
	IPKmin	mln P* poj./h	0,01	0,0	0,0	0,000
	IPKmax	mln P* poj./h	5,14	0,40	0,37	0,028
	WGSPK		0,119	0,118	0,160	0,135

Oznaczenia w tablicy: G, Z – klasa ulicy, PD – pas dzielący, W – wyspa azytu, 2,3 .. liczba pasów ruchu na jezdni,

Wskaźniki oceny funkcjonowania przejść dla pieszych użyte do analiz obliczono według wzorów (5.4 – 5.9):

$$WGSP_i = \frac{QP_{i,max}}{QP_{i,sum}} \quad (5.4)$$

$$WGP_{i,j} = \frac{QP_{i,j}}{QP_{i,sum}} \quad (5.5)$$

$$WGSK_i = \frac{QV_{i,max}}{QV_{i,sum}} \quad (5.6)$$

$$WGK_{i,j} = \frac{QV_{i,j}}{QV_{i,sum}} \quad (5.7)$$

$$WGSPK_i = \frac{IPK_{i,max}}{IPK_{i,sum}} \quad (5.8)$$

$$WGPK_{i,j} = \frac{IPK_{i,j}}{IPK_{i,sum}} \quad (5.9)$$

gdzie:

QP_{i,j} – natężenie ruchu pieszego na i – tym przejściu dla pieszych i w j-tej godzinie [P/h],

QP_{i,śr} – średnie natężenie ruchu pieszego na i – tym przejściu dla pieszych [P/h],

QP_{i,max} – maksymalne natężenie ruchu pieszego na i – tym przejściu dla pieszych [P/h],

QP_{i,sum} – sumaryczne natężenie ruchu pieszego na i – tym przejściu dla pieszych w dobie [P/24 h],

QV_{i,j} – natężenie ruchu pojazdów na i – tym przejściu dla pieszych i w j-tej godzinie [poj./h],

QV_{i,śr} – średnie natężenie ruchu pojazdów na i – tym przejściu dla pieszych [poj./h],

QV_{i,max} – maksymalne natężenie ruchu pojazdów na i – tym przejściu dla pieszych [poj./h],

NK_{i,sum} – sumaryczne natężenie ruchu pojazdów na i – tym przejściu dla pieszych w dobie [poj./24 h],

IPK_{i,j} – iloraz natężenia ruchu pieszego i kołowego na i – tym przejściu dla pieszych i w j-tej godzinie [P* p/h],

IPK_{i,śr} – średni iloraz natężenia ruchu pieszego i kołowego na i – tym przejściu dla pieszych [P* poj./h],

IPK_{i,max} – maksymalny iloczyn natężenia ruchu pieszego i kołowego na i – tym przejściu dla pieszych [P* poj./h],

IPK_{i,sum} – suma iloczynu natężenia ruchu pieszego i kołowego na i – tym przejściu dla pieszych [P* poj./24h],

WGP_{i,j} – współczynnik j-tej godziny natężenia ruchu pieszego na i – tym przejściu dla pieszych [-],

WGK_{i,j} – współczynnik j-tej godziny natężenia ruchu pojazdów na i – tym przejściu dla pieszych [-],

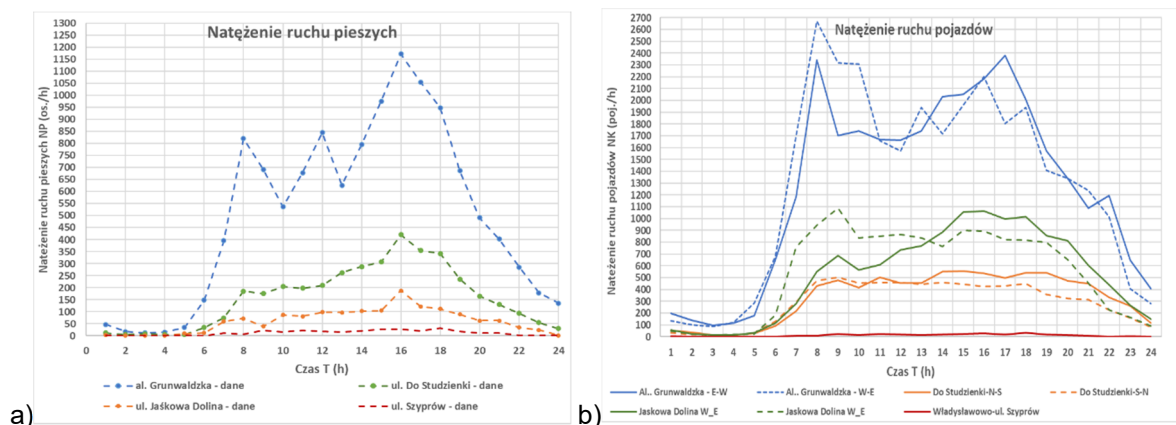
WGPK_{i,j} – współczynnik j-tej godziny iloczynu natężenia ruchu pieszego i pojazdów na i – tym przejściu dla pieszych [-],

WGSP_i – współczynnik godziny szczytu natężenia ruchu pieszego na i – tym przejściu dla pieszych [-],

WGSK_i – współczynnik godziny szczytu natężenia ruchu pojazdów na i – tym przejściu dla pieszych [-]

WGSPK_i – współczynnik godziny szczytu iloczynu natężenia ruchu pieszego i pojazdów na i – tym przejściu dla pieszych [-].

Na rys.5.6 przedstawiono rozkłady dobowe wielkości natężenia ruchu pieszych NP i natężenia ruchu pojazdów na wybranych przejściach dla pieszych w Gdańsku i we Władysławowie ciągu doby.



Rys.5.6 Rozkłady wielkości natężeń godzinowych w ciągu doby na wybranych przejściach dla pieszych w raz z modelami trendu zmian: a) natężenie ruchu pieszych, b) natężenie ruchu pojazdów

Przedstawione wykresy pokazują, że natężenie ruchu pieszego i kołowego stopniowo wzrasta od rana do wieczora, a także występują jeden, dwa lub trzy okresy ruchu szczytowego odpowiednio rano (w godz. 7 – 9) i wieczorem (w godz. 15 – 18). W Gdańsku większość pracowników, uczniów i studentów przychodzi do biura i szkoły przed 8 rano. Natomiast najczęściej kończą oni pracę i naukę ok. godz. 16 po południu. Czasami może pojawić się dodatkowy szczyt koło południa związany z wyjściem mieszkańców na zakupy, gdyż większość sklepów otwiera się ok. godz. 11-tej. Porównując do wyników uzyskanych przez innych badaczy, można stwierdzić, że profile natężeń ruchu w ciągu doby uzyskane w innych miastach są podobne do uzyskanych dla danych z Gdańska. Natomiast w krajach, w których występuje przerwa w pracy na lunch wyraźniej zarysowuje się także południowy szczyt natężenia ruchu pieszego [152].

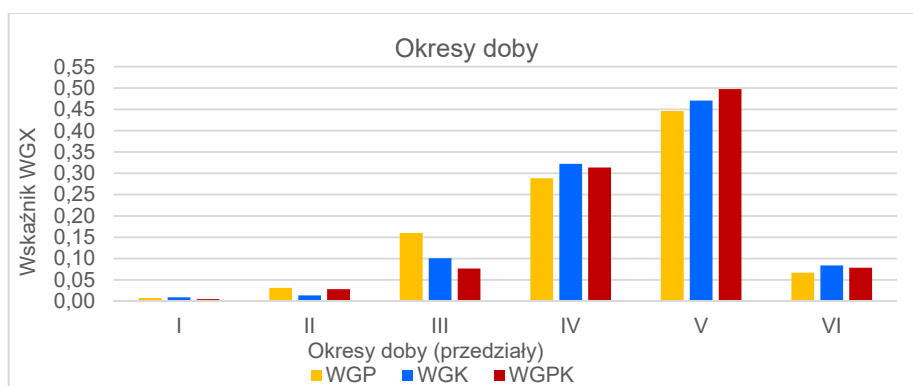
Rozkłady (profile) te wskazują na pewne charakterystyczne przebiegi zmian natężeń ruchu pieszego i kołowego w obszarze przejść dla pieszych. Kształt profilu natężeń ruchu zależy od rodzaju uczestnika ruchu (pieszy, pojazd), dominującej relacji podróży (np. dom – praca, praca - dom), dnia tygodnia (typowy, sobota, niedziela), udziału godziny szczytu w wielkości ruchu dobowego.

Pomocnymi w opisywaniu natężeń ruchu może być podział doby na charakterystyczne okresy doby. Wykorzystując wyniki analiz zaproponowano wstępnie podział okresu doby na sześć charakterystycznych okresów: I – nocna przerwa, II – aktywność poranna, III – szczyt poranny, IV - aktywność dzienna, V – szczyt popołudniowy i VI – aktywność wieczorna.

Na Tab.5 i na rys.5.7 przedstawiono wskaźniki udziału względnych miar obciążenia przejść dla pieszych w poszczególnych okresach w stosunku do całej doby na wybranych do analizy przejściach dla pieszych.

Tab.5.4 Zestawienie wskaźników udziału względnych miar obciążenia przejść dla pieszych w dobie na wybranych przejściach dla pieszych

Okres doby			Wskaźnik udziału względnych miar obciążenia przejść dla pieszych w dobie		
Charakter aktywności	Godziny	Przedział	WGP	W GK	W GP K
Nocna przerwa	22:00 – 5:00	I	0,000 – 0,016	0,000 – 0,021	0,001 – 0,006
Aktywność poranna	5:00 – 7:00	II	0,000 – 0,040	0,000 – 0,061	0,002 – 0,027
Szczyt poranny	7:00 – 9:00	III	0,025 – 0,081	0,025 - 0,083	0,030 – 0,095
Aktywność dzienna	9:00 – 15:00	IV	0,045 – 0,077	0,047 – 0,077	0,050 – 0,086
Szczyt popołudniowy	15:00 – 19:00	V	0,057 – 0,129	0,042 – 0,109	0,047 – 0,119
Aktywność wieczorna	19:00 – 22:00	VI	0,004 – 0,068	0,004 – 0,065	0,010 – 0,041



Rys.5.7 Rozkłady wskaźników udziału względnych miar obciążenia przejść dla pieszych w poszczególnych okresach doby w stosunku do całej doby na wybranych do analizy przejściach dla pieszych

Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że:

- największe obciążenie ruchem pieszym i kołowym obszaru przejść dla pieszych występuje w okresie szczytu popołudniowego (V okres), w którym obserwuje się od 45 - 50 % dobowego natężenia ruchu pieszych i pojazdów,
- duże obciążenie ruchem, wynoszące 29 - 32 % obserwuje się w okresie aktywności dziennej (IV okres),
- małe obciążenie ruchem, wynoszące 7 – 16 % obserwuje się w okresie szczytu porannego (aktywności dziennej (III okres) i aktywności wieczornej (VI okres),
- bardzo małe obciążenie ruchem, wynoszące 0,5 – 3 % obserwuje się w okresie przerwy nocnej (I okres) i aktywności porannej (II okres).

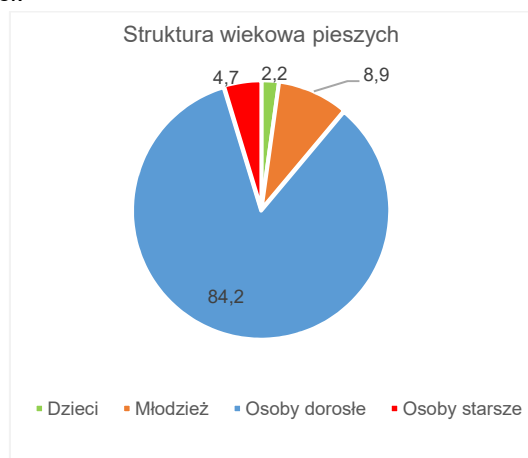
Z przedstawionej analizy wynika, że istotnym okresem dla funkcjonowania przejść dla pieszych jest okres szczytu popołudniowego, w którym podstawą ich dobrego funkcjonowania są: sprawność przejścia, warunki ruchu pieszych i pojazdów oraz bezpieczeństwo ruchu.

5.4.3. Struktura potoków pieszych i pojazdów w obszarze przejść dla pieszych

W trakcie badań prowadzonych w ramach niniejszej pracy uzyskano dane dotyczące struktury wiekowej pieszych. Wyniki badań przedstawiono na rys.5.8.

Struktura wiekowa użytkowników przejść dla pieszych była następująca:

- 84,2 % to osoby dorosłe,
- 8,9 % to młodzież,
- 4,7 % to osoby starsze,
- 2,2 % to dzieci.

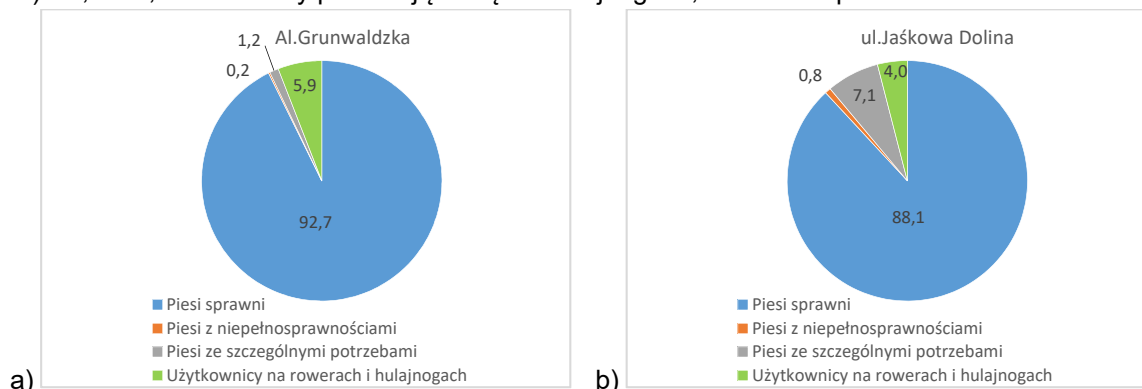


Rys.5.8 Struktura wiekowa pieszych użytkowników przejść dla pieszych

Bardzo rzadko prowadzone są badania struktury pieszych ze względu na ich szczególne potrzeby. W dwóch przypadkach takie badanie przeprowadzono w Gdańsku, wyniki przedstawiono na rys.5.9.

Struktura użytkowników przejść dla pieszych była następująca:

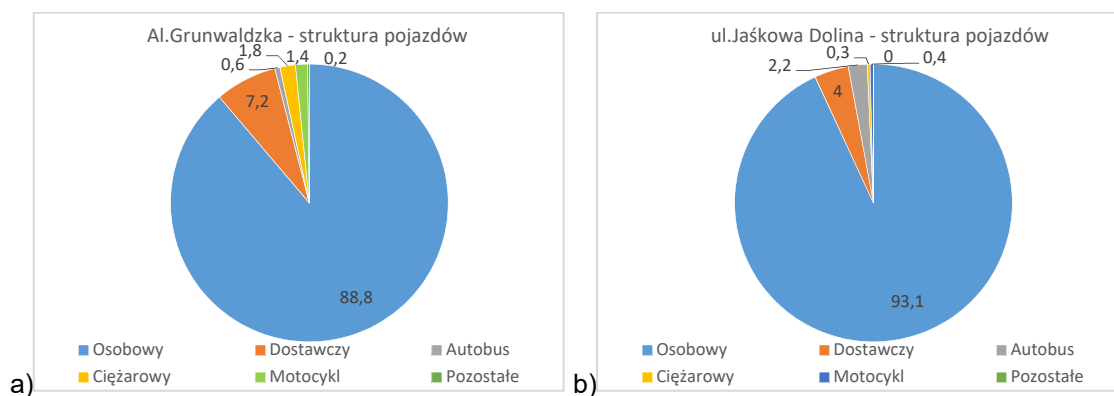
- 93 - 97 % to osoby sprawne,
- 0,7 – 1,4 % osoby ze szczególnymi potrzebami w tym 0,1 - 0,2 % osoby z niepełnosprawnościami (poruszające się na wózkach lub przy wykorzystaniu kul lub niewidome),
- 2,3 – 6,0 % to osoby poruszające się na hulajnogach, rowerach itp.



Rys.5.9 Struktura pieszych użytkowników przejść dla pieszych

Struktura potoku pojazdów w obszarze przejść dla pieszych w warunkach miejskich była następująca (Rys.5.10):

- samochody osobowe: 89 – 93 %,
- samochody dostawcze: 4,0 – 7,0 %,
- autobusy: 0,6 – 2,2 %,
- samochody ciężarowe: 0,3 – 1,8 %,
- motocykle i pozostałe pojazdy: 0,4 – 1,6 %.



Rys.5.10 Struktura pojazdów w obszarze przejść dla pieszych

5.4.4. Zależności pomiędzy natężeniem ruchu pieszego i kołowego

Jak stwierdzono w pkt. 5.3.3 wielkość natężenia ruchu pieszego i kołowego wpływa bezpośrednio na bezpieczeństwo i warunki ruchu pieszego na przejściach dla pieszych. Wynika to z przecięcia tras dla pieszych z trajektorią jazdy pojazdu. Pieszy wchodzący na przejście potrzebuje odpowiedniej luki czasowej (przerwy) w potoku pojazdów, umożliwiającej bezpieczne przejście przez jezdnię. Wywołuje to bezpośrednie konflikty pomiędzy pieszymi i kierującymi pojazdami, jako uczestnikami ruchu. Poszukuje się, zatem zależności wielkości natężenia ruchu pieszego od natężenia ruchu kołowego.

Wykorzystując wyniki badań terenowych prowadzonych na przejściach dla pieszych bez sygnalizacji poszukiwano zależności pomiędzy natężeniem ruchu pieszego QP i ruchu kołowego QV.

Badano także wpływ rodzaju przekroju ulicy oraz liczby pasów ruchu na zależność pomiędzy natężeniami ruchu. Badania były prowadzone w latach (2018), kiedy pierwszeństwo mieli tylko piesi znajdujący się na tym przejściu, natomiast pieszy wchodzący lub oczekujący na przejście musiał udzielić pierwszeństwa pojazdom.

Badania prowadzono przejściach dla pieszych zlokalizowanych na ulicach o jezdniach dwukierunkowych bez pasa dzielącego (przekrój 1x2 i 1x4) oraz na ulicach o jezdniach jednokierunkowych (pojedyncze jezdnie z przekrojów 2x2 i 2x3). W tab.5 zestawiono podstawowe dane o natężeniach ruchu pieszego i kołowego występującego na analizowanych skrzyżowaniach.

W przypadku jezdni dwukierunkowych natężenie ruchu pieszego NP nie przekraczało 1200 P/h, natomiast natężenie ruchu kołowego QV nie przekraczało 4000 poj./h, przy czym na jezdni czteropasowej było ok. 2 krotnie większe niż na jezdni dwupasowej.

W przypadku jezdni jednokierunkowych natężenie ruchu pieszego QP przekraczało 1300 P/h, natomiast natężenie ruchu kołowego QV nie przekraczało 2000 poj./h, przy czym na jezdni trzypasowej pasowej było większe niż na jezdni dwupasowej.

Tab.5.5 Zestawienie danych o natężeniu ruchu pieszych i pojazdów na badanych przejściach dla pieszych

Parametr	Jedn.	Przekrój ulicy				
		1x2	1x4	2x2	2x3	
Natężenie ruchu pieszych	QPmin	P/h	2	2	14	26
	QPmax	P/h	1312	306	1184	415
	QPśr	P/h	137	120	255	143
Natężenie ruchu pojazdów	Qvmin	poj./h	1	202	253	902
	Qvmax	poj./h	1512	1267	1872	4211
	Qvśr	poj./h	364	745	676	2601
Liczba danych	n	liczba	510	12	46	9

Wykorzystując wyniki badań opracowano modele zależności natężenia ruchu pieszego NP od natężenia ruchu kołowego na przejściach dla pieszych. Na bazie doświadczeń zagranicznych i wstępnych badań własnych przyjęto model wykładniczy [112] opisany wzorem (5.10).

$$QP_j = a \cdot \exp\left(\frac{QV_j}{1000}\right)^b \quad (5.10)$$

gdzie:

QP_j – natężenie ruchu pieszego dla j-tego przekroju ulicy [P/h],

QV_j – natężenie ruchu kołowego dla j-tego przekroju ulicy [poj./h],

a, b – współczynniki równania.

W tab.5 zestawiono parametry uzyskanych modeli dla jezdni dwu i jednokierunkowych.

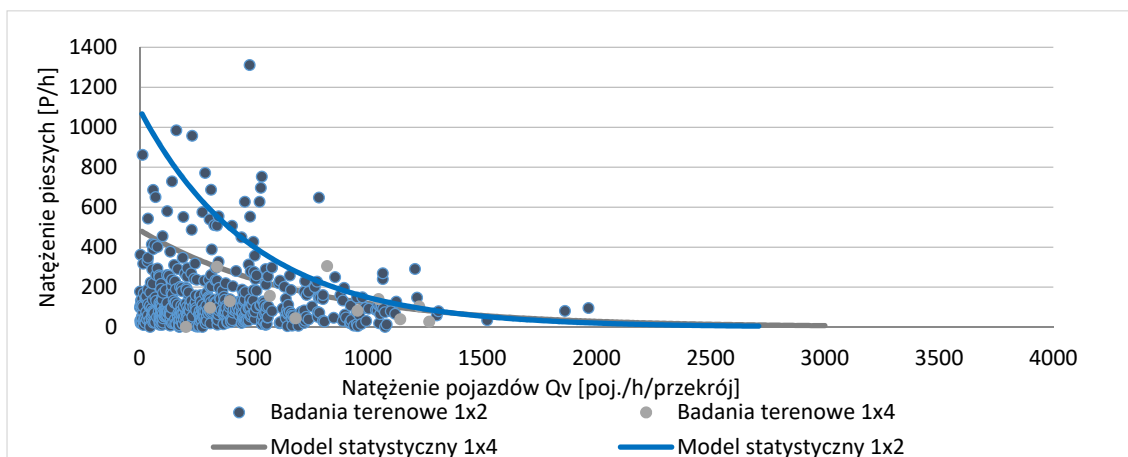
Tab.5.6 Zestawienie parametrów modelu zależności natężenia ruchu pieszego od natężenia ruchu kołowego na wybranych przejściach dla pieszych

Rodzaj przekroju ulicy		Współczynniki równania		Miary dopasowania	
		a	b	R ²	p
Dwukierunkowa	1x2	1088,29	-1,99	0,995	<0,05
	1x4	543,67	-1,75	0,834	<0,05
Jednokierunkowa	2x2	1803,60	-1,16	0,733	<0,05
	2x3	1164,28	-1,24	0,882	<0,05

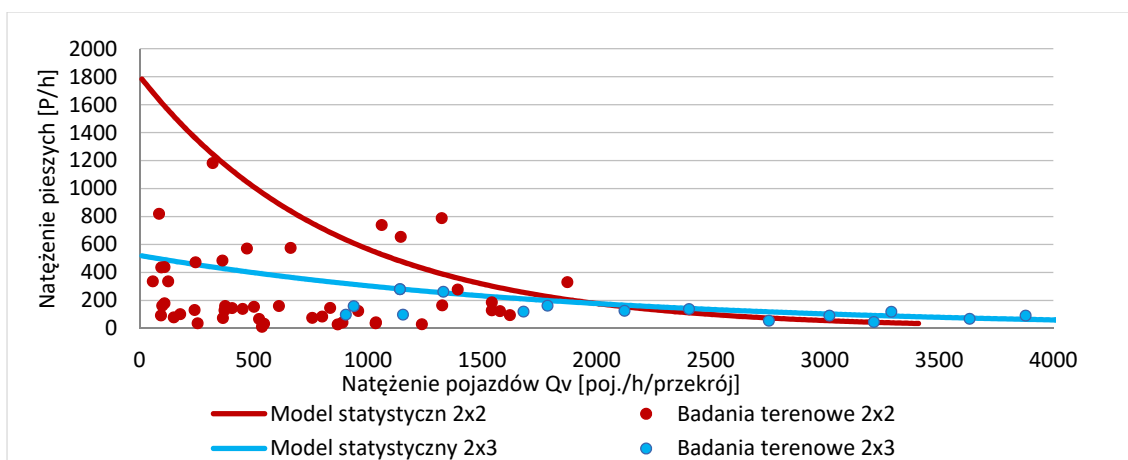
Wyniki analizy wskazują, że:

1. Wraz ze wzrostem natężenia ruchu kołowego zmniejsza się natężenie ruchu pieszego, wynikać to może z tego, że wraz ze wzrostem natężenia ruchu pojazdów zmniejsza się liczba akceptowanych przez pieszego luk w potoku pojazdów i zmniejsza się przepustowość przejścia oraz pogarszają warunki i bezpieczeństwo ruchu pieszego.
2. Na przejściach dla pieszych zlokalizowanych na jezdni jednokierunkowej natężenia ruchu pieszego są większe niż na jezdniach dwukierunkowych, wynika to między innymi z faktu zmniejszenia liczby luk akceptowanych przez pieszego w potoku dwukierunkowym.

3. Im większa liczba pasów ruchu na jezdni, tym większa długość przejścia dla pieszych, a tym samym zmniejsza się liczba luk akceptowanych oraz zmniejsza się natężenie ruchu i przepustowość przejścia dla pieszych.
4. Opracowane modele zależności $NP = f(NK)$ dość dobrze opisują wpływ natężenia ruchu kołowego na wielkość natężenia ruchu pieszego, w przypadku kilku wybranych przekrojów ulic, małego zakresu natężeń ruchu pieszego i kołowego oraz dla poziomu priorytetu dla pieszych przed zmianami wprowadzonymi w 2020 roku. Te modele mogą być wykorzystane, zatem do szacowania wielkości natężeń ruchu pieszego na przejściach sugerowanych i innych rozwiązaniach alternatywnych.



Rys.5.11 Rozkład zależności natężenia ruchu pieszego od natężenia ruchu kołowego na wybranych przejściach dla pieszych położonych na jezdniach dwukierunkowych



Rys.5.12 Rozkład zależności natężenia ruchu pieszego od natężenia ruchu kołowego na wybranych przejściach dla pieszych położonych na jezdniach jednokierunkowych

5.4.5. Akceptowane przez pieszego luki w potoku pojazdów

Jak stwierdzono w pkt. 5.4.4 liczba akceptowanych przez pieszego luk w potoku pojazdów wpływa na przepustowość przejść dla pieszych. Teoretycznie wielkość krytycznej (umożliwiającej bezpieczne przejście pieszego przez jezdnię na przejściu) luki czasowej zależy od długości przejścia dla pieszych, a luki przestrzennej dodatkowo od prędkości pojazdu na odcinku poprzedzającym przejście (tab.5). Rzeczywista wielkość akceptowanej przez pieszego luki w potoku pojazdów może zależeć od wielu innych czynników jak: liczba kierunków ruchu i liczba pasów ruchu na jezdni, na której znajduje się przejście dla pieszych oraz cechy pieszego jak ostrość widzenia umożliwiającą rozpoznanie odległości i prędkości pojazdu, czy podejmowanie ryzykownych decyzji o przejściu bez zapewnionej krytycznej luki czasowej.

Teoretyczną wielkość luki czasowej w potoku pojazdów obliczono ze wzoru (5.11).

$$DT_{i,j} = \frac{LP_j}{VP_{i,j}} + TRP \quad (5.11)$$

Teoretyczną wielkość luki przestrzennej, oznaczającej odległość pojazdu od przejścia dla pieszych OPP obliczono ze wzoru (5.12).

$$OPP_{i,j,k} = \frac{VD_v}{3,6} \cdot \left(\frac{LP_j}{VP_{i,j}} + TRP \right) \quad (5.12)$$

gdzie:

$DT_{i,j}$ – teoretyczna luka czasowa umożliwiająca bezpieczne przekroczenie i-tej grupie pieszych jezdni na j-tym przejściu dla pieszych [s],

$OPP_{i,j,k}$ - teoretyczna luka przestrzenna umożliwiająca bezpieczne przekroczenie i-tej grupie pieszych jezdni na j-tym przejściu dla pieszych [s], przy k-tej prędkości pojazdów,

VD_v – prędkość k-tej grupy pojazdów na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych [m/s]

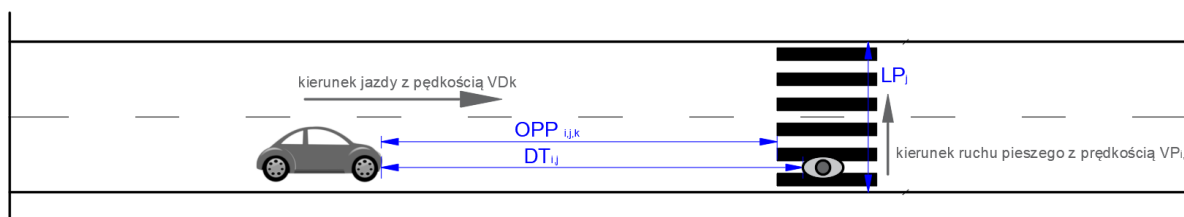
LP_j – długość j-tego przejścia dla pieszych [m],

$VP_{i,j}$ – prędkość i – tego pieszego (lub grupy pieszych) na j-tym przejściu dla pieszych [m/s],

TRP – czas reakcji oraz zejścia na jezdnię i zejścia z jezdni pieszego, przyjmowany o wartości 1,0 s.

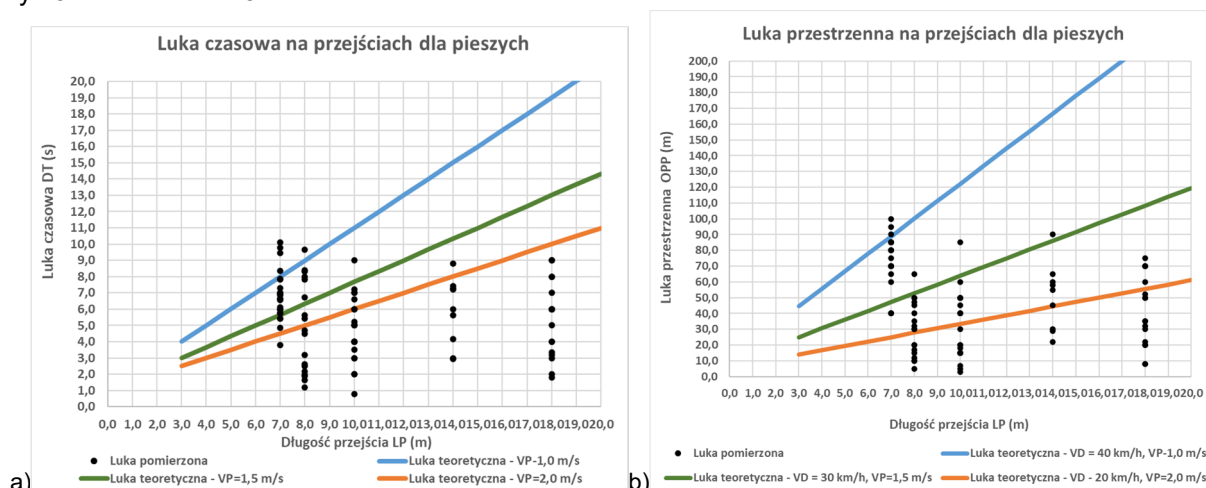
Zależności teoretyczne przedstawione na rys.5.14 przedstawiono dla $VD_{15} = 20$ km/h, $VD_{50} = 30$ km/h i $VD_{85} = 40$ km/h oraz dla $VP_{15} = 1,0$ m/s, $VP_{50} = 1,5$ m/s i $VP_{85} = 2,0$ m/s.

Luka akceptowalna (czas akceptowalny) jest to akceptowalny odstęp między pojazdem, a pieszym oczekującym na możliwość przejścia przez jezdnie. Może być określona w jednostce czasu (np. sekunda) lub odległości (np. metry). Przykład luki akceptowalnej został przedstawiony na rys.5.13. Sposób obliczania luki akceptowalnej został zaprezentowany w rozdziale 2.6.



Rys.5.13 Luka akceptowalna - przykład.

W celu określenia praktycznych wielkości akceptowanych przez pieszych luk w potoku pojazdów przeprowadzono badania na czterech wybranych przejściach dla pieszych bez sygnalizacji w Gdańsku i w Warszawie uwzględniając różny typ przekroju poprzecznego ulicy wyniki badań przedstawiono na rys.5.14 oraz w tab.5.



Rys.5.14 Wykresy wielkość luki na przejściach dla pieszych: a) luka czasowa, b) luka przestrzenna

Przedstawione wyniki wskazują, że:

- tylko w 35 % analizowanych przypadków pieszy przechodził przez przejście, gdy miał zapewniony czas, aby przejść przez całe przejście dla pieszych i opuścić je przed nadjeżdżającym pojazdem przyjęto, jako kategoria zachowań pieszego KZP_A,
- w 15 % przypadków pieszy wchodził na jezdnię, gdy pojazd znajdował się na odległym pasie ruchu, pieszy wchodził na jezdnię i przekraczał pas ruchu, po którym jechał pojazd za przejeżdżającym pojazdem, przyjęto, jako kategoria zachowań pieszego KZP_B,
- w 50 % przypadków pieszy, korzystając z obowiązującego w czasie prowadzenia badań prawa pierwszeństwa pieszego znajdującego się na przejściu dla pieszych, wchodził na jezdnię przed nadjeżdżającym pojazdem i zmuszali kierowców do zatrzymania się przed przejściem, często zmuszając ich do gwałtownego hamowania pojazdu, albo kierowca sam ustępował pierwszeństwa pieszemu i zatrzymywał się przed przejściem, przyjęto, jako kategoria zachowań pieszego KZP_C.

Tab.5.7 Luki akceptowalne – wykaz miejsc, w których były wykonywane badania terenowe

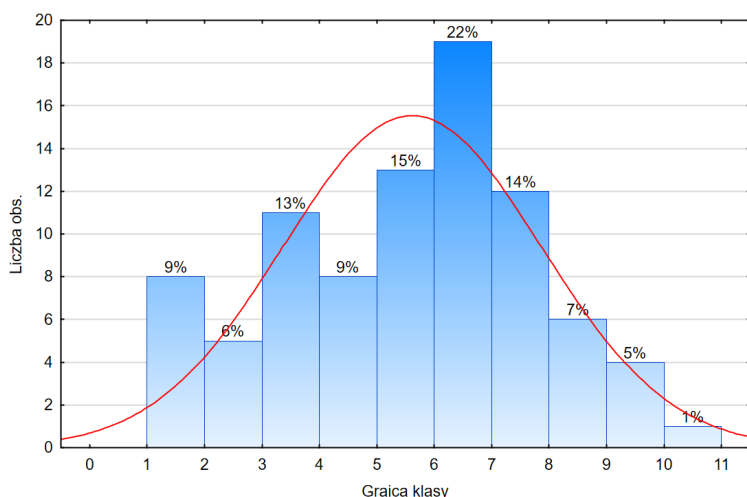
Lokalizacja przejścia	Przekrój ulicy	Oznaczenie	Długość przejścia dla pieszych [m]	Liczba przypadków w	Luka akceptowalna [s]			Prędkość pojazdu [km/h]		
					Max	Min	Średnia	Max	Min	Średnia
Gdańsk ul. Wodnika	1x2	2B	8	18	9,7	1,2	6,4	32,0	15,0	22,5
Warszawa, Plac trzech Krzyży	4 pasy	4P	18	17	9,0	1,8	5,4	45,0	12,0	27,8
Warszawa skrzyżowanie Al. Ujazdowskie - Al. Róż	1x4	4B	14	9	8,8	2,9	5,8	45,0	22,5	31,3
Gdańsk ulica Jana Pawła II	2x2	2P	19	23	10,1	3,8	6,8	51,3	26,6	39,3
Warszawa skrzyżowanie ulic Wiertnicza - Obornicka	2x3	3P	25	21	9,0	2,0	4,9	42,5	6,3	23,7
Razem:				88	Średnia 5,58			Średnia 29,17		

Na podstawie uzyskanych wyników z badań terenowych dla przejść dla pieszych z bez sygnalizacji świetlnej określone zostały wartości statystyk podstawowych. Odnotowane luki akceptowalne, dla całej badanej populacji, były w zakresie od 1,2 do 10,1 s. Moda, parametr wskazujący wartość o największym prawdopodobieństwie wystąpienia to luka akceptowalna wynosząca 6 [s]. Odchylenie standardowe przedstawia odchylenie od średniej i wynosi 2,2 s. Wyniki przedstawiono w tab.5.

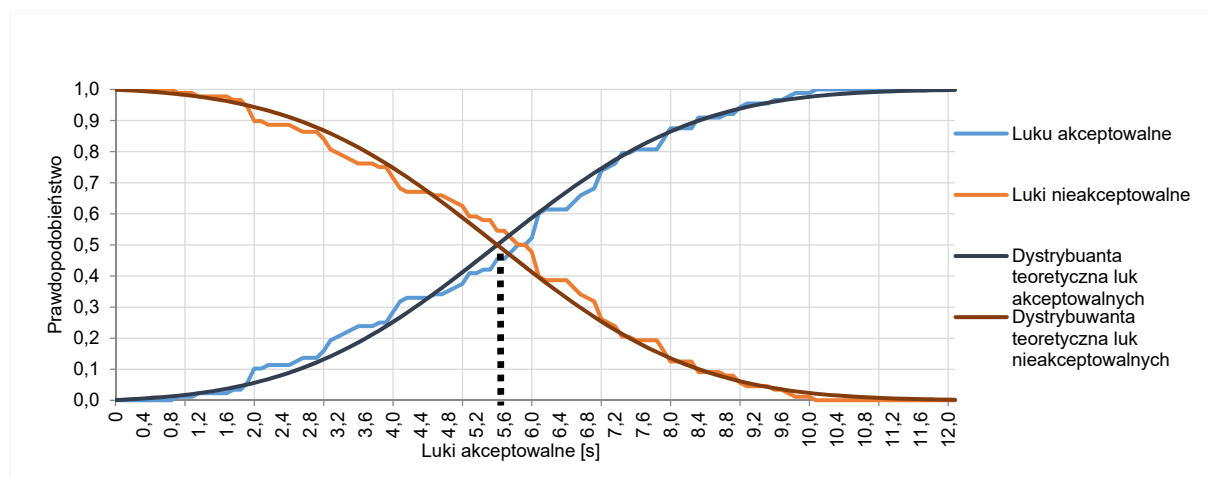
Tab.5.8 Statystyki podstawowe dla luk akceptowalnych dla przejść dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej

Statystyki	Odstęp akceptowalny
Liczba elementów w bazie [liczba]	89
Średnia luka akceptowalna [s]	5,58
Minimalny odstęp akceptowalny [s]	1,2
Maksymalny odstęp akceptowalny [s]	10,01
Moda [liczba]	6,0
Odchylenie standardowe [liczba]	2,2
Poziom istotności p	0,049
Mediana [liczba]	5,96
Kurtoza [liczba]	0,83
Skośność	0,07

Na rys.5.15 przedstawiono uzyskany rozkład akceptowanych luk czasowych uzyskanych w badaniach prowadzonych na wybranych przejściach dla pieszych. W badanej populacji, piesi najczęściej decydowali się na przekroczenie jezdni, gdy luka akceptowalna była w zakresie od 6,0 do 7,0 s. Uzyskane wyniki opisano rozkładem normalnym. Wyniki przedstawiono na rys.5.15. Średnia luka akceptowana przez pieszych na badanych przejściach wyniosła 5,58 s (tab.5, rys.5.16).



Rys.5.15 Histogram rozkładu luk akceptowalnych dla prędkości pieszych - przejścia dla pieszych



Rys.5.16 Dystrybuanty rozkładu luk akceptowanych i nieakceptowanych na badanych przejściach dla pieszych.

Korzystając z wyników pomiarów podjęto próbę opracowania modeli zależności pomiędzy akceptowaną luką czasową DT , prędkością pieszego VP i kategorią zachowania pieszego KZP oraz akceptowanej luki przestrzennej OPP w zależności od prędkości pojazdu na dojeździe do przejścia dla pieszych VD oraz kategorii zachowania pieszego KZP . Rozkłady luk czasowych wraz z modelami opisującymi analizowane zależności przedstawiono na rys.5.17, natomiast w tab.5 przedstawiono uzyskane parametry modeli.

Dobrze opisującym zależności luk czasowych jest model opisany równaniem):

$$DT_i = a * VP + b \quad (5.13)$$

Dobrze opisującym zależności luk przestrzennych jest model:

$$OPP_i = a * VD + b \quad (5.14)$$

Dobrze opisującym modelem zależności prędkości pieszego na przejściu dla pieszych jest model opisany równaniem :

$$VP_i = a * DT^b \quad (5.15)$$

gdzie:

DT – luka czasowa akceptowana przez pieszego [s],

OPP – luka przestrzenna akceptowana przez pieszego [m],

VP – prędkość pieszego na przejściu dla pieszych [m/s],

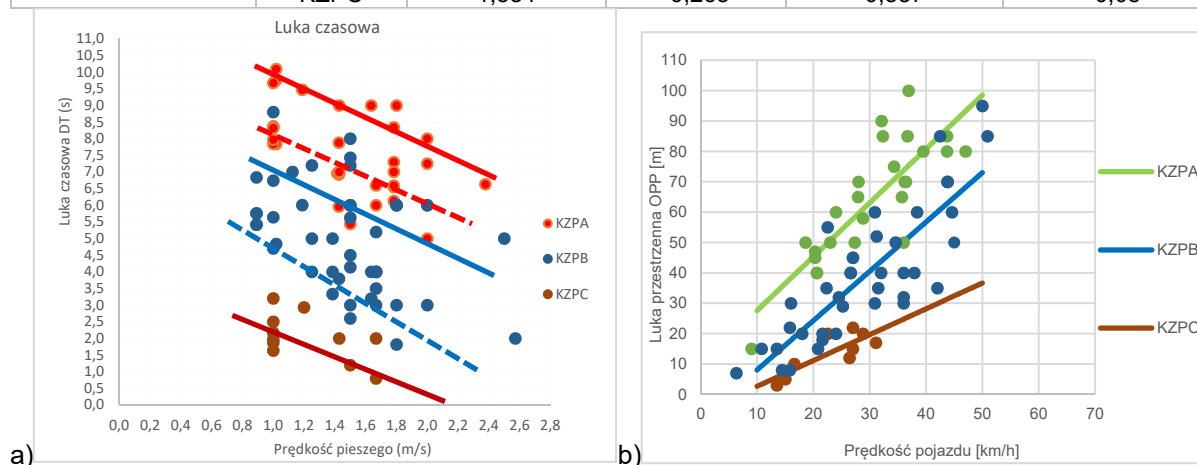
Vv – prędkość pojazdu na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych [km/h],

LP – długość przejścia dla pieszych [m],

KZP – kategoria zachowań pieszego.

Tab.5.9 Zestawienie parametrów modeli zależności luki czasowej i luki przestrzennej na przejściach dla pieszych

Model		Współczynniki równania		Miary dopasowania	
		a	b	R ²	p
Luka czasowa DT	KZPA	-1,916	11,916	0,504	<0,05
	KZPB	-1,917	9,117	0,403	<0,05
	KZPC	-1,327	3,645	0,396	<0,05
Luka przestrzenna OPP	KZPA	1,773	-9,847	0,672	<0,05
	KZPB	1,624	8,203	0,701	<0,05
	KZPC	0,850	5,867	0,712	<0,05
Prędkość pieszego VP	KZPA	7,384	-0,783	0,573	<0,05
	KZPB	2,875	-0,488	0,534	<0,05
	KZPC	1,534	-0,263	0,557	<0,05

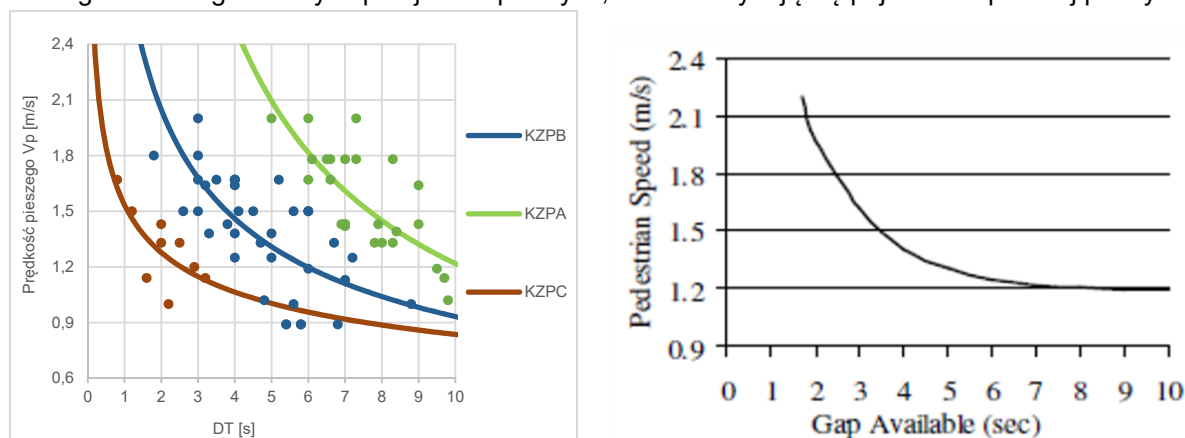


Rys.5.17 Wykres zależności: a) luki czasowej, b) luki przestrzennej na przejściu od prędkości pieszego lub pojazdu na odcinku dojazdowym do przejścia i kategorii zachowań pieszego.

Przedstawione wyniki wskazują, że:

- luka czasowa wynosząca 5,6 [s] w potoku pojazdów jest najczęściej akceptowana przez pieszych przechodzących przez jezdnię,
- w przebadanej populacji, piesi bardzo często zdecydowali się na przekroczenie jezdni, gdy luka akceptowalna była w zakresie od 5,0 do 8,0 [s],
- podobnie jak w badaniach prowadzonych we Włoszech [80], im mniejsza luka akceptowana tym większa prędkość pieszego przechodzącego przez jezdnię (rys.5.18).

Biorąc pod uwagę zmianę zasad funkcjonowania przejść dla pieszych w Polsce od 1 czerwca 2021 roku, w dalszych pracach można wykorzystać tylko niektóre wyniki zaprezentowanych badań. Przede wszystkim do oceny funkcjonowania oraz projektowania rozwiązań alternatywnych, a w szczególności sugerowanych przejść dla pieszych, które zaczynają się pojawiać w polskiej praktyce.



Rys.5.18 Wykres zależności pomiędzy luką czasową a prędkością pieszego: a) na wybranych przejściach dla pieszych w Gdańsku i Warszawie, b) na przejściu dla pieszych o długości 5,5 m we Włoszech [80].

5.5. Badania prędkości pieszych na przejściach dla pieszych

5.5.1. Charakterystyka badań terenowych

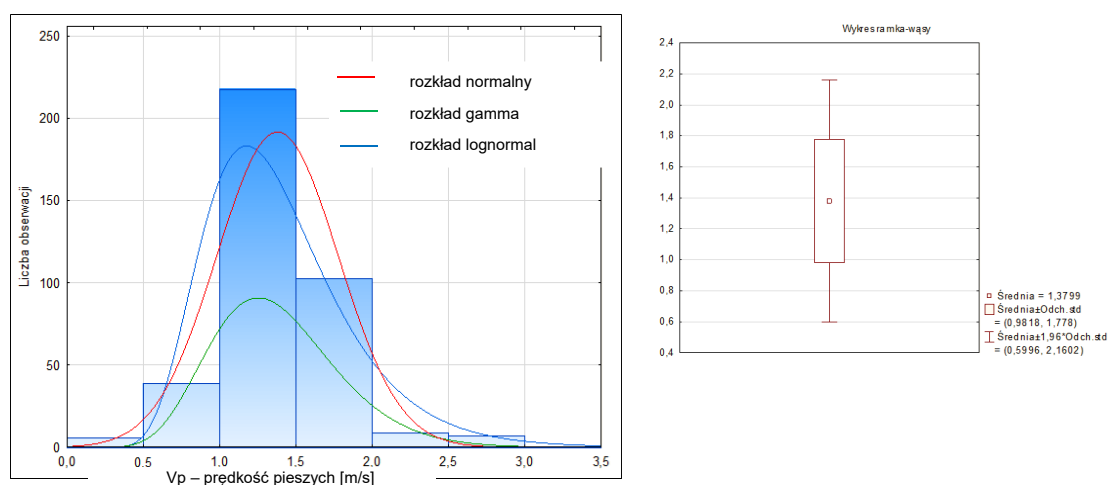
Istotnym parametrem wykorzystywanym przy projektowaniu urządzeń dla pieszych jest czas przejścia pieszego przez jezdnię, który zależy od długości przejścia i prędkości pieszego na przejściu. Prędkość pieszego uzależniona jest od wielu czynników, z których jednym z najbardziej istotnych jest sprawność pieszego zależna od jego wieku. Parametr ten służy do projektowania programów sygnalizacji świetlnej na przejściach dla pieszych i skrzyżowaniach, a także do projektowania innych urządzeń dla pieszych [30]. W ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania prędkości pieszych na 5-u zwykłych przejściach dla pieszych bez sygnalizacji oraz na 4-ch przejściach dla pieszych z sygnalizacją. Charakterystykę badanych przejść przedstawiono w załączniku Z.2.1. Na rys. Z.2.1 przedstawiono schemat przejścia z podstawowymi parametrami geometrycznymi

5.5.2. Prędkość pieszego na przejściach bez sygnalizacji świetlnej

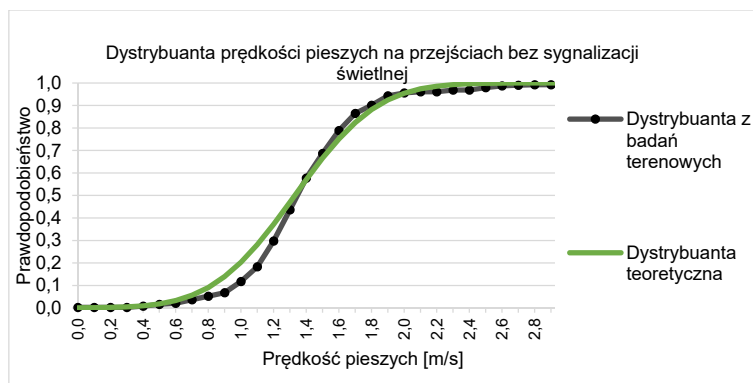
5.5.2.1. Charakterystyka i wyniki badań

Rozkłady prędkości pieszych uzyskanych z badań terenowych (danych empirycznych) opisano rozkładami teoretycznymi (rozkład normalny, gamma i lognormal). Poziom dopasowania tych rozkładów sprawdzono testem Kolmogorov-Smirnov i testem Chi-kwadrat. Wartości graniczna $p \leq 0,05$ uzyskana dla każdego z testów oznaczała, że rozkład opisuje zmienną z 95% pewnością. Na podstawie przyjętych założeń, spośród analizowanych rozkładów (rys.5.19), wybrano ten, który najlepiej opisuje analizowaną zmienną. Dla test Chi-kwadrat im wartość statystyki Chi-kwadrat bliższa jest zeru tym hipoteza zerowa jest bardziej wiarygodna [144]. Stwierdzono, że badaną populację pieszych dobrze opisuje wykres Normalny, spełniając założenia dla testów (Kolmogorov-Smirnov, Chi-kwadrat) mieszczący się w 95% przedziale ufności.

Dla sporządzonego rozkładu stwierdzono, że 78,3% wyników znajduje się w maksymalnej odległości jednego odchylenia standardowego od średniej 1,38 m/s, natomiast 94,3% w odległości dwóch odchyliń od średniej. Uzyskanie wyników większych od średniej o trzy odchylenia standardowe jest mało prawdopodobne i stanowi jedynie 1.6% całej badanej populacji pieszych przechodzących przez przejście. Na rys.5.19 zaprezentowano wykres pudełkowy (ramka wąsy) obrazujący w formie graficznej parametry statystyki opisowej medianę, wartości minimalne maksymalne oraz kwartyle. Dane z badań terenowych, przedstawiono za pomocą dystrybuanty prędkości pieszych V_p z podziałem na grupy wiekowe rys.5.22. Zgodnie z tym, co zostało zaprezentowane w tab.5 osoby starsze wyraźnie przemieszczają się z prędkością mniejszą w odniesieniu do innych badanych grup pieszych



Rys.5.19 a)Histogram rozkładu prędkości pieszych b) Wykres ramka wąsy dla wskaźnika prędkość pieszych - przejścia dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej.



Rys.5.20 Dystrybuanta rozkładu prędkości pieszych na przejściu bez sygnalizacji świetlnej (dystrybuanta rzeczywista i teoretyczna dla rozkładu normalnego),

5.5.2.2. Wpływ charakterystyk pieszego na średnią prędkość pieszego

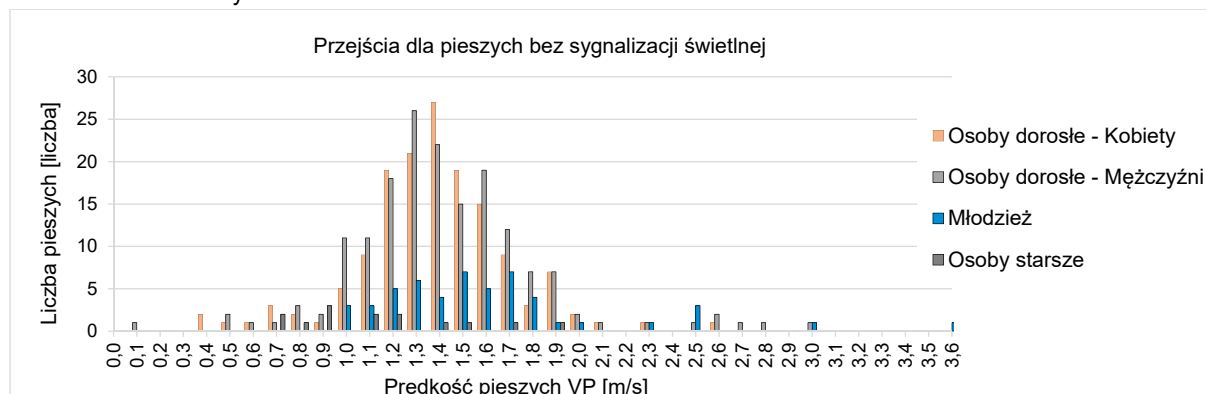
Z populacji badanych pieszych wydzielono cztery grupy pieszych: największą grupę osób dorosłych, (którą podzielono na dwie podgrupy: kobiety i mężczyzn) młodzież i osoby starsze. Niestety nie udało się uzyskać reprezentatywnych wyników prędkości w grupie wiekowej dzieci. Histogram rozkładu prędkości dla poszczególnych grup przedstawiono na rys.5.21, a parametry rozkładów w tab.5. Natomiast na rys.5.22 przedstawiono dystrybuanty rozkładów prędkości poszczególnych grup pieszych. Uzyskane wyniki wskazują, że:

1. Najszybciej na przejściach dla pieszych poruszają się młodzi piesi, którzy przemieszczają się z prędkością średnią SVP = 1,56 m/s, a 15 % pieszych przemieszcza się z prędkością VP85 nie mniejszą niż 1,80 m/s).
2. Osoby dorosłe przemieszczają się z prędkością średnią SVP = 1,34 – 1,38 m/s, tj. prędkość przemieszczania kobiet jest zbliżona do prędkości przemieszczania się mężczyzn.
3. Osoby starsze przemieszczają się z małą prędkością średnią SVP = 1,09 m/s, a 15 % tych pieszych przemieszcza się z prędkością nie większą niż VP15 = 0,71 m/s.

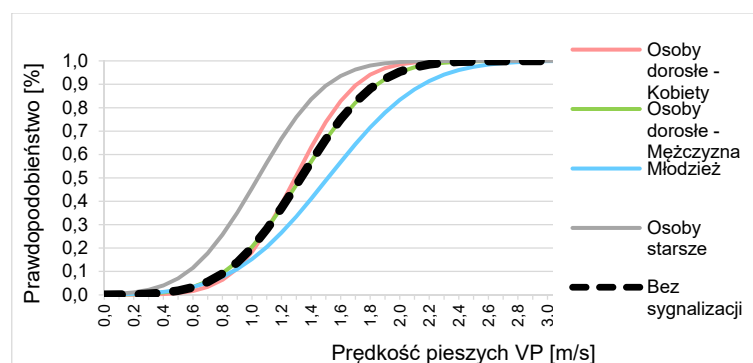
Tab.5.10 Parametry rozkładów prędkości wybranych grup pieszych przechodzących przez przejście bez sygnalizacji świetlnej

Grupa wiekowa	Płeć	Liczba	Prędkość średnia	Odchylenie standardowe	Wskaźnik zmienności	Kwantyl rozkładu prędkości [%]		
		N [os]	SVP [m/s]	OVP	WVP [%]	VP15	VP50	VP85
Osoby starsze	bd	14	1,09	0,37	33,9	0,71	1,06	1,51
Osoby dorosłe	Kobiety	149	1,34	0,33	24,2	1,10	1,38	1,64
	Mężczyźni	168	1,38	0,40	29,1	1,05	1,37	1,69
Młodzież	bd	52	1,56	0,50	32,2	1,16	1,5	1,80
Dzieci	bd	bd	-	-	-	-	-	-
Razem		383	1,38	0,40	28,9	1,06	1,38	1,68

bd – brak danych



Rys.5.21 Rozkłady prędkości pieszych na przejściach dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej z podziałem na grupy wiekowe i płeć



Rys. 5.22 Dystrybuanty rozkładów teoretycznych prędkości pieszych na przejściach bez sygnalizacji świetlnej z podziałem na grupy wiekowe.

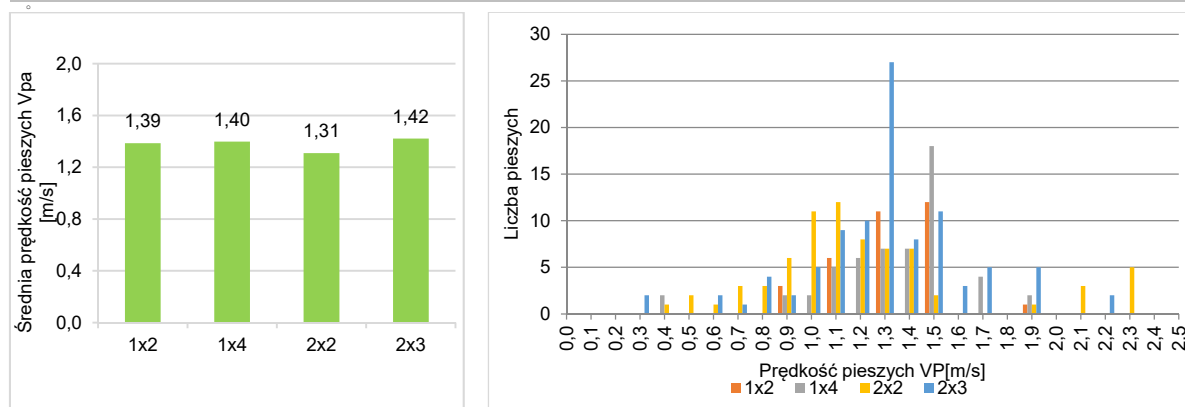
5.5.2.3. Wpływ rodzaju przekroju drogi na średnią prędkość pieszego

Z populacji badanych pieszych wydzielono cztery grupy pieszych przemieszczających przejście dla pieszych położony na: jezdni dwukierunkowej o przekroju 1x2 i 1 x 4 pasy ruchu oraz na jezdniach jednokierunkowych położonych na ulicy o przekroju 2x2 i 2x3 pasy ruchu. Rozkłady prędkości dla poszczególnych przekrojów jezdni przedstawiono na rys.5.23, a parametry rozkładów w tab.5. Natomiast na rys.5.24 przedstawiono dystrybuanty rozkładów prędkości grup pieszych na przejściach dla pieszych na poszczególnych przekrojach jezdni. Uzyskane wyniki wskazują, że:

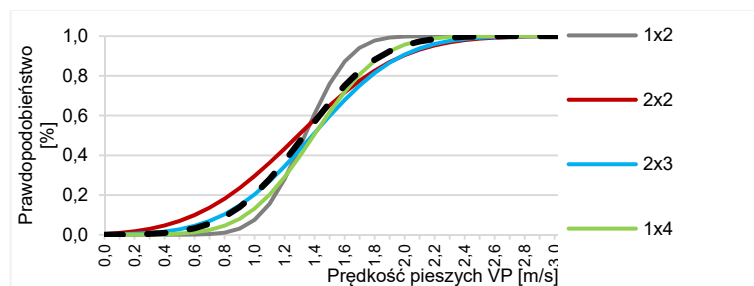
1. Przejścia położone na dwupasowej jezdni jednokierunkowej piesi pokonują za najmniejszą prędkością średnią SVP = 1,31 m/s, tj. mniejszą o 6 – 8 % niż na pozostałych jezdniach.
2. Na przejściach dla pieszych położonych na pozostałych przekrojach ulicy piesi przemieszczali się z prędkością średnią SVP = 1,39 – 1,42 m/s.
3. Analizując dystrybuantę prędkości pieszych w zależności od przekroju ulicy, zaobserwowano większe różnice aniżeli dla przejść z sygnalizacją świetlną rys.5.24. Pieszy przekraczający ulicę, z powodu braku sygnalizacji świetlnej, odczuwa mniejszy komfort przechodzenia. Przechodząc przez przejście dla pieszych na przekroju ulicy 1x4, 2x2, 2x3 osiąga wyższe prędkości maksymalne w odniesieniu do przekroju 1x2, najprawdopodobniej chcąc jak najszybciej pokonać całą długość przejścia dla pieszych.

Tab.5.11 Parametry rozkładów prędkości pieszych przechodzących przez przejście bez sygnalizacji świetlnej przez jezdnie o różnym przekroju poprzecznym

Przekrój ulicy	Liczba pasów ruchu	Liczba pieszych N [os]	Prędkość średnia SVP [m/s]	Odchylenie standardowe OVP	Wskaźnik zmienności WVP	Kwantyl rozkładu prędkości [%]		
						VP15	VP50	VP85
Jezdnia dwukierunkowa	1x2	33	1,39	0,23	16,92	1,14	1,33	1,60
	1x4	55	1,40	0,29	25,43	1,17	1,40	1,56
Jezdnia jednokierunkowa	2x2	74	1,31	0,50	21,01	0,95	1,19	1,60
	2x3	101	1,42	0,45	38,09	1,09	1,39	1,79
Razem		383	1,38	0,40	28,85	31,48	1,38	1,68



Rys. 5.23 Przejścia dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej w zależności od rodzaju przekroju ulic, a) średnia prędkość pieszych Vpa, b) histogramy rozkładu prędkości pieszych VP.

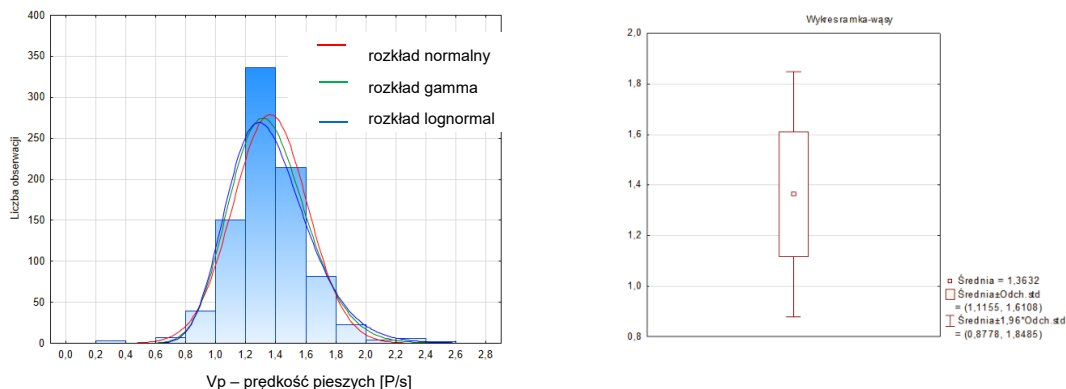


Rys.5.24 Dystrybuanty rozkładów prędkości pieszych na przejść bez sygnalizacji świetlnej z podziałem na rodzaj jezdni na której zlokalizowane było przejście dla pieszych.

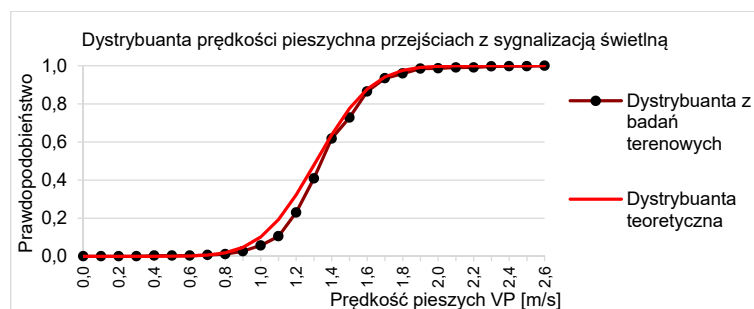
5.5.3. Prędkość pieszego na przejściach z sygnalizacją świetlną

Korzystając z oprogramowania Statistica, rozkłady pomiarzonych prędkości pieszych z sygnalizacją świetlną opisano za pomocą wybranych rozkładów prawdopodobieństwa (rozkład normalny, gamma i lognormal). Dopasowanie rozkładów teoretycznych do danych empirycznych sprawdzono testem Kolmogorov-Smirnov i testem Chi-kwadrat. Wartość graniczna $p \leq 0,05$ uzyskana dla każdego z testów oznaczała, że rozkład opisuje zmienne z 95% pewnością. Na podstawie przyjętych założeń, spośród analizowanych rozkładów (rys.5.25), stwierdzono, że badaną populację pieszych dobrze opisuje wykres Normalny, spełniając założenia dla testów (Kolmogorov-Smirnov, Chi-kwadrat) mieszczący się w 95% przedziale ufności. Dla sporządzonego rozkładu stwierdzono, że 75,7% wyników znajduje się w maksymalnej odległości jednego odchylenia standardowego od średniej 1,36 m/s, natomiast 95,9% w odległości dwóch odchyliń od średniej. Uzyskanie wyników większych od średniej o trzy odchylenia standardowe jest mało prawdopodobne i stanowi jedynie 1.3% całej badanej populacji pieszych przechodzących przez przejście.

Na rys.5.26, zaprezentowano wykres pudełkowy (ramka wąsy) obrazujący w formie graficznej parametry statystyki opisowej medianę, wartości minimalne maksymalne oraz kwartyle. Dane z badań terenowych, przedstawiono za pomocą dystrybuanty prędkości pieszych VP z podziałem na grupy wiekowe rys.5.28. Zgodnie z tym, co zostało zaprezentowane w tab.5 osoby starsze wyraźnie przemieszczają się z prędkością mniejszą w odniesieniu do innych badanych grup pieszych



Rys. 5.25 a) Histogram prędkości pieszych b) Wykres ramka wąsy dla wskaźnika prędkości pieszych.



Rys. 5.26 Dystrybuanta rozkładu prędkości pieszych na przejściu z sygnalizacją świetlną (dystrybuanta rzeczywista i teoretyczna dla rozkładu normalnego).

5.5.3.1. Wpływ wieku i płci na średnią prędkość pieszego

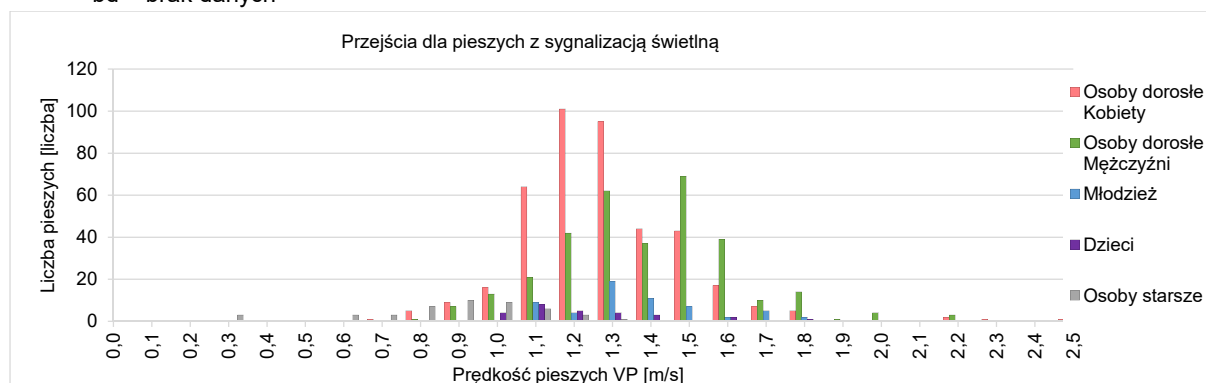
Z populacji badanych pieszych wydzielono pięć grup pieszych: największą grupę osób dorosłych, (którą podzielono na dwie podgrupy: kobiety i mężczyzn) oraz dzieci, młodzież i osoby starsze. Rozkłady prędkości dla poszczególnych grup pieszych przedstawiono na rys.5.27, a parametry rozkładów w tab.5. Natomiast na rys.5.28 przedstawiono dystrybuanty rozkładów prędkości poszczególnych grup pieszych. Uzyskane wyniki wskazują, że:

1. Na przejściach dla pieszych z sygnalizacją świetlną piesi poruszali się z średnią prędkością SVP = 1,36 m/s, 15 % (w tym prawie wszystkie osoby starsze) poruszały się z prędkością mniejszą niż VP15 = 1,13 m/s, natomiast 15 % (głównie dorośli mężczyźni i młodzież) z prędkością większą niż V85 = 1,57 m/s.
2. Osoby dorosłe przemieszczały się z prędkością średnią SVP = 1,34 – 1,45 m/s, przy czym prędkość przemieszczania kobiet była o 8 % mniejsza niż prędkość przemieszczania się mężczyzn.
3. Młodzież przemieszczała się prędkością średnią SVP = 1,40 m/s, a 15 % tych pieszych przemieszcza się z prędkością nie mniejszą niż VP85 = 1,58 m/s.
4. Dzieci przemieszczały się z prędkością średnią SVP = 1,28 m/s, a 15 % tych pieszych przemieszcza się z prędkością nie większą niż VP15 = 1,10 m/s.
5. Osoby starsze przemieszczały się z małą prędkością średnią SVP = 0,94 m/s, a 15 % tych pieszych przemieszcza się z prędkością nie większą niż VP15 = 0,79 m/s. Dystrybuanta rozkładu prędkości osób starszych jest mocno przesunięta w lewo w stosunku do dystrybuant prędkości pozostałych grup pieszych.

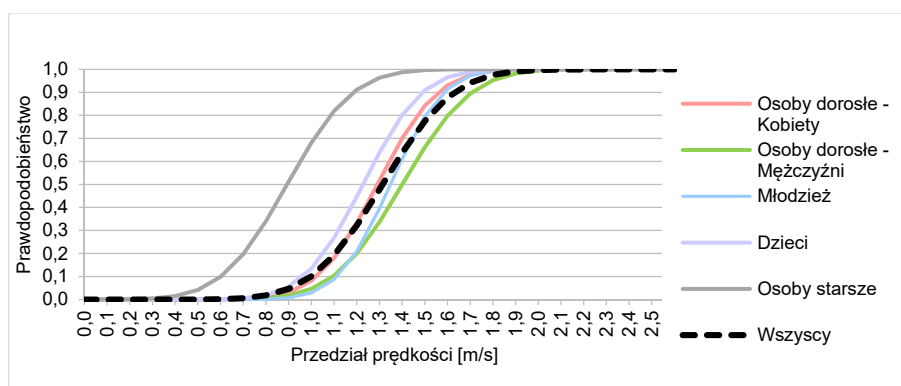
Tab.5.12 Parametry rozkładów prędkości wybranych grup pieszych przechodzących przez przejście z sygnalizacją świetlną

Grupa wiekowa	Płeć	Liczba pieszych	Prędkość średnia	Odchylenie standardowe	Wskaźnik zmienności	Kwantyl rozkładu prędkości[%]		
		N [os]	SVP [m/s]	OVP [m/s]	WVP [%]	VP15 [m/s]	VP50 [m/s]	VP85 [m/s]
Osoby starsze	bd	45	0,94	0,23	25,2	0,79	0,97	1,14
Osoby dorosłe	Kobiety	412	1,34	0,21	15,7	1,14	1,34	1,55
	Mężczyźni	324	1,45	0,24	16,6	1,26	1,41	1,66
Młodzież	bd	59	1,40	0,19	13,3	1,23	1,33	1,58
Dzieci	bd	27	1,28	0,21	16,2	1,10	1,26	1,46
Razem		867	1,36	0,25	18,4	1,13	1,35	1,57

bd – brak danych



Rys.5.27 Rozkłady prędkości pieszych na przejściach dla pieszych z sygnalizacją świetlną z podziałem na grupy wiekowe i płeć



Rys.5.28 Dystrybuanty rozkładów teoretycznych prędkości pieszych na przejściach z sygnalizacją świetlną z podziałem na grupy wiekowe.

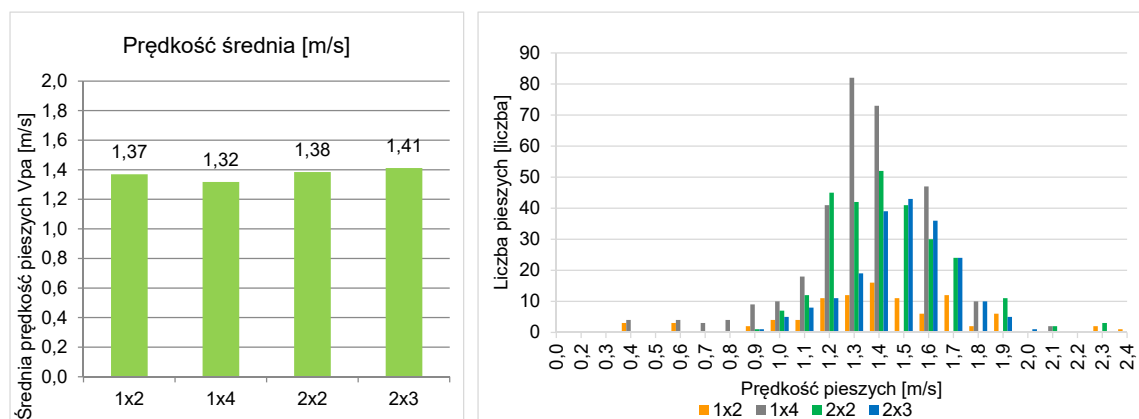
5.5.3.2. Wpływ przekroju ulicy na średnią prędkość pieszego

Z populacji badanych pieszych wydzielono trzy grupy pieszych przemierzających przejścia dla pieszych położonych na: jezdni dwukierunkowej o przekroju 1x2 i 1 x 4 pasy ruchu oraz na jezdni jednokierunkowej położonej na ulicy o przekroju 2x2 pasy ruchu. Rozkłady prędkości dla poszczególnych przekrojów jezdni przedstawiono na rys.5.29, a parametry rozkładów w tab.5. Natomiast na rys.5.30 przedstawiono dystrybuanty rozkładów prędkości grup pieszych na przejściach dla pieszych na poszczególnych przekrojach jezdni. Uzyskane wyniki wskazują, że:

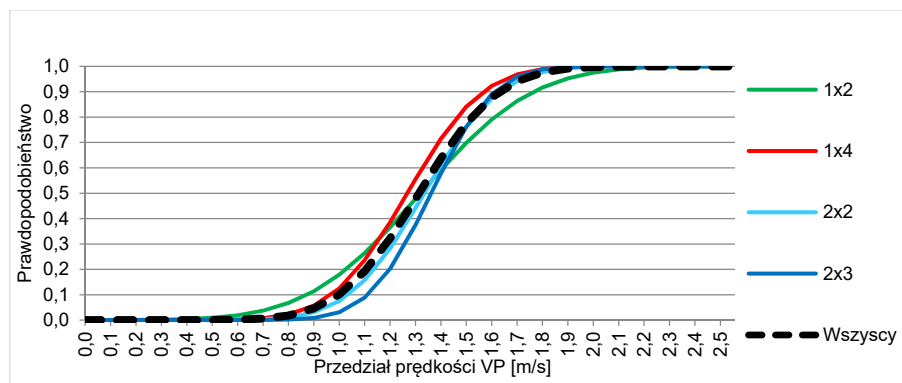
1. Prędkości średnie pieszych na przejściach dla pieszych położonych na różnego rodzaju jezdniach są zbliżone i wynoszą 1,32 – 1,40 m/s.
2. Przejścia położone na czteropasowej jezdni dwukierunkowej piesi pokonują za najmniejszą prędkością średnią SVP = 1,32 m/s, tj. mniejszą o 6 – 8 % niż na pozostałych jezdniach.
3. Na przejściach dla pieszych położonych na pozostałych przekrojach ulicy piesi przemieszczali się z prędkością średnią SVP = 1,37 – 1,40 m/s.
4. Dystrybuanty rozkładów prędkości pieszych na poszczególnych rodzajach jezdni mają podobny przebieg.

Tab.5.13 Parametry rozkładów prędkości pieszych przechodzących przez przejście z sygnalizacją świetlną przez jezdnie o różnym przekroju poprzecznym

Przekrój ulicy	Liczba pasów ruchu	Liczba pieszych N [os]	Prędkość średnia SVP [m/s]	Odchylenie standardowe OVP	Wskaźnik zmienności WVP	Kwantyl rozkładu prędkości[%]		
						VP15	VP50	VP85
Jezdnia dwukierunkowa	1x2	92	1,37	0,35	25,5	1,11	1,37	1,66
	1x4	303	1,32	0,23	17,8	1,05	1,26	1,57
Jezdnia jednokierunkowa	2x2	269	1,38	0,23	16,9	1,13	1,35	1,56
	2x3	203	1,41	0,20	13,9	1,25	1,41	1,61
Razem		867	1,36	0,25	18,2	1,13	1,35	1,57



Rys.5.29 Przejścia dla pieszych z sygnalizacją świetlną w zależności od rodzaju przekroju ulic, a) średnia prędkość pieszych Vpa, b) histogramy rozkładu prędkości pieszych VP.

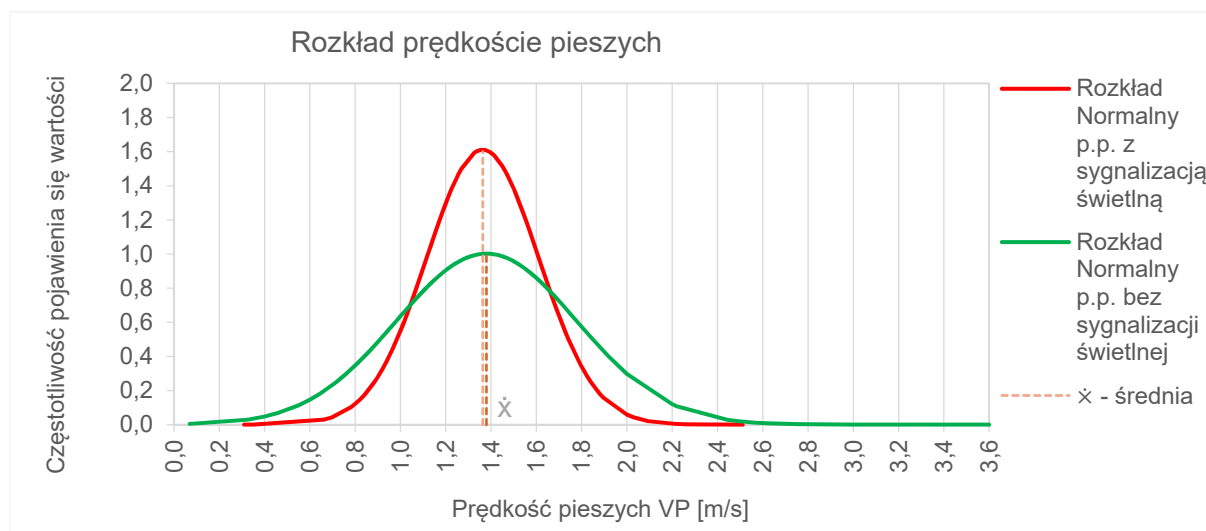


Rys.5.30 Dystrybuanty rozkładów prędkości pieszych na przejść z sygnalizacją świetlną z podziałem na rodzaj jezdni, na której zlokalizowane było przejście dla pieszych.

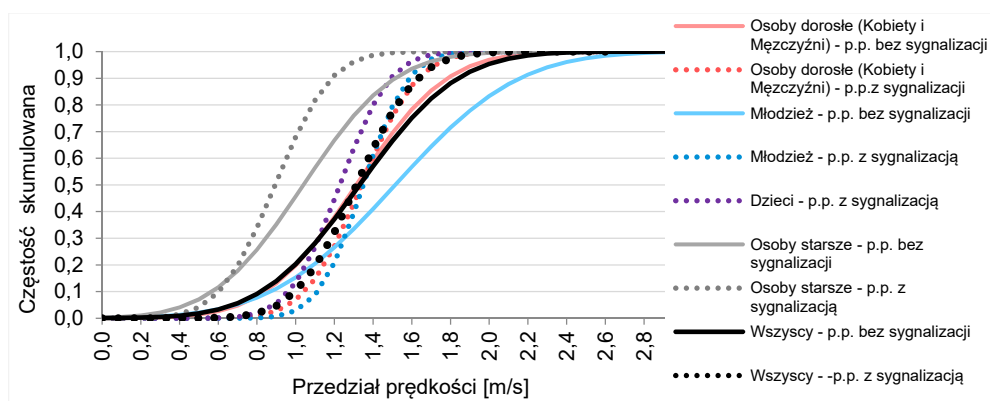
5.5.4. Porównanie prędkości pieszych na przejściach z i bez sygnalizacji świetlnej

Korzystając z wyników przeprowadzonych badań porównano uzyskane rozkłady prędkości pieszych dla przejść bez sygnalizacji świetlnej i z sygnalizacją świetlną, które przedstawiono na rys.5.31 i rys.5.32. Uzyskane wyniki umożliwiły sformułowanie następujących wniosków:

1. Średnie prędkości pieszych na obu rodzajach przejść są zbliżone, gdyż wynoszą 1,36 i 1,38 m/s.
2. Maksymalne prędkości pieszych (VP85) na przejściach dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej są znacznie większe niż na przejściach z sygnalizacją świetlną, co prawdopodobnie spowodowane jest brakiem komfortu bezpieczeństwa pieszego i chęcią szybkiego pokonania przejścia dla pieszych bez sygnalizacji. Na przejściu dla pieszych z sygnalizacją świetlną, pieszy czuje się bezpieczniej i osiąga mniejsze prędkości maksymalne.
3. Osoby starsze poruszają się znacznie wolniej od pozostałych grup pieszych, ze średnią prędkością ok. 1,0 m/s. Biorąc pod uwagę fakt, że społeczeństwo się starzeje, a osoby starsze stanowią obecnie ok. 24 procent spośród ludności Polski, należy dążyć do uwzględnienia parametrów ruchu osób starszych przy projektowaniu urządzeń infrastruktury miejskiej.
4. Dzieci poruszają się także wolniej niż osoby dorosłe i młodzież, ze średnią prędkością 1,28 m/s. Należy dążyć do uwzględnienia parametrów ruchu dzieci na trasach szkolnych przy projektowaniu urządzeń infrastruktury miejskiej.
5. Niestety brakuje w przeprowadzonych badaniach grupy osób z niepełnosprawnością ruchową i niepełnosprawnością wzrokową, ze względu brak takich osób na badanych przejściach dla pieszych.



Rys.5.31 Porównanie rozkładów normalnych opisujących histogramy prędkości pieszych na przejściach bez sygnalizacji świetlnej i z sygnalizacją świetlną



* p.p. – przejście dla pieszych

Rys.5.32 Dystrybuanty rozkładów prędkości pieszych na przejścia z sygnalizacją świetlną i bez sygnalizacji z podziałem na grupy wiekowe pieszych

5.5.5. Dyskusja wyników i rekomendacje

Piesi stanowią populację składającą się z różnych grup. Bardzo istotnym jest podział na grupy wiekowe, które posiadają różną sprawność. Parametrem opisującym sprawność ruchową pieszego jest prędkość pieszego. Z przeprowadzonych badań wynika (tab.5) wynika, że średnia prędkość pieszego dla całej populacji pieszych (1250 pieszych) na przejściach wynosi 1,37 m/s (82,3 m/min), natomiast poszczególnych grup wiekowych od 1,0 m/s (60,0 m/min) w grupie osób starszych do 1,47 m/s (88,2 m/min) w grupie młodzieży. Prędkość V15 w grupie osób starszych wynosi 0,78 m/s (46,8 m/min), a prędkość V85 w grupie młodzieży wynosi 1,72 m/s (103,2 m/min).

Tab.5.14 Zestawienie prędkości różnych grup pieszych uzyskanych na podstawie badań własnych w całej badanej populacji

Grupa wiekowa	Badania własne			Badania zagraniczne [2]
	Prędkość średnia [m/s]	Kwantyl rozkładu prędkości [m/s]		Prędkość średnia [m/s]
		SVP	VP85	
Osoby starsze	1,0	0,78	1,15	1,20
Osoby dorosłe	1,38	1,15	1,65	--
Młodzież	1,47	1,18	1,72	1,45
Dzieci	1,28	1,1	1,46	1,36
Osoby z niepełnosprawnościami	--	--	--	--
Średnia	1,37	1,1	1,59	1,37

W dotychczasowej praktyce projektowej w Polsce stosowano najczęściej prędkość pieszego 1,4 m/s (5,0 km/h) przy ustalaniu programów sygnalizacji i wyznaczaniu pól dobrej widoczności. W literaturze [40] przedstawiono wyniki średniej prędkości pieszych realizowane przez 25 badaczy z 12 krajów na podstawie, których stwierdzono, że średnia prędkość pieszych zwiera się w przedziale od VP=1,08 [m/s] (badania z 1988 wykonanych przez Koushki w Arabii Saudyjskiej), do VP=1,60 [m/s] (badania z 1958 wykonanych przez Hankin & Wright w Wielkiej Brytanii). Średnia prędkość pieszych z przedstawionych 25 badań wynosi VP=1,34 [m/s].

Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki oraz doświadczenia innych krajów rekomenduje się rozwiązania zaproponowane w tab.5 w zakresie stosowania prędkości grup pieszych w praktyce projektowej infrastruktury dla pieszych, a w szczególności w projektowaniu programów sygnalizacji świetlnej, ustalaniu czasów ewakuacji pieszych, ustalaniu długości przejścia dla pieszych, określaniu obszarów dobrej widoczności i projektowaniu innych urządzeń infrastruktury dla pieszych proponuje się:

1. W warunkach normalnych stosowanie prędkości pieszych - VP = 1,2 m/s.
2. W trudnych warunkach tj. w okresach ruchu szczytowego, gdy występuje bardzo małe natężenie ruchu pieszego oraz brak w potoku pieszych osób starszych lub osób z niepełnosprawnościami – VP = 1,4 m/s.
3. Gdy w potoku pieszych występują osoby starsze, które poruszają się znacznie wolniej od pozostałych grup pieszych, w szczególności na trasach położonych w pobliżu ośrodków zdrowia,

miejsc pobytu dziennego osób starszych, miejsc kultu itp., a także, gdy w potoku pieszych występują dzieci na trasach szkolnych i szkolnych przejściach dla pieszych – należy przyjmować do projektowania prędkość pieszego $V_P = 1,0$ m/s.

4. Gdy w potoku pieszych występują osoby z niepełnosprawnością ruchową i niepełnosprawnością wzrokową, w szczególności na trasach dla osób z niepełnosprawnościami – należy przyjmować do projektowania prędkość pieszego $V_P = 0,8$ m/s. Przyjęcie tej wartości uzasadnia także prędkość V_{15} w grupie osób starszych, która jest nieco poniżej 0,8 m/s.

Tab.5.15 Zestawienie rekomendowanych do projektowania średnich prędkości pieszego

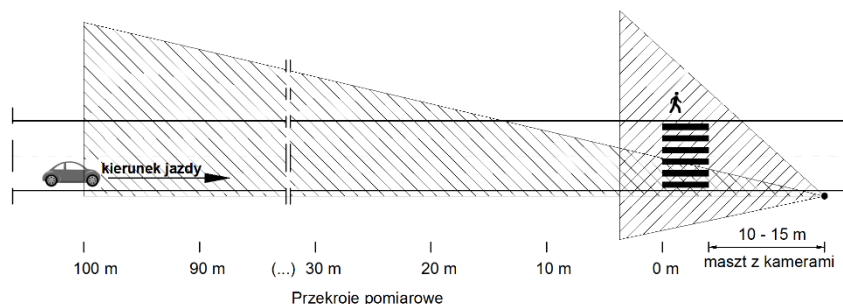
Warunki stosowania na przejściach dla pieszych	Proponowana średnia prędkość pieszego SVP		
	[m/s]	[m/min]	[km/h]
Osoby z niepełnosprawnością ruchową lub wzrokową (na trasach dla osób z niepełnosprawnościami)	0,8	48,0	2,9
Osoby starsze (na trasach w pobliżu ośrodków zdrowia, miejsc kultu itp.) oraz dzieci (na trasach i przejściach szkolnych)	1,0	60,0	3,6
Warunki normalne	1,2	72,0	4,3
Trudne warunki (okresy ruchu szczytowego, małe natężenie ruchu pieszego, brak osób starszych lub osób z niepełnosprawnościami)	1,4	84,0	5,0

5.6. Prędkość pojazdu na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych

5.6.1. Charakterystyka badań

Prędkość pojazdu na dojeździe do obszaru przechodzenia pieszych jest jednym z istotnych czynników wpływających na wielkość luki czasowej wybieranej przez pieszego przy przechodzeniu przez jezdnię. Do określenia prędkości pojazdów na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych wykorzystano wyniki badań zachowań uczestników ruchu przeprowadzonych, przy udziale aktywnej autorki, w 2015 roku w ramach projektu badawczego realizowanego na zlecenie Krajowej Rady Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego [24].

Metoda pomiarów prędkości pojazdów na dojeździe do przejścia dla pieszych, polega na estymacji ręcznej (manualnej) prędkości i odległości, poprzez przeglądanie zachowań poszczególnych pieszych zarejestrowanych na filmach wideo. Wzdłuż drogi nadjeżdżania pojazdów do przejścia dla pieszych ustawiono słupki i odnotowywano czas na każdym z nich. Zaletą metody jest jej prostota, natomiast wadą jest to, że prędkość i odległość są szacowane z mniejszą dokładnością, która zależy między innymi od kąta ustawienia kamery. Dodatkowo ustawienie słupków w okolicy drogi może wpływać na nienaturalne zachowanie kierowców. Schemat odcinka badawczego przedstawiono na rys.5.33.



Rys.5.33 Schemat odcinka badawczego na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych

Prędkość dla każdego odcinka obliczano z zależności:

$$V_{i,j} = \frac{TP_{i,j}}{DS_i} \quad (5.16)$$

gdzie:

$VD_{i,j}$ – prędkość pojazdu na i -tym segmencie odcinka dojazdowego do przyścia dla pieszych, dla j -tego przypadku zachowania pieszego [km/h],

$TP_{i,j}$ – czas przejazdu pojazdu na i -tym segmencie odcinka dojazdowego do przyścia dla pieszych, dla j -tego przypadku zachowania pieszego [s],

DS_i – długość i-tego segmentu odcinka dojazdowego do przejścia dla pieszych.

Badaniami objęto cztery sytuacje: 1 – brak pieszego, 2 – pieszy oczekuje na wejście na jezdnię, 3 – pieszy znajduje się na jezdni. Badania prędkości przeprowadzono na próbie 4117 pojazdów. Minimalna wielkość próby wynosiła 89, błąd oszacowania prędkości wynosił 0,01.

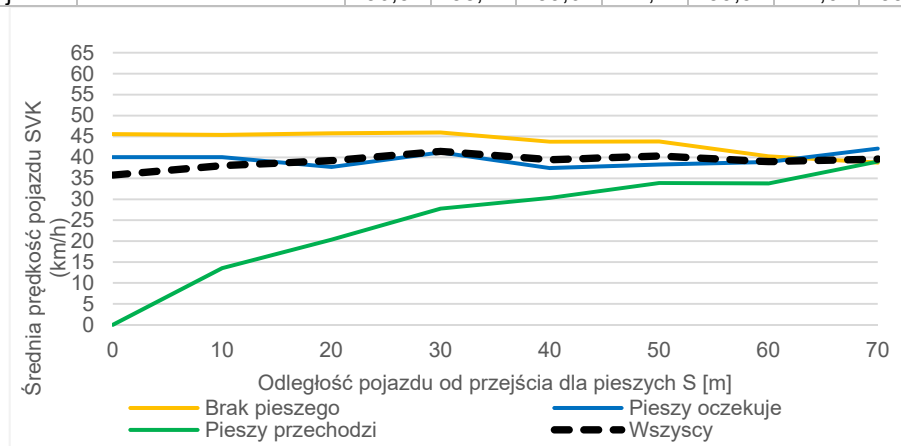
5.6.2. Wyniki badań prędkości pojazdów na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych

Wyniki badań dla warunków miejskich, z dopuszczalnym limitem prędkości 50 km/h przedstawiono w tab.5 i na rys.5.34. Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Badania zachowań pieszych i kierowców prowadzono w 2015 roku, gdy w ruchu drogowym obowiązywała zasada, że pierwszeństwo na przejściu miał tylko pieszy znajdujący się na przejściu, natomiast pieszy wchodzący na przejście lub dochodzący do przejścia nie posiadał pierwszeństwa. Ta zasada powodowała, że tylko w przypadku, gdy pieszy znajdował się na jezdni następowało zmniejszenie prędkości na odcinku dojazdowym, natomiast w pozostałych przypadkach kierowcy praktycznie nie zmniejszali prędkości, a w niektórych przypadkach wartość była wyższa niż średnia.
2. W odległości 70 m od przejścia średnia prędkość wszystkich pojazdów wynosiła $SVK_{7,4} = 39,6$ km/h, w przypadku, kiedy brak pieszych w rejonie przejścia $SVK_{7,1} = 38,8$ km/h, w przypadku, kiedy pieszy oczekiwał na przejście $SVK_{7,2} = 42,1$ km/h oraz w przypadku, kiedy pieszy przechodzi przez jezdnię $SVK_{7,3} = 39,7$ km/h.
3. W odległości 30 m od przejścia średnia prędkość wszystkich pojazdów wynosiła $SVK_{3,4} = 41,7$ km/h, w przypadku, kiedy brak pieszych w rejonie przejścia $SVK_{3,1} = 45,9$ km/h, w przypadku, kiedy pieszy oczekiwał na przejście $SVK_{3,2} = 41,2$ km/h oraz w przypadku, kiedy pieszy przechodzi przez jezdnię $SVK_{3,3} = 27,7$ km/h.
4. W odległości 0,0 m od przejścia średnia prędkość wszystkich pojazdów wynosiła $SVK_{0,4} = 36,5$ km/h, w przypadku, kiedy brak pieszych w rejonie przejścia $SVK_{0,1} = 45,6$ km/h, w przypadku, kiedy pieszy oczekiwał na przejście $SVK_{0,2} = 40,0$ km/h oraz w przypadku, kiedy pieszy przechodzi przez jezdnię $SVK_{0,3} = 0,0$ km/h.

Tab.5.16 Średnia prędkość pojazdów SVK [km/h] w zależności od odległości od przejścia dla pieszych S [m]

Badana sytuacja	Liczba przypadków	Odległość pojazdu od przejścia dla pieszych S [m]							
		0	10	20	30	40	50	60	70
		Prędkość średnia pojazdów [km/h]							
Wielkość próby N (poj.)	SVK0	SVK1	SVK2	SVK3	SVK4	SVK5	SVK6	SVK7	
Brak pieszego	2489	45,6	45,4	45,7	45,9	43,8	43,8	40,3	38,8
Pieszy oczekuje	920	40,0	40,0	37,7	41,2	37,5	38,3	38,9	42,1
Pieszy przechodzi	708	0,0	13,6	20,3	27,7	30,3	33,9	33,8	39,0
Wszystkie sytuacje	4117	36,5	38,7	39,6	41,7	39,9	41,0	39,0	39,6



Rys.5.34 Profile średniej prędkości pojazdów dojeżdżających do przejścia dla pieszych w zależności od sytuacji, w jakiej znajduje się pieszych.

5.6.3. Badania wpływu wybranych czynników na prędkość pojazdów na odcinku dojazdowym

Badania przeprowadzono na 18 odcinkach ulic, będącymi dojazdami do przejść dla pieszych. Odcinki te różniły się rodzajem przekroju poprzecznego ulicy oraz lokalizacją przejścia. Badania prowadzono na odcinkach położonych w ciągu ulic: na jezdni dwukierunkowej o przekroju 1x2 i 1x4 pasy ruchu oraz na jezdniach jednokierunkowych położonych na ulicy o przekroju 2x2 i 2x3 pasy ruchu. Przejścia dla pieszych były zlokalizowane: na odcinku pomiędzy skrzyżowaniami bez sygnalizacji, na odcinku między skrzyżowaniami z sygnalizacją świetlną, na wlotach na skrzyżowanie typu rondo oraz na skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną. Wyniki badań przedstawiono rys.5.35 i rys.5.36.

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. W przypadku, gdy pieszy oczekuje na wejście na jezdnię przy krawężniku pojazdy przejeżdżają przez odcinek dojazdowy i przejście dla pieszych prawie z niezmienną prędkością (rys.5.35).
2. W analizach uwzględniono też, przekrój ulicy, na której zlokalizowane jest przejście dla pieszych. Rodzaj przekroju ulicy wpływa na prędkość poruszania się pojazdu na odcinku dojazdowym. W przypadku przekroju 1x2 pasy ruchu rejestrowano średnią prędkość pojazdów w przedziale $SVK_2 = 22 - 30$ km/h, natomiast w przypadku pozostałych przekrojów (1x4, 2x2 i 2x3) średnia prędkość była w przedziale $SVK_2 = 39 - 52$ km/h.
3. W analizach uwzględniono też lokalizację przejścia dla pieszych na odcinku między skrzyżowaniami: z sygnalizacją świetlną (OMSS) i skrzyżowaniami bez sygnalizacji świetlnej (OMBS) oraz na skrzyżowaniach: rondo (SR) i z sygnalizacją świetlną (SS). Lokalizacja przejścia wpływa istotnie na prędkość poruszania się pojazdu na odcinku dojazdowym. W przypadku przejścia zlokalizowanego na odcinku między skrzyżowaniami rejestrowano średnią prędkość pojazdów w przedziale $SVK_2 = 62 - 45$ km/h. W przypadku lokalizacji przejścia na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną średnia prędkość pojazdów była w przedziale $SVK_2 = 46 - 35$ km/h, natomiast w przypadku lokalizacji przejścia dla pieszych na rondzie średnia prędkość pojazdów była w przedziale $SVK_2 = 22 - 8$ km/h.

Dla uzyskanych wyników z badań terenowych podjęto próbę dobrania modeli matematycznych, których postać zgodna jest z wzorem (5.17) :

$$SVK = a \cdot S + b \quad (5.17)$$

gdzie:

SVK – średnia prędkość pojazdu [km/h],

S – odległość pojazdu od przejścia dla pieszych [m],

a,b – parametry modelu matematycznego.

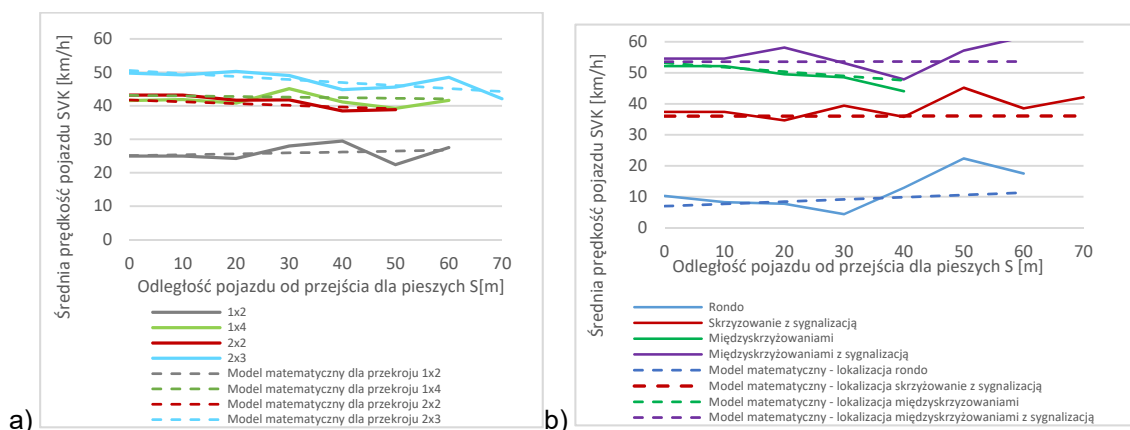
W tabeli tab.5, tab. 5.18 oraz rys.5.35 zaprezentowano parametry modelu liniowego dla średniej prędkości pojazdów dojeżdżających do przejścia dla pieszych, gdy pieszy oczekuje na przejście przez jezdnię przy krawężniku w zależności od rodzaju przekroju ulicy oraz od lokalizacji przejścia dla pieszych. Model matematyczny dla lokalizacji „między skrzyżowaniami z sygnalizacją” (tab.5), uzyskał niską wartość $R^2 (<0,4)$, w kierunkach dalszych prac, zaleca się wykonanie większej liczby badań i zweryfikowanie modelu.

Tab.5.17 Średnia prędkość pojazdów dojeżdżających do przejścia dla pieszych, gdy pieszy oczekuje na przejście przez jezdnię przy krawężniku w zależności od rodzaju przekroju ulicy

Przekrój (rys.5.35 a)	Parametr		R2
	a	b	
1x2	0,0271	25,1185	0,3560
1x4	-0,0176	43,1508	0,3457
2x2	-0,0524	41,7512	0,8531
2x3	-0,0896	50,5540	0,5727

Tab.5.18 Średnia prędkość pojazdów dojeżdżających do przejścia dla pieszych, gdy pieszy oczekuje na przejście przez jezdnię przy krawężniku w zależności od lokalizacji przejścia

Przekrój (rys.5.35 b)	Parametr		R2
	a	b	
Rondo	7,1967	7,0040	0,47
Skrzyżowanie z sygnalizacją	0,0796	36,0183	0,42
Między skrzyżowaniami	-14,1979	53,2518	0,88
Między skrzyżowaniami z sygnalizacją	0,0565	53,6030	0,38



Rys.5.35 Profile średniej prędkości pojazdów dojeżdżających do przejścia dla pieszych, gdy pieszy oczekuje na przejście przez jezdnię przy krawężniku w zależności od: a) rodzaju przekroju ulicy, b) lokalizacji przejścia

Dla pieszych oczekujących przy krawędzi jezdni na przejście przez jezdnię, pojazd nieznacznie zmniejsza prędkość w okolicy 40-50 [m] przed przejściem, następnie, im bliżej przejścia, przemieszcza się z podobną prędkością (rys.5.35).

- Rodzaj przekroju ulicy wpływa na średnią prędkość poruszania się pojazdu SVK na odcinku dojazdowym. Na długości analizowanego odcinka średnia prędkość pojazdów wynosi około 25-30 km/h na jezdni o przekroju 1x2 do około 45-50 km/h, na jezdni o przekroju 2x3.
- Lokalizacja przejścia dla pieszych wpływa na średnią prędkość pojazdu SVK. Największą prędkość odnotowano na odcinku między skrzyżowaniami z sygnalizacją świetlną (OMBS) średnia prędkość pojazdów wynosiła 48-60 km/h, w przypadku przejścia położonego na odcinku między skrzyżowaniami bez sygnalizacji świetlnej (OMBS) średnia prędkość pojazdu była między 45-52 km/h. Na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną (SS) średnia prędkość pojazdów wynosiła około 35 - 45 km/h. Najmniejszą prędkość średnią odnotowano w przypadku lokalizacji przejścia na skrzyżowaniu rondo, gdzie średnia prędkość pojazdów na odcinku dojazdowym wynosiła około 5- 22 km/h.

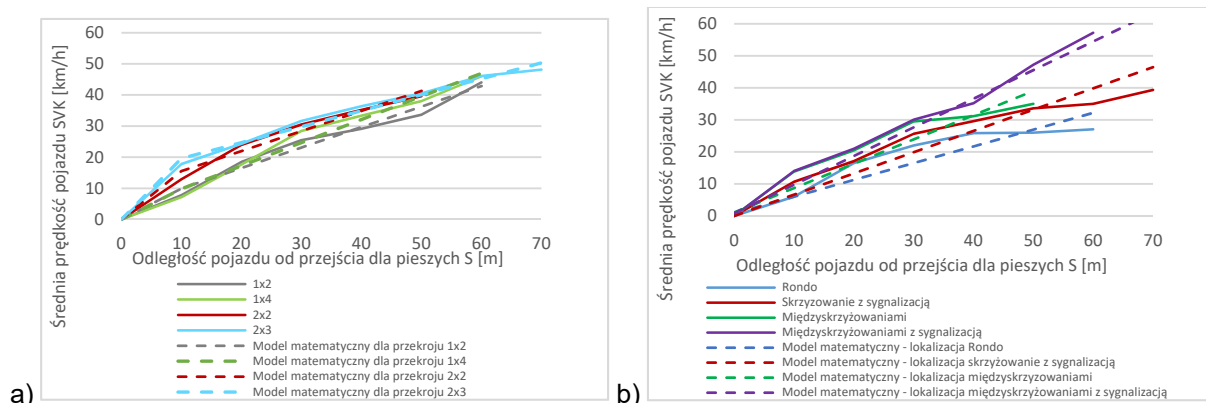
W tabeli tab.5, tab.5 oraz rys.5.36, zaprezentowano parametry modelu liniowego dla średniej prędkości pojazdów dojeżdżających do przejścia dla pieszych, gdy pieszy przechodzi przez przejście dla pieszych w zależności od rodzaju przekroju ulicy oraz od lokalizacji przejścia dla pieszych.

Tab.5.19 Średnia prędkość pojazdów dojeżdżających do przejścia dla pieszych w sytuacji, gdy pieszy przechodzi przez przejście dla pieszych w zależności od rodzaju przekroju ulicy

Przekrój (rys.5.36 a)	Parametr		R2
	a	b	
1x2	0,658	3,388	0,97
1x4	0,743	2,408	0,97
2x2	0,645	9,085	0,96
2x3	0,512	14,489	0,98

Tab.5.20 Średnia prędkość pojazdów dojeżdżających do przejścia dla pieszych w sytuacji, gdy pieszy przechodzi przez przejście dla pieszych w zależności od lokalizacji przejścia.

Przekrój (rys.5.36 b)	Parametr		R2
	a	b	
Rondo	0,523	0,8210	0,82
Skrzyżowanie z sygnalizacją	0,664	0,0172	0,95
Między skrzyżowaniami	0,759	1,1430	0,94
Między skrzyżowaniami z sygnalizacją	0,895	0,8570	0,98



Rys.5.36 Profile średniej prędkości pojazdów dojeżdżających do przejścia dla pieszych w sytuacji, gdy pieszy przechodzi przez przejście dla pieszych w zależności od: a) rodzaju przekroju ulicy, b) od lokalizacji przejścia,

Gdy pieszy przechodzi przez jezdnię pojazdy dojeżdżają do przejścia systematycznie zmniejszając prędkość, aby zatrzymać się przed przejściem (rys.5.36).

- c) Rodzaj przekroju ulicy wpływa nieznacznie na prędkość poruszania się pojazdu na odcinku dojazdowym. Na długości analizowanego odcinka średnia prędkość pojazdów zmieniała się w przedziale $SVK_3 = 49 - 0,0$ km/h.
- d) Lokalizacja przejścia dla pieszych na odcinku między skrzyżowaniami wpływa na prędkość na początku odcinka dojazdowego: w przypadku położeniu przejścia na odcinku między skrzyżowaniami bez sygnalizacji (OMBS) średnia prędkość pojazdów wynosiła $SVK_1 = 57$ km/h, w przypadku przejścia położonego na odcinku między skrzyżowaniami z sygnalizacją świetlną (OMBS) oraz na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną (SS) średnia prędkość pojazdów wynosiła $SVK_1 = 40$ km/h, natomiast w przypadku lokalizacji przejścia na skrzyżowaniu rondo średnią prędkość pojazdów na początku odcinka dojazdowego wynosiła $SVK_1 = 27$ km/h.

5.7. Badania zależności pomiędzy prędkością, gęstością i natężeniem ruchu pieszego na kładce dla pieszych

5.7.1. Charakterystyka badań

5.7.1.1. Opis badań

Kładka dla pieszych na Wyspę Ołowiankę, nie odzwierciedla w pełni zachowań, jakie panują na przejściach dla pieszych, ponieważ nie dochodzi do interakcji z pojazdami. Miejsce to wybrano do poligonu badawczego, ponieważ charakteryzuje się bardzo dużymi natężeniami pieszych. Kładka dla pieszych na Wyspę Ołowiankę jest zwodzona (rys.5.37), a dostęp dla pieszych jest przez 30 minut w każdej godzinie od 7 do 19 w okresie letnim. Piesi gromadzą się przy blokadach zabezpieczających przed wпадnięciem do wody, gdy kładka jest podniesiona, oczekując na możliwość przekroczenia kładki. W momencie opuszczenia kładki i otwarcia blokad zabezpieczających, występują największe natężenia pieszych, które wraz z upływem czasu maleją. Ze względu na duże natężenia pieszych, których brak na przejściach dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej w obszarze Trójmiasta i mimo świadomości odmienności tego punktu badawczego względem przejść dla pieszych, zdecydowano, że posłużą on do weryfikacji modelu referencyjnego (autorskiego).



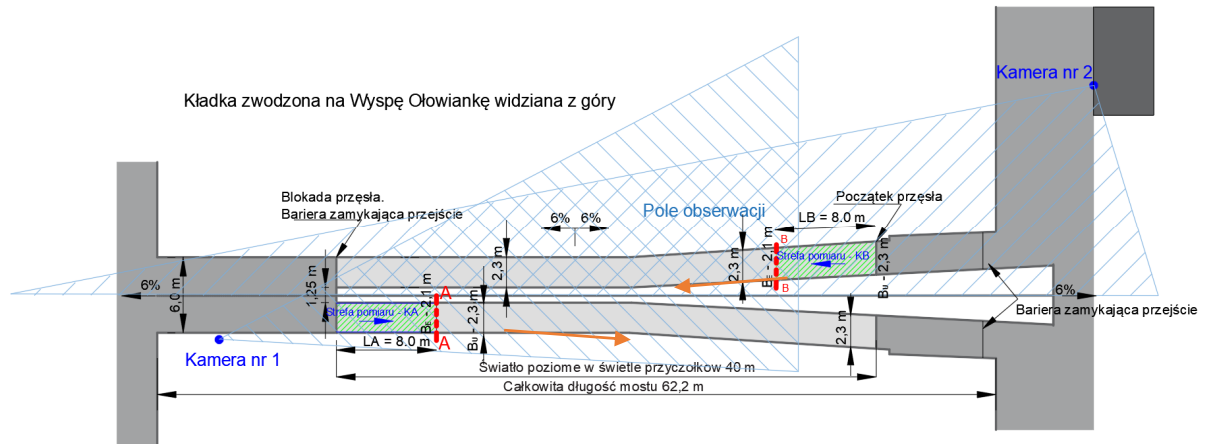
Rys.5.37 Widok kładki dla pieszych na wyspę Ołowianka w Gdańsku: a) z boku, b) z góry, c) w przekroju poprzecznym

5.7.1.2. Cel i zakres badań

Celem badań było określenie zależności pomiędzy prędkością gęstością i natężeniem ruchu pieszych w warunkach bazowych tzn. bez udziału ruchu kołowego. Tego rodzaju badania prowadzone były na kładkach lub w tunelach w innych krajach i pozyskane dane posłużyły do określenia zależności prędkości, natężenia i gęstości ruchu pieszych w warunkach wzorcowych (bazowych) [103]. Badanie obejmowało pomiar natężenia ruchu, gęstości i czasu przejścia pieszych przez wybrany odcinek kładki dla pieszych w warunkach dużego zatłoczenia. Na tej podstawie oszacowano prędkość średnią potoku pieszych w zależności od natężenia i gęstości potoku pieszych.

5.7.1.3. Metodyka badań

Badania prowadzono z wykorzystaniem techniki video. Pozyskano filmy z nagrań prowadzonych przez zarządcę kładki – GZDiZ w Gdańsku. Do badań nagrania przeprowadzone w soboty i niedziele podczas corocznego Jarmarku Dominikańskiego. W sumie wykorzystano około 80 godzin nagrań, w których było 80 otwarć dla ruchu pieszych. Ze zgromadzonej bazy danych odrzucono te, które z najmniejszym prawdopodobieństwem wpisują się w wartości graniczne analizowanych parametrów Q_p , V_p , D_p . Schemat kładki dla pieszych przedstawiono na rys.5.38.

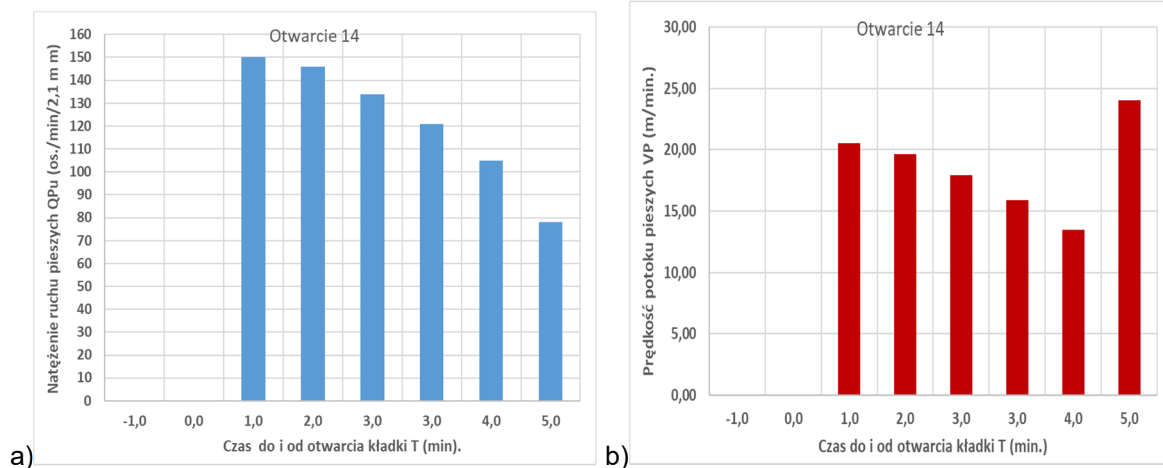


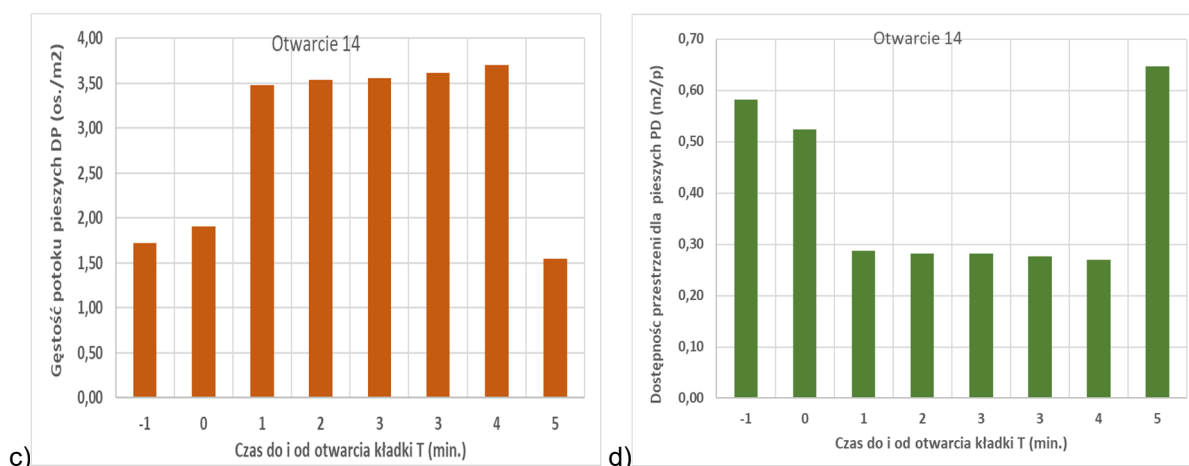
Rys.5.38 Schemat kładki dla pieszych na wyspę Ołowiankę w Gdańsku wraz z lokalizacją kamer i odcinków pomiarowych

5.7.2. Pomiar parametrów ruchu pieszego

5.7.2.1. Dobór przedziału analiz

Ruch pieszony charakteryzuje się dużą zmiennością w czasie. Dlatego trudno uzyskać jest pełny obraz zależności pomiędzy jego podstawowymi parametrami. Badania parametrów ruchu pieszego prowadzono najczęściej w przedziałach minutowych [104], które potem przeliczano na okresy odmierzane w sekundach lub w godzinach [69]. Biorąc pod uwagę parametry stosowane w podręcznikach obliczania przepustowości i oceny warunków ruchu pieszego [104] przyjęto, jako bazową jednostkę pomiarową czasu wyrażoną w minutach. Na rys.5.39 przedstawiono przykładowe wykresy obrazujące wyniki pomiarów podstawowych parametrów ruchu na analizowanej kładce dla pieszych w okresie kilku minut przed otwarciem kładki i po otwarciu kładki. Zaprezentowano wyniki dla 14-tego otwarcia kładki (14-tego badania). Z przedstawionych wykresów wynika, że duże obciążenie ruchem, które wielkość jest jednym z celów niniejszego badania, występuje tylko przez kilka okresów jednonumitowych. Dlatego bazuje się na tak krótkich okresach pomiarowych, gdyż ma możliwości na analizowanym obiekcie uzyskania danych o parametrach ruchu pieszego w dłuższych okresach czasu.





Rys.5.39 Rozkłady parametrów ruchu pieszego w przedziałach minutowych przed i po 14 otwarciu kładki na wyspę Ołowianka: a) natężenie ruchu pieszego QP, b) prędkość potoku pieszych VP, c) gęstość potoku pieszych DP oraz d) przestrzeń dostępna dla pieszego PD.

Pod wieloma względami przepływ pieszych jest podobny do przepływu pojazdów, ponieważ można go opisać za pomocą znanych zmiennych, takich jak prędkość, natężenie przepływu i gęstość. Inne środki związane w szczególności z ruchem pieszym obejmują zdolność do przekraczania strumienia ruchu pieszego, chodzenia w kierunku przeciwnym do głównego strumienia pieszych, manewrowania ogólnie bez konfliktów i zmian prędkości pieszego oraz opóźnienia odczuwanego przez pieszych na osygnalizowanych i nieosygnalizowanych skrzyżowaniach. Różni się od przepływu pojazdów tym, że przepływ pieszych może być jednokierunkowy, dwukierunkowy lub wielokierunkowy. Piesi nie zawsze poruszają się po czystych „pasach”, chociaż czasami mogą to robić przy dużym natężeniu ruchu.

5.7.2.2. Pomiar natężeń ruchu pieszych

Pomiar natężeń ruchu prowadzono w przekroju A-A na kierunku do wyspy i w przekroju B-B na kierunku z wyspy w przedziałach minutowych przed i po otwarciu kładki mierząc liczbę pieszych QP_U przechodzących przez analizowany przekrój w okresie pomiaru wynoszącym 1 min. Szerokość pasa ruchu na kładce wynosiła $B_U = 2,3$ m, natomiast szerokość użyteczna (ekwiwalentna) wynosiła $B_E = 2,1$ m. Przyjmując średnią szerokość człowieka 0,60 m, w analizowanym przekroju może obok siebie przemieszczać się maksymalnie 3, a wyjątkowo 4 osoby.

Pomierzone natężenie ruchu pieszego QP_U w przekroju pomiarowym na pasie ruchu na kładce przeliczano na natężenie jednostkowe według wzoru (5.17):

$$QP_i = \frac{QP_{U,i}}{B_E} \quad (5.17)$$

gdzie:

QP_i – natężenie ruchu w analizowanym przekroju kładki dla pieszych w i – tym przedziale czasu (P/min./m),

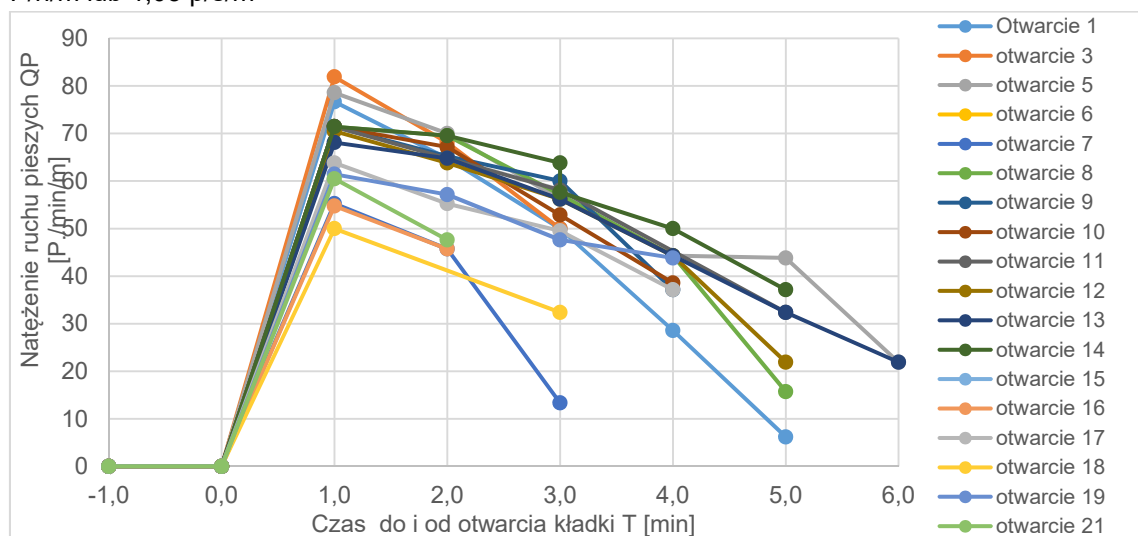
$QP_{U,i}$ – natężenie ruchu w analizowanym przekroju kładki dla pieszych w i – tym przedziale czasu (P/min./2,1m),

B_E – ekwiwalentna szerokość kładki (m), przyjęto 2,1 m.

Wyniki pomierzonych natężeń ruchu pieszego dla 18 otwarć (okresów badań) analizowanej kładki dla pieszych przedstawiono na rys.5.40. Uzyskano natężenia ruchu w zakresie od 0 do 82 P/min./m. Błąd pomiaru wynosił 0,087.

Przed otwarciem kładki piesi oczekiwali przed barierką zamykającą wejście na kładkę, dlatego natężenie ruchu w badanym przekroju było zerowe. Po otwarciu barierki potok pieszych rusza z dużą gęstością i małą prędkością dlatego natężenie ruchu gwałtownie wzrastało i utrzymywało się w zakresie 50 – 82 P/min./m. Następnie jeszcze w ciągu dwóch kolejnych minut natężenie ruchu utrzymywało się na podobnym poziomie jak w pierwszej minucie lub było nieco mniejsze, po czym w kolejnych minutach zaczęło gwałtownie spadać osiągając wielkości 6 – 30 P/min./m. Biorąc to pod uwagę można uznać, że w okresie pierwszych trzech minut maksymalne empiryczne natężenie ruchu pieszego wynosiło $QP_{max, e} = 82$ p/min/m tj. 4920 P/h/m lub 1,37 p/s/m. Biorąc pod uwagę okres trzech najbardziej

obciążonych ruchem minut kwantyli $QP_{85} = 71$ p/min./m, a wartość średnia $QP_S = 61,8$ p/min./m, tj. 3708 P/h/m lub 1,03 p/s/m



Rys.5.40 Profil natężeń ruchu pomierzonych na kładce zwodzonej dla pieszych na wyspę Ołowianka w Gdańsku przed i po otwarciu kładki

5.7.2.3. Pomiar gęstości potoku pieszych

Pomiar gęstości ruchu prowadzono w polach pomiarowych (strefach pomiaru) KA położonym na pasie na kierunku do wyspy i KB położonym na pasie na kierunku z wyspy. Pole pomiarowe miało szerokość ekwiwalentną $B_E = 2,1$ m, a długość pola badawczego (strefy pomiaru) $L_A = L_B = 8,0$ m, w przedziałach minutowych przed i po otwarciu kładki mierząc liczbę pieszych QP_U przechodzących przez analizowany przekrój w okresie pomiaru wynoszącym 1 min. Szerokość pasa ruchu na kładce wynosiła $B = 2,3$ m, natomiast szerokość użyteczna (ekwiwalentna) wynosiła $B_U = 2,1$ m. Przyjmując średnią szerokość $0,60$ m i grubość $0,5$ m o kształcie dwóch półokręgów, to człowiek teoretycznie zajmuje ok. $0,22$ m² powierzchni. Stąd teoretycznie na 1 metrze kw. powierzchni przeznaczonej dla ruchu pieszych może pomieścić się ok. 4.55 osoby. Tą wartość można uznać za teoretycznie maksymalną gęstość potoku pieszych $DP_{max,t}$. Taka sytuacja może występować w przypadku ruchu panicznego, np. podczas ewakuacji. Natomiast w sytuacjach normalnego ruchu pieszego pieszy przemieszczający potrzebuje wokół siebie pewnej strefy wolnej, niezbędnej do zapewnienia pola obserwacji ruchu poprzedzającego pieszego oraz obserwacji nawierzchni w celu zwolnienia lub zatrzymania się w przypadku wystąpienia przeszkody. Pomiar gęstości potoku pieszych w analizowanych polach pomiarowych szacowano na podstawie zliczania liczby pieszych znajdujących się w polu pomiarowym na „obrazach” wycinanych z filmu, co 10 s. Pomierzoną liczbę osób LP_U przeliczano na średnią gęstość potoku pieszych DP_i w polu pomiarowym według wzoru (5.18):

$$DP_i = \frac{\sum_{j=1}^n LP_{U,i,j}}{n \cdot B_E \cdot L_{A/B}} \quad (5.18)$$

gdzie:

DP_i – średnia gęstość potoku pieszych w analizowanym polu pomiarowym na kładce dla pieszych w i – tym przedziale czasu [p/m²],

$LP_{U,i}$ – liczba osób znajdująca się w analizowanym polu pomiarowym kładki dla pieszych w i – tym przedziale czasu i j – tym „obrazie” [P/8,4 m²],

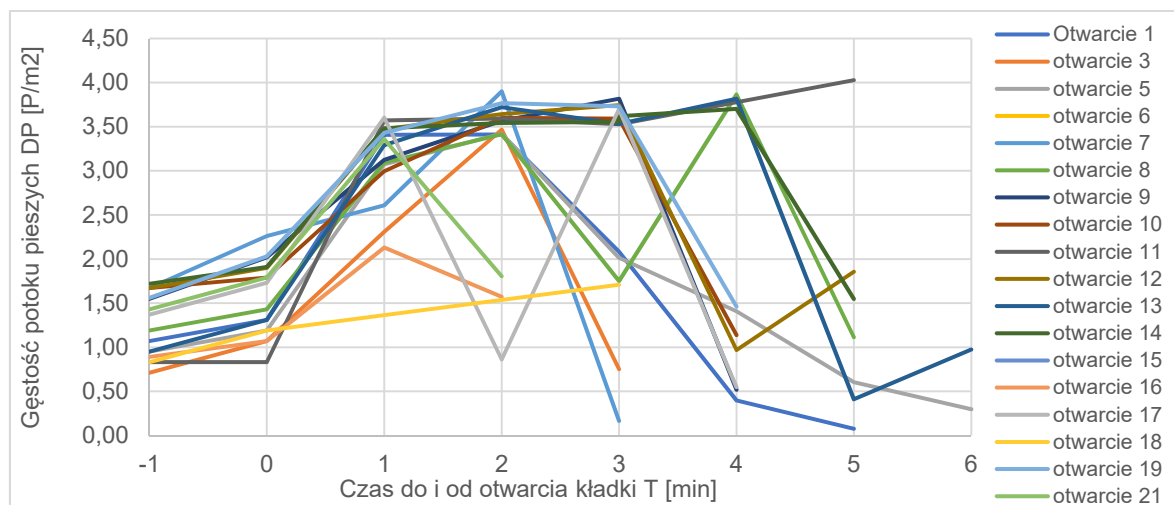
B_E – ekwiwalentna szerokość kładki [m], przyjęto 2,1 [m],

$L_{A/B}$ – długość pola pomiarowego na kładce dla pieszych [m], przyjęto 8,0 [m],

n – liczba pomiarów gęstości w okresie 1 [min]., przyjęto $n=6$.

Wyniki pomierzonych i oszacowanych gęstości potoku pieszego dla 18 otwarć (okresów badań) analizowanej kładki dla pieszych przedstawiono na rys.5.41. Uzyskano gęstości potoku pieszych DP w zakresie od 0,1 do 4,03 p/m². Błąd pomiaru wynosił 0,087.

Przed otwarciem kładki piesi oczekiwali przed barierką zamykającą wejście na kładkę zostawiając większą przestrzeń między sobą, dlatego gęstość ta jest znacznie mniejsza niż gęstość maksymalna.



Rys.5.41 Profil natężeń ruchu pomierzonych na kładce zwodzonej dla pieszych na wyspę Ołowianka w Gdańsku przed i po otwarciu kładki

Tuż przed otwarciem kładki i w kilka minut po jej otwarciu (w zależności od liczby oczekujących na przejście pieszych) potok pieszych rusza z dużą gęstością i małą prędkością, dlatego gęstość potoku, podobnie jak natężenie ruchu pieszych gwałtownie wzrastała i utrzymywała się w zakresie 3,0 – 4,0 P/m². Następnie jeszcze w ciągu dwóch do czterech kolejnych minut gęstość potoku pieszych utrzymywała się na podobnym poziomie jak w pierwszej minucie lub była nieco większa, po czym w kolejnych minutach zaczęła gwałtownie spadać osiągając wielkości poniżej 2,0 P/m².

Biorąc to pod uwagę można uznać, że w okresie pierwszych czterech minut maksymalna empiryczna gęstość potoku pieszych wynosiła $DP_{max,e} = 4,03 \text{ P/m}^2$. Biorąc pod uwagę okres trzech najbardziej obciążonych ruchem minut kwantyl 85 % z rozkładu gęstości $DP_{85} = 3,7 \text{ P/m}^2$, a wartość średnia gęstości $DP_s = 3,2 \text{ p/min./m}^2$.

5.7.2.4. Pomiar przestrzeni dla pieszych

Wykorzystując pomiary gęstości potoku pieszych na analizowanej kładce oszacowano wielkości przestrzeni dla pieszych PD. Średnią wielkość przestrzeni dostępnej dla pieszych PD_i oszacowano korzystając z zależności (5.19):

$$PD_i = \frac{1}{DP_i} \quad (5.19)$$

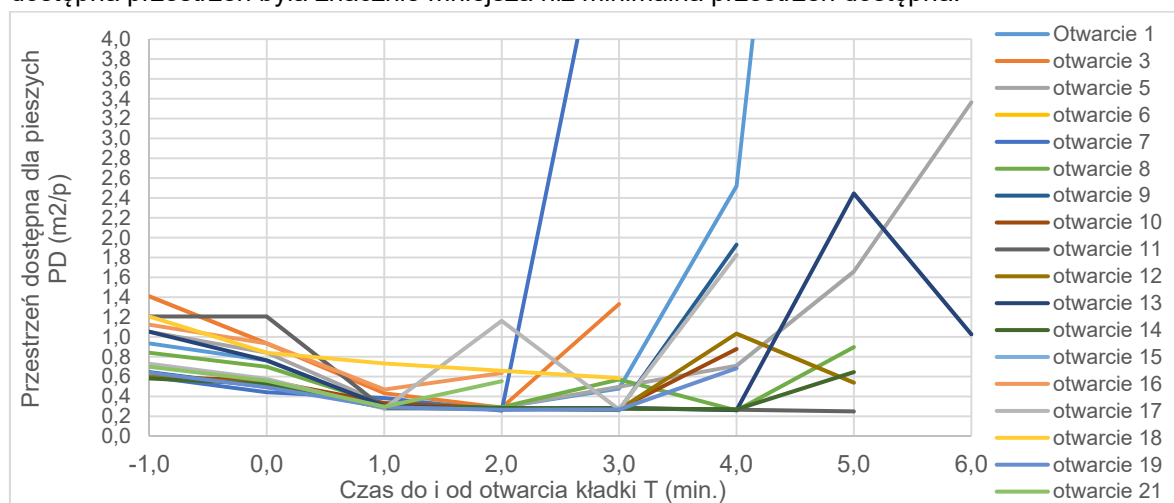
gdzie:

PD_i – średnia przestrzeń dostępna dla pieszego w polu pomiarowym na kładce w i – tym przedziale czasu (m²/p)
 DP_i – gęstość potoku pieszych w analizowanym polu pomiarowym na kładce dla pieszych w i – tym przedziale czasu (P/m²).

Przyjmując maksymalną teoretyczną wartość gęstości potoku pieszych oszacowano minimalną wartość powierzchni dostępnej dla pieszego $PD_{min,t} = 0,23 \text{ m}^2 / \text{p}$. W badaniach prowadzonych jak wspomniano wcześniej taka sytuacja może występować w przypadku ruchu panicznego, np. podczas ewakuacji. Natomiast w sytuacjach normalnego ruchu, pieszy przemieszczający się po potrzebuje wokół siebie pewnej strefy wolnej, niezbędnej do zapewnienia pola obserwacji ruchu poprzedzającego pieszego oraz obserwacji nawierzchni w celu zwolnienia lub zatrzymania się w przypadku wystąpienia przeszkody.

Wyniki oszacowanych przestrzeni dostępnej dla pieszych dla 18 otwarć (okresów badań) analizowanej kładki dla pieszych przedstawiono na rys.5.42. Uzyskano średnie wielkości przestrzeni dostępnej dla pieszych PD w zakresie od 0,27 do 13,3 P/m². Przed otwarciem kładki piesi oczekiwali

przed barierką zamykającą wejście na kładkę zostawiając większą przestrzeń między sobą, dlatego dostępna przestrzeń była znacznie mniejsza niż minimalna przestrzeń dostępna.



Rys.5.42 Profil przestrzeni dostępnej dla pieszych pomierzonych na kładce zwodzonej dla pieszych na wyspę Ołowianka w Gdańsku przed i po otwarciu kładki

W okresie kilku minut po jej otwarciu dostępna przestrzeń dla pieszych utrzymywała się w zakresie 0,27 – 0,52 m²/P, po czym w zależności o liczby zgromadzonych pieszych średnia dostępna przestrzeń dla pieszego zaczęła się powiększać osiągając wielkości powyżej 1,0 m²/P

Biorąc to pod uwagę można uznać, że w okresie pierwszych czterech minut minimalna empiryczna dostępna przestrzeń dla pieszych wynosiła $PD_{min,e} = 0,27 \text{ m}^2 / P$ Biorąc pod uwagę okres trzech najbardziej obciążonych ruchem minut kwantyl 85 % z rozkładu dostępnej przestrzeni $PD_{85} = 0,33 \text{ m}^2 / P$, a wartość średnia dostępnej przestrzeni $PD_s = 0,54 \text{ m}^2 / P$

5.7.2.5. Pomiar prędkości

Prędkość przemieszczania się pieszych jest silnie uzależniona od struktury wiekowej pieszych i rodzaju urządzenia dla pieszych (szerokości, pochylenia podłużnego, organizacji ruchu). Pomiar prędkości potoku pieszych prowadzono w polach pomiarowych (strefach pomiaru) KA i KB położonych na analizowanej kładce dla pieszych. Pole pomiarowe (strefa pomiaru) miało długość $L_A = L_B = 8,0 \text{ m}$. Mierzono czas przemieszczania się charakterystycznego (wyróżniającego się wielkością, kolorem ubrania itp.) pieszego przemieszczającego się w grupie pieszych. Czas ten reprezentował średni czas przejścia danej grupy pieszych. W każdym okresie pomiarowym (1 minuta) rejestrowano czas przemieszczania się $TP_{i,j}$ od kilku do kilkunastu grup pieszych między linią początkową i końcową pola pomiarowego.

Pomierzony czas przemieszczania potoku pieszych $TP_{i,j}$ przeliczano na średnią prędkość potoku pieszych VP_i w polu pomiarowym według wzoru (5.20):

$$VP_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{TP_{i,j}}{\frac{L_A}{B}} \quad (5.20)$$

gdzie:

VP_i – średnia prędkość potoku pieszych w analizowanym polu pomiarowym na kładce dla pieszych w i – tym przedziale czasu [m/min],

$TP_{i,j}$ – czas przemieszczania się j – tej grupy pieszych w polu pomiarowym kładki dla pieszych w i – tym przedziale czasu [min.],

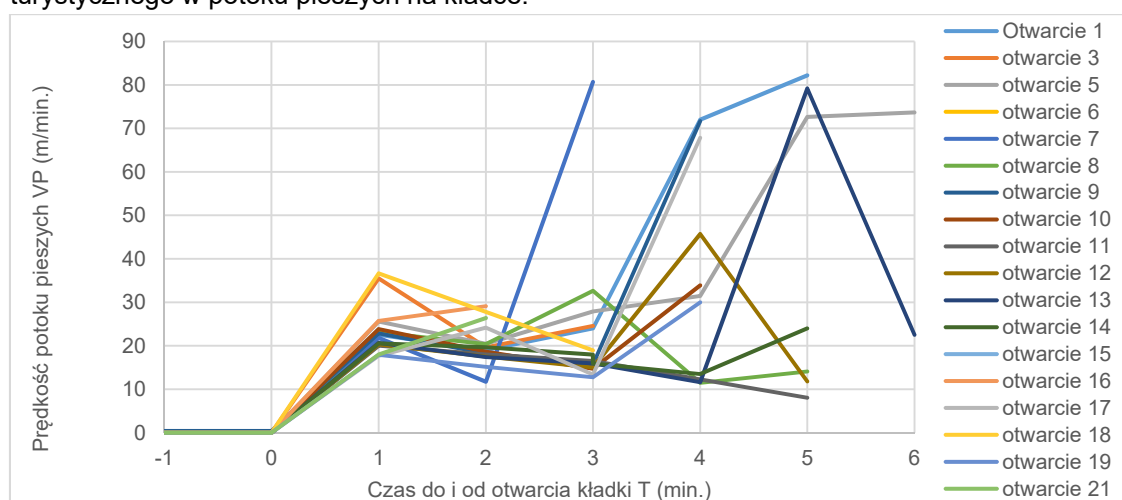
$L_{A/B}$ – długość pola pomiarowego na kładce dla pieszych [m], przyjęto 8,0 [m]

n – liczba pomiarów prędkości pieszego (grup pieszych) w okresie 1 min.

Wyniki oszacowanych średnich prędkości przemieszczania się dla pieszych dla 18 otwarć (okresów badań) analizowanej kładki dla pieszych przedstawiono na rys.5.43. Uzyskano średnie wielkości prędkości potoku pieszych VP w zakresie od 0,0 do 82,2 m/min. Błąd pomiaru wynosił 0,087.

Przed otwarciem kładki piesi oczekiwali przed barierką zamykającą wejście na kładkę, wówczas prędkość wynosiła 0,0 m/min. W kilka minut po jej otwarciu (w zależności od liczby oczekujących na przejście pieszych) potok pieszych rusza z dużą gęstością i małą prędkością, dlatego prędkość wzrastała i przez pierwsze trzy minuty utrzymywała się w zakresie 11,7 – 25,6 m/min. Następnie jeszcze w ciągu kolejnych minut, kiedy natężenie ruchu i gęstość potoku pieszych się zmniejszały średnia prędkość pieszych wzrastała osiągając wielkości powyżej 30,0 m/min.

Biorąc to pod uwagę można uznać, że w okresie trzech minut dużego obciążenia ruchem prędkość potoku pieszych wynosiła: kwantyl 85 % z rozkładu prędkości $VP_{85} = 24,6$ m/min., a wartość średnia prędkości $VP_s = 24,4$ m/min. Natomiast w przypadku ruchu swobodnego (przy $DP < 0,5$ P/m²) średnia prędkość potoku pieszych wynosiła $VP_s = 78,3$ m/min. lub 1,31 m/s. Porównując do średniej prędkości swobodnej pieszych na przejściu dla pieszych bez sygnalizacji (uzyskanych z badań opisanych w rozdz. 5.5.2) prędkość na kładce była o ok. 5 % mniejsza niż prędkość średnia na przejściu dla pieszych. Różnica ta nie jest zbyt duża, a można ją wytłumaczyć wpływem następujących czynników: 6 % pochylenie podłużne kładki na odcinku pomiarowym i duży udział ruchu turystycznego w potoku pieszych na kładce.



Rys.5.43 Profil średniej prędkości przemieszczania się potoku pieszych pomierzonych na kładce zwodzonej dla pieszych na wyspę Ołowianka w Gdańsku przed i po otwarciu kładki

5.7.3. Zależność pomiędzy natężeniem, gęstością i prędkością ruchu potoku pieszych

Pozyskane w wyniku przeprowadzonych pomiarów dane dotyczące poszczególnych parametrów ruchu pieszego na analizowanej kładce dla pieszych, naniesione na trójosiowy wykres zależności $QP - DP - VP$ (rys.5.44) pozwoliły na zarysowanie kształtu zależności fundamentalnej w ruchu pieszych. Analizując uzyskane kształty zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami stwierdzono, że brakuje danych z obszaru częściowo wymuszonego i wymuszonego tj. przy występowaniu dużych natężeń ruchu oraz środkowych obszarów gęstości i prędkości, a także w obszarze ruchu wymuszonego tj. przy występowaniu bardzo dużych gęstości i małych prędkości potoku pieszych. Część danych położonych jest poza obszarem obwiedni wyznaczającej zależność fundamentalną.

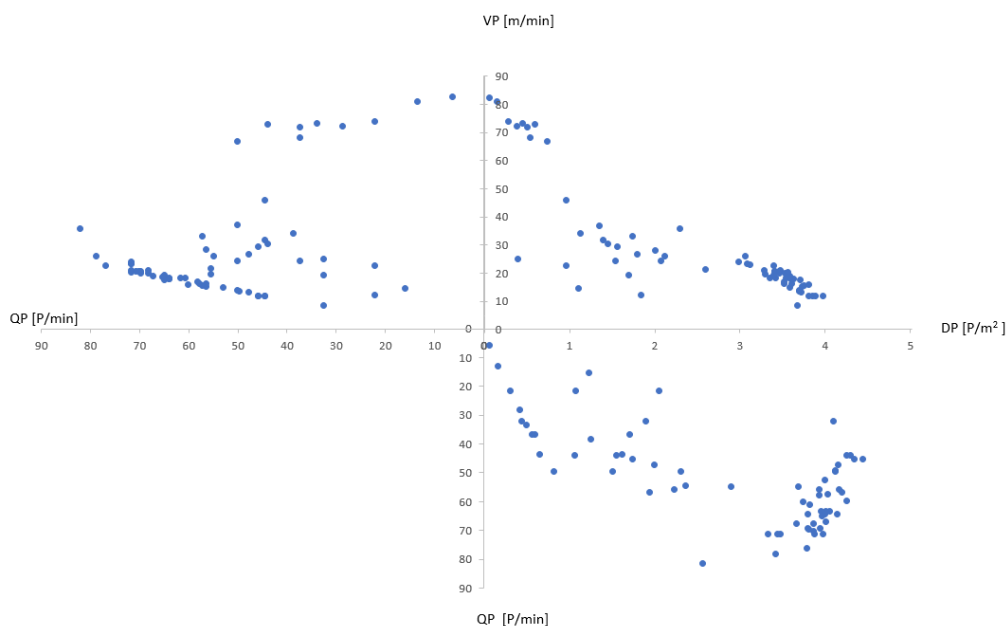
Na podstawie pozyskanych danych można określić w przybliżeniu empiryczne wartości graniczne parametrów tej zależności, jako:

- 1) natężenie maksymalne (przepustowość): $QP_{max,e} = CP_e = 82$ p/min = 4920 P/h = 1,37 P/s;
- 2) prędkość maksymalna: $VP_{max,e} = 82,2$ m/min = 1,37 m/s;
- 3) gęstość maksymalna: $DP_{max,e} = 4,03$ P/m²;
- 4) prędkość optymalna: $VP_{opt,e} \approx 34,8$ m/min = 0,58 m/s;
- 5) gęstość optymalna: $DP_{opt,e} \approx 2,4$ P/m².

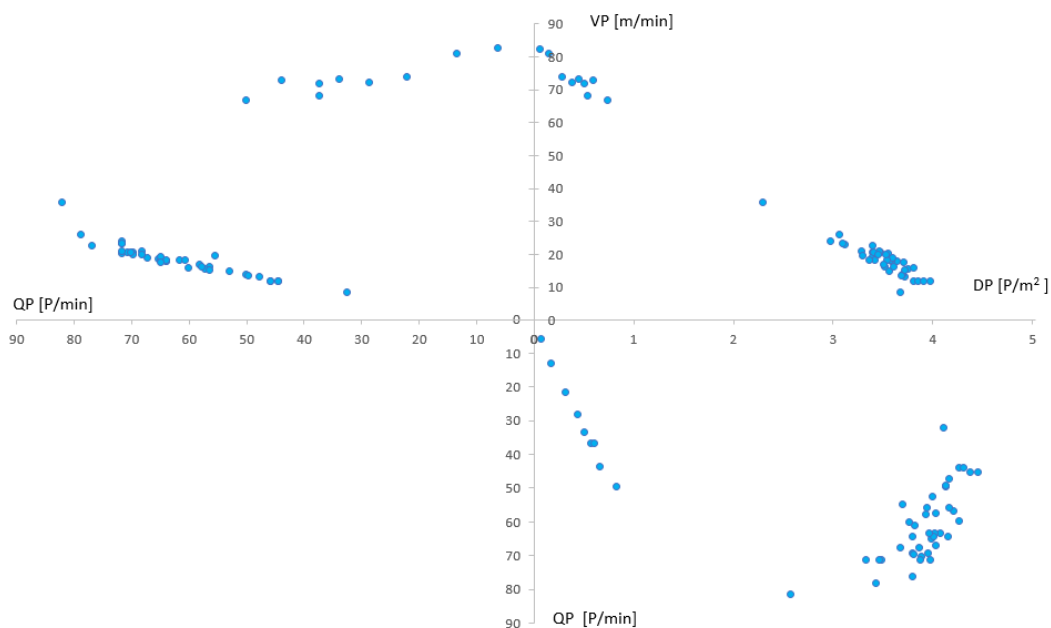
Nie mniej uzyskane parametry graniczne obarczone są dość dużą niepewnością wynikającą z ograniczonej próby. Dlatego przed przystąpieniem do opisu matematycznego uzyskanych zależności podjęto próbę uzupełnienia zbioru danych za pomocą symulacji cyfrowej (opisanej w rozdz. 7) w szczególności w obszarze ruchu wymuszonego oraz uporządkowania danych opisujących zależność fundamentalną.

Dane empiryczne z kładki dla pieszych stanowią zbiór danych Z.1. Do analiz przyjęto wszystkie dane o parametrach ruchu pieszego zebrane podczas badań prowadzonych na kładce dla pieszych. Zbiór danych Z.1. zawiera 67 serii danych zebranych w różnych warunkach ruchowych. Wykres danych na trójosiowym wykresie zależności (przedstawionym) na rys.5.44 pokazuje na dość duże pole rozrzutu uzyskanych danych od domniemanego przebiegu oczekiwanych zależności między poszczególnymi parametrami.

Dane skorygowane z kładki dla pieszych, stanowią zbiór danych zbiór Z.2. Do analiz przyjęto skorygowane dane empiryczne (dane ze zbioru Z.1) z pomiarów prowadzonych na kładce dla pieszych. Przyjęto dane znajdujące się w pasie hipotetycznej zależności $VP = f(QP)$ i $VP = f(DP)$ w zakresie ± 10 m/min. Utworzony w ten sposób zbiór danych, obejmujący 48 serii danych, przedstawiono na rys.5.45.



Rys.5.44 Trójosiowy wykres zależności pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu potoku pieszych na analizowanej kładce – zbiór Z1.



Rys.5.45 Trójosiowy wykres zależności pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu potoku pieszych na analizowanej kładce, dane skorygowane – zbiór Z2.

5.7.4. Dyskusja wyników i rekomendacje

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań do dalszych prac obejmujących analizę zależności pomiędzy parametrami ruchu pieszego przyjęto trzy podstawowe parametry ruchu pieszego do oceny funkcjonowania przejść dla pieszych: natężeniem QP, prędkością VP i gęstością DP potoku pieszych, natomiast parametr dostępna przestrzeń dla pieszego PD należy pozostawić do oceny funkcjonowania chodników, peronów i przystanków transportu zbiorowego.

Natomiast biorąc pod uwagę porównanie rozkładu parametrów fundamentalnej zależności ustalonych empirycznie na podstawie badań terenowych z wykresem fundamentalnej zależności opisanym modelem Furina [121] oraz lokalizacji uzyskanych wyników pomiarów parametrów ruchu pieszego na wykresie przedstawionym rys.5.45 stwierdzono, że:

1. Wyniki pomiarów podstawowych parametrów ruchu pieszego QP, VP i DP uzyskane na analizowanej kładce dla pieszych w Gdańsku układają się dość dobrze w obszarze wyznaczonym przez zależność fundamentalną opisaną modelem Furina.
2. Brakuje wyników pomiarów dla ruchu częściowo wymuszonego to jest w obszarze maksymalnych natężeń ruchu pieszego i średnich prędkości i gęstości potoku pieszych.
3. Empirycznie wyznaczone parametry graniczne ($QP_{max,e}$, $DP_{max,e}$, $DP_{max,t}$, $VP_{opt,e}$ i $DP_{opt,e}$) odbiegają od parametrów granicznych opisanych modelem Furina. Uzyskane parametry graniczne obarczone są dość dużą niepewnością, szczególnie w obszarze ruchu częściowo wymuszonego, wynikającą z ograniczonej wielkości próby, zatem konieczne jest poszerzenie próby za pomocą badań na innych obiektach lub za pomocą badań symulacyjnych.
4. Część wyników pomiarów parametrów ruchu pieszego (w szczególności znajdujących się w obszarze ruchu wymuszonego znajduje się poza linią określoną modelem Furina.

Przed przystąpieniem do opisu matematycznego uzyskanych zależności i budowy zależności fundamentalnej QP – VP – DP dla warunków polskich rekomenduje się poszerzenie zbioru danych za pomocą symulacji cyfrowej w szczególności w obszarze ruchu częściowo wymuszonego oraz doboru danych dedykowanych do budowy modelu opisującego zależność fundamentalną.

5.8. Podsumowanie badań terenowych

Badania terenowe przeprowadzone na różnych poligonach badawczych dostarczyły danych do identyfikacji zasad funkcjonowania przejść dla pieszych oraz opisanie niektórych parametrów ruchu pieszego. Uzyskane dane pozwoliły na rozpoznanie wielu problemów badawczych i praktycznych oraz na sformułowanie następujących wniosków:

1. Przejścia zwykłe bez sygnalizacji stanowią podstawową grupę przejść dla pieszych w Polsce (> 80% na drogach zamiejskich i > 60 % w miastach). Przejścia dla pieszych z sygnalizacją świetlną stanowią duży udział na obszarze dużych miast (> 37 %), a mniejszy w małych miastach i na drogach zamiejskich (> 15 %). Niewielki udział (ok. 2 %) mają przejścia bezkolizyjne. W polskiej praktyce zaczynają się pojawiać przejścia sugerowane, które są bardziej rozpowszechnione są na obszarach osiedli mieszkaniowych i strefach ograniczonej prędkości. Brakuje, zatem informacji i danych o ich funkcjonowaniu i skuteczności.
2. Przejścia dla pieszych są miejscem konfliktów między potokami pieszych i pojazdów powodującym źródło zagrożeń wypadkami z udziałem pieszych. Ponad 50 % wypadków z pieszymi ma miejsce na przejściach dla pieszych. Największe zagrożenie wypadkami występuje na zwykłych przejściach dla pieszych bez sygnalizacji zlokalizowanych na drogach (ulicach) dwupasowych dwukierunkowych, także duże zagrożenia występuje na ulicach wielopasowych.
3. Do oceny funkcjonowania przejść dla pieszych wykorzystuje się dane o wielkości ruchu pieszego i ruchu kołowego w obszarze przejścia dla pieszych. Iloczyn wielkości ruchu pieszego i kołowego może być miarą pomocniczą, do jako wskaźnik obciążenia i wskaźnik sprawności przejścia dla pieszych.
4. Zatem istotnym problemem jest opracowanie metody doboru wielkości natężeń pieszych i pojazdów oraz metody szacowania przepustowości przejścia dla pieszych i przepustowości jezdni dla pojazdów w obszarze przejścia.

5. Profile wielkości ruchu pieszego i kołowego wskazują na pewne charakterystyczne zmiany przebiegu w obszarze przejść dla pieszych. Kształt profilu natężeń ruchu zależy od rodzaju uczestnika ruchu (pieszy, pojazd), dominującej relacji podróży (np. dom – praca, praca - dom), dnia tygodnia (typowy, sobota, niedziela), udziału godziny szczytu w wielkości ruchu dobowego. W ciągu doby można wyróżnić sześć charakterystycznych okresów: I – nocna przerwa, II – aktywność poranna, III – szczyt poranny (7 – 16 % ruchu dobowego), IV - aktywność dzienna (ok. 30 % ruchu dobowego), V – szczyt popołudniowy (ok. 45 - 50 % ruchu dobowego) i VI – aktywność wieczorna. Zatem istotnym okresem dla oceny funkcjonowania przejść dla pieszych jest okres szczytu popołudniowego, w którym podstawą ich dobrego funkcjonowania są: sprawność przejścia, warunki ruchu pieszych i pojazdów oraz bezpieczeństwo ruchu pieszych.
6. Struktura ruchu pieszego nie odzwierciedla w pełni struktury wiekowej społeczeństwa, na badanych przejściach dla pieszych zarejestrowano, że potok pieszych składa się w 84 % z osób dorosłych, a resztę stanowią dzieci młodzież %, osoby dorosłe 84,2% i osoby starsze 4,7 % potoku pieszych. W potoku pieszych obserwuje się także 0,7 – do 1,4 % osób z niepełnosprawnościami.
7. Struktura wiekowa i struktura sprawności pieszych wpływa istotnie na funkcjonowanie przejść dla pieszych, biorąc pod uwagę prędkość pieszego, lukę w potoku pojazdów wykorzystywaną do przejścia i inne zachowania pieszych. Średnia luka akceptowana wynosi 5,3 s, a średnia prędkość pieszego w zależności od wieku od 0,8 – 1,4 m/s.
8. Prędkość pojazdów na odcinkach dojazdowych do przejścia jest jednym z istotnych czynników wpływających na wielkość luki czasowej wybieranej przez pieszego przy przechodzeniu przez jezdnię oraz na bezpieczeństwo pieszych. Z przeprowadzonych badań wynika, że rodzaj przekroju ulicy wpływa nieznacznie na prędkość poruszania się pojazdu na odcinku dojazdowym, natomiast lokalizacja i rodzaj przejścia mają istotny wpływ na średnią prędkość pojazdów w zakresie od 27,0 do 57,0 km/h.
9. Przepływ potoku pieszych jest podobny do przepływu pojazdów, ponieważ można go opisać za pomocą znanych zmiennych, takich jak natężenie, prędkość, gęstość potoku pieszych oraz przestrzeń dostępną dla pieszego. Trójosiową zależność pomiędzy podstawowymi parametrami nazywa się zależnością fundamentalną, ale do jej określenia potrzebne są dane o parametrach ruchu z całego zakresu zmienności tych parametrów (zarówno dla obszaru ruchu niewymuszonego jak i wymuszonego). Na badanych przejściach dla pieszych uzyskiwano dane dla parametrów znajdujących się w obszarze ruchu swobodnego i niewymuszonego. Przeprowadzone badania na zwodzonej kładce dla pieszych w chwili po jej otwarciu pozwoliły na uzupełnienie danych o parametrach ruchu pieszego w obszarze ruchu wymuszonego. Wyniki tych badań pozwoliły na zarysowanie obwiedni zależności fundamentalnej w ruchu pieszych dla warunków polskich oraz ustalenie empirycznych wartości granicznych podstawowych parametrów: natężenie maksymalne, prędkość i gęstość maksymalna oraz prędkość i gęstość optymalna.
10. Uzyskane parametry graniczne obciążone są dość dużą niepewnością, szczególnie w obszarze ruchu częściowo wymuszonego, wynikającą z ograniczonej wielkości próby. Dlatego przed przystąpieniem do opisu matematycznego uzyskanych zależności podjęto decyzję o poszerzeniu zbioru danych za pomocą symulacji cyfrowej w szczególności w obszarze ruchu wymuszonego oraz uporządkowania danych opisujących zależność fundamentalną.
11. W rozdziale piątym zrealizowaniu cel praktyczny nr 1 rozprawy doktorskiej (Wykonanie badań ruchu niezbędnych do opisanego charakterystyk ruchu pieszego i kołowego na wybranych przejściach dla pieszych w miastach.) oraz cel naukowy nr 1 (Opracowanie charakterystyki ruchu pieszego i kołowego na przejściach dla pieszych w miastach na podstawie badań terenowych, ankietowych i symulacyjnych na wybranych przejściach dla pieszych) i nr 2 (Opracowanie matematycznych modeli fundamentalnej zależności pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu potoku pieszych natężeniem, prędkością i gęstością na wybranych przejściach dla pieszych w miastach w Polsce)

6. BADANIA MIKROSYMULACYJNE WYBRANYCH PRZEJŚĆ DLA PIESZYCH W MIASTACH

6.1. Metodyka badań

6.1.1. Wstęp

Opracowanie mikroskopowych modeli symulacyjnych odwzorowujących ruch pieszych i pojazdów w obszarze przejść dla pieszych, było jednym z elementów niezbędnych do realizacji celów założonych w rozprawie doktorskiej. Celem badań symulacyjnych było pozyskanie danych o parametrach ruchu pieszych i pojazdów na wybranych rodzajach przejść dla pieszych w warunkach, których nie udało się objąć pomiarami terenowymi.

Do najbardziej rozpowszechnionych narzędzi do budowy modeli mikrosymulacyjnych w zakresie ruchu kołowego można uznać pakiety programów komputerowych Aimsun [241], [74], PTV Vissim [181], MAINS²IM [42], natomiast w zakresie ruchu pieszego Legion [219], PTV Viswalk [181], Micro-PedSim [218], MAINS²IM, SIMWALK [201]. Każde z tych narzędzi ma swoich zwolenników jak i krytyków, wobec czego trudno jest wskazać, które z wymienionych jest tym najlepszym do odwzorowania rzeczywistych zachowań uczestników ruchu pieszego i kołowego. Ze względu na to, iż autorka rozprawy ma możliwość korzystania z narzędzi PTV i posiada w tym zakresie doświadczenie, na potrzeby rozprawy doktorskiej, został wykorzystany program PTV Vissim 8, rozbudowany o moduł pieszych PTV Viswalk. Narzędzia te, dedykowane są do przeprowadzenia kompleksowych analiz z zakresu modelowania ruchu pieszego i kołowego. Pozwalają z dużą dokładnością na odzwierciedlenie m.in. geometrii analizowanego fragmentu sieci ulicznej, uwzględnienie struktury rodzajowej ruchu, natężenia ruchu pieszych i pojazdów, organizacji ruchu oraz zachowań uczestników ruchu drogowego.

W narzędziu PTV Vissim zastosowany jest model jazdy za liderem (car-following model - CFM), opracowany przez Wiedemann'a [183], [181], natomiast w module Viswalk znajduje się model zachowań pieszych Social Force Model [181]. W przyjętych do badań narzędziach symulacja ruchu przeprowadzana jest w czasie rzeczywistym ze stałym krokiem czasowym. Poprzez możliwość zastosowania w narzędziu detektorów oceny warunków ruchu, możliwe jest wytypowanie korzystnych, spośród analizowanych, rozwiązań geometrycznych przy określonych warunkach ruchowych [181].

Opracowane i wykorzystane do badań modele symulacyjne, opisane w dalszych rozdziałach rozprawy doktorskiej umożliwiły:

- a) zaprezentowanie zależności fundamentalnej z wykorzystaniem wyników z badań terenowych i modeli mikrosymulacyjnych (rozdział 7),
- b) badania wpływu wybranych czynników na sprawność oraz warunki ruchu pieszych i pojazdów na wybranych przejściach dla pieszych (rozdział 8),
- c) wykonanie koncepcji metody oceny funkcjonowania przejścia dla pieszych (rozdział 9),
- d) przedstawienie kierunków dalszych badań (rozdział 10).

6.1.2. Cel i zakres modelowania na poziomie mikroskopowym

W celu odwzorowania ruchu pieszych i pojazdów w obszarze wybranych rodzajów przejść dla pieszych, przygotowano modele mikrosymulacyjne (z wykorzystaniem pakietów komputerowych PTV Vissim z modulem Viswalk) na przejściach dla pieszych usytuowanych na jezdni:

1. dwukierunkowej o przekroju 1x2 pasy ruchu,
2. jednokierunkowej położonej na ulicy dwujezdniowej o przekroju 1x4, 2x2 i 2x3 pasy ruchu.

Wykonane modele symulacyjne pozwoliły na uzyskanie wyników, które wykorzystano do:

1. modelowania zależności fundamentalnej QP-VP-DP potoku pieszych przemieszczających się w jednym kierunku (rozdział 7.2),
2. modelowania zależności fundamentalnej QP-VP-DP potoku pieszych przemieszczających się w dwóch kierunkach (rozdział 7.2),
3. określenie wpływu struktury kierunkowej pieszych (rozdział 7.3),

4. oszacowania wielkości przepustowości przejścia dla pieszych oraz przepustowości jezdni (rozdział 8.1),
5. oszacowania średnich strat czasu pieszych i pojazdów (rozdział 8.2).

Opracowane modele zachowań uczestników ruchu w obszarze przejścia dla pieszych dostarczyły danych, z większego zakresu niż wykonane badania terenowe.

6.1.3. Założenia do opracowania modeli mikroskopowych

Do opracowania modeli symulacyjnych wybranych przejść dla pieszych przyjęto następujące założenia:

1. Modele mikrosymulacyjne opracowano wykorzystując:
 - a) model zachowań kierowcy dedykowany dla obszarów miejskich Wiedemann'a 74
 - b) model zachowań pieszych Social Force Model [181],
 - c) dystrybuanty prędkości pieszych na badanych przejściach, uzyskane na podstawie badań terenowych (przedstawionych w rozdziale 5).
2. Modele symulacyjne opracowano dla przejść dla pieszych o szerokości $S_{pc} = 4$ [m], bez sygnalizacji świetlnej, znajdujących się na odcinku ulicy z pierwszeństwem przejazdu, w których sąsiedztwie nie było przystanków autobusowych.
3. Badania symulacyjne prowadzono dla natężeń ruchu pieszego w zakresie $NP = 500 - 2000$ [P/h] oraz natężeń ruchu kołowego w zakresie $QV = 0 - 2000$ [poj./h]

Przyjęte założenia, pozwalają na realizację celów przedstawionych w punkcie 6.1.2.

6.2. Opis narzędzia do symulacji

6.2.1. Model zachowań pieszych

Podróże piesze wykazują istotne różnice w odniesieniu do innych środków transportu. Jak przedstawia Sowulewska [92], pieszy ma więcej alternatyw, co do wyboru trasy, którą się przemieszcza, może podejmować decyzję o zmianie kierunku ruchu nie tylko na skrzyżowaniach ulic, przemieszczając się może podejmować działania jak wejście do sklepu, czy restauracji i pozostanie w nim na jakiś czas. W wyniku różnic w stosunku do ruchu pojazdów, modelowanie ruchu pieszego jest osobnym działem modelowania, który badany jest od ponad pięciu dekad [207].

Pierwsze badania koncentrowały się na badaniu ruchu pieszego w określonej sytuacji np. badanie przepływu ludzi w metrze, na lotniskach, czy wejściach do budynków [47], [126], [187]. Badania przeprowadzane były w postaci bezpośredniej obserwacji w terenie lub z wykorzystaniem techniki zdjęciowej lub filmowej [85]. Kolejnym celem badań było opracowanie koncepcji oceny poziomu swobody ruchu („level of service” LOS) m.in. przez Fruina [20],[121],[222], oceny funkcjonowania urządzeń dla pieszych oraz wytycznych planistycznych w zakresie ruchu pieszego [88]. W ostatnich latach narzędzia pomiarowe stały się bardziej zaawansowane i dokładne, co przełożyło się na większą szczegółowość badań. W wytycznych i narzędziach do modelowania wykorzystuje się modele regresji, modele kolejek, modele macierzy przejścia, modele stochastyczne, modele predykcji [85], [243], [83] [229].

W 1995 roku został opracowany model zachowań pieszych Social Force Model przez Helbinga i Molnára pod nazwą Helbing & Molnár [84], [31], [181], rys.6.1. Zachowania pieszych bardzo często postrzegane są za chaotyczne i trudne do zamodelowania, jednak, gdy mamy do czynienia z większą grupą są one bardziej przewidywalne i mogą zostać przedstawione w formie modelu stochastycznego. Zaprezentowany model Helbing & Molnár uwzględnia możliwość zmiany zachowań pieszych mających odzwierciedlenie w zmianie kierunku ruchu, prędkości, aby osiągnąć określony cel. W modelu uwzględniono oddziaływanie pieszego na inne osoby i obiekty. Pieszy zachowuje pewien dystans i prędkość względem innych osób oraz porusza się w pewnej odległości od obiektów np. budynków.

$$\vec{F}_a(t) = \vec{F}_a^0 + \sum_{\beta} \vec{F}_{a\beta} + \sum_B \vec{F}_{aB} + \sum_i \vec{F}_{ai} \quad (6.1)$$

gdzie:

$\vec{F}_a(t)$ siła oddziaływania społecznego - wielkość opisująca konkretną motywację do działania. W przypadku zachowania pieszego motywacja ta wywołuje fizyczne generowanie siły przyspieszenia lub hamowania, jako reakcję na postrzegane informacje, które uzyskuje o swoim otoczeniu podlegając siłom zewnętrznym,

\vec{F}_g siła, która odwzorowuje chęć osiągnięcia celu przez pieszego jak najkrótszą trasą. Opisuje przyspieszenie pieszych, czyli przyrost prędkości pieszego do wartości prędkości pożądanej przez pieszego, na redukcję, której wpływają procesy hamowania w celu uniknięcia przeszkody lub innych pieszych.

$\sum_{\beta} \vec{F}_{\alpha\beta}$ siła, która odwzorowuje wpływ innych pieszych, reakcje zachowania akceptowalnego dystansu między pieszymi (strefy prywatności pieszego), zmiany kierunku ruchu celem uniknięcia zbytniego zbliżenia do innych pieszych,

$\sum_{\beta} \vec{F}_{\alpha\beta}$ siła, która odwzorowuje wpływ przeszkód fizycznych na ruch pieszego, reakcje zachowania akceptowalnego dystansu, zmiany kierunku ruchu celem uniknięcia zbytniego zbliżenia do budynków, ścian i innych przeszkód,

$\sum_i \vec{F}_{\alpha i}$ siła, która odwzorowuje efekt absorbowania uwagi pieszego przez inne osoby (przyjaciół, artystów ulicznych itp.) lub obiekty (np. wystawy okienne).

Model zachowań pieszych Social Force Model został wdrożony do narzędzia PTV Vissim z modulem Viswalk, który wykorzystywany jest do tworzenia modeli mikroskopowych odwzorowujących sieć uliczną i oceny warunków ruchu, jej użytkowników.

6.2.2. Narzędzia do modelowania ruchu

Za początek rozwoju modeli mikroskopowych można uznać rok 1974, kiedy profesor Rainer Wiedemann w Institute for Transport Studies at the University of Karlsruhe za pomocą języka programowania Algol zaadaptował idee modelu „jazdy za liderem” (car-following model) Ernesta P. Todorov z 1963 roku i wdrożył do oprogramowania INTAC, co zostało nazwane modelem Wiedemann 74 [183]. W kolejnych latach model Wiedemann 74 był weryfikowany i rozwijany przykładowo poprzez wprowadzenie do modelu możliwość zmiany pasa ruchu przez pojazdy na drogach typu autostrada oraz dla dróg zamiejskich.

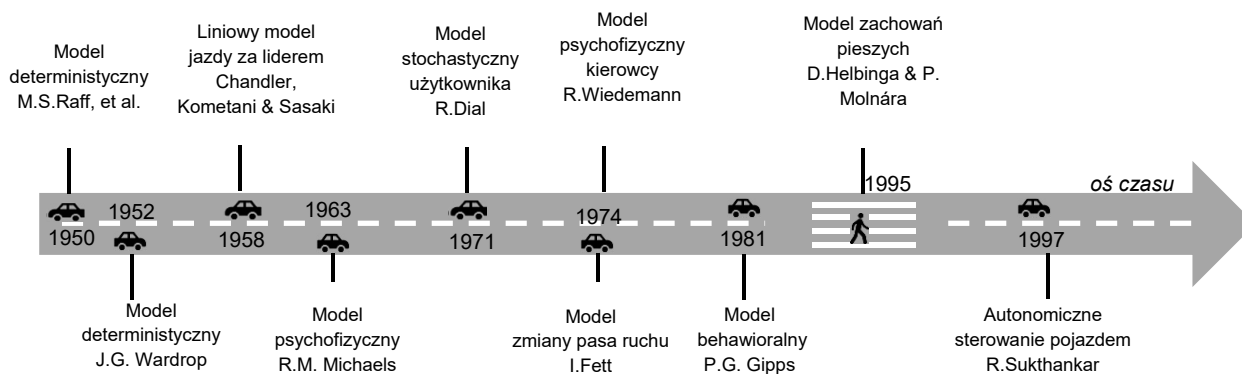
Kolejnym istotnym punktem w rozwoju narzędzi do modelowania ruchu był rok, 1983 kiedy Hans Hubschneider przedstawił pracę naukową dotyczącą koncepcji budowania modeli sieci ulicznej z uprzednio zdefiniowanych bloków bez konieczności kodowania ich w języku programowania [11]. W kolejnych latach wraz z rozwojem komputeryzacji różne ośrodki badawcze na świecie rozwijały i doskonaliły prace wcześniejszych badaczy, czego efektem było m.in. skomercjalizowanie modelu Wiedemann 74 i wdrożenie go do oprogramowania Vissim 1.0 w 1993 roku na University of Karlsruhe [139].

Wraz z rozwojem narzędzi do modelowania ruchu kołowego powstawały oprogramowania do modelowania zachowań pieszych. Jednym z nich jest powstały na University of Karlsruhe w 2007, Viswalk [120], a zachowania pieszych bazują na modelu społecznym Social Force Model opracowanym przez Helbing & Molnár w 1995 na University of Stuttgart [86], [120]. W modelach mikrosymulacyjnych do analiz ruchu drogowego podstawowych charakterystyk takich jak: natężenie, prędkość, gęstość, straty czasu, kolejki i inne, brane są pod uwagę indywidualne zachowania każdego kierującego pojazdem z uwzględnieniem interakcje z innymi kierującymi. Jednym z najszerzej stosowanym w mikroskopowym modelowaniu są modele deterministyczne jazdy za liderem (car-following model). Do analizy miar pośrednich w zakresie bezpieczeństwa ruchu drogowego można wykorzystać narzędzie do mikrosymulacji SAM3 (Surrogate Safety Assessment Model) opracowany przez New Global Systems Corporation [91] umożliwia analizę konfliktów między użytkownikami drogi w obrębie przejść dla pieszych. Oprogramowanie pozwala zautomatyzować analizę konfliktów poprzez przetwarzanie trajektorii pojazdu z modelu mikrosymulacyjnego wykonanego w narzędziu PTV Vissim. Model mikrosymulacyjny przed zastosowaniem SSAM, wymaga kalibracji [185]. Przedstawione badania [238]

wykazały stopień dopasowania pomiędzy badaniami terenowymi, a wynikami otrzymanymi w SSAM powyżej 80%.

6.2.3. Model zachowań kierowców

Modele zachowań kierowców można podzielić na trzy typy, strategiczny, w którym zaadaptowane są między innymi modele wyboru trasy (np. deterministyczny model Wardropa), taktyczny związany ze zmianą pasa ruchu przez kierowcę oraz operacyjny uwzględniający modele odstępów akceptowalnych między pojazdami i modele jazdy za liderem. Na rys.6.1 przedstawiono wybrane modele zachowań kierowców oraz model zachowań pieszych [58], [186], [105], [132], [149], [45]. W niniejszej pracy w celu odwzorowania zachowań kierowców na dojeździe do przejścia dla pieszych skupiono się na zastosowaniu modeli operacyjnych CMF.



Rys.6.1 Wybrane modele zachowań pieszych i kierowców na osi czasu – opracowane na podstawie [58], [186], [105], [132], [149], [45].

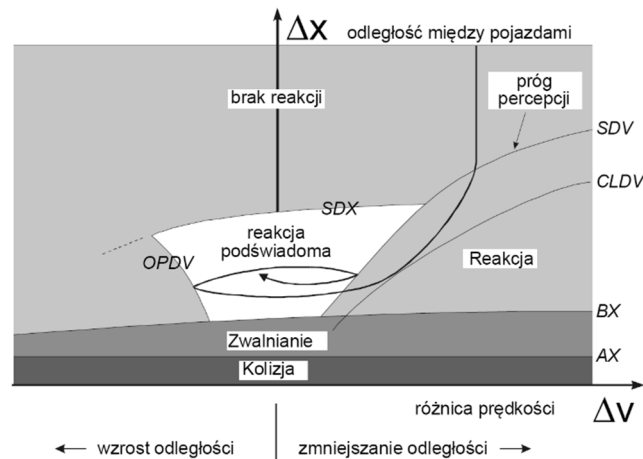
Modele jazdy za liderem opisują interakcje między pojazdami za pomocą równań matematycznych, reprezentujących zachowanie kierowcy. W stanie ruchu swobodnego kierowca może poruszać się z pożądaną prędkością. W warunkach ruchu wymuszonego, jeśli pojazd podążający za pojazdem prowadzącym znajduje się w stosunkowo bliskiej odległości, zachowanie lidera wpływa na zachowanie pojazdów podążających za nim. Każdy pojazd dąży do poruszania się z najwyższą możliwą prędkością, która jest bezpieczna oraz w bezpiecznej odległości od poprzedzającego pojazdu. Warunki te są osiągnięte poprzez dynamiczne dostosowywanie prędkości (przyspieszanie i zwalnianie). W literaturze naukowej możemy znaleźć wiele przykładów CFM zarówno opartych na teorii ruchu jak i uczeniu maszynowym [247]. Spośród modeli teoretycznych można wyróżnić modele kinematyczne reprezentowane przez model Gipps'a [71], model Newell's [157], modele automatów komórkowych (Cellular Automata - CA) [157], modele General Motors (GM) [29],[89], model Optimal Velocity (OVM) [11] oraz model inteligentnego kierowcy (IDM) [249], [223]. Drugą grupę modeli teoretycznych stanowią modele psychofizyczne, spośród których możemy wyróżnić model punktów działania (AP) [150], [250] oraz modele logiki rozmytej [28], [7]. Ponadto w grupie modeli teoretycznych opracowano modele Adaptacyjnej Kontroli Prędkości (Adaptive Cruise Control - ACC). W przeciwieństwie do wcześniej wymienionych modeli, które miały na celu symulowanie zachowań kierowców i identyfikowanie zakłóceń w naturalnym ruchu drogowym, modele ACC zostały stworzone z myślą o wyeliminowaniu niestabilności z perspektywy mechanicznej. W grupie modeli ACC można wymienić modele liniowe [46], modele nieliniowe [226], [230] oraz modele sterowania predykcyjnego [8],[32].

W niniejszej pracy wykorzystano model jazdy za liderem Wiedemann74 [183],[52]. Model Wiedemann 74 można sklasyfikować jako model psychofizyczny, ponieważ nie ogranicza się jedynie do opisu ruchu pojazdów za pomocą równań ruchu (czyli kinematyki), które zwykle uwzględniają prędkość, przyspieszenie i pozycję pojazdów w czasie. Zamiast tego, model Wiedemann 74 obejmuje psychologiczne i fizjologiczne aspekty zachowań kierowcy, takie jak percepcja, decyzje i reakcje na zmiany w ruchu drogowym. Głównie cechy modelu psychofizycznego, które odróżniają go od modelu kinematycznego, to:

- percepcja i decyzje kierowcy: Model uwzględnia, jak kierowcy postrzegają odległości i prędkości oraz jak podejmują decyzje dotyczące przyspieszania, hamowania i utrzymywania dystansu.
- strefy działania: Model dzieli reakcje kierowcy na różne strefy działania w zależności od odległości do pojazdu poprzedzającego, np. strefa swobodnej jazdy, strefa zamierzonego przyspieszania, strefa komfortowego hamowania.
- zmienne progowe: Model definiuje różne progi, które inicjują konkretne reakcje kierowcy, takie jak rozpoczęcie hamowania czy przyspieszania.

Model jazdy za liderem Wiedemann 74, wdrożony do programu Vissim zakłada, że kierowca znajdujący się w pojeździe, może znajdować się w jednym z czterech stanów: ruchu swobodnym, zbliżaniu, podążaniu i hamowaniu względem innego pojazdu.

Zaprezentowany na rys.6.2 model Wiedemann 1974 jazdy za liderem zakłada, że w sytuacji, gdy pojazd jedzie szybciej kierowca zacznie hamować w momencie, gdy osiągnie indywidualny próg percepcji kierowcy, który porusza się wolniej. Kierowca nie jest w stanie określić dokładnie prędkości wolniejszego pojazdu, dlatego będzie hamował tak długo aż zwolni i osiągnie mniejsza prędkość niżeli drugi pojazd, w tym momencie zacznie delikatnie przyspieszać po osiągnięciu kolejnego progu percepcji. Proces ten to interakcja między hamowaniem i przyspieszaniem rys.6.2. Model Wiedemanna 74 był kalibrowany oraz uaktualniany na przestrzeni lat w oparciu o badania terenowe prowadzone na Uniwersytecie w Karlsruhe.



Rys.6.2 Logika „jazdy za liderem” (Wiedemann 1974) – instrukcja PTV [181]

Model „jazdy za liderem” Wiedemann 74 ma postać [70], [188]:

$$u_n(t + \Delta t) = \min \left\{ \begin{array}{l} 3.6 * \left(\frac{s_n(t) - s_j}{BX} \right)^2 \\ 3.6 * \left(\frac{s_n(t) - s_j}{BX * EX} \right)^2, u_f \end{array} \right. \quad (6.2)$$

Gdzie

$u_n(t + \Delta t)$ - prędkość pojazdu podążającego za liderem w chwili t (km/h)

$s_n(t)$ - odstęp pomiędzy przednim zderzakiem pojazdu lidera a przednim zderzakiem pojazdu podążającego w czasie t (m)

s_j - odstęp między pojazdami, gdy pojazdy oczekują w kolejce (m)

u_f - średnia przestrzenna prędkość w ruchu swobodnym (km/h)

przy czym:

$$BX = (BX_{add} + BX_{mult} * RND1_n) * \sqrt{V} \quad (6.3)$$

$$EX = (EX_{add} + EX_{mult} * (NRND - RND2_n)) \quad (6.4)$$

gdzie:

BX – pożądana odległość między pojazdami z uwagi na bezpieczeństwo:

BX_{add} – jako wartość wyrażona w jednostce czasu, wartość domyślna w narzędziu PTV Vissim (model Wiedemann 74) $BX_{add} = 2,0$,

BX_{mult} - jako wartość wyrażona w jednostce dystansu, wartość domyślna w narzędziu PTV Vissim (model Wiedemann 74) $BX_{mult} = 3,00$,

AX – pożądana minimalna odległość pomiędzy przednimi zderzakami kolejno po sobie następujących pojazdów, które znajdują się w kolejce, wartość domyślna w narzędziu PTV Vissim (model Wiedemann 74) $ax=2,0$,

V – mniejsza z prędkości – lidera lub pojazdu poruszającego się w kolumnie,

$RND1_n$ – parametr zależny od rozkładu normalnego o średniej m i odchyleniu standardowym n ,

EX – parametr opisujący minimalną odległość następujących po sobie pojazdów,

EX_{add} , EX_{multi} - parametry kalibracyjne,

$NRND$ – jest zmienną losową o rozkładzie normalnym z domyślną średnią wartością 0,5 i odchyleniem standardowe 0,15,

$RND2_n$ - parametr zależny od rozkładu normalnego kierowcy o rozkładzie normalnym z domyślną wartością średnią 0,5 i odchyleniem standardowym 0,15.

W przygotowanych na potrzeby rozprawy doktorskiej modelach symulacyjnych, bazowano na wartościach domyślnych, w zakresie parametrów kalibrujących model jazdy za liderem Wiedemann 74.

6.3. Model przejścia dla pieszych

Budując model symulacyjny dla poszczególnych przejść dla pieszych, postawiono za cel, aby model jak najwiarygodniej odzwierciedlał zarówno parametry geometryczne, jak również zachowania użytkowników ruchu drogowego. Modele składały się z następujących elementów:

- geometria jezdni oraz przejścia dla pieszych została zbudowana w oparciu o podkłady mapowe Google Maps. Podkłady mapowe w postaci zdjęcia zostały wgrane do narzędzia PTV Vissim z modułem Viswalk i w dalszym etapie prac umożliwiły poprawiły odwzorowanie fragmentu sieci ulicznej. Aktualność podkładów mapowych została zweryfikowana podczas prowadzonych badań terenowych.
- elementy sieci ulicznej zostały odwzorowane w narzędziu za pomocą odcinków (links) i łączników (connectors) dedykowanych do ruchu pojazdów oraz pieszych na wcześniej wgrane podkłady mapowe.
- odwzorowano organizację ruchu drogowego tj. prędkość pojazdów oraz dystrybuantę prędkości pieszych wykonaną w oparciu o badania terenowe.

W narzędziu PTV Vissim elementy te dla pojazdów zostały wykonane z wykorzystaniem obszarów redukcji prędkości (reduced speed area), liniowych ograniczeń prędkości umieszczanych na geometrii jezdni (desired speed distributions). W celu zdefiniowania priorytetów w ruchu pojazdów i pieszych wykorzystano obszary konfliktów (conflict areas) oraz zasady priorytetu (priority rules). W zakresie pierwszeństwa na przejściu dla pieszych zastosowano obowiązujące do 01 czerwca 2021 roku prawo pierwszeństwa dla pojazdów.

- do wykonanego modelu sieci ulicznej w programie PTV Vissim, wprowadzono wartości dla natężenia pieszych i pojazdów (vehicle inputs, pedestrian inputs). Każdy analizowany model przejścia dla pieszych zawierał wartości natężenia pieszych Q_p 500, 1000, 1500 i 2000 [P/h], a dla każdej z tych wartości, natężenia pojazdów Q_v , które zwiększano o 100 [p/h], gdzie minimalna wartość to 0 [poj./h] a maksymalna 2000 [poj./h]. W ten sposób dla każdego analizowanego przejścia dla pieszych powstało ok.100 wariantów z różnymi wartościami natężenia pieszych i pojazdów (dla $Q_p=500$ [P/h] wartość $Q_v= 0,100, 200, 300 \dots$ do 2000 [poj./h], analogicznie dla $Q_p=1000, 1500$ i 2000 [P/h])
- do modelu wykonanego modelu przejścia dla pieszych wprowadzono trasy pojazdów i pieszych (vehicle routes i pedestrian routes)
- celem pozostania wyników z modelu sieci ulicznej wprowadzono punkty pomiarowe (data collection points, vehicle travel times, queue counters, pedestrian travel times measurements). Pozwoliły one na uzyskanie informacji o natężeniu pieszych przechodzących przez przejście dla pieszych Q_p , natężeniu pojazdów przejeżdżających przez przejście Q_v , stratach czasu gęstości oraz prędkości pieszych VP i pojazdów VD_v (rys.6.3).

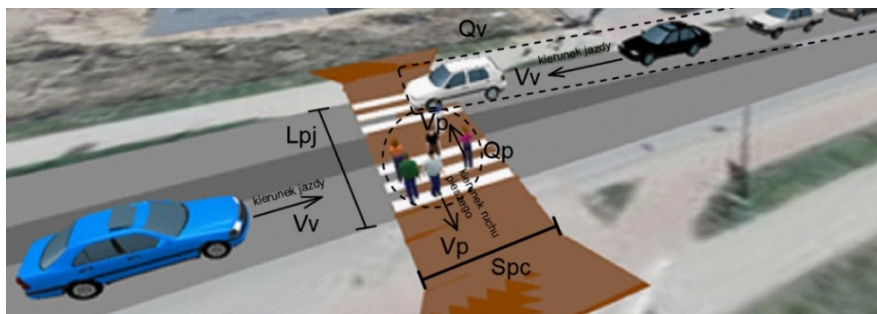
Model mikrosymulacyjny fragmentu sieci ulicznej zostały wykonane dla czterech lokalizacji i zostały przedstawione w załączniku Z.3.1.

Tab.6.1 Zestawienie charakterystyka modelowanych przejść dla pieszych

Rodzaj przejścia	Rodzaj przekroju ulicy	Ruch pojazdów	Szerokość przejścia S_{pc} [m]	Długość przejścia L_{pj} [m]	Rodzaj badań (*)
MSP 1.1	1x2	Dwukierunkowy	4	8	1,2,3,4,5
MSP 1.2	1x4	Jednokierunkowy	4	14	4,5
MSP 2.1	2x2	Jednokierunkowy	4	19	4,5
MSP 2.2	2x3	Jednokierunkowy	4	25	4,5

(*) :

- 1 - modelowanie zależności fundamentalnej QP-VP-DP potoku pieszych przemieszczających się w jednym kierunku;
- 2 - modelowanie zależności fundamentalnej QP-VP-DP potoku pieszych przemieszczających się w dwóch kierunkach;
- 3 - określenie wpływu struktury kierunkowej pieszych
- 4 - oszacowanie przepustowości przejścia dla pieszych oraz przepustowości jezdni
- 5 - oszacowanie średnich strat czasu pieszego i pojazdu



Rys.6.3 Przykładowy mikrosymulacyjny model ruchu pieszych i pojazdów w obrębie przejścia dla pieszych z zaznaczonymi elementami geometrycznymi i parametrami ruchu - opracowanie własne

6.3.1. Kalibracja modelu

Przy przeprowadzaniu eksperymentu badawczego z wykorzystaniem modelu mikrosymulacyjnego założono następującą metodykę postępowania z podziałem na etapy opisane poniżej.

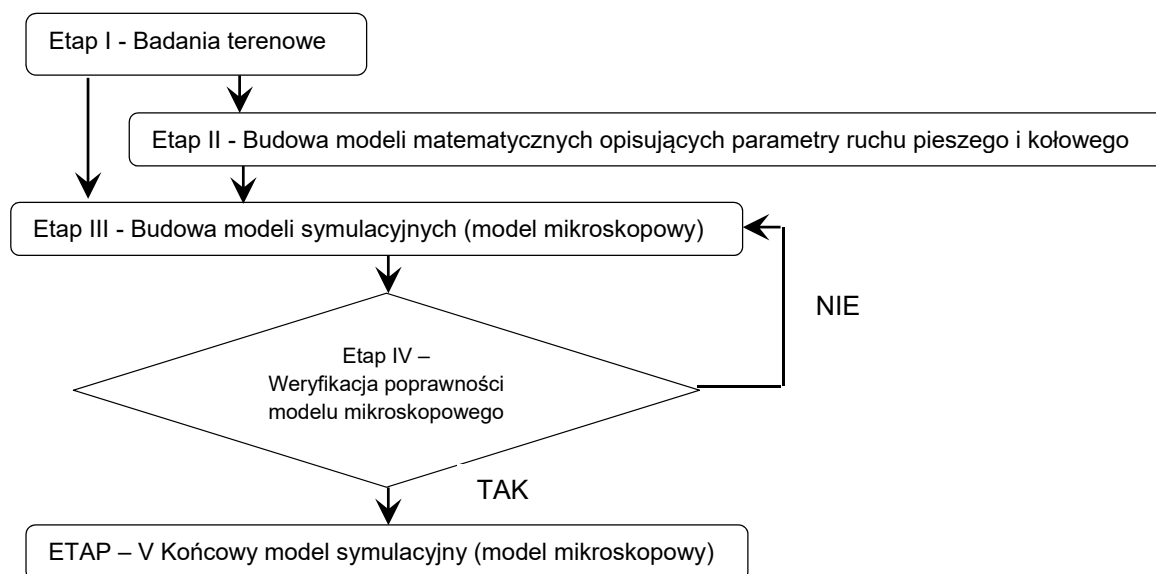
W etapie I wykonane zostały badania terenowe dla każdego analizowanego przejścia dla pieszych. Pozyskano informacje o geometrii, organizacji oraz natężeniu ruchu pieszych i pojazdów na analizowanych przejściach dla pieszych (przedstawione w rozdziale 4)

W etapie II, na podstawie pomiarów terenowych wykonano modele matematyczne opisujące rozkład prędkości pieszych - (przedstawione w rozdziale 5),

Etap III - Dla analizowanych przejść dla pieszych (załącznik Z.3.1), zbudowane zostały modele mikrosymulacyjne z uwzględnieniem założeń przedstawionych w rozdziale 6.1.3.

Etap IV – W tym etapie zweryfikowano poprawność wykonanych modeli mikrosymulacyjnych, oceny zgodności dokonano za pomocą wskaźników GEH i MAPE.

Etap V – Końcowy model mikrosymulacyjny, posłużył do wykonania analiz (przedstawione w rozdziale 7.2, 7.3, 8.1, 8.2), a wyniki z analiz posłużyły do realizacji celów przedstawionych w podrozdziale 7.



Rys.6.4. Schemat blokowy wprowadzania danych i weryfikacji modelu mikroskopowego

Weryfikacja modelu miała na celu doprowadzenie do uzyskania jak najbardziej zbliżonych wartości z modelu mikrosymulacyjnego w odniesieniu do wyników badań z pomiarów terenowych. Przy braku weryfikacji modelu, otrzymane wyniki mogą być nierealne dając błędne wnioski. W pierwszym etapie (Rys.6.4) wykonano badania terenowe na podstawie, których opracowane zostały analizy matematyczne, następnie zamodelowano fragment sieci ulicznej w modelu mikrosymulacyjnym w oparciu o domyślnie wartości parametrów zachowań użytkowników, udostępnionych przez producenta narzędzia (rozdział 2.8.3). Przeprowadzono symulację i dokonano wstępnej oceny wizualnej oraz otrzymanych wyników z określonego okresu symulacji. Oceny wizualnej dokonano w celu wykrycia zachowań niezgodnych z rzeczywistością. Jeżeli ocena wizualna i wyniki z symulacji uznane zostały za odpowiednie, nie było potrzeby dokonywać zmian w parametrach i model mikrosymulacyjny uznano za gotowy. Jeżeli otrzymane wyniki nie były satysfakcjonujące eksperymentalnie dobrano wartości parametrów zachowań kierowców i pieszych w oparciu o badania terenowe, w procesie weryfikacji można wykorzystywać ponadto algorytmy genetyczne [173]. W przypadku niesatysfakcjonujących wyników ponownie dokonano weryfikacji i oceny otrzymanych wyników z modelu symulacyjnego w odniesieniu do badań terenowych poprzez korektę domyślnych parametrów modelu, realizację testu wykonalności (ponowne przeprowadzenie symulacji) oraz ponowną kalibrację parametrów, ich ocenę oraz ponowną ocenę modelu. Proces powtarzany był tak długo, jak to konieczne do osiągnięcia zamierzonego rezultatu (rys.6.4 i rys. 6.6) . Ocena wyników z symulacji została wykonana przez przyrównanie do reprezentatywnej grupy kontrolnej niestanowiącej podstawy budowy modelu.

Ocena zgodności wyników z modelu mikrosymulacyjnego z danymi pomierzonymi w terenie, wykonano za pomocą wskaźników:

1. GEH (Geoffrey E. Havers) – jest to empiryczna formuła, przypominająca test statystyczny Chi-kwadrat, stworzona w latach '70 XX wieku na potrzeby analiz ruchowych. Wskaźnik rekomendowany jest do oceny zgodności natężenia ruchu w godzinie [162].

$$GEH = \sqrt{\frac{(M-O)^2}{0,5*(M+O)}} \quad (6.5)$$

gdzie:

M - natężenie ruchu na odcinku sieci ulicznej w modelu mikrosymulacyjnym [P/h],

O – natężenie ruchu na odcinku sieci drogowej w czasie pomiarów terenowych [P/h].

2. MAPE (mean absolute percentage error) średni bezwzględny błąd procentowy. Jest to wskaźnik, który reprezentuje procent, o jaki wartości estymowane odchylają się w stosunku do wartości rzeczywistych. Czym niższy błąd MAPE tym większa dokładność estymacji. [216].

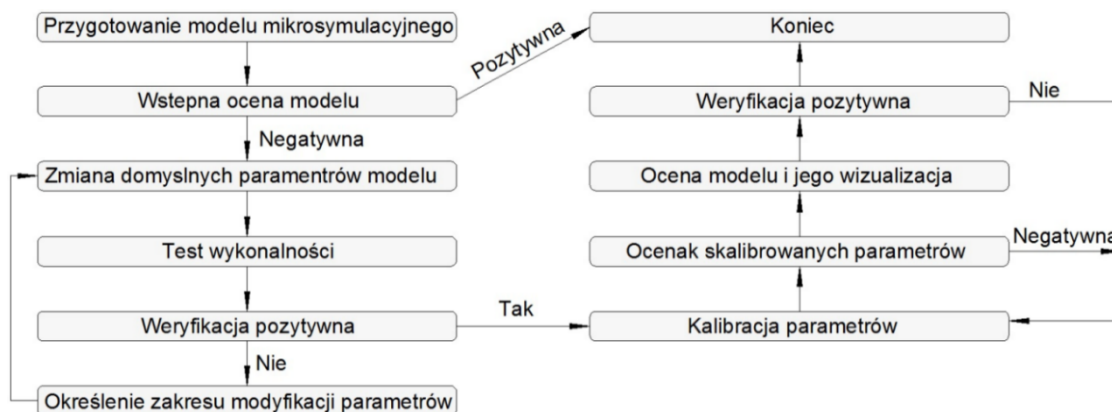
$$MAPE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - x_o|}{x_o} \quad (6.6)$$

gdzie:

X_i – dane uzyskane z modelu,
 X_o - dane uzyskane z badań terenowych lub symulacji,
 N – liczba danych.

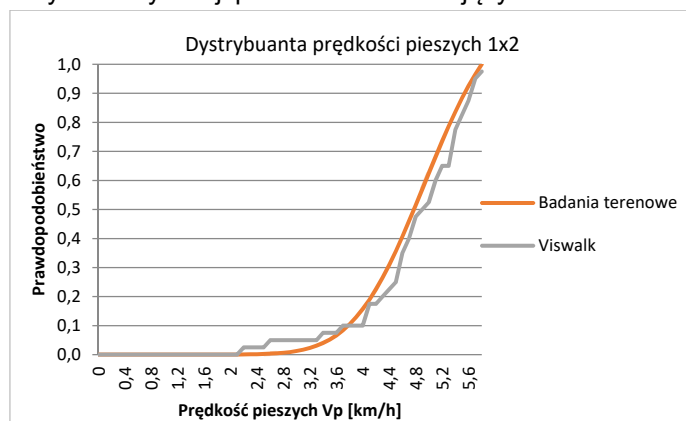
Na podstawie doświadczeń własnych i innych [109] przyjęto, że poziom dopasowania analizowanego modelu do danych z pomiarów terenowych lub z symulacji jest:

1. bardzo duży, gdy - $R^2_{sk} > 0,8$; lub gdy $MAPE \leq 10\%$, lub gdy $GEH \leq 10\%$,
2. duży i średni, gdy - $R^2_{sk} \geq 0,5$; lub gdy $10 < MAPE \leq 25\%$, lub gdy $10 < GEH \leq 25\%$,
3. mały i bardzo mały, gdy - $R^2_{sk} < 0,5$; lub gdy $MAPE > 25\%$, lub gdy $GEH > 25\%$.



Rys.6.5 Procedura weryfikacji modelu mikrosymulacyjnego, opracowanie własne

Po przeprowadzeniu symulacji i po analizie wartości uzyskanych z detektorów pomiarowych, określono wartość wskaźników GEH i MAPE. Przykładowy wyniki MAPE dla jednego z przejść dla pieszych (przekrój 1x2) przedstawiono na rys.6.6. Całkowity względny błąd dopasowania wyników symulacji do wyników z badań terenowych MAPE oraz GEH wyniósł mniej niż 10% i został zaprezentowany w tab.6. Uznano, że przygotowane modele charakteryzują się dobrym dopasowaniem i nie wymagają dodatkowych modyfikacji parametrów kalibrujących.



Rys.6.6 Przykład porównania wartości dystrybuanty prędkości pieszych wykonany do weryfikacji poprawności modelu mikroskopowego – przekrój ulicy 1x2.

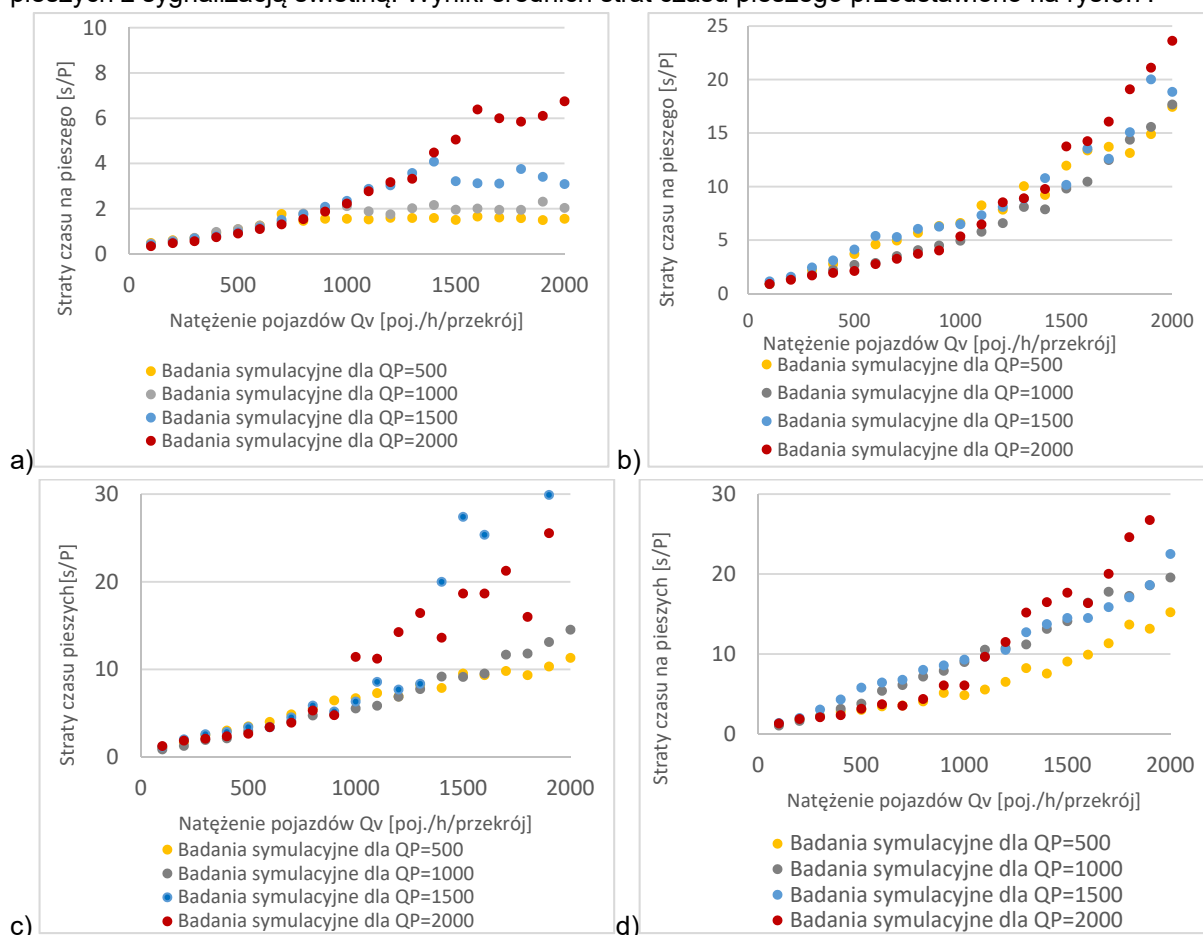
Tab.6.2 Zestawienie wartości parametrów GEH i MAPE dla modeli mikrosymulacyjnych

Rodzaj przekroju ulicy	GEH	MAPE [%]
1x2	7.23	6.55
1x4	8.74	8.20
2x2	8.44	8.12
2x3	7.96	7.64

6.4. Wyniki badań

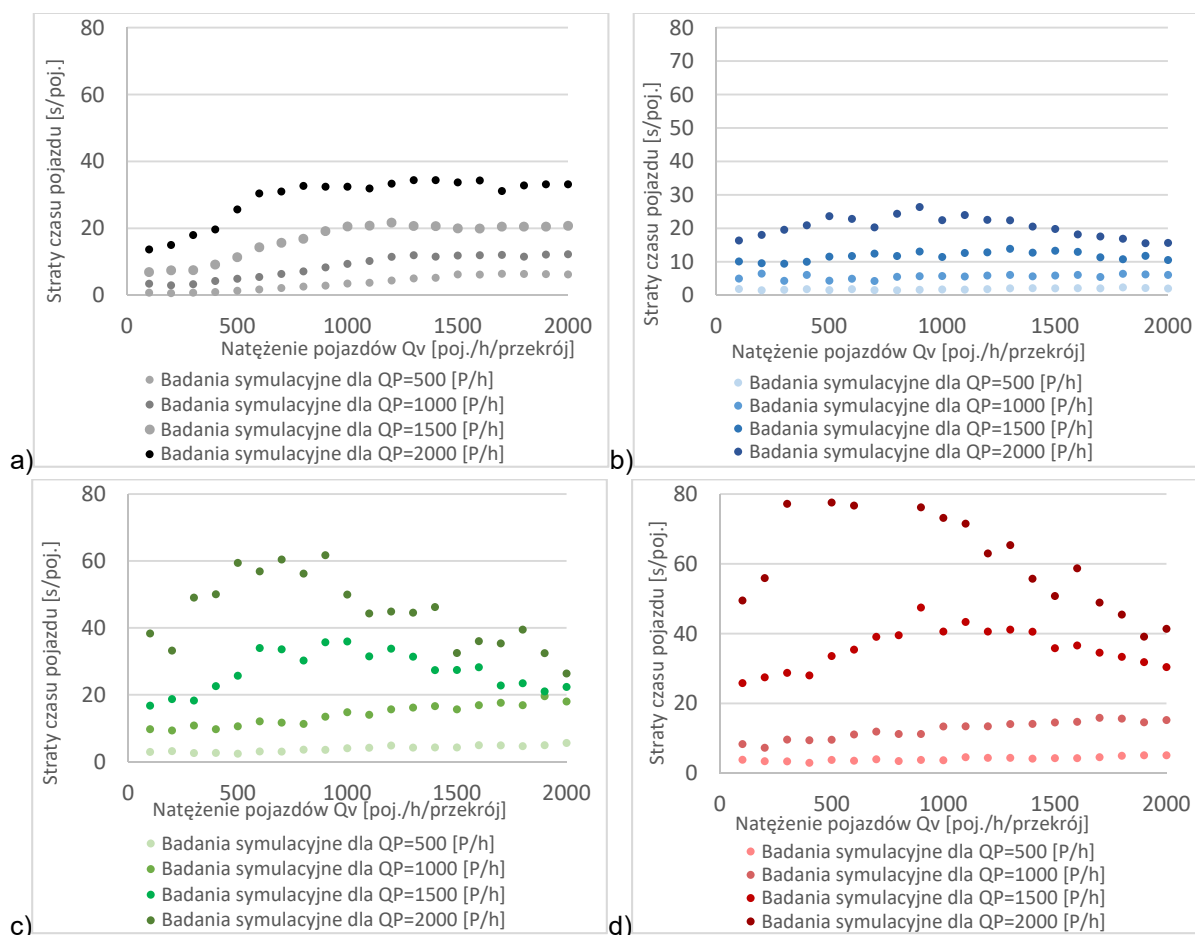
6.4.1. Badania strat czasu pieszych i pojazdów na przejściach dla pieszych

Dla średnich strat czasu pieszego stwierdzono, że wraz ze wzrostem natężenia pojazdów Q_v zwiększają się średnie straty czasu pieszego. W badaniach symulacyjnych założono, że pojazd ma pierwszeństwo przed pieszym. Wraz ze wzrostem natężenia ruchu pojazdów zmniejsza się liczba akceptowalnych przez pieszego luk w potoku pojazdów. Stwierdzono także, że wraz ze wzrostem strat czasu pieszego pogorszą się jego warunki ruchu. W kierunkach dalszych prac warto zwiększyć liczbę przekrojów badawczych z uwzględnieniem środków uspokojenia ruchu pojazdów oraz przejść dla pieszych z sygnalizacją świetlną. Wyniki średnich strat czasu pieszego przedstawiono na rys.6.7.



Rys.6.7 Średnie straty czasu pieszego dla przekroju a) 1x2, b) 1x4 c) 2x2 d) 2x3

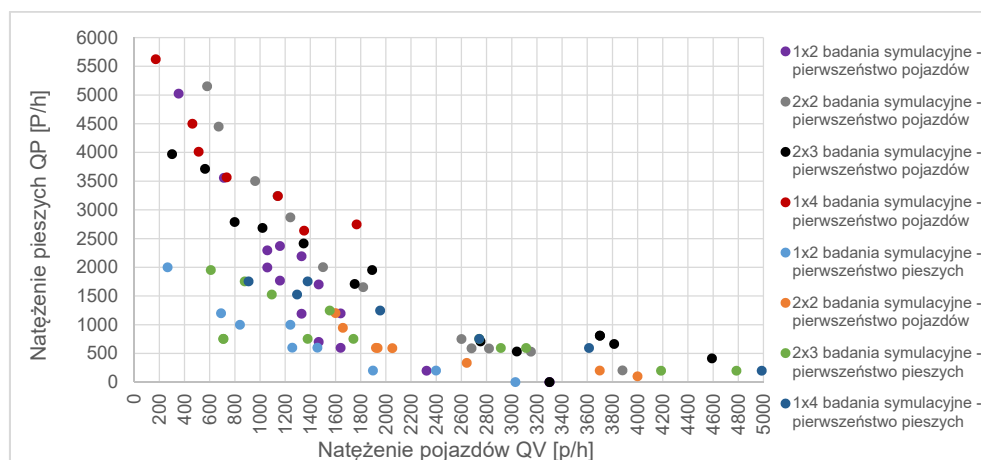
W modelach symulacyjnych dla średnich strat czasu pojazdu założono, że pojazd ma pierwszeństwo przed pieszym oraz stwierdzono, że wraz ze wzrostem natężenia pieszych Q_p do pewnego momentu zwiększają się średnie straty czasu pojazdu, w miarę dalszego zwiększania natężenia ruchu pojazdów straty czasu maleją. W kierunkach dalszych prac, tak jak dla średnich strat czasu pieszego, stwierdzono, że warto zwiększyć liczbę przekrojów badawczych z uwzględnieniem środków uspokojenia ruchu pojazdów oraz przejść dla pieszych z sygnalizacją świetlną. Wyniki średnich strat czasu pojazdu przedstawiono na rys.6.8.



Rys.6.8 Średnie straty czasu pojazdu dla przekroju a) 1x2, b) 1x4 c) 2x2 d) 2x3

6.4.2. Badania przepustowości ruchu pieszego i kołowego na przejściu dla pieszych

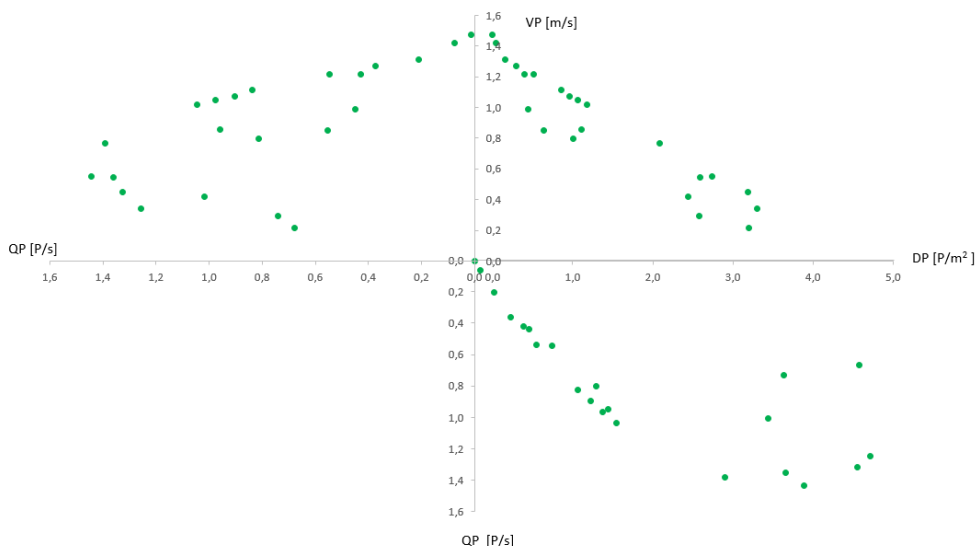
Z oszacowanej wielkości przepustowości na podstawie badań symulacyjnych wynika, że wraz ze wzrostem liczby pojazdów, gdy ci mają pierwszeństwo, liczba pieszych przekraczających ulicę maleje. Jest to spowodowane większą gęstością pojazdów i mniejszą liczbą luk akceptowalnych umożliwiających pieszemu bezpieczne przejście na drugą stronę jezdni. W kierunkach dalszych prac warto zwiększyć liczbę przekrojów badawczych z uwzględnieniem środków uspokojenia ruchu pojazdów oraz przejść dla pieszych z sygnalizacją świetlną. Wyniki zależności natężenia pieszych od pojazdów przedstawiono na rys.6.9.



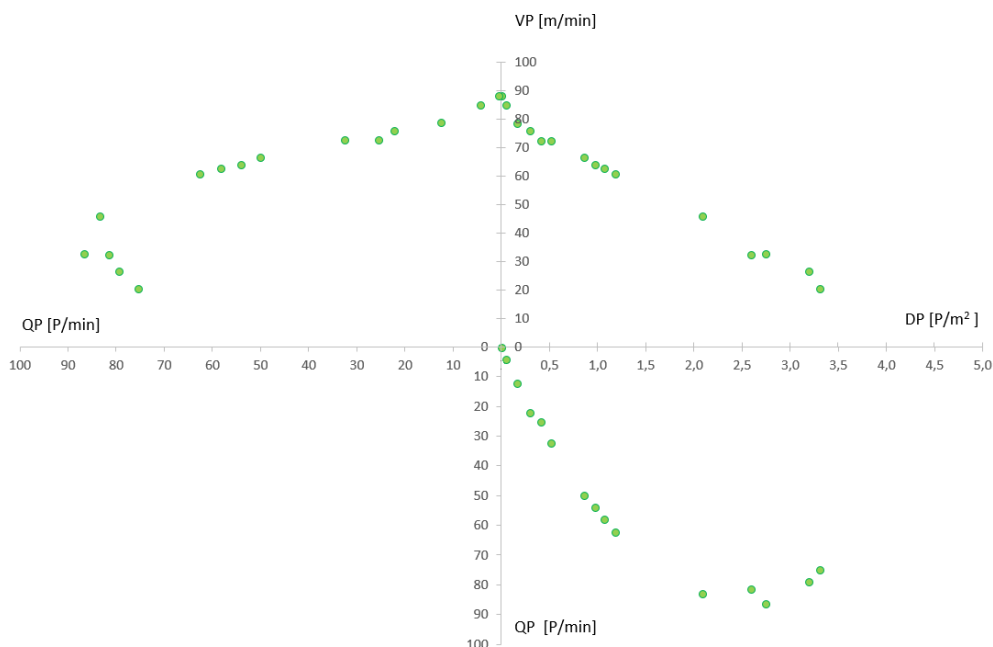
Rys.6.9 Zależność natężenia pieszych od natężenia pojazdów.

6.4.3. *Badania zależności podstawowych parametrów ruchu pieszego w przypadku potoku pieszych przemieszczających się w jednym kierunku;*

Dane z modelu symulacyjnego pochodzą ze zbioru Z.3. Do analiz przyjęto wszystkie dane o parametrach ruchu pieszego zebrane podczas badań symulacyjnych dla modelowego przejścia dla pieszych (opisanych w rozdz. 7). Zbiór zawiera 45 serii danych zebranych dla przejścia dla pieszych o szerokości 4,0 m, długości 7,0 m i przy założeniu jednokierunkowego ruchu pieszych. Rozkład wyników symulacji przedstawiono na rys.6.11. Wykres ten pokazuje rozkład uzyskanych danych układających się wzdłuż hipotetycznej zależności fundamentalnej $QP - VP - DP$. Zbiór ten zawiera skorygowaną liczbę danych. Odrzucono dane mocno odbiegające od hipotetycznej zależności fundamentalnej $QP - VP - DP$ (widoczne na rys.6.10).



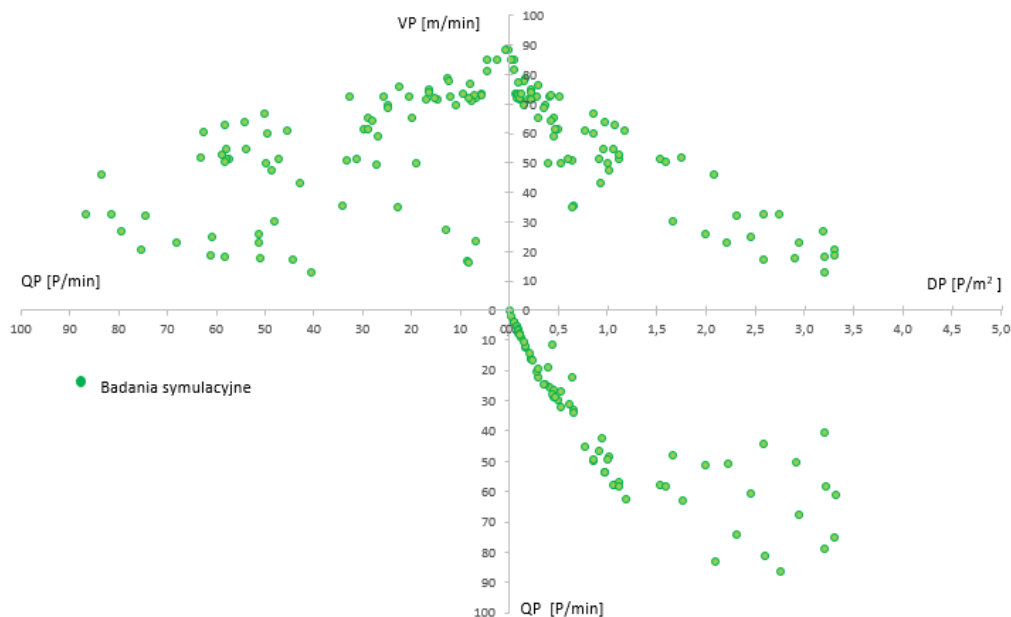
Rys.6.10 Trójosiowy wykres zależności pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu potoku pieszych uzyskanych z symulacji ruchu na przejściu dla pieszych.



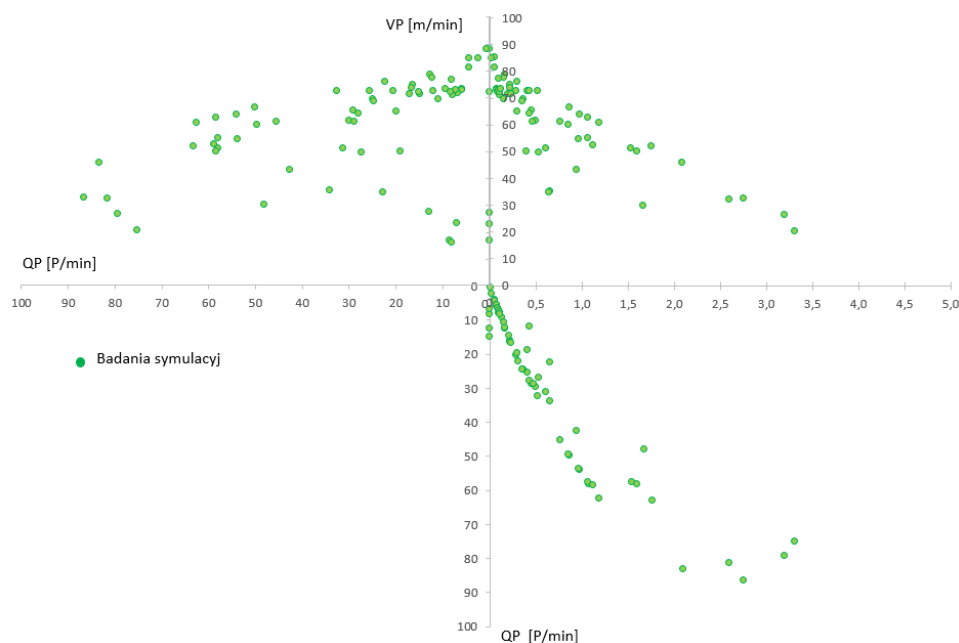
Rys.6.11 Trójosiowy wykres zależności pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu potoku pieszych uzyskanych z symulacji ruchu na przejściu dla pieszych, dane skorygowane – zbiór Z.3.

6.4.4. *Badania zależności podstawowych parametrów ruchu pieszego w przypadku potoku pieszych przemieszczających się w dwóch kierunkach*

Do analiz przyjęto wszystkie dane o parametrach ruchu pieszego zebrane podczas badań symulacyjnych dla modelowego przejścia dla pieszych (opisanych w rozdz. 7) o szerokości 4,0 m, długości 7,0 m. W rozdziale 7.3.2 przedstawiono wyniki z modelu symulacyjnego z podziałem na zbiory w zależności od współczynnika podziału kierunkowego wraz z nazwami zbiorów, które wykorzystano do analizy współczynnika podziału kierunkowego WPK. Dane z modelu symulacyjnego z uwzględnieniem wpływu podziału kierunkowego WPK przedstawiono na rys.6.13. Wykres ten pokazuje rozkład uzyskanych danych układających się wzdłuż hipotetycznej zależności fundamentalnej $QP - VP - DP$. Zbiór ten zawiera skorygowaną liczbę danych. Odrzucono dane mocno odbiegające od hipotetycznej zależności fundamentalnej $QP - VP - DP$ (widoczne na rys.6.12).



Rys.6.12 Trójosiowy wykres zależności pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu potoku pieszych uzyskanych z symulacji ruchu na przejściu dla pieszych dla potoku przemieszczającego się w dwóch kierunkach.



Rys.6.13 Trójosiowy wykres zależności pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu potoku pieszych uzyskanych z symulacji ruchu na przejściu dla pieszych dla potoku przemieszczającego się w dwóch kierunkach, dane skorygowane.

6.5. Wnioski z badań symulacyjnych

1. W rozdziale zaprezentowano metodykę, cele i zakres postępowania z podziałem na etapy przy przeprowadzaniu eksperymentu badawczego z wykorzystaniem modelu mikrosymulacyjnego.
2. Wykonano modele mikrosymulacyjne dla następujących przekrojów ulicznych 1x2, 1x4, 2x2, 2x3. Modele mikrosymulacyjne zostały wykonane w oparciu o model zachowań kierowcy dedykowany dla obszarów miejskich Wiedemann 74 dla którego bazowano na wartościach domyślnych. W zakresie ruchu pieszego bazowano na modelu zachowań pieszych Social Force Model oraz wprowadzono dystrybuanty prędkości pieszych, które zostały wykonane w oparciu o wyniki z pomiarów terenowych.
3. Przygotowane modele mikrosymulacyjne poddano ocenie zgodności wyników z modelu mikrosymulacyjnego z danymi pomierzonymi w terenie. Całkowity względny błąd dopasowania wyników symulacji do wyników z badań terenowych MAPE oraz GEH wyniósł mniej niż 10%. Uznano, że przygotowane modele charakteryzują się dobrym dopasowaniem i nie wymagają dodatkowych modyfikacji parametrów kalibrujących.
4. Wyniki z badań symulacyjnych stanowią zbiór danych, które zastosowano w rozdziale 7 i 8 do :
 - a) modelowania zależności fundamentalnej QP-VP-DP potoku pieszych przemieszczających się w jednym kierunku rys.6.11.
 - b) oszacowania średnich strat czasu pieszego na przejściach. Symulacje wykonano dla wartości natężenia pieszych 500,1000, 1500 i 2000 [P/h] oraz różnych wartościach natężenia pojazdów od 100 [p/h] do 2000 [p/h]. Zależność strat czasu pieszych dla różnych wartości natężenia pojazdów i pieszych w zależności od przekroju ulicy, przedstawiono na rys.6.7.
 - c) oszacowania średnich strat czasu pojazdu na przejściach, które wykonano w zakresie natężeń pieszych i pojazdów jak dla średnich strat czasu pieszych. Zależność strat czasu pojazdu dla różnych wartości natężenia pojazdów i pieszych w zależności od przekroju ulicy, przedstawiono na rys.6.7 i rys.6.8.
 - d) oszacowania przepustowości pieszych oraz pojazdów na podstawie wybranych modeli przejść dla pieszych w obszarze miejskim w wybranych warunkach prawnych oraz przepustowości pojazdów na tych przejściach. Zależność natężenia pojazdów od natężenia pieszych przedstawiono na rys.6.9.

7. MODELOWANIE FUNDAMENTALNEJ ZALEŻNOŚCI OPISUJĄCEJ RUCH POTOKU PIESZYCH NA PRZEJŚCIACH DLA PIESZYCH

7.1. Charakterystyka, cel i zakres analiz

Podobnie jak w przypadku ruchu pojazdów tak i w przypadku ruchu pieszego występuje zależność fundamentalna zachodząca pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu potoku pieszego: średnią prędkością potoku VP , gęstością potoku DP i natężeniem ruchu pieszego QP . Zależność pomiędzy tymi parametrami opisana jest wzorem (7.1):

$$QP = VP \cdot DP \quad (7.1)$$

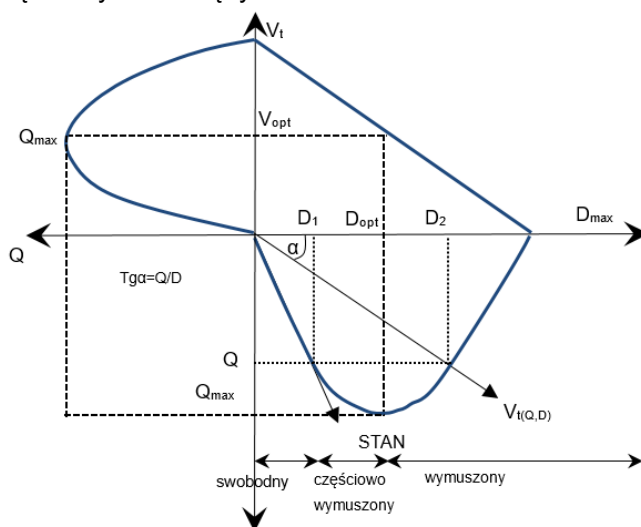
gdzie:

QP – natężenie ruchu potoku pieszych [P/s/m; P/min/m; P/h/m],

VP – prędkość potoku pieszych [m/s; m/min.; km/h],

DP – gęstość potoku pieszych [P/m²].

Podobnie też jak w przypadku ruchu pojazdów zależności zachodzące pomiędzy poszczególnymi parametrami $VP(QP)$, $VP(DP)$, $QP(DP)$ opisuje się za pomocą wykresu fundamentalnego, w postaci trójwymiarowej płaszczyzny wyznaczonej przez wspólne osie prędkości, gęstości i natężenia [69]. W najprostszej postaci (model Furina [65]) zależności $VP(QP)$ i $QP(DP)$ odwzorowuje się za pomocą paraboli i funkcji kwadratowej, a zależność $VP(DP)$ przyjmuje postać funkcji liniowej (rys.7.1). W przeglądzie literatury (rozdział 2.2.2) wskazano jednak, że możliwości reprezentacji poszczególnych zależności jest znacznie więcej, i tak na przykład zależność $VP(DP)$ może być reprezentowana także przez funkcję logarytmiczną lub wykładniczą rys.7.1.



Rys.7.1 Wykres fundamentalny ruchu potoku pieszych według modelu Fuirin'a [65]

Cytowane w literaturze prace dotyczyły najczęściej badań ruchu jednokierunkowego [192] i określenia zależności fundamentalnej dla warunków ruchu jednokierunkowego. Jednakże na przejściach dla pieszych występuje głównie ruch dwukierunkowy, charakteryzujący się przemieszczaniem potoków pieszych w różnych kierunkach, mimo zasady ruchu prawostronnego. Co powoduje, że piesi idący naprzeciwko przeszkadzają sobie powodując znaczną zmianę parametrów ruchu potoku pieszych.

Celem prowadzonych badań jest opracowanie modelu fundamentalnej zależności $QP - VP - DP$ dla ruchu pieszego na przejściach dla pieszych w miastach w Polsce dla potoków przemieszczających się zarówno w jednym jak i w dwóch kierunkach na przejściu dla pieszych. Na rys.7.8 przedstawiono rozkłady uzyskanych zależności $QP - VP - DP$ dla jednego kierunku ruchu pieszych na tle modelowej zależności fundamentalnej opracowanej przez Fruina [121] oraz innych badaczy. Rozkład uzyskanych w ramach prowadzonej pracy (rozdział 5.7 i rozdział 7.2) danych odbiega od zaprezentowanego modelu. Dlatego na skutek pojawiających się wątpliwości postawiono następujące pytania badawcze:

1. Jak określić wartości parametrów granicznych i punktów charakterystycznych modelu zależności fundamentalnej?
2. Jakimi funkcjami odwzorować poszczególne pary zależności pomiędzy podstawowymi parametrami?
3. Czy można zaadoptować któryś z zidentyfikowanych w przeglądzie literatury modeli fundamentalnej zależności pomiędzy podstawowymi parametrami potoku ruchu pieszego?
4. Jaki model najlepiej opisuje fundamentalną zależność w ruchu pieszych na podstawie zebranych danych w warunkach polskich miast?
5. Jaki jest wpływ struktury kierunkowej potoku pieszych na zmianę parametrów granicznych i zmianę zależności fundamentalnej w ruchu pieszych?

7.1.1. Procedura modelowania

Przyjęto pięciostopniową procedurę opracowania modelu fundamentalnej zależności $QP - VP - DP$ [192],[103]:

1. Przyjęcie założeń i celu modelowania
2. Dobór danych do modelowania.
3. Określenie wielkości charakterystycznych punktów na wykresie $QP - VP - DP$, a w szczególności: VP_{max} , DP_{max} , QP_{max} oraz VP_{opt} i DP_{opt} ,
4. Dobór modelu zależności dla par poszczególnych parametrów ruchu pieszego a w szczególności:
 - a) $VP = f(DP)$, gdzie zmienną zależną jest średnia prędkość potoku pieszych,
 - b) $QP = f(VP)$, gdzie zmienną zależną jest natężenie ruchu potoku pieszych,
 - c) $QP = f(DP)$, gdzie zmienną zależną jest także natężenie ruchu potoku pieszych.
5. Konstrukcja trójosiowego modelu zależności fundamentalnej potoku ruchu pieszych $QP = F(VP \text{ i } DP)$.
6. Porównanie opracowanych modeli z modelami innych autorów (przedstawione tab.2) i rekomendacje do stosowania,.

7.1.2. Założenia do modelowania

Biorąc pod uwagę wnioski z przeglądu literatury (rozdział 2.2) oraz wyniki badań własnych (rozdział 6) przyjęto następujące założenia do budowy modelu fundamentalnej zależności $QP - VP - DP$ na przejściach dla pieszych:

1. Modelowanie zależności $QP - VP - DP$ prowadzono z wykorzystaniem opisowych modeli analitycznych), dla danych uzyskanych z badań symulacyjnych dla modelowych przejść dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej oraz dla danych empirycznych uzyskanych z badań prowadzonych na kładce dla pieszych w Gdańsku oraz danych uzyskanych z modelu symulacyjnego.
2. Modelowanie zależności $QP - VP - DP$ prowadzono dla danych uzyskanych dla warunków wzorcowych, bez wpływu warunków atmosferycznych, oświetlenia itp.
3. Kładka dla pieszych reprezentuje ruch jednokierunkowy po chodniku lub przejściu dla pieszych, szerokość efektywna 2,1 m, pochylenie podłużne 6,0 %, warunki pogodowe dobre,
4. Modelowe przejście dla pieszych spełnia następujące wymagania:
 - a) rodzaj przejścia: zwykle przejście dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej;
 - b) wielkość ruchu znana jest liczba pieszych Q_p (P/min.) przechodzących przez przejście dla pieszych,
 - c) piesi przemieszczają się przez przejście dla pieszych:
w jednym kierunku (struktura kierunkowa potoku pieszych $UKP = 100$);
w dwóch kierunkach (struktura kierunkowa potoku $UKP = 100 - 50$);
 - d) brak pojazdów na jezdni;
 - e) szerokość przejścia dla pieszych wynosi $B = 4,0$ m;
 - f) długość przejścia dla pieszych jak dla przekroju ulicy 1x2, $LP = 7,0$ m.
5. Dla zależności fundamentalnej $QP - VP - DP$ ustalono następujące warunki brzegowe [44] [69] [192]:
Pierwszy warunek brzegowy (W1), dotyczący stanu ruchu swobodnego:

$$VP = VP_{max} = VP_{sw} \quad (7.2)$$

gdy: $DP = 0$ oraz $QP = 0$
warunkowo:

$$VP < VP_{max} \quad (7.3)$$

gdy: $DP > 0$

Drugi warunek brzegowy (W2), dotyczący stanu ruchu wymuszonego:

$$VP = 0 \quad (7.4)$$

gdy: $DP = DP_{max}$ oraz $QP = 0$

warunkowo:

$$VP > 0 \quad (7.5)$$

gdy: $DP < DP_{max}$

Trzeci warunek brzegowy (W3) dotyczący stanu ruchu swobodnego i wymuszonego:

$$QP = 0 \quad (7.6)$$

gdy: $DP = 0$ lub $DP = DP_{max}$

warunkowo:

$$QP > 0 \quad (7.7)$$

gdy: $0 < DP < DP_{max}$

Przy jednoczesnym spełnieniu warunku brzegowego W1 i W2, spełniony jest również warunek W3. Dla warunku W1, który jest spełniony warunkowo, następuje naruszenie warunku W3 w obszarze stanu ruchu swobodnego. Gdy dojdzie do spełnienia warunkowego warunku brzegowego W2, następuje naruszenie warunku W3 w obszarze stanu ruchu wymuszonego. Założono, że najistotniejsze jest spełnienie warunków brzegowych W1 i W2, ponieważ warunek W3 jest od nich zależny. Jeżeli model spełnia lub warunkowo spełnia warunki brzegowe W1 i W2, może być zastosowany do odwzorowania obu stanów ruchu (ruchu swobodnego i wymuszonego). Jeżeli tylko jeden z warunków (W1 lub W2) jest spełniony lub warunkowo spełniony, wtedy model może odwzorowywać stan ruchu, dla którego spełniony jest warunek brzegowy.

6. Dla zależności fundamentalnej $QP - VP - DP$ ustalono parametry graniczne, których wartości liczbowe zestawiono w tab.7.

Tab.7.1 . Oczekiwany zakres wartości poszczególnych parametrów granicznych zależności $QP-VP-DP$ potoku pieszych dla ruchu jedno i dwukierunkowego

Parametr graniczny	Ruch jednokierunkowy		Ruch dwukierunkowy
	Oczekiwany zakres	Przykładowe zakresy	Oczekiwany zakres
QP_{max} [P/min/m]	75,0 – 100,0	72,0 – 98,0	40,0-80,0
VP_{sw} [m/min]	82,8	60,0 - 87,6	82,8
VP_{opt} [m/min]	40,0 – 70,0	43,0 - 73,0	35,0 – 60,0
DP_{max} [P/m ²]	4,60	3,85 – 4,73	4,60
DP_{opt} [P/m ²]	2,00 – 2,50	1,60 -2,30	0,50 – 2,30

7.1.3. Dobór modeli, walidacja i weryfikacja

Przez walidację rozumie się monitorowanie metody badania w sposób ciągły w celu potwierdzenia, że badania wykonywane są zgodnie z oczekiwaniami. Weryfikacja zaś, jest procesem jednorazowym celem potwierdzenia oczekiwanego efektu modelowania [215].

Do oceny dobroci analizowanych modeli zależności fundamentalnej przyjęto procedurę obejmującą: dobór kryteriów oceny i poziomów akceptowalności oraz ocenę i wybór najlepszych modeli. Na podstawie pracy [192] oraz wstępnych badań własnych przyjęto następujące kryteria, które powinien spełniać dobrze dobrany model $QP-VP-DP$: prosty zapis matematyczny (K1), dobre dopasowanie statystyczne modelu do danych empirycznych i symulacyjnych (K2), poprawne wartości parametrów granicznych i spełnione warunki brzegowe zależności fundamentalnej (K3).

Miarą prostoty zapisu matematycznego modelu będzie liczba jego parametrów. Im mniejsza liczba parametrów, tym model prostszy, łatwiejszy w zastosowaniu praktycznym i łatwiejszy do adaptacji do

danych warunków. Przyjęto, że model posiada prosty zapis matematyczny, jeżeli liczba jego parametrów nie przekracza 2, średnio trudny zapis matematyczny, jeżeli liczba parametrów wynosi 3-4 parametrów i trudny, jeżeli liczba parametrów jest większa niż 4.

Dobre dopasowanie statystyczne do danych empirycznych i symulacyjnych. Do oceny wykorzystano statystyczne miary dobroci dopasowania pozwalające na ocenę oraz porównanie modeli, w skład, których wchodzi: R^2_{sk} , i MAPE (wzór 7.8, rozdział 6).

Współczynnik R^2_{sk} – informujące o stopniu dopasowania estymowanych wartości do wartości empirycznych i symulacyjnych. Im większa wartość współczynnika R^2_{sk} tym lepsza, jakość dopasowania modelu do danych rzeczywistych.

$$R^2_{sk} = \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \geq 0 \quad (7.8)$$

Gdzie:

y_i – i-ta obserwacja zmiennej y ;

\hat{y}_i – wartość teoretyczna zmiennej objaśnianej;

\bar{y}_i – średnia arytmetyczna empirycznych wartości zmiennej objaśnianej;

Ocenę poprawności parametrów otrzymano, poprzez porównanie uzyskanych wartości granicznych parametrów zależności fundamentalnej QP-VP-DP z oczekiwanym zakresem wartości wskazanym w tab.7. Jeżeli wartość parametru estymowanego znajduje się w oczekiwanym zakresie to uznano, że model dobrze estymuje wartość określonego parametru. W sytuacji, gdy nie mieści się w oczekiwanym zakresie, uznano, że wartość parametru granicznego jest szacowana błędnie. Najlepsze odwzorowanie rzeczywistych warunków ruchu za pomocą modelu jest, gdy otrzymujemy jak największą liczbę parametrów granicznych znajdujących się w oczekiwanym zakresie.

7.2. Modelowanie zależności fundamentalnej QP-VP-DP w potoku pieszych przemieszczających się w jednym kierunku

7.2.1. Charakterystyka i cel analiz

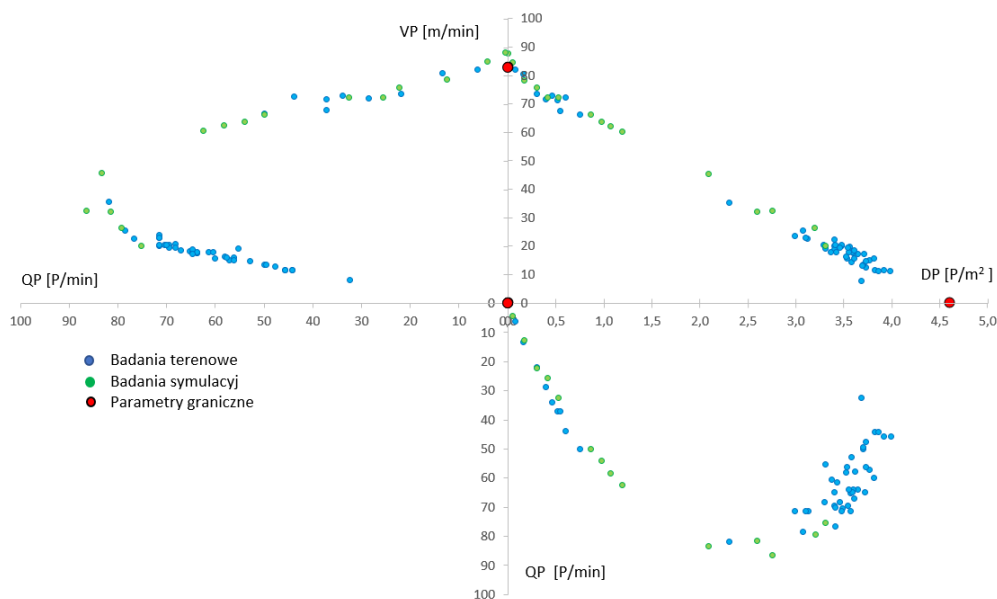
Poszukiwanie modelu trójosiowego dla fundamentalnej zależności potoku ruchu pieszych pomiędzy trzema podstawowymi parametrami QP-VP-DP było przedmiotem badań wielu badaczy. W szczególności badania te dotyczyły ruchu jednokierunkowego w celu uzyskania informacji o zależności fundamentalnej i poszukiwanie największych wartości przepustowości [192],[40]. W Polsce takie badania nie były dotychczas prowadzone. Celem prezentowanej analizy jest opracowanie modelu zależności fundamentalnej dla jednokierunkowego potoku ruchu w warunkach miast polskich oraz porównanie tego modelu z wybranymi z dotychczas opracowanych modeli przez innych badaczy.

7.2.2. Dobór danych do modelowania

Do analiz przyjęto cztery zbiory danych:

1. Dane empiryczne z kładki dla pieszych, zbiór Z.1 (rozdział 5.7).
2. Dane skorygowane z kładki dla pieszych, zbiór Z.2 (rozdział 5.7).
3. Dane z modelu symulacyjnego dla modelowego przejścia dla pieszych, zbiór Z.3 (rozdział 6.3).
4. Dane połączone z modelu symulacyjnego i kładki dla pieszych, zbiór Z.4.

Dane połączone z kładki dla pieszych i z modelu symulacyjnego, zbiór Z.4. Do analiz przyjęto wszystkie dane o parametrach ruchu pieszego zebrane podczas badań symulacyjnych dla modelowego przejścia dla pieszych zbiór Z3 oraz skorygowane dane empiryczne z pomiarów prowadzonych na kładce dla pieszych zbiór Z2. Dane te uzupełniono o ustalone na podstawie analiz teoretycznych i wyników badań empirycznych charakterystyczne punkty graniczne VP na wykresie zależności fundamentalnej QP – VP – DP. Wykres danych przedstawionych na rys.7.2. Wykres ten pokazuje, że zbiory tych danych uzupełniają się. W ten sposób uzyskano zbiór danych złożony z 63 serii danych.



Rys.7.2 Trójosiowy wykres zależności pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu potoku pieszych, połączone zbiory danych skorygowany uzyskanych na analizowanej kładce i z badań symulacyjnych - zbiór Z4.

7.2.3. Określenie wielkości parametrów charakterystycznych modelu zależności fundamentalnej

Prędkość pieszych w ruchu swobodnym VP_{sw} jest to prędkość ruchu potoku pieszych występująca, kiedy $QP=0$ i $DP=0$ tzn. brak pieszych na przejściu. W rzeczywistości taka sytuacja jest nieosiągalna, dlatego prędkość w ruchu swobodnym definiuje się, jako średnią prędkość w warunkach małego natężenia ruchu pieszego i małej gęstości potoku pieszych. W takiej sytuacji nie występuje interakcja pomiędzy pieszymi, gdyż poruszają się oni swobodnie i sami decydują o wyborze prędkości przemieszczania się. Zatem do dalszych analiz przyjęto VP_{sw} , jako średnią prędkość z rozkładu prędkości pieszych uzyskaną na podstawie badań prowadzonych na przejściach dla pieszych opisanych w rozdz. 6.5. Z tych badań wynika, że piesi na badanych przejściach dla pieszych poruszali się z prędkością VP od 0,32 - 3,60 [m/s]. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań (tab.5) uzyskano średnią prędkość pieszego w ruchu swobodnym $VP_{sw} = 1,38$ m/s (82,8 m/min.), a kwantyl $VP_{85} = 1,68$ [m/s] (100,8 m/min). Do dalszych analiz przyjęto wartość zaokrągloną $VP_{sw} = 1,38$ [m/s], tj. 82,8 m/min.

Gęstość maksymalna DP_{max} jest to teoretyczna gęstość potoku pieszych występująca w warunkach zatoru na chodniku, kładce, przejściu dla pieszych, gdy prędkość pieszych VP i natężenie ruchu pieszych QP są równe 0. W rzeczywistości oznacza to graniczny stan zatłoczenia, w którym piesi w zatorze praktycznie nie poruszają się. W praktyce taka sytuacja jest trudna do uchwycenia, stąd istnieją różne metody wyznaczenia tego parametru na bazie pomiarów lub analiz teoretycznych. Próbowano określić maksymalną gęstość potoku pieszych DP_{max} na podstawie pomiaru średniej gęstości potoku pieszych oczekujących na przejście po kładce dla pieszych zwodzonej nad rzeką Motławą w Gdańsku na podstawie badań opisanych w rozdz. 5.7. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano średnią gęstość pieszych oczekujących na przejście $DPs = 1,5$ [P/m²], tj. znacznie mniejszą od oczekiwanej. Należy zauważyć, że występuje znaczny rozrzut gęstości pieszych oczekujących na przejście, gdyż podczas oczekiwania na przejście piesi w celu uzyskania większego komfortu zajmują większą powierzchnię. Dlatego gęstość potoku w trakcie oczekiwania jest mniejsza niż w momencie tuż przed uzyskaniem zezwolenia na wejście (na jezdnię lub na kładkę) lub w czasie przechodzenia. Zatem do określenia gęstości maksymalnej oszacowano maksymalną gęstość potoku pieszych przyjmując średnią szerokość 0,60 m i grubość 0,5 m pieszego o kształcie dwóch półokręgów, oszacowano, że człowiek teoretycznie zajmuje ok. 0,22 m² powierzchni. Zatem teoretycznie na 1 metrze kw. powierzchni przeznaczonej dla ruchu pieszych może pomieścić się średnio 4,6 osoby przytulone do siebie. Taka sytuacja może też występować w przypadku ruchu panicznego, np. podczas ewakuacji. Tą wartość można uznać za teoretycznie maksymalną gęstość potoku pieszych $DP_{max,t} = 4,6$ [P/m²].

Natężenie minimalne QP_{\min} i prędkość minimalna VP_{\min} na podstawie danych z badań na kładce dla pieszych przyjęto w momencie oczekiwania pieszych na wejście na kładkę. Wówczas natężenie pieszych i prędkość potoku pieszych były równe 0, co stanowiło podstawę do przyjęcia $QP_{\min} = 0$ oraz $VP_{\min} = 0$.

Natężenie maksymalne QP_{\max} w zależności fundamentalnej występuje, jako ekstremum funkcji dla maksymalnego natężenia ruchu pieszych, które występuje w zakresie gęstości ruchu potoku pieszych $0 < DP < DP_{\max}$. W modelach ruchu potoku pojazdów i potoku pieszych podobnie natężenie DP_{\max} odpowiada występowaniu gęstości optymalnej potoku DP_{opt} oraz prędkości optymalnej potoku pieszych VP_{opt} . Podobnie jak w przypadku innych charakterystyk, istnieją różne metody wyznaczania QP_{\max} : na podstawie badań empirycznych lub analizy zależności pomiędzy parametrami granicznymi [192]. W tym ostatnim przypadku maksymalne natężenie ruchu pieszych QP_{\max} można wyznaczyć ze wzoru (7.9):

$$QP_{\max} = DP_{opt} \cdot VP_{opt} \quad (7.9)$$

Zwykle przyjmuje się, że QP_{\max} wyznaczone za pomocą modelu QP-VP-DP odpowiada przepustowości analizowanego urządzenia dla pieszych.

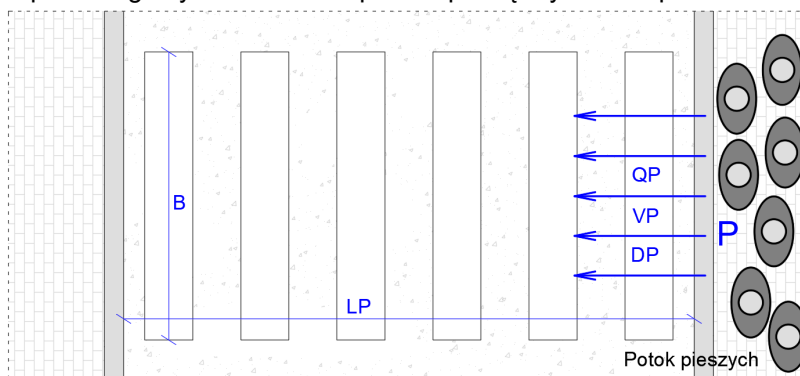
Prędkość optymalna VP_{opt} i gęstość optymalna DP_{opt} są to wartości występujące, gdy natężenie ruchu pieszych osiąga wartość maksymalną DP_{\max} . Są to także wartości graniczne dla stanu ruchu swobodnego i wymuszonego, tj. po przekroczeniu, których następuje zmiana stanu ruchu. Zarówno prędkość jak i gęstość optymalną najłatwiej jest wyznaczyć dopasowując wybrany model zależności fundamentalnej QP-VP-DP do danych empirycznych lub na podstawie analizy danych, wyznaczając średnią prędkość i gęstość ruchu potoku pojazdów przy natężeniu odpowiadającym QP_{\max} . W dalszych analizach zastosowano pierwszą z wymienionych metod.

Natężenie maksymalne QP_{\max} , prędkość optymalna VP_{opt} i gęstość optymalna DP_{opt} będą ustalane na podstawie analiz i opracowanych modeli zależności fundamentalnej w kolejnych podrozdziałach.

7.2.4. Dobór modeli zależności pomiędzy podstawowymi parametrami

7.2.4.1. Obszar i zakres modelowania

Typowy ruch jednokierunkowy rzadko występuje na urządzeniach przeznaczonych dla ruchu pieszego. Takie przypadki można zaobserwować na bramkach wejściowych i wyjściowych z obiektów (stadion, hala sportowa, kładki lub tunele dla pieszych o rozdzielonych kierunkach ruchu). Przypadki te reprezentują jednorodny warunki ruchu. Schemat modelowego przejścia dla pieszych z ruchem jednokierunkowym przedstawiono na rys.7.3. W tym przypadku cały potok pieszych P o natężeniu ruchu pieszego QP, przemieszcza się przez przejście dla pieszych, od prawej do lewej krawędzi jezdni, z prędkością VP i gęstością pieszych DP. W celu opracowania modelu zależności fundamentalnej dla tego rodzaju przypadków urządzeń dla pieszych z jednym kierunkiem ruchu pieszych przeprowadzono analizy wykorzystując wszystkie cztery zbiory danych Z.1 – Z.4. Dla każdego zbioru analizowano po dwa różne modele poszczególnych zależności parami pomiędzy trzema parametrami ruchu pieszego.



Rys.7.3 Schemat modelowego przejścia dla pieszych z potokiem pieszych P przemieszczającym się w jednym kierunku.

7.2.4.2. Modele zależności między gęstością potoku i natężeniem ruchu pieszych

Zależność pomiędzy gęstością potoku pieszych DP i natężeniem potoku pieszych QP dla czterech analizowanych zbiorów danych opisano dwoma modelami: w postaci funkcji kwadratowej (7.10) i wielomianu trzeciego stopnia (7.11):

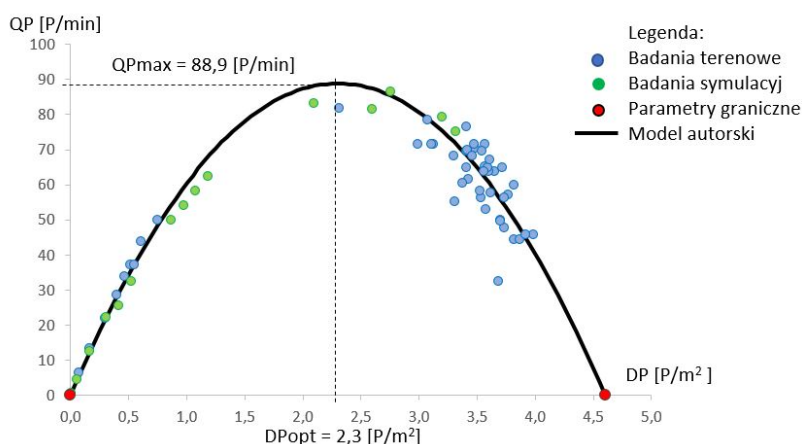
$$QP = a \cdot DP^2 + b \cdot DP \quad (7.10)$$

$$QP = a \cdot DP^3 + b \cdot DP^2 + c \cdot DP + d \quad (7.11)$$

Korzystając z pakietu obliczeniowego Statistica określono parametry poszczególnych modeli oraz miary ich dopasowania do danych empirycznych lub z symulacji., które zestawiono w tab.7. Miary dopasowania wskazują, że parametry ruchu pieszych uzyskane z badań empirycznych, (dane skorygowane) oraz parametry ruchu pieszych uzyskane z modelu symulacyjnego dobrze opisują oba modele. Do dalszych analiz przyjęto model opisany funkcją kwadratową na połączonym zbiorze danych Z.4 (tj. połączonych danych z badań ruchu pieszego na kładce i symulacji ruchu na przejściu dla pieszych). Wykres zależności natężenia ruchu pieszych QP od gęstości potoku DP przedstawiono na rys.7.4. Uzyskany model potwierdza, że wraz z przyrostem gęstości pieszych DP wzrasta natężenie ruchu aż do osiągnięcia wartości maksymalnej QP_{max} . W przypadku ruchu jednokierunkowego $QP_{max} = 88,9$ [P/min./m], tj. 5334 [P/h] lub 1,48 [P/s/m]. Natężenie maksymalne reprezentuje przepustowość kładki, która wynosi (przy szerokości efektywnej 2,1 [m]) CP = 187 [P/min]. (tj. 11200 [P/h]). Przy dalszym przyroście gęstości natężenie ruchu zmniejsza się aż do wartości zerowej przy gęstości maksymalnej wynoszącej $DP_{max}=4,6$ [P/m²].

Tab.7.2 Zestawienie parametrów i miar dopasowania modeli zależności QP = f (DP)

Zbiór danych		Model	Parametry modelu				Miary dopasowania modelu		
			a	b	c	d	R2sk	MAPE (%)	p
Z.1	Empiryczne - kładka	Kwadratowy (7.10)	-7,77	44,55	-	-	0,547	7,8	<0,05
		Wielomianowy (7.11)	-4,38	21,37	-11,13	27,47	0,657	6,3	<0,05
Z.2	Empiryczne – kładka, skorygowane	Kwadratowy (7.10)	-15,66	72,95	-	-	0,842	0,3	<0,05
		Wielomianowy (7.11)	0,0004	-0,09	5,37	-5,28	0,959	30,5	>0,05
Z.3	Model symulacyjny	Kwadratowy (7.10)	-14,00	69,19	-	-	0,998	9,4	<0,05
		Wielomianowy (7.11)	1,73	-6,60	6,03	-0,16	0,985	27,0	>0,05
Z.4	Model symulacyjny + empiryczne – kładka, skorygowane	Kwadratowy (7.10)	-16,81	77,30	-	-	0,931	2,0	<0,05
		Wielomianowy (7.11)	0,0003	-0,09	5,19	-2,73	0,975	36,5	<0,05



Rys.7.4 Wykres zależności natężenia ruchu pieszych QP od gęstości potoku DP dla ruchu jednokierunkowego

7.2.4.3. Modele zależności między prędkością potoku i natężeniem ruchu pieszych

Zależność pomiędzy prędkością potoku pieszych VP i natężeniem potoku pieszych QP dla czterech analizowanych zbiorów danych opisano dwoma modelami: w postaci funkcji kwadratowej (7.12) i wielomianu trzeciego stopnia (7.13):

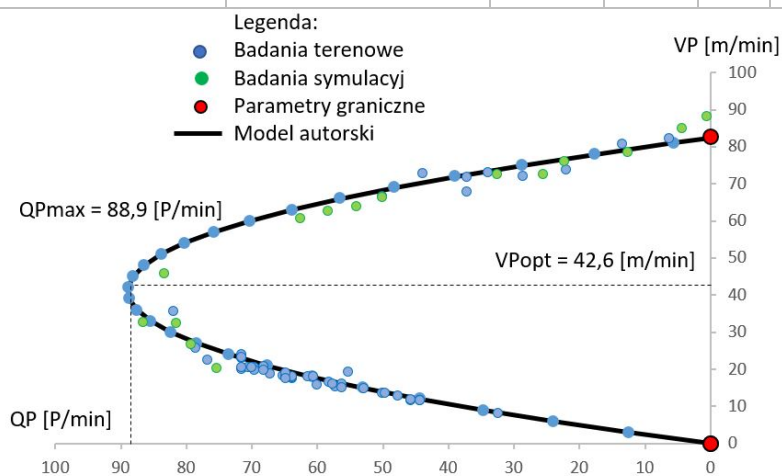
$$QP = a \cdot VP^2 + b \cdot VP \quad (7.12)$$

$$QP = a \cdot VP^3 + b \cdot VP^2 + c \cdot VP + d \quad (7.13)$$

Korzystając z pakietu obliczeniowego Statistica określono parametry poszczególnych modeli oraz miary ich dopasowania do danych empirycznych lub z symulacji, które zestawiono w tab.7. Miary dopasowania wskazują, że parametry ruchu pieszych uzyskane z badań empirycznych (dane skorygowane) oraz parametry ruchu pieszych uzyskane z modelu symulacyjnego dobrze opisują oba modele dla zbiorów Z.2 – Z.4. Założone warunki brzegowe i wymagania dopasowania funkcji do danych najlepiej spełniają modele dla danych ze zbioru Z.4, dlatego do dalszych analiz przyjęto model opisany funkcją kwadratową na połączonym zbiorze danych Z.4 (tj. połączonych danych z badań ruchu pieszego na kładce i symulacji ruchu na przejściu dla pieszych). Wykres zależności natężenia ruchu pieszych QP od prędkości potoku VP przedstawiono na rys.7.5. Uzyskany model potwierdza, że wraz ze spadkiem prędkości pieszych VP wzrasta natężenie ruchu, aż do osiągnięcia wartości maksymalnej QP_{max} . W przypadku ruchu jednokierunkowego $QP_{max} = 88,9$ [P/min./m]. Przy dalszym spadku prędkości natężenie ruchu zmniejsza się aż do wartości zerowej przy prędkości minimalnej wynoszącej $VP_{min} = 0$ [m/min].

Tab.7.3 Zestawienie parametrów i miar dopasowania modeli zależności $QP = f(VP)$

Zbiór danych		Model	Parametry modelu				Miary dopasowania modelu		
			a	b	c	d	R^2_{sk}	MAPE (%)	p
Z.1	Empiryczne - kładka	Kwadratowy (7.12)	-0,04	3,63	-	-	0,158	18,9	<0,05
		Wielomianowy (7.13)	0,0002	-0,047	2,32	27,60	0,378	4,3	>0,05
Z.2	Empiryczne – kładka, skorygowane	Kwadratowy (7.12)	-0,05	4,45	-	-	0,929	3,5	<0,05
		Wielomianowy (7.13)	0,739	-19,50	76,72	1,72	0,746	68,2	>0,05
Z.3	Model symulacyjny	Kwadratowy (7.12)	-0,47	3,95	-	-	0,911	6,9	<0,05
		Wielomianowy (7.13)	0,0047	-0,25	1,15	0,01	0,998	30,7	>0,05
Z.4	Model symulacyjny + empiryczne – kładka, skorygowane	Kwadratowy (7.12)	-0,052	4,32	-	-	0,927	0,03	<0,05
		Wielomianowy (7.13)	-0,361	-13,30	68,60	1,93	0,936	0,64	>0,05



Rys.7.5 Wykres zależności natężenia ruchu pieszych QP od prędkości potoku pieszych VP dla ruchu jednokierunkowe

7.2.4.4. Modele zależności między gęstością i prędkością potoku pieszych

Zależność pomiędzy gęstością DP i prędkością potoku pieszych VP dla czterech analizowanych zbiorów danych opisano trzema modelami: w postaci funkcji liniowej (7.14) i funkcji wykładniczej (7.15):

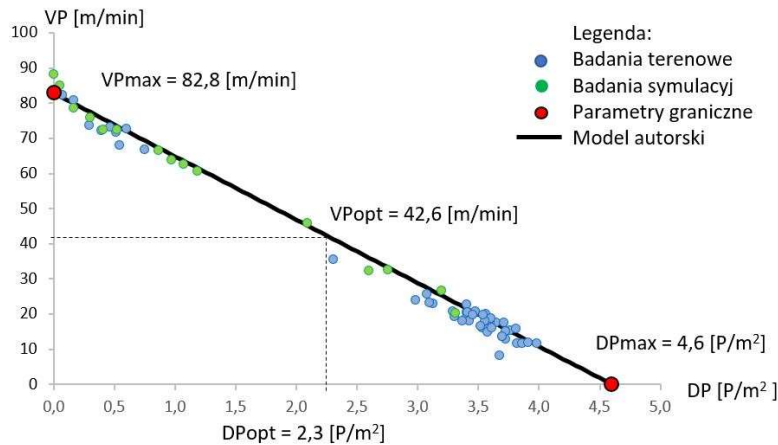
$$VP = a \cdot DP + b \quad (7.14)$$

$$VP = a \cdot \exp(b \cdot DP + c) \quad (7.15)$$

Korzystając z pakietu obliczeniowego Statistica określono parametry poszczególnych modeli oraz miary ich dopasowania do danych empirycznych lub z symulacji, które zestawiono w tab.7. Miary dopasowania wskazują, że parametry ruchu pieszych uzyskane z badań empirycznych (dane skorygowane) oraz parametry ruchu pieszych uzyskane z modelu symulacyjnego dobrze opisują oba modele dla zbiorów Z.1 i Z.3 oddzielnie. Jednak założone warunki brzegowe i wymagania dopasowania funkcji do danych najlepiej spełniają modele dla danych ze zbioru Z.4, dlatego do dalszych analiz przyjęto model opisany funkcją liniową na połączonym zbiorze danych Z.4 (tj. połączonych danych z badań ruchu pieszego na kładce i symulacji ruchu na przejściu dla pieszych). Wykres zależności prędkości potoku pieszych VP od gęstości potoku przedstawiono na rys.7.6. Uzyskany model potwierdza, że wraz ze wzrostem gęstości potoku pieszych DP zmniejsza się prędkość pieszych VP, od wartości średniej w ruchu swobodnym aż do osiągnięcia wartości minimalnej $VP_{min} = 0$ [m/min]. przy wartości maksymalnej gęstości DP_{max} . W przypadku ruchu jednokierunkowego oszacowane $DP_{max} = 4,6$ [P/m²]. Przy natężeniu maksymalnym QP_{max} występuje gęstość optymalna DP_{opt} i prędkość optymalna $VP_{opt} = 42,6$ [m/min].

Tab.7.4 Zestawienie parametrów i miar dopasowania modeli zależności $VP = f(DP)$

Zbiór danych	Model	Parametry modelu			Miary dopasowania modelu		
		a	b	c	R ² _{sk}	MAPE (%)	p
Z.1	Liniowy (7.14)	-18,62	83,06	---	0,990	0,2	<0,05
	Wykładniczy (7.15)	0,35	-0,36	1,42	0,981	37,7	>0,05
Z.2	Liniowy (7.14)	-12,58	60,07	---	0,664	12,4	<0,05
	Wykładniczy (7.15)	1,68	-0,46	3,80	0,756	14,3	>0,05
Z.3	Liniowy (7.14)	-17,83	80,58	---	0,990	1,0	<0,05
	Wykładniczy (7.15)	1,20	-0,45	4,30	0,986	4,2	<0,05
Z.4	Liniowy (7.14)	-17,96	82,8	---	0,844	9,3	<0,05
	Wykładniczy (7.15)	1,69	-0,40	3,87	0,823	11,2	<0,05



Rys.7.6 Wykres zależności prędkości potoku pieszych VP od gęstości potoku DP dla ruchu jednokierunkowego

7.2.5. Konstrukcja trójosiowego modelu zależności fundamentalnej potoku ruchu pieszych

Wykorzystując wyniki przeprowadzonych analiz autorka zaproponowała trójosiowy model zależności fundamentalnej potoku ruchu pieszych na kładce lub przejściu dla pieszych przy ruchu jednokierunkowym. Opracowano dwa modele autorskie, których wykresy przedstawiono na rys.7.7. Natomiast w Tab.75. zestawiono podstawowe parametry obu modeli fundamentalnej zależności QP-VP-DP dla ruchu jednokierunkowego potoku pieszych.

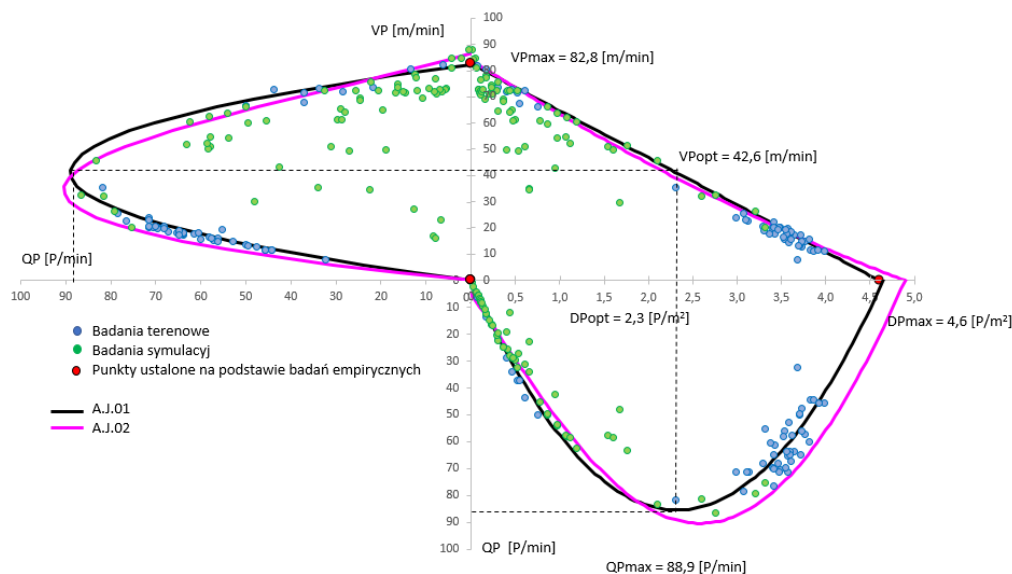
Model A.J.01. Model autorski – pierwszy, dla jednokierunkowego ruchu potoku pieszych. Wzorując się na modelu Fruina [20],[121] oraz wykorzystując modele opracowane dla danych ze zbioru Z.4, do konstrukcji trójosiowej zależności fundamentalnej przyjęto: modele kwadratowe dla zależności natężenia od prędkości (7.12) i zależności natężenia od gęstości (wzór 7.10) oraz model liniowy dla zależności prędkości od gęstości potoku pieszych (wzór 7.14). Na rys.7.7 przedstawiono uzyskany trójosiowy wykres zależności natężenie -prędkość - gęstość ruchu pieszych dla danych ze zbioru Z.4. Opracowany model spełnia przyjęte warunki brzegowe i przyjęte warunki graniczne.

Model A.J.02. Model autorski – drugi, dla jednokierunkowego ruchu potoku pieszych. Wykorzystując modele opracowane dla danych ze zbioru Z.4, do konstrukcji trójosiowego modelu zależności fundamentalnej przyjęto: przyjęto modele wielomianowe dla zależności natężenia od prędkości (7.13) i zależności natężenia od gęstości (wzór 7.11) oraz model liniowy dla zależności prędkości od gęstości potoku pieszych (wzór 7.15). rys.7.7 przedstawiono uzyskany trójosiowy wykres zależności natężenie, prędkość i gęstość ruchu pieszych dla danych ze zbioru Z.4. Natomiast w Tab.75 zestawiono podstawowe parametry fundamentalnej zależności QP-VP-DP dla ruchu jednokierunkowego potoku pieszych. Opracowany model spełnia przyjęte warunki brzegowe i przyjęte warunki graniczne.

Tab.7.5 Zestawienie parametrów fundamentalnej zależności QP-VP-DP dla ruchu jednokierunkowego potoku pieszych

Model	Wartości graniczne zależności fundamentalnej								MAPE %	Spełnienie warunków brzegowych		
	VP _{sw}		VP _{opt}		QP _{max}		DP _{max}	DP _{opt}		W1	W2	W3
	m/s	m/min	m/s	m/min	P/ m/s	P/m/min	P/m ²	P/m ²				
A.J.01	1,38	82,8	0,71	42,6	1,47	88,9	4,60	2,3	9,3	Tak	Tak	Tak
A.J.02	1,40	84,2	0,58	34,8	1,51	90,4	4,85	2,42	11,2	Tak	Tak	Tak

Należy wziąć pod uwagę, że analizowane modele były testowane na danych z praktycznie z jednego poligonu badawczego (kładka dla pieszych) poszerzonych o dane z symulacji ruchu na modelowym przejściu dla pieszych. Takie podejście wynikało z dostępności danych oraz przyjętych założeń do modelowania zależności QP-VP-DP. Istnieje zatem ryzyko, że opracowane modele testowane w innych zbiorach danych z dobrą reprezentacją serii danych dla stanu ruchu wymuszonego, mogłyby dać inne wyniki oceny. W przypadku dostępności danych z innych poligonów, wyniki oceny modeli należałoby dodatkowo zweryfikować.



Rys.7.7 Trójosiowy wykres fundamentalnej zależności QP-VP-DP potoku pieszych dla ruchu jednokierunkowego

7.2.6. Porównanie modeli (dyskusja wyników i rekomendacje)

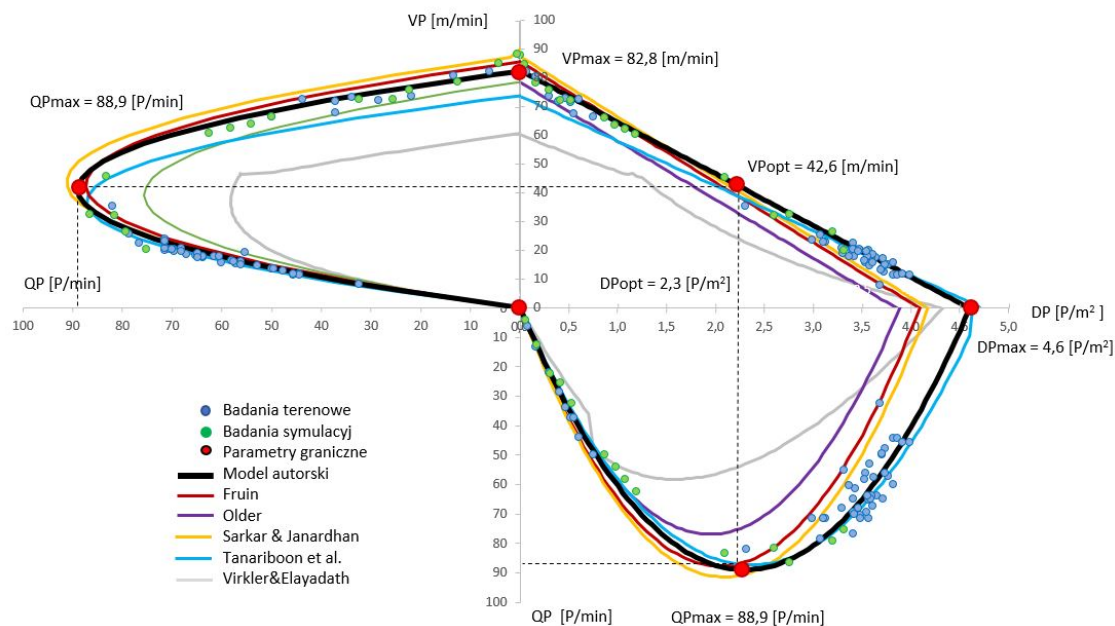
Analizę objęto oba modele autorskie oraz wybrane modele zestawione w tablicy w rozdziale 2, w tab.2. Prezentowane modele bazują na 2 parametrach i opracowane były dla różnych obszarów miejskich w kilku krajach [121],[163],[200],[217],[227]. W tab.7 zestawiono wartości liczbowe wybranych parametrów granicznych modeli opisujących fundamentalną zależność pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu pieszych przemieszczających się w jednym kierunku. Natomiast na rys.7.8 przedstawiono porównanie wykresów fundamentalnej zależności QP-VP-DP potoku pieszych dla ruchu jednokierunkowego dla modeli: autorskiego i kilku wybranych badaczy na tle danych ze zbioru Z.4

Tab.7.6 Zestawienie zbiorcze podstawowych parametrów granicznych modeli opisujących fundamentalną zależność pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu pieszych przemieszczających się w jednym kierunku

Modele zależności fundamentalnej	Wartość parametrów granicznych								MAPE %	Spełniony warunek brzegowy		
	Qp _{max}		Vp _{sw}		Vp _{opt}		Dp _{max}	Dp _{opt}		W1	W2	W3
	P/m/s	P/m/min	m/s	m/min	m/s	m/min	P/m ²	P/m ²				
A.J.01	1,38	82,8	1,47	88,9	0,71	42,6	4,60	2,3	9,3	Tak	Tak	Tak
A.J.02	1,51	90,4	1,4	84,2	0,58	34,8	4,85	2,42	11,2			
B.J.01 (Fruin)	1,46	87,6	1,43	85,8	0,71	42,6	4,08	2,04	13,7	Tak	Tak	Tak
B.J.02 (Older)	1,28	76,8	1,31	78,6	0,65	39,0	3,85	1,94	34,0	Tak	Tak	Tak
B.J.03 (Sarkar & Janardhan)	1,52	91,2	1,46	87,6	0,73	43,8	4,17	2,09	32,8	Tak	Tak	Tak
B.J.04 (Tanariboona)	1,45	87,0	1,23	73,8	0,61	36,6	4,73	2,30	10,6	Tak	Tak	Tak
B.J.05 (Virkler & Elayadath)	0,97	58,2	1,01	60,6	0,37	22,2	4,32	1,60	44,1	Nie	Nie	Tak

Analizując wyniki porównań zestawione w tab.7 stwierdzono, że:

- tylko model B.J.05 nie spełnia przyjętych warunków brzegowych,
- z pozostałych modeli najlepiej dopasowanymi do danych z badań terenowych i symulacji (mierzone wartością liczbową błędu MAPE) jest model autorski A.J.01, a także dobrze dopasowane są także modele: B.J.04 (Tanariboona), A.J.02 (II autorski) oraz B.J.01 (Fruina),
- biorąc pod uwagę parametry graniczne to parametry charakterystyczne poszczególnych modeli odbiegają od przyjętych parametrów granicznych, reprezentowanych przez model autorski A.J.01 0,0 – 48,0 %.



Rys.7.8 Wykresy fundamentalnej zależności QP-VP-DP potoku pieszych dla ruchu jednokierunkowego dla modeli: autorskiego i kilku wybranych badaczy na tle danych ze zbioru Z.4

Model autorski A.J.01 – jest modelem dwuparametrowym, opracowanym na bazie podobnych modeli zastosowanych przez Fruina, Sarkara, Tanariboona i Oldera. Kształt zależności QP-VP-DP na trzyosiowym wykresie jest podobny do kształtu modeli uzyskanych przez wymienionych autorów. Natomiast odbiega od kształtu uzyskanego przez Vinklera. Model wykazuje się bardzo dobrym dopasowaniem do danych empirycznych (MAPE – 9,3 %). Analizując wartości podstawowych parametrów granicznych to można stwierdzić, że w przypadku:

- QPmax – różni się nieznacznie (+- 2,5 %) w porównaniu do modeli Fruina, Sarkara, Tanariboona,
- VPsw – różni się nieznacznie (+- 5,0 %) w porównaniu do modeli Fruina, Sarkara, Oldera,
- DPmax - różni się nieznacznie (+- 3,0 %) w porównaniu do modeli Tanariboona,
- VPOpt - różni się nieznacznie (+- 3,0 %) w porównaniu do modeli Fruina, Sarkara,
- DPopt - różni się nieznacznie (+- 0,0 %) w porównaniu do modelu Tanariboona.

Model autorski A.J.02 – jest modelem trójparametrowym wykładniczym, opracowanym na bazie podobnych modeli zastosowanych przez Virkler & Elayadath. Kształt wizualny zależności QP-VP-DP na trzyosiowym wykresie jest podobny do kształtu modeli uzyskanych przez Fruina, Sarkara, Tanariboona i Oldera.. Natomiast odbiega od kształtu uzyskanego przez Virkler & Elayadath. Model wykazuje się dobrym dopasowaniem do danych empirycznych (MAPE – 11,2 %) jednak nieznacznie gorszym niż A.J.02.

- QPmax – różni się nieznacznie (+- 4,0 %) w porównaniu do modeli Fruina, Sarkara, Tanariboona,
- VPsw – różni się nieznacznie (+- 7,0 %) w porównaniu do modeli Fruina, Sarkara, Oldera,
- DPmax - różni się nieznacznie (+- 3,0 %) w porównaniu do modeli Tanariboona,
- VPOpt - różni się nieznacznie (+- 21,0 %) w porównaniu do modeli Fruina, Sarkara,
- DPopt - różni się nieznacznie (+- 5,0 %) w porównaniu do modelu Tanariboona.

Model Fruina B.J.01 - Dwuparametrowy model Fruina [121] opracowany na bazie danych o ruchu pieszych w obszarze terminalu autobusowego, oparty na modelu Greenshields'a [121],[76]opracowanym dla ruchu potoku pojazdów, jest najprostszym modelem liniowym zależności QP-VP-DP. Zależność VP(DP) w modelu jest reprezentowana za pomocą funkcji liniowej, a zależności VP(QP) i QP(DP) reprezentowane są pomocą funkcji kwadratowej. Model posiada dwa parametry, dzięki czemu charakteryzuje się prostym zapisem matematycznym, jest prosty w adaptacji i interpretacji. Model spełnia oba warunki brzegowe zależności fundamentalnej. Biorąc pod uwagę pozostałe kryteria oceny modelu, wykazuje się on dobrym dopasowaniem do danych empirycznych (MAPE – 13,7 %).

Jego parametry graniczne zawierają się w oczekiwanym zakresie wartości, aczkolwiek odbiegają od parametrów granicznych uzyskanych dla modelu autorskiego A.J.01 w przedziale od 0,0 – 11,3 %. Najlepsze odwzorowanie uzyskano dla VP_{opt} , a najgorsze dla DP_{max} .

Model Oldera B.J.02 - Dwuparametrowy model Oldera [163],[40], opracowany na bazie danych z ulicy handlowej, podobnie jak model Fruina, oparty na modelu Greenshields'a [76], opracowanym dla ruchu potoku pojazdów, jest najprostszym modelem liniowym zależności QP-VP-DP. Zależność VP(DP) w modelu jest reprezentowana za pomocą funkcji liniowej, a zależności VP(QP) i QP(DP) reprezentowane są pomocą funkcji kwadratowej. Model posiada też dwa parametry, dzięki czemu charakteryzuje się prostym zapisem matematycznym, jest prosty w adaptacji i interpretacji. Model spełnia oba warunki brzegowe zależności fundamentalnej. Biorąc pod uwagę pozostałe kryteria oceny modelu, wykazuje się on małym dopasowaniem do danych empirycznych (MAPE – 34,0 %). Jego parametry graniczne zawierają się w oczekiwanym zakresie wartości, aczkolwiek odbiegają od parametrów granicznych uzyskanych dla modelu autorskiego A.J.01 w przedziale od 5,1 – 16,3 %. Najlepsze odwzorowanie uzyskano dla VP_{sw} , a najgorsze dla DP_{max} .

Model Sarkar & Janadhan B.J.03 - Dwuparametrowy model Sarkara opracowany na podstawie danych z obszaru metropolitalnego Kalkuty [200],[40], podobnie jak model Fruina, oparty na modelu Greenshields'a [76], opracowanym dla ruchu potoku pojazdów, jest najprostszym modelem liniowym zależności QP-VP-DP. Zależność VP(DP) w modelu jest reprezentowana za pomocą funkcji liniowej, a zależności VP(QP) i QP(DP) reprezentowane są pomocą funkcji kwadratowej. Model posiada też dwa parametry, dzięki czemu charakteryzuje się prostym zapisem matematycznym, jest prosty w adaptacji i interpretacji. Model spełnia oba warunki brzegowe zależności fundamentalnej. Biorąc pod uwagę pozostałe kryteria oceny modelu, wykazuje się on małym dopasowaniem do danych empirycznych (MAPE – 32,8 %). Jego parametry graniczne zawierają się w oczekiwanym zakresie wartości, aczkolwiek odbiegają od parametrów granicznych uzyskanych dla modelu autorskiego A.J.01 w przedziale od 2,6 – 9,3 %. Najlepsze odwzorowanie uzyskano dla VP_{opt} , a najgorsze dla DP_{max} .

Model Tarnariboona B.J.04 - Dwuparametrowy model Tarnariboona opracowany na podstawie danych z obszaru Singapuru [217],[40], podobnie jak model Fruina, oparty na modelu Greenshields'a [76], opracowanym dla ruchu potoku pojazdów, jest najprostszym modelem liniowym zależności QP-VP-DP. Zależność VP(DP) w modelu jest reprezentowana za pomocą funkcji liniowej, a zależności VP(QP) i QP(DP) reprezentowane są pomocą funkcji kwadratowej. Model posiada też dwa parametry, dzięki czemu charakteryzuje się prostym zapisem matematycznym, jest prosty w adaptacji i interpretacji. Model spełnia oba warunki brzegowe zależności fundamentalnej. Biorąc pod uwagę pozostałe kryteria oceny modelu, wykazuje się on dobrym dopasowaniem do danych empirycznych (MAPE – 10,6 %). Jego parametry graniczne zawierają się w oczekiwanym zakresie wartości, aczkolwiek odbiegają od parametrów granicznych uzyskanych dla modelu autorskiego A.J.01 w przedziale od 0,0 – 14,1 %. Najlepsze odwzorowanie uzyskano dla DP_{opt} , a najgorsze dla VP_{opt} .

Model Vinkler & Elayadath B.J.05 – Dwufazowy, wieloparametrowy model Vinklera, opracowany dla danych z tunelu dla pieszych łączącego obszarem boisk piłki nożnej z Uniwersytetem Missouri w USA [227],[40], jest modelem liniowym zależności QP-VP-DP. Zależność VP(DP) w modelu jest reprezentowana za pomocą funkcji liniowej, a zależności VP(QP) i QP(DP) reprezentowane są pomocą funkcji kwadratowej. Model posiada też dwa parametry, dzięki czemu charakteryzuje się prostym zapisem matematycznym, jest prosty w adaptacji i interpretacji. Model spełnia tylko trzeci warunek brzegowy zależności fundamentalnej. Biorąc pod uwagę pozostałe kryteria oceny modelu, wykazuje się on bardzo małym dopasowaniem do danych empirycznych (MAPE – 44,1%). Jego parametry graniczne zawierają się w oczekiwanym zakresie wartości, aczkolwiek odbiegają od parametrów granicznych uzyskanych dla modelu autorskiego A.J.01 w przedziale od 6,1 – 47,9 %. Najlepsze odwzorowanie uzyskano dla DP_{max} , a najgorsze dla VP_{opt} .

Podsumowując można stwierdzić, że opracowany **model autorski A.J.01** fundamentalnej zależności pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu pieszych przemieszczających się w jednym kierunku :

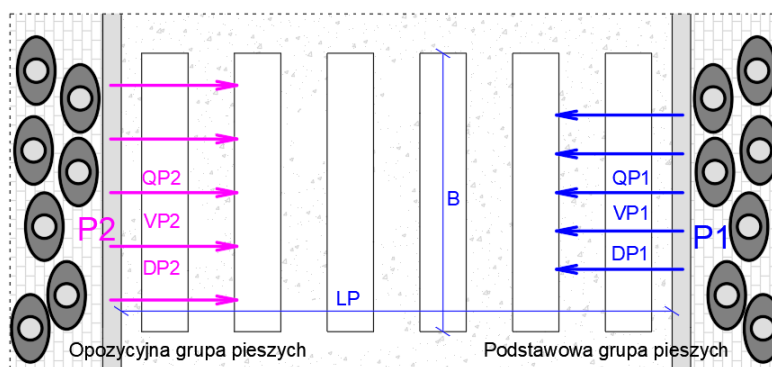
1. dobrze opisuje rozkłady danych uzyskanych z badań terenowych i symulacji w warunkach polskich,
2. podstawowe parametry graniczne modelu niewiele odbiegają od klasycznych modeli opracowanych przez Fruina, Sarkara, Tanariboona i Oldera.

- może być rekomendowany do stosowania przy szacowaniu parametrów ruchu pieszego w miastach w Polsce.

7.3. Modelowanie zależności fundamentalnej QP-VP-DP w potoku pieszych przemieszczających się w dwóch kierunkach

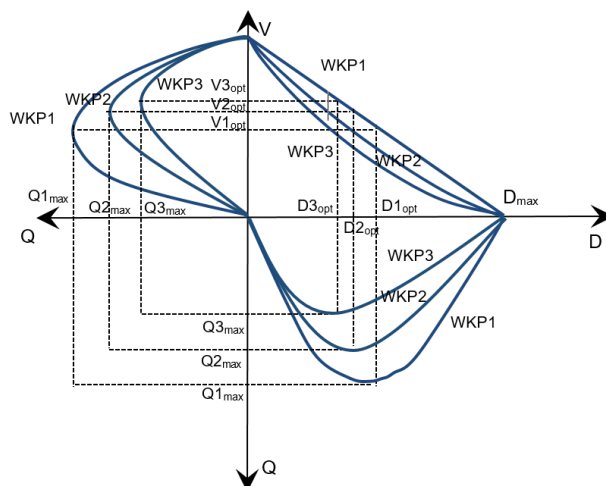
7.3.1. Charakterystyka problemu i cel analiz

W poprzednim rozdziale (7.2) przedstawiono zależności pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu potoku pieszych przemieszczających się w jednym kierunku. Warunki takie traktuje się, jako wzorcowe, natomiast w praktyce na przejściach dla pieszych występuje ruch dwukierunkowy. W tym przypadku, w przeciwieństwie do ruchu pojazdów, piesi nie przemieszczają się po wydzielonych pasach, lecz bardzo często ruszają grupami ustawionym naprzeciwko siebie, po dwóch stronach jezdni. Grupy te można określić, jako podstawową grupę pieszych przemieszczających się po przejściu (grupa P1) oraz opozycyjną grupę pieszych przemieszczających się w kierunku przeciwnym (grupa P2). Grupa opozycyjna P2 stwarza pewnego rodzaju utrudnienia (opór) podstawowej grupie P1 (rys.7.9). W czasie przemieszczania piesi idący naprzeciwko siebie wchodzi w pewnego rodzaju interakcję między sobą powodującą, że zwiększenie odstępu do drugiego pieszego, wynikającego z potrzeby zachowania pewnego komfortu oraz zachowaniu odległości widoczności manewrów i przeszkód na jezdni, który wynosi ok. 0,5 – 0,9 m. Opór (trudnienia), przemieszczania, jaki stawia opozycyjna grupa pieszych P2 porównywany jest do oporu powietrza w czasie ruchu pojazdu, lub oporu cieczy w czasie ruchu statku [3],[43]. Ten opór grupy P2 wpływający na warunki przemieszczania się grupy podstawowej P1 wpływa na zmianę warunków przemieszczania się potoku pieszych.



Rys.7.9 Schemat modelowego przejścia dla pieszych z potokami pieszych P1 i P2 przemieszczającymi się w dwóch przeciwnych kierunkach

Dlatego celem prowadzonej analizy jest próba określenia wpływu struktury kierunkowej potoku pieszych na zmianę podstawowych parametrów ruchu potoku pieszych oraz trójosiowy model zależności fundamentalnej potoku pieszych przemieszczających się w dwóch kierunkach. Poszukiwania takie były prowadzone przez kilku badaczy na świecie [1], natomiast w Polsce takich badań dotychczas jeszcze nie prowadzono. Na rysunku rys.7.10 zaprezentowano prawdopodobny przebieg wykresu fundamentalnego potoku pieszych z uwzględnieniem różnych wartości współczynnika podziału kierunkowego WPK, opracowany na podstawie [1].



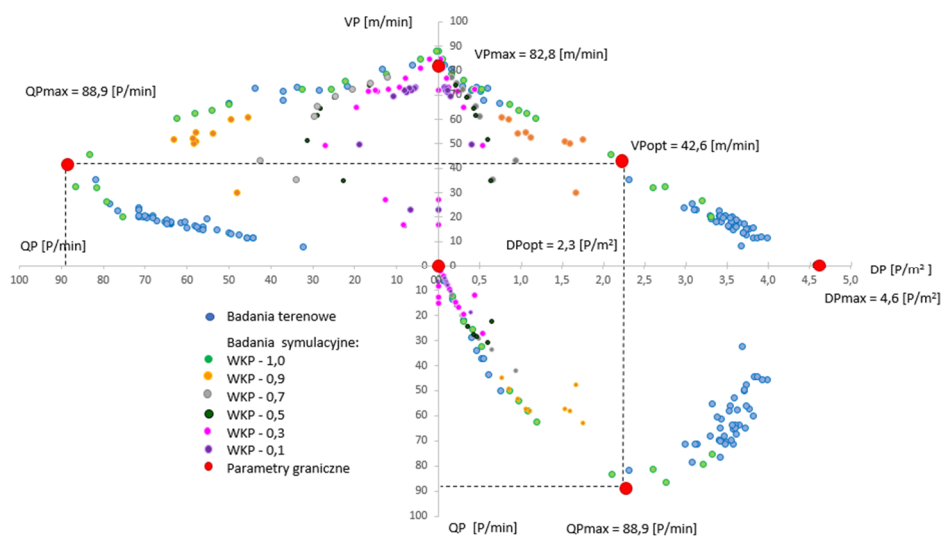
Rys.7.10 Wykres fundamentalny ruchu potoku pieszych z uwzględnieniem współczynnika podziału kierunkowego (WPK)

7.3.2. Dobór danych do modelowania

Do analiz przyjęto zbiory danych uzyskanych z mikroskopowego modelu symulacyjnego dla modelowego przejścia dla pieszych z uwzględnieniem wpływu podziału kierunkowego WPK (zbiór danych Z.5, Z.6, Z.7, Z.8 i Z.9). Zbiór danych Z.5, Z.6, Z.7, Z.8 i Z.9, zawiera 135 serii danych zebranych dla przejścia dla pieszych o szerokości 4,0 m, długości 7,0 m i dwukierunkowym ruchu pieszych. Wykres danych przedstawionych na rys.7.11 Wykres ten pokazuje rozkład uzyskanych danych układających się wewnątrz obszaru opisanego trójosiowym modelem fundamentalnej zależności A.J.01 opracowanym dla ruchu jednokierunkowego.

Do analiz przyjęto zbiory danych Z4 dla ruchu kierunkowego oraz:

1. Dane połączone z modelu symulacyjnego, zbiór Z.5 (27 serii danych) dla $WPK_1=0,90$.
2. Dane połączone z modelu symulacyjnego, zbiór Z.6 (24 serii danych) dla $WPK_1=0,70$.
3. Dane połączone z modelu symulacyjnego, zbiór Z.7 (21 serii danych) $WPK_1=0,50$.
4. Dane połączone z modelu symulacyjnego, zbiór Z.8 (36 serii danych) $WPK_1=0,30$.
5. Dane połączone z modelu symulacyjnego, zbiór Z.9 (27 serii danych) $WPK_1=0,10$.
6. Dane połączone z modelu symulacyjnego, zbiór Z.5 + Z.9 (54 serii danych)
7. Dane połączone z modelu symulacyjnego, zbiór Z.6 + Z.8 (60 serii danych)
8. Dane połączone z modelu symulacyjnego, zbiór Z7, wraz z ruchem przeciwnym (42 serii danych)



Rys.7.11 Trójosiowy rozkład danych z symulacji ruchu pieszego na modelowym przejściu dla pieszych dwukierunkowym ruchem pieszych na tle wykresu modelowej zależności fundamentalnej QP-VP-DP potoku pieszych dla ruchu dwukierunkowego

7.3.3. Określenie wielkości parametrów charakterystycznych w modelu zależności fundamentalnej

Prędkość pieszych w ruchu swobodnym VP_{max} przyjęto podobnie jak dla ruchu jednokierunkowego, jako średnią prędkość z rozkładu prędkości pieszych uzyskaną na podstawie badań prowadzonych na przejściach dla pieszych opisanych w rozdz. 5.5. Do dalszych analiz przyjęto $VP_{ws} = 1,38$ [m/s], tj. 82,8 m/min.

Gęstość maksymalna DP_{max} przyjęto podobnie jak dla ruchu jednokierunkowego, na podstawie analiz teoretycznych $DP_{max,t} = 4,6$ [P/m²].

Natężenie minimalne QP_{min} i prędkość minimalna VP_{min} przyjęto podobnie jak w przypadku ruchu jednokierunkowego $QP_{min} = 0$ oraz $VP_{min} = 0$.

Natężenie maksymalne QP_{max} w zależności fundamentalnej występuje, jako ekstremum funkcji dla maksymalnego natężenia ruchu pieszych, które występuje w zakresie gęstości ruchu potoku pieszych $0 < DP < DP_{max}$ oraz prędkości potoku pieszych $0 < VP < VP_{sw}$. W przygotowywanych modelach ruchu potoku pieszych przyjęto, że natężenie QP_{max} odpowiada występowaniu gęstości optymalnej potoku DP_{opt} oraz prędkości optymalnej potoku pieszych VP_{opt} i istotnie zależy od struktury kierunkowej potoku pieszych opisanej współczynnikiem WPK. Natężenie maksymalne QP_{max} wyznaczano korzystając z opracowanych dla różnego udziału struktury kierunkowej potoku modeli zależności pomiędzy parametrami ruchu potoku pieszych (korzystając ze wzoru 7.26, 7.27).

Prędkość optymalna VP_{opt} i gęstość optymalna DP_{opt} są to wartości występujące, gdy natężenie ruchu pieszych osiąga wartość maksymalną DP_{max} . Zarówno prędkość jak i gęstość optymalną wyznaczano na podstawie analizy modeli zależności fundamentalnej QP-VP-DP dopasowanych do danych z symulacji ruchu pieszego wyznaczając średnią prędkość i gęstość ruchu potoku pojazdów przy natężeniu odpowiadającym QP_{max} .

Natężenie maksymalne QP_{max} , prędkość optymalna VP_{opt} i gęstość optymalna DP_{opt} będą ustalone na podstawie analiz i opracowanych modeli zależności fundamentalnej w kolejnym rozdziale (7.3).

7.3.4. Dobór modeli zależności pomiędzy parametrami podstawowymi

7.3.4.1. Obszar i zakres modelowania

Na chodnikach i przejściach dla pieszych najczęściej występuje ruch dwukierunkowy. Schemat modelowego przejścia dla pieszych z ruchem jednokierunkowym przedstawiono na rys.7.3. W tym przypadku piesi przemieszczają się w dość chaotyczny sposób grupami naprzeciwko siebie. Grupy te można określić, jako grupę podstawową przemieszczającą się po przejściu (grupa P1) oraz grupę opozycyjną przemieszczającą się w kierunku przeciwnym (grupa P2) stwarzającą pewnego rodzaju opór grupie P1. Ten opór grupy P2 wpływający na warunki przemieszczanie się grupy podstawowej P1 wpływa na zmianę warunków przemieszczania się potoku pieszych (tab.7).

Z przeglądu literatury wynika, że podstawowym czynnikiem wpływającym na zmianę warunków ruchu potoku pieszych na przejściu dla pieszych ma struktura kierunkowa określana według wzorów (7.18 i 7.19).

$$WPK_1 = \frac{QP_1}{QP} = \frac{QP_1}{QP_1 + QP_2} \quad (7.16)$$

$$WPK_2 = \frac{QP_2}{QP} = \frac{QP_2}{QP_1 + QP_2} = 1,0 - WSK_1 \quad (7.17)$$

$$WPK = WPK_1 \quad \text{dla} \quad WPK_1 \geq 0,5 \quad (7.18)$$

$$WPK = 1 - WPK_1 \quad \text{dla} \quad WPK_1 < 0,5 \quad (7.19)$$

gdzie:

WPK_1 – wskaźnik struktury kierunkowej podstawowej grupy pieszych (-), zmienia się w zakresie od 0,0 do 1,0;

WPK_2 – wskaźnik struktury kierunkowej opozycyjnej grupy pieszych (-), zmienia się w zakresie od 0,0 do 1,0;

WPK – wskaźnik podziału kierunkowego potoków pieszych na modelowym przejściu dla pieszych (-),

QP_1 – natężenie ruchu podstawowej grupy pieszych (P/min),

QP_2 – natężenie ruchu opozycyjnej grupy pieszych (P/min),

QP - natężenie ruchu łączne na przejściu dla pieszych (P/min).

WPK₁=1,0 oznacza, że wszyscy piesi przemieszczają się w jednym kierunku wyznaczonym przez grupę P1;
 WPK₁=0,90 oznacza, że 90 % pieszych przemieszcza się w grupie P1 w tym samym kierunku, a 10 % pieszych przemieszcza się w grupie P2 w kierunku przeciwnym;
 WPK₁=0,70 oznacza, że 70 % pieszych przemieszcza się w grupie P1 w tym samym kierunku, a 30 % pieszych przemieszcza się w grupie P2 w kierunku przeciwnym;
 WPK₁=0,50 oznacza, że 50 % pieszych przemieszcza się w grupie P1 w tym samym kierunku, a 50 % pieszych przemieszcza się w grupie P2 w kierunku przeciwnym.
 WPK₁=0,30 oznacza, że 30 % pieszych przemieszcza się w grupie P1 w tym samym kierunku, a 70 % pieszych przemieszcza się w grupie P2 w kierunku przeciwnym;
 WPK₁=0,10 oznacza, że 10 % pieszych przemieszcza się w grupie P1 w tym samym kierunku, a 90 % pieszych przemieszcza się w grupie P2 w kierunku przeciwnym.

W celu opracowania modelu zależności fundamentalnej dla tego rodzaju przypadków urządzeń dla pieszych z jednym kierunkiem ruchu pieszych przeprowadzono analizy wykorzystując zbiór danych Z.5.. Dla każdego zbioru analizowano po dwie grupy modeli dla poszczególnych zależności parami pomiędzy trzema parametrami ruchu pieszego uwzględniając dwa przypadki:

- parametry ruchu potoku pieszych grupy podstawowej P1 przemieszczających się w jednym kierunku;
- parametry ruchu całkowitego potoku pieszych P przemieszczających się w dwóch kierunkach.

Modele zależności pomiędzy poszczególnymi parami parametrów podstawowych opracowano dla wybranych grup struktury kierunkowej potoku pieszych zestawionych w tab.7.

Tab.7.7 Zestawienie charakterystyk grup pieszych, różniących się podziałem kierunkowym, przyjętych do opracowania modeli zależności pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu pieszych

Struktura kierunkowa potoku pieszych		Podstawowa grupa pieszych P1		Całkowity potok pieszych P	
L.p.	Nazwa struktury	Podzbiory danych		Podzbiory danych	
		WPK _{śr}	WPK	WPK _{śr}	WPK
1.	Ruch jednokierunkowy, WPK=1,0	1,00	1,00	1,00	1,00
2.	Przeważający potok podstawowy WPK=0,9	0,90	0,90	0,90	0,90
3.	Znaczny potok podstawowy WPK=0,7	0,70	0,65; 0,75	0,70	0,65; 0,75
4.	Ruch zrównoważony WPK=0,5	0,50	0,50	0,50	0,50
5.	Mały potok podstawowy WPK=0,3	0,30	0,25; 0,35	0,30	0,25; 0,35
6.	Znikomy potok podstawowy WPK=0,1	0,10	0,10	0,10	0,10

Za pomocą modeli mikrosymulacyjnych przebadano wpływ współczynnika kierunkowego r na przepustowość przejścia dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej ulicy dwujezdniowej (przekrój 1x2). Parametr r , określa proporcję między pieszymi idącymi w tym samym kierunku, a relacją z naprzeciwka i ma zastosowanie w analizach na dwukierunkowych odcinkach przepływu pieszych. Przepustowość przejścia dla pieszych określono, jako maksymalną wartość natężenia pieszych, która może przekroczyć ustalony przekrój w jednostce czasu bez określania wymogów, co, do jakości warunków ruchu.

Wyniki analizy na przejściu dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej, zależności przepustowości przejścia dla pieszych w zależności od współczynnika podziału kierunkowego WPK, przedstawiono na Rys.7.12. Maksymalna redukcja przepustowości przy współczynniku kierunkowym WPK = 0,50 wynosi 29,3%. Uzyskany wynik jest większy aniżeli w badaniach Japońskich [1], gdzie wartość ta wynosiła 25,3%. Przyczyna może być związana z inną organizacją ruchu na przejściu dla pieszych, odstępami między pieszymi, które mogły być uwzględnione w modelu symulacyjnym.

7.3.5. Modelowanie zmian natężenia maksymalnego w zależności od podziału kierunkowego

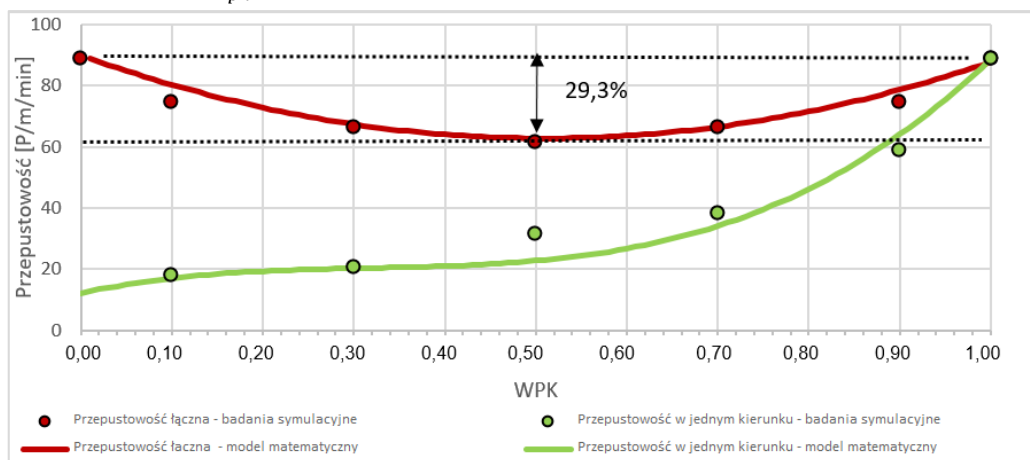
Zmiana natężenia maksymalnego w zależności od zmiany współczynnika kierunkowego WPK opisano dwoma modelami: w postaci funkcji kwadratowej (wzór 7.20) i wielomianu trzeciego stopnia (wzór 7.21):

- przepustowość łączna (dla dwóch kierunków):

$$C_{pc} = 104,3299 * WPK_1^2 - 1,0433 * WPK_1 + 88,9 \quad (7.20)$$

2. przepustowość w jednym kierunku (przy ruchu przeciwbieżnym) :

$$C_{pk} = 200 * WPK_1^3 - 189 * WPK_1^2 + 65,77 * WPK_1 + 12,15 \quad (7.21)$$



Rys.7.12 Przepustowości przejścia dla pieszych w zależności od współczynnika podziału kierunkowego WPK

Na podstawie przeprowadzonych analiz na przejściach dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej stwierdzono, zbieżne wnioski do tych uzyskanych na przejściach z sygnalizacją świetlną w Japonii [1], że jeżeli :

- podział kierunkowy pieszych ma wpływ na przepustowość przejścia dla pieszych
- dla przepustowości kierunkowej, im współczynnik WPK bliższy jest 100, tym bardziej dominującą grupą potoku pieszych jest Q1, Q1>Q2 (zgodnie z rys.7.12).
- dla przepustowości kierunkowej, wartość WPK jest bliższa zeru tym bardziej dominująca jest grupa potoku pieszych Q2, Q1<Q2 (zgodnie z rys.7.12).
- dla przepustowości całkowitej, im współczynnik WPK bliższy wartości 0.5, tym przepustowość przejścia spada w wyniku większego oddziaływania między pieszym, Q1=Q2

Ponadto, można stwierdzić, że:

- podział kierunkowy pieszych ma wpływ na zależność natężenia od prędkości pieszych Qp(Vp)
- wraz ze wzrostem podziału kierunkowego, maleje maksymalna wartość natężenia Qp pieszych pomierzona w przekroju przejścia.
- różnica pomiędzy maksymalnym natężeniem pieszych przy podziale kierunkowym WPK=100, a WPK=50 wynosi 29,3% dla modelu matematycznego postaci kwadratowej (wzór 7.20, rys.7.12)

7.3.5.1. Modele zależności między prędkością, natężeniem i gęstością potoku ruchu pieszych

Zależność pomiędzy prędkością potoku pieszych VP i natężeniem potoku pieszych QP dla dwóch analizowanych podzbiorów danych opisano modelami: w postaci funkcji kwadratowej (7.22) i wielomianu trzeciego stopnia (7.23):

$$QP = a \cdot VP^2 + b \cdot VP \quad (7.22)$$

$$QP = a \cdot VP^3 + b \cdot VP^2 + c \cdot VP \quad (7.23)$$

Zależności pomiędzy gęstością DP i prędkością VP potoku pieszych opisano modelami: w postaci funkcji liniowej (7.24) wykładniczej (7.25):

$$VP = a \cdot DP + b \quad (7.24)$$

$$VP = a \cdot \left(1 - \exp^{b \cdot \left(\frac{1}{DP} - \frac{1}{c}\right)}\right) \quad (7.25)$$

Zależności pomiędzy gęstością DP i gęstością QP potoku pieszych dla trzeciej ćwiartki tab.7 i tab.7, została wyliczona z równania QP=VP*DP [103] ,czyli:

$$DP = \frac{QP}{VP} \quad (7.26)$$

Do określenia parametrów poszczególnych modeli oraz miar ich dopasowania do danych empirycznych lub z symulacji, które zestawiono w tab.7 i tab.7., zastosowano pakiet obliczeniowy Statistica. Modele uwzględniają zmianę natężenia maksymalnego w zależności od zmiany współczynnika kierunkowego WPK, które przedstawiono w poprzednim rozdziale 7.3.4. Miary dopasowania wskazują, że parametry ruchu pieszych uzyskane z modelu symulacyjnego dobrze opisują modele dla zbiorów Z.5 – Z.9. Założone warunki brzegowe zostały spełnione. Konstrukcja trójosiowego modelu kierunkowego, zależności fundamentalnej potoku ruchu pieszych z uwzględnieniem współczynnika kierunkowego WPK została przedstawiona na rys.7.13. W rys.7.8, przedstawiono estymowane modele wielomianowe trzeciego stopnia, oraz modele wielomianowe kwadratowe, zależności między natężeniem, prędkością i gęstością ruchu pieszych z uwzględnieniem współczynnika kierunkowego, dla jednego kierunku ruchu Q1. Zestawienie dla dwóch kierunków ruchu, przedstawiono w rys.7.10.

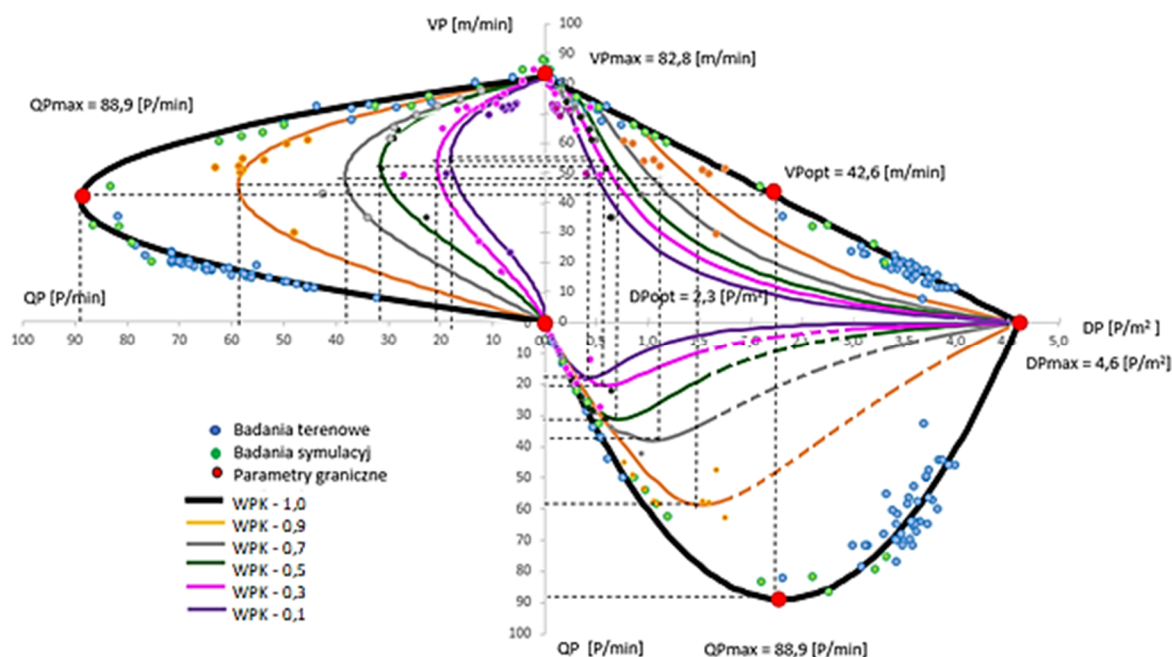
Tab.7.8 Modele zależności między prędkością, natężeniem i gęstością ruchu pieszych – jednokierunkowy z ruchem przeciwnym (JP)

Zbiór danych		Model	Parametry modelu			Miary dopasowania modelu	
			a	b	c	R ² _{sk}	p
Ruch jednokierunkowy (Model A.J.01.)	Z.4 (WPK=1.0)	Kwadratowy $QP1 = a \cdot VP^2 + b \cdot VP$	-0,052	4,32	-	<0,05	<0,05
Przeważający potok podstawowy (Model JP.01)	Z.5 (WPK=0.9)	Wielomianowy $QP1 = a \cdot VP^3 + b \cdot VP^2 + c \cdot VP$	-0,0002	-0,010	2,16	<0,05	<0,05
Znaczny potok podstawowy (Model JP.02)	Z.6 (WPK=0.7)	Wielomianowy $QP1 = a \cdot VP^3 + b \cdot VP^2 + c \cdot VP$	-0,00022	0,0053	1,0492	<0,05	<0,05
Ruch zrównoważony (Model JP.03)	Z.7 (WPK=0.5)	Wielomianowy $QP1 = a \cdot VP^3 + b \cdot VP^2 + c \cdot VP$	-0,000279	0,018	0,4248	<0,05	<0,05
Mały potok podstawowy (Model JP.04)	Z.8 (WPK=0.3)	Wielomianowy $QP1 = a \cdot VP^3 + b \cdot VP^2 + c \cdot VP$	-0,000184	0,01199	0,2703	<0,05	<0,05
Znikomy potok podstawowy (Model JP.05)	Z.9 (WPK=0.1)	Wielomianowy $QP1 = a \cdot VP^3 + b \cdot VP^2 + c \cdot VP$	-0,000224	0,0185	-0,0108	<0,05	<0,05
Ruch jednokierunkowy (Model A.J.01.)	Z.4 (WPK=1.0)	liniowy $VP1 = a \cdot DP^2 + b$	-17,957	82,8	-	<0,05	<0,05
Przeważający potok podstawowy (Model JP.01)	Z.5 (WPK=0.9)	Wykładnicza $VP1 = a \cdot (1 - \exp^{-b \cdot (\frac{1}{DP} - \frac{1}{c})})$	82,8	-1,80405	4,6	<0,05	<0,05
Znaczny potok podstawowy (Model JP.02)	Z.6 (WPK=0.7)	Wykładnicza $VP1 = a \cdot (1 - \exp^{-b \cdot (\frac{1}{DP} - \frac{1}{c})})$	82,8	-1,19049	4,6	<0,05	<0,05
Ruch zrównoważony (Model JP.03)	Z.7 (WPK=0.5)	Wykładnicza $VP1 = a \cdot (1 - \exp^{-b \cdot (\frac{1}{DP} - \frac{1}{c})})$	82,8	-0,856511	4,6	<0,05	<0,05
Mały potok podstawowy (Model JP.04)	Z.8 (WPK=0.3)	Wykładnicza $VP1 = a \cdot (1 - \exp^{-b \cdot (\frac{1}{DP} - \frac{1}{c})})$	82,8	-0,680088	4,6	<0,05	<0,05
Znikomy potok podstawowy (Model JP.05)	Z.9 (WPK=0.1)	Wielomianowy $QP1 = a \cdot VP^3 + b \cdot VP^2 + c \cdot VP$	-0,000224	0,0185	-0,0108	<0,05	<0,05
Ruch jednokierunkowy (Model A.J.01.)	Z.4 (WPK=1.0)	Kwadratowy $QP1 = a \cdot DP^2 + b \cdot DP$	-16,81	77,30	-	<0,05	<0,05

Uzyskane modele tab.7 potwierdzają, że wraz ze spadkiem prędkości pieszych VP wzrasta natężenie ruchu, aż do osiągnięcia wartości maksymalnej QPmax. Natężenie maksymalne pieszych QPmax, ruchu kierunkowego, dla poszczególnych zbiorów danych przedstawiono w rys.7.13. Potwierdzają także, że wraz ze wzrostem gęstości potoku pieszych DP zmniejsza się prędkość pieszych VP, od wartości średniej w ruchu swobodnym, aż do osiągnięcia wartości minimalnej $VP_{min} = 0$ [m/min]. przy wartości maksymalnej gęstości DP_{max} . Wyniki VPopt., DPopt przedstawiono w tab.7.

Tab.7.9 Zestawienie parametrów charakterystycznych fundamentalnej zależności QP-VP-DP dla ruchu jednokierunkowy z ruchem przeciwnym (JP)

Model	Zbiór danych		Wartości graniczne zależności fundamentalnej					Spełnienie warunków brzegowych		
			VPopt		QPmax		DPopt	W1	W2	W3
			m/s	m/min	P/ m/s	P/m/min	P/m ²			
JP.01	Z.5 (WPK=0.9)	Przeważający potok podstawowy	0,76	45,5	0,98	58,74	1,49	Tak	Tak	Tak
JP.02	Z.6 (WPK=0.7)	Znaczny potok podstawowy	0,81	48,7	0,65	38,74	1,29	Tak	Tak	Tak
JP.03	Z.7 (WPK=0.5)	Ruch zrównoważony	0,88	52,6	0,53	31,51	0,74	Tak	Tak	Tak
JP.04	Z.8 (WPK=0.3)	Mały potok podstawowy	0,89	52,7	0,34	20,62	0,58	Tak	Tak	Tak
JP.05	Z.9 (WPK=0.1)	Znikomy potok podstawowy	0,91	54,8	0,30	18,1	0,38	Tak	Tak	Tak



Rys.7.13 Zależność między prędkością, natężeniem i gęstością ruchu pieszych – ruch jednokierunkowy z ruchem przeciwnym (JP)

Na rys.7.14 przedstawiono zależność fundamentalną potoku ruchu pieszych z uwzględnieniem współczynnika kierunkowego WPK dla modeli sumarycznych. Zbiory danych są następujące:

1. Dane połączone z modelu symulacyjnego, zbiór Z.5 + Z.9
2. Dane połączone z modelu symulacyjnego, zbiór Z.6 + Z.8
3. Dane połączone z modelu symulacyjnego, zbiór Z.7, wraz z ruchem przeciwnym

W tab.7 przedstawiono estymowane modele wielomianowe trzeciego stopnia, oraz modele wielomianowe kwadratowe, zależności między natężeniem, prędkością i gęstością ruchu pieszych z uwzględnieniem współczynnika kierunkowego dla ruchu sumarycznego, przedstawiono w tab.7.

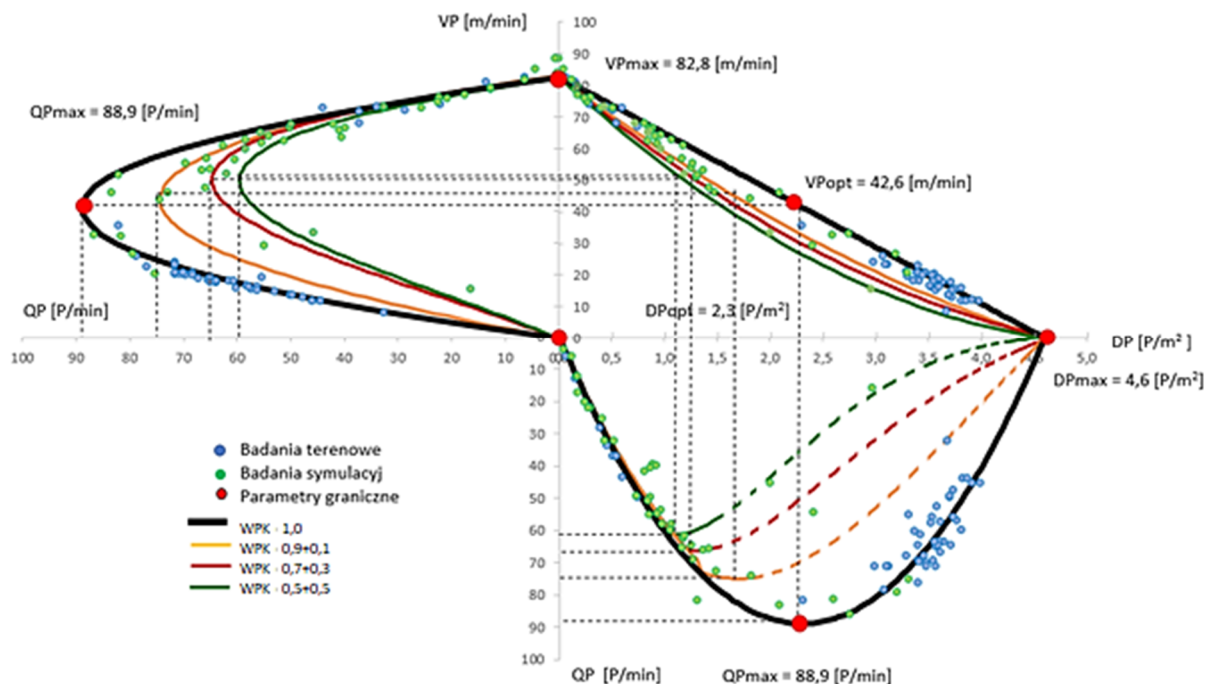
Tab.7.10 Modele zależności między prędkością, natężeniem i gęstością ruchu pieszych – ruch dwukierunkowy (D)

Zbiór danych		Model	Parametry modelu			Miary dopasowania modelu	
			a	b	c	R ² _{sk}	p
Ruch jednokierunkowy (Model A.J.01.)	Z.4 (WPK=1.0)	Kwadratowy $QP = a \cdot VP^2 + b \cdot VP$	-0,052	4,32	-	0,927	<0,05
Przeważający potok podstawowy (Model D.01)	Z.5+Z.9 (WPK 0.9+WPK 0.1)	Wielomianowy $QP = a \cdot VP^3 + b \cdot VP^2 + c \cdot VP$	-0,000117	-0,0283	3,1616	0,9695	<0,05
Znaczny potok podstawowy (Model D.02)	Z.6+Z.8 (WPK 0.7+WPK 0.3)	Wielomianowy $QP = a \cdot VP^3 + b \cdot VP^2 + c \cdot VP$	-0,000425	0,0165	1,5296	0,9858	<0,05
Ruch zrównoważony (Model D.03)	Z.7 (WPK 0.5+przeciwległy WPK 0.5)	Wielomianowy $QP = a \cdot VP^3 + b \cdot VP^2 + c \cdot VP$	-0,0004	0,0158	1,4004	0,99681	<0,05
Ruch jednokierunkowy (Model A.J.01.)	Z.4 (WPK=1.0)	liniowy $VP = a \cdot DP + b$	-17,957	82,8	-	0,85617	<0,05
Przeważający potok podstawowy (Model D.01)	Z.5+Z.9 (WPK 0.9+WPK 0.1)	Kwadratowy $VP = a \cdot DP^2 + b \cdot DP + c$	1,6426	-25,477	82,8	0,97809	<0,05
Znaczny potok podstawowy (Model D.02)	Z.6+Z.8 (WPK 0.7+WPK 0.3)	Kwadratowy $VP = a \cdot DP^2 + b \cdot DP + c$	2,2235	-28,117	82,8	0,94772	<0,05
Ruch zrównoważony (Model D.03)	Z.7 (WPK 0.5+przeciwległy WPK 0.5)	Kwadratowy $VP = a \cdot DP^2 + b \cdot DP + c$	2,845	-30,886	82,8	0,91684	<0,05
Ruch jednokierunkowy (Model A.J.01.)	Z.4 (WPK=1.0)	Kwadratowy $QP = a \cdot DP + b$	-15,863	83,9609		0,85617	<0,05
Przeważający potok podstawowy (Model D.01)	Z.5+Z.9 (WPK 0.9+WPK 0.1)	Kwadratowy $Dp < 1,35$ to $QP = a \cdot DP + b$ (jak dla ruchu jednokierunkowego) $Dp \geq 1,35$ to $QP = a \cdot VP^2 + b \cdot VP + c$ gdzie $VP = a \cdot DP^2 + b \cdot DP + c$	1,6254	-25,477	82,8	0,97809	<0,05
Znaczny potok podstawowy (Model D.02)	Z.6+Z.8 (WPK 0.7+WPK 0.3)	Kwadratowy $QP = a \cdot DP^2 + b \cdot DP + c$	-0,000423	0,0167	1,5496	0,8745	<0,05
Ruch zrównoważony (Model D.03)	Z.7 (WPK 0.5+przeciwległy WPK 0.5)	Kwadratowy $QP = a \cdot DP^2 + b \cdot DP + c$	-0,00059	0,0415	0,6272	0,8647	<0,05

Uzyskane modele tab.7 potwierdzają, że wraz ze spadkiem prędkości pieszych VP wzrasta natężenie ruchu, aż do osiągnięcia wartości maksymalnej QP_{max}. Natężenie maksymalne pieszych QP_{max}, ruchu sumarycznego, dla poszczególnych zbiorów danych przedstawiono w tab.7. Uzyskane modele, potwierdzają także, że wraz ze wzrostem gęstości potoku pieszych DP zmniejsza się prędkość pieszych VP, od wartości średniej w ruchu swobodnym aż do osiągnięcia wartości minimalnej VP_{min} = 0 [m/min]. przy wartości maksymalnej gęstości DP_{max}. Wyniki VP_{opt.}, DP_{opt} przedstawiono w tab.7.

Tab.7.11 Zestawienie parametrów fundamentalnej zależności QP-VP-DP dla ruchu sumarycznego potoku pieszych

Model	Zbiór danych		Wartości graniczne zależności fundamentalnej					Spełnienie warunków brzegowych		
			VPopt		QPmax		DPopt	W1	W2	W3
			m/s	m/min	P/m/s	P/m/min	P/m2			
D.01	Z.5+Z.9 (WPK 0.9+WPK 0.1)	Przeważający potok podstawowy	0,73	44	1,24	74,36	1,65	Tak	Tak	Tak
D.02	Z.6+Z.8 (WPK 0.7+WPK 0.3)	Znaczny potok podstawowy	0,83	50	1,08	64,61	1,30	Tak	Tak	Tak
D.03	Z.7 (WPK 0.5+przeciwległy WPK 0.5)	Ruch zrównoważony	0,83	50	0,99	59,52	1,05	Tak	Tak	Tak



Rys.7.14 Zależność między prędkością, natężeniem i gęstością ruchu pieszych – ruch dwukierunkowy (D)

7.3.6. Wnioski

W niniejszym rozdziale, przedstawiono wyniki analiz wpływu współczynnika podziału kierunkowego WPK, zależności pomiędzy natężeniem, prędkością i gęstością pieszych (Q-V-D) oraz natężeniem ruchu pieszego i kołowego na przejściach dla pieszych. W wyniku przeprowadzonych analiz przedstawiono modele statystyczne dla badanych zależności. W rozdziale siódmym zrealizowano cel praktyczny nr 2 (Implementacja wyników badań do praktyki poprzez uzupełnieni elementów metodyki wyboru rodzaju skrzyżowania o aspekty związane z przepustowością, warunkami ruchu pieszego i kołowego oraz wykorzystanie, jako element wytycznych projektowania przejść dla pieszych w ramach Wzorców i Standardów rekomendowanych przez Ministra Infrastruktury) oraz cel naukowy nr 2 i 3 (nr 2 - Opracowanie matematycznych modeli zależności pomiędzy fundamentalnymi parametrami ruchu potoku pieszych na wybranych przejściach dla pieszych w miastach w Polsce i nr 3 - Badania wpływu wybranych czynników na sprawność i warunki ruchu na przejściach dla pieszych z wykorzystaniem opracowanych modeli.). Na podstawie przeprowadzonych analiz, poza przytoczonymi wnioskami w rozdziale odnoszącymi się do konkretnych analiz, sformułowano następujące wnioski całościowe:

- uzyskane wyniki są zgodne z wynikami badań przedstawionymi w literaturze [1], wykazując wpływ współczynnika podziału kierunkowego na natężenie, prędkość i gęstość pieszych, Wskazują także, że-sposób organizacji ruchu poprzez zastosowany priorytet dla danego użytkownika drogi, wpływa istotnie na uzyskane wartości maksymalnego natężenia pieszych i pojazdów [10],[112],

- w wyniku przeprowadzonych analiz, zależności pomiędzy natężeniem, prędkością i gęstością pieszych (Q-V-D) zostały zaprezentowane modele statystyczne jednofazowe i przyrównane do modeli przedstawionych w literaturze (rozdział 2), Na tej podstawie wytypowano modele charakteryzujące się najlepszym dopasowaniem rozkładu [121],[163],[200],[217],[227],

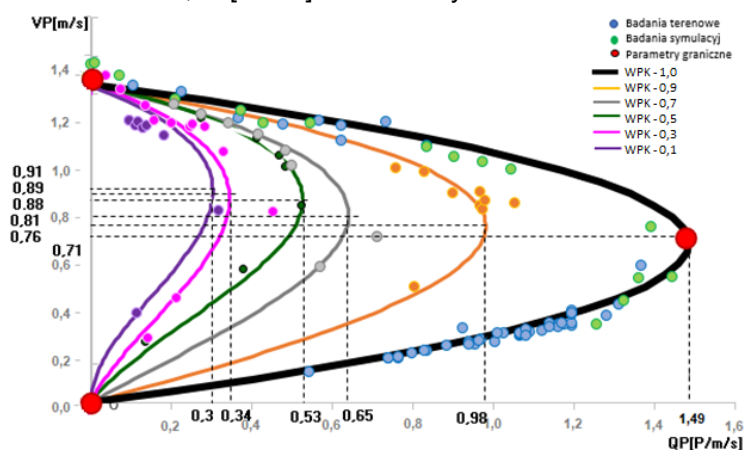
- analiza średnich strat czasu pieszych, wykazała zbieżne prawidłowości do modeli matematycznych prezentowanych w literaturze, W Rozprawie Doktorskiej zaprezentowano model wykładniczy, podobnie jak model prezentowany przez Igazvölgyi [63],[101],

- wyniki analiz mogą zostać wykorzystane do planowania i projektowania przejść dla pieszych, Mogą także pozwolić na podjęcie decyzji, co do zmiany sposobu sterowania ruchem w obrębie przejścia dla pieszych, poprzez wprowadzanie sygnalizacji świetlnej lub przejść dla pieszych w innym poziomie jezdni,

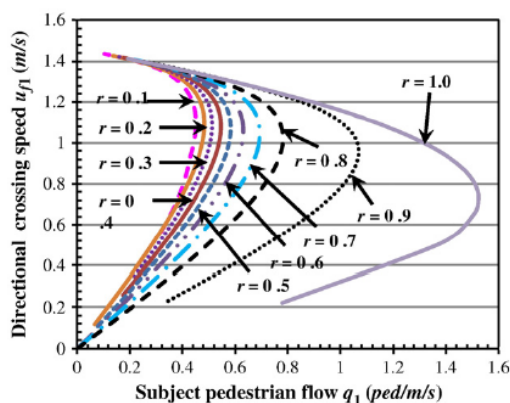
- należy pamiętać, że modele odwzorowujące sieć uliczną mimo dużej staranności i dokładności wykonania, posiada pewne uproszczenia w odniesieniu do rzeczywistych sytuacji drogowych w zachowaniach pieszych, kierowców jak i geometrii ulic. W modelu symulacyjnym kierowcy, jeżdżą zgodnie z przepisami w sposób uporządkowany, nie przekraczają linii ciągłych, zachowują pewien określony dystans względem pojazdu poprzedzającego wykluczając jazdę "na zderzaku", stosują się do zasad organizacji ruchu, Piesi zachowują pewien dystans względem siebie, nie przebiegają poza obszarem przejścia dla pieszych, Te wszystkie elementy, mimo sprawdzenia bezwzględnego błędu procentowego MAPE dla modelu mikrosymulacyjnego, mogą nieznacznie wpływać na uzyskane wyniki,

- przedstawione w rozdziale 7.3.5 wyniki zależności prędkości od natężenia ruchu pieszych porównano z przedstawionymi w literaturze [1], na podstawie, których stwierdzono, że:

- 1) dla pieszych idących w tym samym kierunku (WPK=1.0) otrzymano wartość $QP=1,49$ [P/m/s], czyli o ok 6% mniej niż w wynikach przedstawionych w literaturze ($QP=1,59$ [P/m/s]).
- 2) dla współczynnika podziału kierunkowego $WPK = 0,5$ uzyskano wartość $QP=0,53$ [P/m/s], natomiast w wynikach przedstawionych w literaturze jest to $QP=0,56$ [P/m/s], czyli o ok 5% mniej.
- 3) dla $WPK = 0,1$ otrzymano $QP=0,3$ [P/m/s], natomiast w badaniach przedstawionych w literaturze $QP=0,43$ [P/m/s]. Różnica wynosi około 30%.



Rys.7.15. Zależność między prędkością a natężeniem ruchu pieszych dla różnych wartości współczynnika podziału kierunkowego, na podstawie własnych wyników badań.



Rys.7.16 Zależność między prędkością a natężeniem ruchu pieszych dla różnych wartości współczynnika podziału kierunkowego - piesi w wieku średnim [1].

- w kierunku dalszych badań powinny być rozwijanie o kolejne poligony badawcze celem rozszerzenia próby o większy zakres badanych czynników wpływających na funkcjonowanie przejść dla pieszych, Kontynuowane będą badania mające na celu opracowanie rekomendacji dla rodzaju przejście w zależności od przewidywanego lub istniejącego natężenia pieszych i pojazdów.

8. BADANIA (MODELOWANIE) WPLYWU WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA SPRAWNOŚĆ ORAZ WARUNKI RUCHU PIESZYCH I POJAZDÓW NA WYBRANYCH RODZAJACH PRZEJŚĆ DLA PIESZYCH

8.1. Przepustowość

8.1.1. Założenia

Wykorzystując wyniki badań symulacyjnych (rozdział 6 i 7) oszacowano wielkość przepustowości pieszych oraz pojazdów na wybranych modelach przejść dla pieszych. Założono, że badane przejście dla pieszych znajduje się w obszarze miejskim uwzględniając dwa scenariusze priorytet pieszych względem pojazdów lub priorytet pojazdów względem. Do modeli wprowadzono różne wartości natężenia pieszych Q_p i pojazdów Q_v . Przed przeprowadzeniem symulacji, określono na podstawie literatury i badań terenowych, wartość maksymalną natężenia pieszych, która może przejść przez przejście w zależności od wartości natężenia pojazdów w jednostce czasu bez określania wymogów, co, do jakości warunków ruchu - przepustowość przejścia C_p . Ponieważ przejście dla pieszych jest miejscem gdzie dochodzi do interakcji między pieszymi, a pojazdami, przeanalizowano także maksymalną wartość pojazdów w zależności od natężenia pieszych - przepustowość drogi C_v .

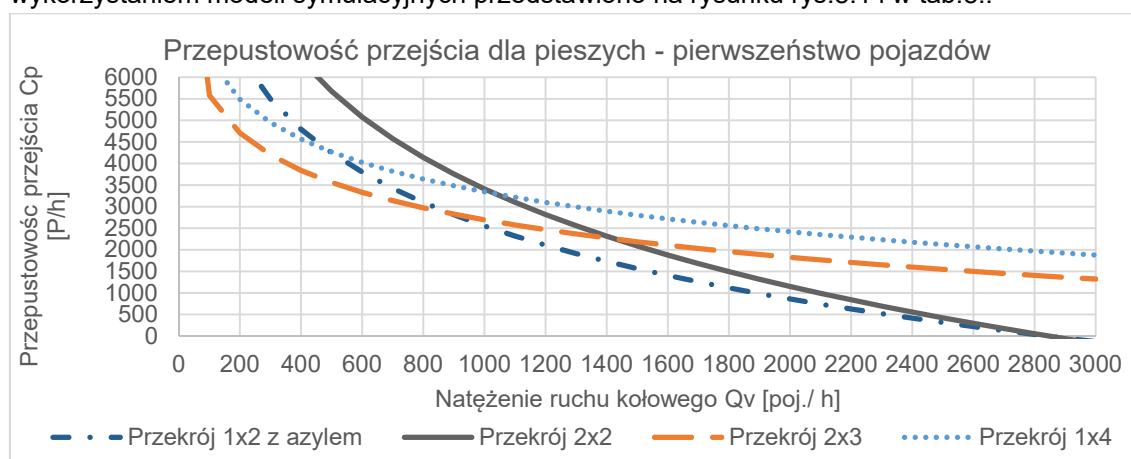
Analizy przeprowadzono z uwzględnieniem następujących sytuacji: pierwszeństwo dla pojazdów i pierwszeństwo dla pieszych. Przyjęte założenia odnośnie modeli symulacyjnych są zgodne z przedstawionymi w podrozdziale 7.1.2 z tym, że przeanalizowano przejścia dla pieszych znajdujące się na różnych przekrojach ulicy.

1. dwa pasy ruchu dla ulicy o przekroju 1x2,
2. cztery pasy ruchu jak dla przekroju 1x4,
3. dwa pasy ruchu liczone do pasa dzielącego o przekrój ulicy 2x2,
4. trzy pasy ruchu liczone do pasa dzielącego o przekrój ulicy 2x3.

8.1.2. Przepustowość przejścia dla pieszych w przypadku pierwszeństwa pojazdów

W przypadku pierwszeństwa pojazdów pieszy czeka przy krawędzi jedni na możliwość przekroczenia przejścia dla pieszych. Gdy pieszy uzna, że możliwe jest bezpieczne przekroczenie ulicy, wchodzi na jezdnię. Gdy pieszy znajduje się na przejściu dla pieszych, a pojazdy dojeżdżają do niego, zatrzymują się i umożliwiają pieszemu przejście całej jego długości. Wyniki symulacji dla różnych wartości natężenia pieszych i pojazdów w godzinie z uwzględnieniem liczby pasów ruchu, przedstawiono na rys.8.1 i tab.8.. Przeprowadzone analizy, mają zastosowanie przy wyznaczaniu przepustowości przejścia dla pieszych typu przejścia sugerowane

Otrzymane w wyniku symulacji (rozdz. 6) wielkości liczbowe przepustowości przejść dla pieszych zlokalizowanych na wybranych przekrojach ulic opisano za pomocą modeli regresyjnych, które najlepiej opisywały zależność natężenia pieszych od natężenia pojazdów. Wyniki z analizy z wykorzystaniem modeli symulacyjnych przedstawiono na rysunku rys.8.1 i w tab.8..



Rys.8.1 Zależność natężenia pieszych od natężenia pojazdów w zależności od przekroju ulicy – pierwszeństwo dla pojazdów

Tab.8.1 Modele zależności natężenia pieszych od natężenia pojazdów w zależności od liczby pasów ruchu ulicy – pierwszeństwo dla pojazdów

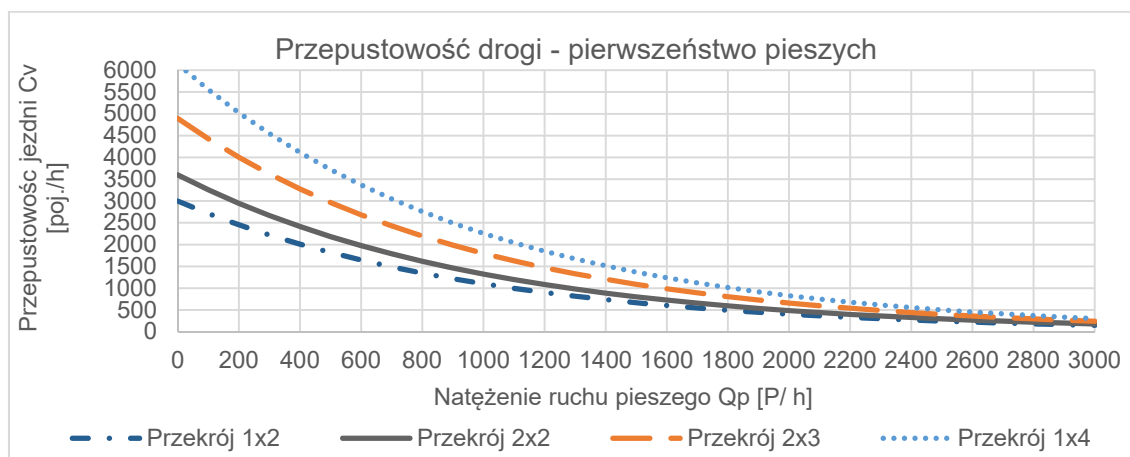
Liczba pasów ruchu	Model zależności	Współczynnik determinacji R^2	Poziom ufności p
2 (1x2)	$C_p = -2443 \ln(Q_v) + 19431$	0,81	<0,05
2 (2x2)	$C_p = -3260 \ln(Q_v) + 25931$	0,79	<0,05
3 (2x3)	$C_p = -1250 \ln(Q_v) + 11338$	0,89	<0,05
4 (1x4)	$C_p = -1333 \ln(Q_v) + 12553$	0,84	<0,05

Przy bardzo dużych wartości natężenia pieszych powyżej $Q_p=2500$ [P/h], przy priorytecie dla pojazdów (rys.8.1), dla dwóch pasów ruchu o przekroju 2x2 przejedzie mniejsza liczba pojazdów niż przez przekrój 1x2. Jest to spowodowane tym, że dla przekroju 2x2 piesi pokonując pierwsze dwa pasy ruchu, gromadzą się na pasie dzielącym oczekując na możliwość przekroczenia kolejnych dwóch pasów ruchu. Część pieszych nie mieści się na pasie dzielącym i pozostaje na pierwszym etapie przejścia dla pieszych, blokując ruch pojazdów. Piesi decydują się na przekroczenie drugiego etapu przejścia, jeżeli, gdy luka akceptowalna była przez nich akceptowalna. Wraz ze wzrostem natężenia pojazdów liczba pieszych przekraczających ulicę zmniejsza się istotnie. Jest to spowodowane większą gęstością pojazdów i mniejszą liczbą luk akceptowalnych umożliwiających pieszemu bezpieczne przejście na drugą stronę jezdni.

8.1.3. Przepustowość jezdni w obszarze przejścia w przypadku pierwszeństwa dla pieszych

W przypadku przejścia dla pieszych z pierwszeństwem dla pieszych pojazdy zatrzymują się przed przejściem, gdy pieszy dochodzi do przejścia dla pieszych. natomiast, gdy pieszy znajduje się na przejściu dla pieszych, a pojazdy dojeżdżają do niego, zatrzymują się i umożliwiają pieszemu przejście na całej jego długości. Wyniki symulacji dla różnych wartości natężenia ruchu pojazdów od natężenia ruchu pieszych z uwzględnieniem liczby pasów ruchu (rozdz. 6) poddano analizie. Przeprowadzone analizy, mają zastosowanie przy wyznaczaniu przepustowości drogi, przy przejściach dla pieszych.

Otrzymane w wyniku symulacji (rozdz. 6) wielkości liczbowe przepustowości jezdni w obszarze przejść dla pieszych zlokalizowanych na wybranych przekrojach ulic opisano za pomocą modeli regresyjnych, które najlepiej opisywały zależność natężenia pojazdów od natężenia pieszych. Wyniki z analizy z wykorzystaniem modeli symulacyjnych przedstawiono na rysunku rys.8.1 i w tab.8.,



Rys.8.2 Zależność natężenia pojazdów od natężenia pieszych w zależności od przekroju ulicy – pierwszeństwo dla pieszych

Tab.8.2 Modele zależności natężenia pojazdów od natężenia pieszych w zależności od przekroju ulicy – pierwszeństwo dla pieszych

Liczba pasów ruchu	Model statystyczny	Współczynnik determinacji R ²	Poziom ufności p
2 (1x2)	$Cv = 3000 e^{-0,001 Qp}$	0,87	<0,05
2 (2x2)	$Cv = 3600 e^{-0,001 Qp}$	0,85	<0,05
3 (2x3)	$Cv = 4892,1 e^{-0,001 Qp}$	0,84	<0,05
4 (1x4)	$Cv = 6140,2 e^{-0,001 Qp}$	0,85	<0,05

Na przejściach dla pieszych z pierwszeństwem dla pieszych wraz ze wzrostem natężenia ruchu pieszych zmniejsza się liczba pojazdów przejeżdżających przez przekrój ulicy w obszarze przejścia. Jest to spowodowane większą gęstością pieszych oraz koniecznością ustąpienia pierwszeństwa pieszemu.

8.1.4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz, stwierdzono, że:

1. Na przepustowość przejść dla pieszych (maksymalne natężenie ruchu pieszych) istotny wpływ, mają: rodzaj pierwszeństwa na przejściu dla pieszych, długość przejścia, struktura kierunkowa pieszych, natężenie ruchu pojazdów.
2. Przejścia z priorytetem dla pieszych mają większą przepustowość niż przejścia z priorytetem dla pojazdów, gdyż przepustowość zależy głównie od ich szerokości i struktury kierunkowej potoku pieszych. Co jest zgodne z analizami uzyskanymi w literaturze [10];
3. Na przejściach dla pieszych z priorytetem dla pojazdów np. przejściach sugerowanych, przepustowość przejścia zależy głównie od rodzaju przejścia dla pieszych, natężenia ruchu pojazdów, długości przejścia (liczby pasów ruchu w przekroju jezdni). Im większe natężenie ruchu pojazdów tym mniejsza przepustowość przejścia dla pieszych.
4. Na przejściach z pierwszeństwem dla pieszych wraz ze wzrostem ich natężenia, zmniejsza się istotnie liczba pojazdów przejeżdżających przez przekrój jezdni jest to spowodowane większą gęstością pieszych oraz koniecznością ustąpienia pierwszeństwa pieszemu.
5. Analiza przepustowości przejść dla pieszych Cp ma zastosowanie w projektowaniu przejść dla pieszych tak, aby zapewnić wysoką sprawność obiektów i urządzeń przeznaczonych do ruchu pieszego. Projektowane i wykonane urządzenia przeznaczone do ruchu pieszego powinny umożliwiać swobodne przemieszczanie się pieszych w dobrych i bardzo dobrych warunkach ruchu.
6. Analiza przepustowości drogi Cv , ma także znaczące zastosowanie w projektowaniu przejść dla pieszych i może określać moment, w którym konieczne jest zastosowanie sygnalizacji świetlnej dla użytkowników.
7. Przedstawione wyniki badań rys.8.1, rys.8.2, tab.8., tab.8. , zostały zastosowane, jako jeden z elementów do „Wytyczne projektowania infrastruktury dla pieszych” WR-D-41-1 [214].

8.2. Straty czasu na podstawie modeli mikrosymulacyjnych

8.2.1. Średnie straty czasu pieszego

Średnie straty czasu pieszych na przejściach zależą m.in. od luki akceptowalnej w potoki pojazdów, która została opisana w punkcie 6.4.5. Wraz ze wzrostem długości przejścia, wzrasta luka akceptowalna w potoku pojazdów, jaką potrzebuje pieszy, aby przekroczyć przejście. Znaczenie ma także, czy przejście dla pieszych jest jedno, czy dwuetapowe. Im dłuższe przejście dla pieszych pokonywane w jednym etapie przez pieszego tym od luka akceptowalna w potoki pojazdów jest większa, co powoduje, że pieszy dłużej oczekuje na możliwość przekroczenia jezdni, a jego straty czasu rosną. Jeżeli pieszy przechodzi przez przejście w kilku etapach, całkowita średnia strata czasu pieszego jest sumą strat na każdym postoju, gdy pieszy oczekuje na możliwość ponownego wejścia i przekroczenia kolejnego etapu ulicy.

W analizie średnich strat czasu pieszych wykorzystano przygotowane wcześniej modele symulacyjne w programie PTV Vissim z modułem Viswalk. Symulacje wykonano dla wartości natężenia pieszych 500, 1000, 1500 i 2000 [P/h] oraz różnych wartościach natężenia pojazdów od 100 [p/h] do 2000 [p/h] przy różnych przekrojach ulicy. W modelu założono, że pieszy nie ma pierwszeństwa przed pojazdami. Pieszy może przejść przez przejście dla pieszych, jeśli pojazd jest odpowiednio daleko, a dostępna luka czasu jest większa lub równa luce krytycznej (Rozdział 2.6). Jeżeli dostępna luka, jest mniejsza niż luka krytyczna, pieszy będzie oczekiwał przy krawędzi ulicy do czasu, aż zostanie lukę czasu równą lub dłuższą niż luka krytyczna.

Wykorzystując wyniki badań symulacyjnych dla jezdni dwukierunkowych bez pasa dzielącego (przekrój 1x2 i 1x4) oraz jezdniach jednokierunkowych (przekrojów 2x2 i 2x3), opracowano model matematyczny średnich strat czasu pieszego na przejściu bez sygnalizacji świetlnej.

Przeanalizowano następujące postaci modeli matematycznych:

$$TDp = a \cdot \exp^{Qv^{cb+Qp^c}} \quad (8.1)$$

$$TDp = a \cdot Qv^b \cdot \exp^{Qp^d} \quad (8.2)$$

$$TDp = a \cdot Qv^b \cdot \exp^{Qv^c+Qp^d} \quad (8.3)$$

$$TDp = a \cdot (Qv^b + Qp^c) \quad (8.4)$$

Najlepsze dopasowanie wykazał model matematyczny opisany wzorem:

$$TDp = a \cdot Qv^b \cdot \exp^{Qv^c+Qp^d} \quad (8.5)$$

TDp – straty czasu pieszego [s/P],

Qv – natężenie pojazdów [poj./h/przekrój],

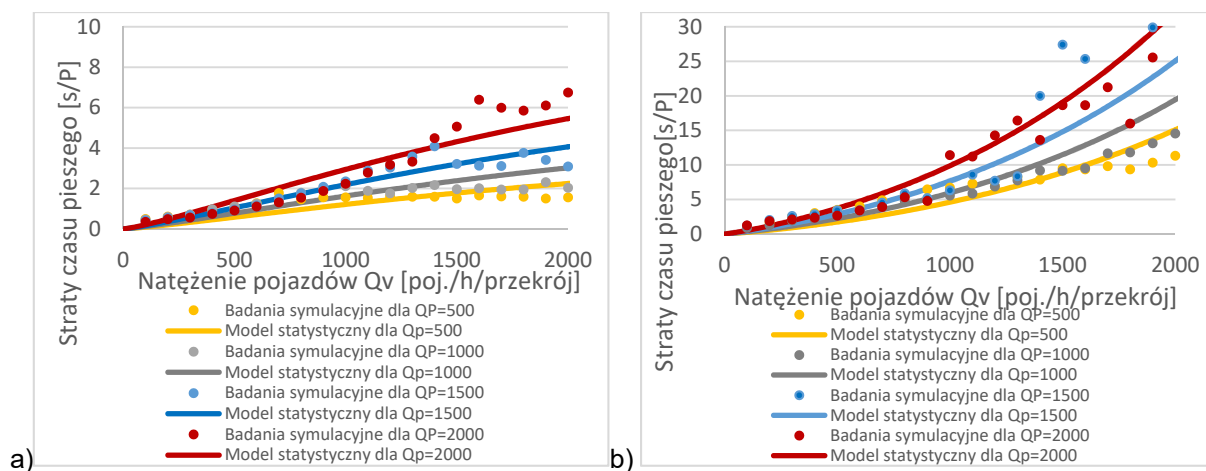
Qp – natężenie pieszych [P/h],

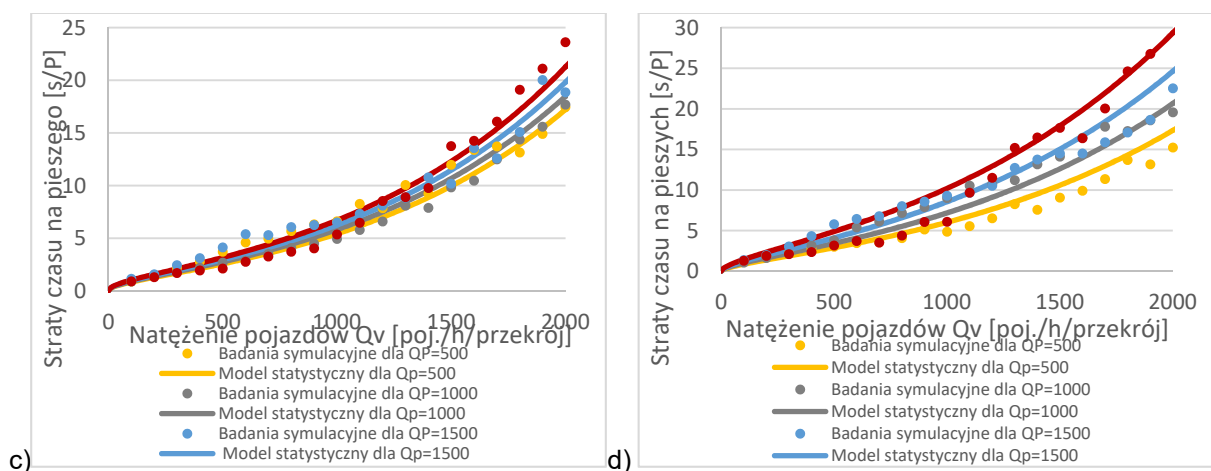
a - wartość współczynnika a jest uzależniona od przekroju ulicy.

W tab.8. zestawiono parametry modelu dla jezdni dwu i jednokierunkowych oraz na rys.8.3.

Tab.8.3 Zestawienie parametrów modelu dla strat czasu pieszego

Rodzaj przekroju ulicy		Współczynnik równania				Miary dopasowania	
		a	b	c	d	R2	p
Dwukierunkowa	1x2	1,154	1,250	-0,249	0,592	0,721	<0,05
	1x4	2,250	0,493	0,811	0,141	0,920	<0,05
Jednokierunkowa	2x2	2,367	1,114	0,413	0,508	0,780	<0,05
	2x3	2,654	0,594	0,645	0,351	0,945	<0,05

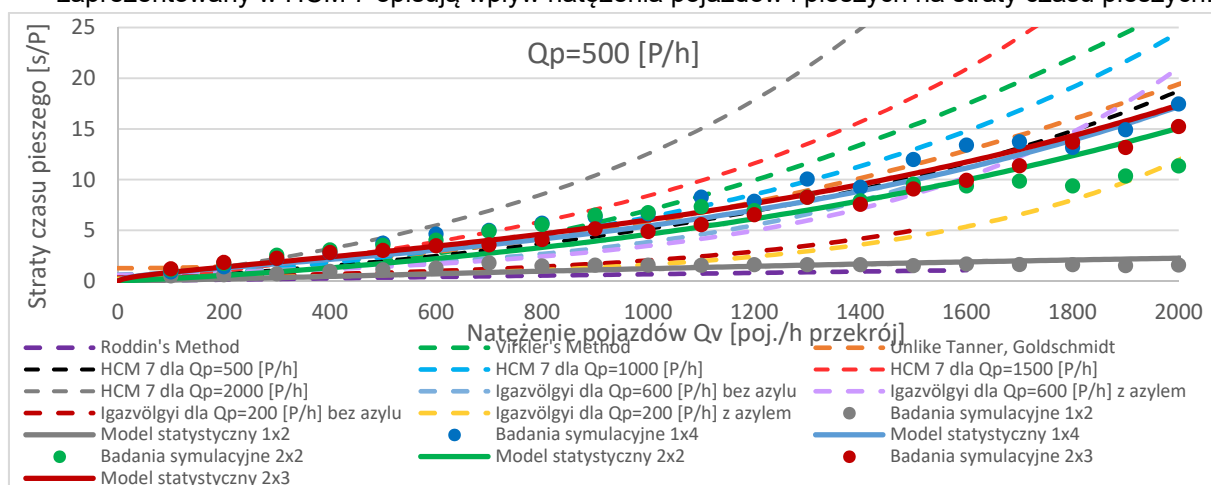




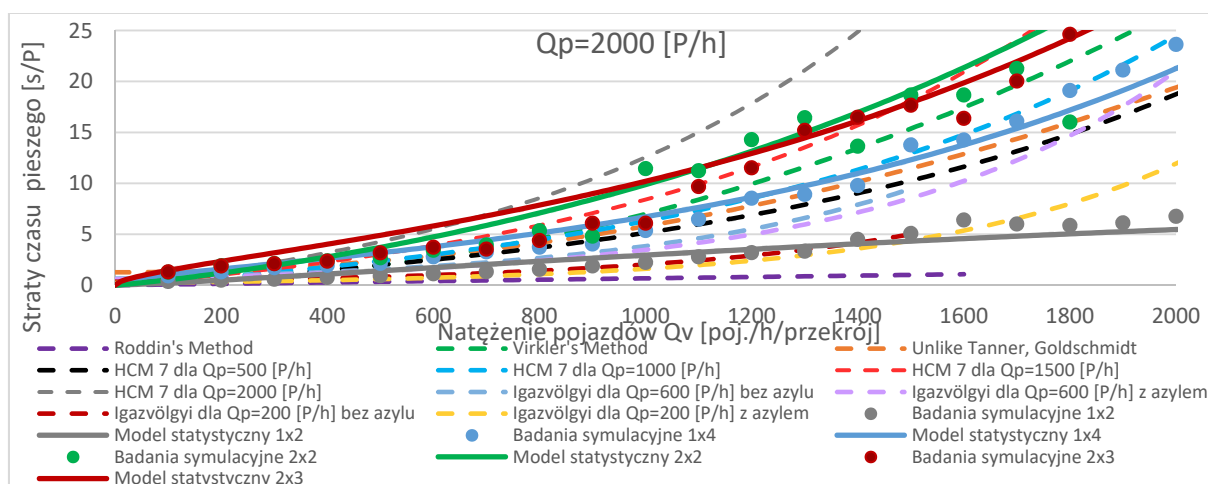
Rys.8.3 Średnie straty czasu pieszego dla przekroju a) 1x2 b) 2x2 c) 1x4 d) 2x3.

Otrzymane Wyniki analizy wskazują, że:

1. Opracowany model zależności $TD = f(Q_p, Q_v)$ stanowią próbę opisu wpływu natężenia ruchu kołowego i pieszego, na straty czasu pieszych w zakresie kilku wybranych przekrojów ulic, wymagają poszerzenia badań. Opracowane modele mogą być wykorzystywane do szacowania wielkości strat czasu pieszych na przejściach sugerowanych oraz innych rozwiązaniach alternatywnych w zakresie natężenia ruchu kołowego Q_v od 0 do 2000 [poj./h] w przekroju ulicy oraz natężenia pieszych Q_p od 500 do 2000 [P/h].
2. Wraz ze wzrostem natężenia pojazdów zwiększają się straty czasu pieszego. W badaniach symulacyjnych założono, że pojazd ma pierwszeństwo przed pieszym. Wraz ze wzrostem natężenia ruchu pojazdów zmniejsza się liczba akceptowalnych przez pieszego luk w potoku pojazdów. Wraz ze wzrostem strat czasu pieszego pogorszą się jego warunki ruchu.
3. Im większa liczba pasów ruchu na jezdni, tym większa długość przejścia dla pieszych, a tym samym zmniejsza się liczba luk akceptowanych i zwiększają się straty czasu pieszego.
4. Opracowane modele zależności $TD = f(Q_p, Q_v)$ przedstawiono wraz z modelami Roddinda, Virklera, Tanner, Igazvölgyi, HCM 7 [194],[63],[101] na rys. 8.4 i rys. 8.5. Igazvölgyi zaprezentowała modele matematyczne dla natężenia pieszych 200 oraz 600 [P/h] z i bez azylu dla pieszych. Modele Roddinda, Virklera, Tanner opisują wpływ natężenia pojazdów na straty czasu pieszego. Model matematyczny Virklera, został opracowany w oparciu o teorię kolejek [194] zakładając losowe przybycie pojazdu do przejścia dla pieszych. Model ten znacząco odbiega, od przedstawionych modeli matematycznych, przy większych natężeniach pojazdów w przekroju ulicy. Model zaprezentowany w HCM 7 opisują wpływ natężenia pojazdów i pieszych na straty czasu pieszych.



Rys.8.4 Porównanie modeli matematycznych dla natężenia pieszych $Q_p=500$ [P/h] z modelami strat czasu Roddinda, Virklera, Igazvölgyi, tanner, HCM 7.



Rys.8.5 Porównanie modeli matematycznych dla natężenia pieszych $Q_p=2000$ [P/h] z modelami strat czasu Roddinda, Virklera, Igazvölgyi, Tanner HCM 7

8.2.2. Średnie straty czasu pojazdów

Średnie straty czasu pojazdów na przejściach zależą m.in. od natężenia pieszych, zasad pierwszeństwa ruchu. Wraz ze wzrostem natężenia ruchu pieszych, zaczynają oni dominować na przejściu, a tym samym rosną straty czasu pojazdów. W analizie średnich strat czasu pojazdów wykorzystano te same modele symulacyjne jak dla straty czasu pieszych

Wykorzystując wyniki badań symulacyjnych dla jezdni dwukierunkowych bez pasa dzielącego (przekrój 1x2 i 1x4) oraz jezdniach jednokierunkowych (przekrojów 2x2 i 2x3), opracowano model matematyczny średnich strat czasu pieszego na przejściu bez sygnalizacji świetlnej.

Dla jezdni dwukierunkowych bez pasa dzielącego (przekrojów 1x2 i 1x4) przyjęto model opisany wzorem:

$$TDv = a \cdot (10^{-3}Qv^b \cdot 10^{-3}Qp^c) \quad (8.6)$$

Dla jezdni jednokierunkowych (przekrojów 2x2 i 2x3) przyjęto model opisany wzorem:
dla natężenia $Q_p=500$ i $Q_p=1000$ [P/h]

$$TDv = a \cdot (Qv^b \cdot LP^c), \quad (8.7)$$

dla natężenia $Q_p=1500$ i $Q_p=2000$ [P/h]

$$TDv = Qv \cdot \exp^{(Qv^a + Qp^b)} \cdot LP^c + d, \quad (8.8)$$

TDv – straty czasu pojazdu [s/ poj.],

Qv – natężenie pojazdów [poj./h/przekrój],

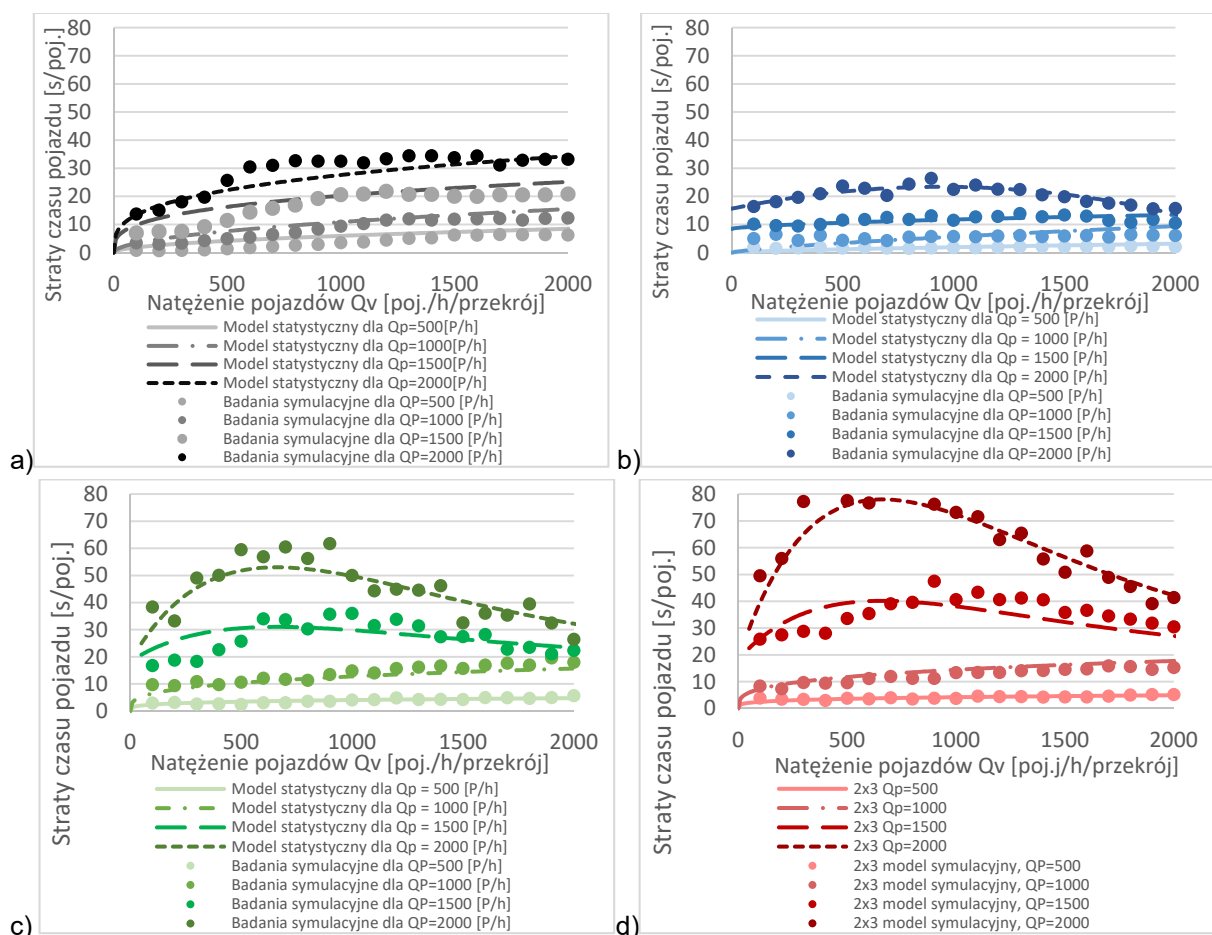
Qp – natężenie pieszych [P/h],

LP – liczba pasów dla przekroju 2x2 $LP=2$ i 2x3 $LP=3$,

a - wartość współczynnika a jest uzależniona od przekroju ulicy.

Tab.8.4 Zestawienie parametrów modelu dla strat czasu pieszego

Rodzaj przekroju ulicy		Współczynnik równania				Miary dopasowania	
		a	b	c	d	R2	p
Dwukierunkowa	1x2	13,066	0,312	1,080	--	0,721	<0,05
	1x4	5,655	0,736	1,589	--	0,920	<0,05
Jednokierunkowa	2x2 i 2x3 dla $Q_p= 500$ i 1000 [P/h]	3,775	0,229	0,091	--	0,780	<0,05
	2x2 i 2x3 dla $Q_p= 1500$ i 2000 [P/h] $Q_v > 50$ [poj./h/przekrój]	-1,512	2,015	1,340	18,389	0,945	<0,05



Rys.8.6 Średnie straty czasu pojazdu dla przekroju 1)1x2 b) 1x4 c) 2x2 d)2x3.

Otrzymane Wyniki analizy wskazują, że:

1) Opracowany model zależności $TD_v = f(Q_p, Q_v)$ stanowią próbę opisu wpływu natężenia ruchu kołowego i pieszego, na straty czasu pojazdów w zakresie kilku wybranych przekrojów ulic, wymagają poszerzenia badań. Opracowane modele mogą być wykorzystywane do szacowania wielkości strat czasu pojazdów na przejściach sugerowanych oraz innych rozwiązaniach alternatywnych w zakresie natężenia ruchu kołowego Q_v od 0 do 2000 [poj./h] w przekroju ulicy oraz natężenia pieszych Q_p od 500 do 2000 [P/h]. zgodnie z tab.8..

2) w badaniach zagranicznych Igazvölgyi [63], przedstawiła wykładniczy model średnich strat czasu pojazdów w zależności dla natężenia pieszych $Q_p = 200$ [P/h] i $Q_p=600$ [P/h], na ulicy o przekroju 1x2. Porównując otrzymane wyniki zaprezentowane w tab.8. i rys.8.6 a z wynikami przedstawionymi w literaturze tab.8 dla kilku wartości natężenia pojazdów Q_v otrzymujemy wartości zbliżone do wartości natężenia pojazdów $Q_v = 1000$ [poj./h/przekrój]. Większe różnice powstają przy wartościach natężenia pojazdów $Q_v=1500$ [poj./h/przekrój], co może być spowodowane warunkami prawnymi, co do priorytetu użytkownika na przejściu dla pieszych.

Tab.8.5 Porównanie strat czasu pojazdu z badań symulacyjnych do wyników badań z literatury dla przekroju 1x2 [63]

Qv [poj./h/prze- krój]	model Igazvölgyi [63], dla przekroju 1x2 Qp=600 [P/h]		Model autorski strat czasu pojazdu, dla przekroju 1x2	
	z azylem	bez azylu	Qp=500 [P/h]	Qp=1000 [P/h]
0	1,52	2,18	0,00	0,00
500	3,38	5,36	4,98	10,52
1000	7,53	13,19	6,18	13,07
1500	16,76	32,44	7,01	14,83

9. IMPLEMENTACJA WYNIKÓW BADAŃ

9.1. Metody szacowania prędkości pieszego

9.1.1. Prędkość swobodna potoku pieszych przemieszczających się w jednym kierunku

Średnia prędkość swobodna pieszych SVP jest jednym z parametrów wykorzystywanych w projektowaniu urządzeń dla pieszych i w programowaniu sygnalizacji świetlnej. Na przykład w programowaniu sygnalizacji świetlnej, najczęściej przyjmowano prędkość pieszego 1,4 [m/s] [Czerwona Książka]. Jak wykazały wyniki badań przedstawione w rozdz. 5.5 prędkość pieszych zróżnicowana jest w zależności od wieku pieszego i warunków otoczenia. Niezbędne do projektowania urządzeń dla pieszych wartości liczbowe SVP można:

- 1) uzyskać na podstawie badań terenowych prowadzonych na przejściach dla pieszych;
- 2) przyjąć z tab.9., gdy nie ma możliwości wykonania badań terenowych.

Proponowane w tab.9. wartości liczbowe przyjęto na podstawie wyników badań prędkości średniej pieszego SVP przedstawionych w rozdz. 5.5. Zwraca uwagę potrzeba stosowania niższych prędkości dla osób starszych i z niepełnosprawnościami. Wartości przedstawione w tab.9. zarekomendowano do stosowania w przygotowywanym procesie zmian przepisów dotyczących organizacji i sterowania ruchem.

Tab.9.1 Zestawienie rekomendowanych do projektowania średnich prędkości pieszego

Warunki stosowania na przejściach dla pieszych	Proponowana średnia prędkość pieszego
	SVP [m/s]
Osoby z niepełnosprawnością ruchową lub wzrokową (na trasach dla osób z niepełnosprawnościami)	0,8
Osoby starsze (na trasach w pobliżu ośrodków zdrowia, miejsc kultu itp.) oraz dzieci (na trasach i przejściach szkolnych)	1,0
Warunki normalne	1,2
Trudne warunki (okresy ruchu szczytowego, małe natężenie ruchu pieszego, brak osób starszych lub osób z niepełnosprawnościami)	1,4

9.1.2. Natężenie krytyczne ruchu pieszych w zależności od prędkości potoku

W procedurach projektowania urządzeń dla pieszych uwzględnia się także wpływ natężenia ruchu pieszych QP i struktury kierunkowej potoku pieszych WPK na prędkość potoku pieszych VP. Jeżeli nie ma możliwości wykonania pomiarów terenowych prędkości pieszego w potoku pieszych, to prędkość VP można szacować, przy znanym podziale kierunkowym potoków pieszych WPK i natężeniu ruchu pieszych QP, w zależności od jednostek, w jakich wyrażono te parametry, na podstawie tab.9., tab.9. lub tab.9.. Wartości liczbowe prędkości VP i natężenia ruchu QP przedstawione w tych tablicach zostały określone na podstawie modeli zależności fundamentalnej, między prędkością, natężeniem i gęstością ruchu pieszych (rys.7.8 i rys.7.13) przedstawionych w rozdziale 7.3.

Tab.9.2 Zestawienie rekomendowanych do projektowania średnich prędkości pieszego dla określonego WPK i Qp [P/s]

Vp [m/s]	Qp [P/s] dla różnych wartości WPK					
	1	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,40	1,22	0,72	0,42	0,28	0,18	0,12
0,80	1,44	0,98	0,64	0,52	0,34	0,29
1,00	1,17	0,84	0,58	0,50	0,33	0,29
1,20	0,65	0,48	0,35	0,33	0,22	0,19
1,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab.9.3 Zestawienie rekomendowanych do projektowania średnich prędkości pieszego dla określonego WPK i QP [P/h]

Vp [m/s]	Qp [P/h] dla różnych wartości WPK					
	1	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1
0,00	0	0	0	0	0	0

0,40	4408	2599	1512	1002	651	438
0,80	5188	3511	2295	1859	1215	1040
1,00	4217	3024	2071	1799	1178	1054
1,20	2339	1742	1254	1181	777	691
0,02	0	0	0	0	0	0

Tab.9.4 Zestawienie rekomendowanych do projektowania średnich prędkości pieszego dla określonego WPK i QP [P/min]

Vp [m/min]	Qp [P/min] dla różnych wartości WPK					
	1	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24,0	73,5	43,3	25,2	16,7	10,9	7,3
48,0	86,5	58,5	38,7	31,0	20,3	17,3
60,0	70,3	50,4	34,4	30,0	19,6	17,6
72,0	39,0	29,0	20,9	19,7	12,9	11,5
82,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

9.2. Szacowanie widoczności

Odległość widoczności pojazdu przez pieszego LWP wchodzącego na przejście sugerowane chcącego bezpiecznie wejść na jezdnię, przejść przez jezdnię i bezpiecznie ją opuścić zależy od czasu TP potrzebnego na przejście pieszego przez jezdnię i prędkości pojazdu VDv dojeżdżającego do przejścia dla pieszych w czasie TP przechodzenia pieszego przez jezdnię. Czas TP przejścia pieszego przez jezdnię zależy od długości drogi pieszego dochodzącego do miejsca przejścia, przekraczania jezdni szerokości jezdni i bezpiecznego jej opuszczenia Lpp i prędkości pieszego Vp.

Odległość widoczności pojazdu przez pieszego wchodzącego na przejście sugerowane LWP oblicza się korzystając z wzoru (9.1) przyjętego w wytycznych WR-D-43-1. Jednakże przyjmuje się tam standardową prędkość pieszego VP = 1,2 [m/s]. Biorąc pod uwagę wyniki badań terenowych proponuje się przy szacowaniu odległości widoczności pojazdu przez pieszego na sugerowanym przejściu dla pieszych uwzględnić oprócz prędkości standardowych, także innych prędkości poruszania się pieszych w różnym wieku, ustalonych na podstawie wyników badań terenowych przedstawionych w rozdziale 5.5, dla:

- osób z niepełnosprawnościami – Vp = 0,8 [m/s] (48,0 m/min.), występujących na przejściach położonych w ciągu tras dla pieszych dla osób z niepełnosprawnościami
- dzieci Vp = 1,0 [m/s] (60,0 m/min.), występujących na przejściach szkolnych i przejściach położonych w ciągu tras szkolnych,
- młodzieży Vp = 1,4 [m/s] (84,0 m/min.) na przejściach przy szkołach średnich i uczelniach.

Minimalne odległości widoczności LWP obliczono korzystając ze wzoru (9.1) [124]:

$$LWP \geq \frac{VD}{3,6} \cdot \left(\frac{LPP}{VP} + TRP \right) \quad (9.1)$$

gdzie:

LWP - odległość widoczności pojazdu przez pieszego oczekującego na wejście na jezdnię na sugerowanym przejściu dla pieszych [m],

VDv – prędkość pojazdów na odcinku dojazdowym ulicy do miejsca przekraczania jezdni przez pieszego [km/h],

LPP – długość drogi pieszego składająca się z długość przejścia sugerowanego dla pieszych LP plus szerokości opasek bezpieczeństwa pieszego oczekującego na chodniku i wchodzącego bezpiecznie na chodnik po drugiej stronie przejścia OP (2 x 1,0) [m],

VP – prędkość pieszego [m/s],

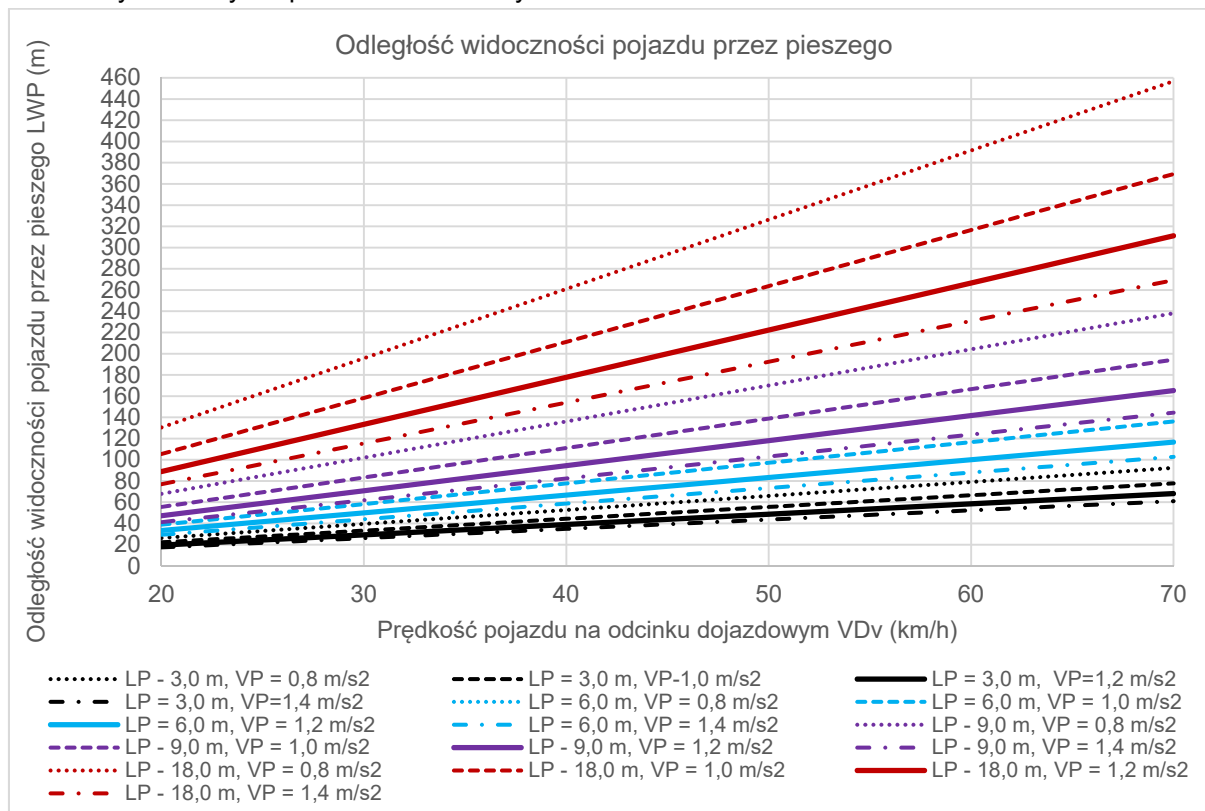
TRP – czas reakcji na wejście pieszego na przejście (s).

Do obliczeń przyjęto:

- prędkość pojazdów na dojeździe do przejścia VDv = 20 – 70 [km/h] (w przedziałach, co 10 km/h), na podstawie wyników badań przedstawionych w rozdziale 5.6., zgodnie z tab.5,
- szerokość jezdni (długość przejścia) LP = 3,0 – 18,0 [m] (w przedziałach, co 3,0 i 9,0 m),

- 3) długość drogi pieszego LPP = 5,0 – 20,0 [m]
- 4) prędkość pieszego VP = 0,8 – 1,4 [m/s] (w przedziałach co 0,2 m/s), na podstawie wyników badań przedstawionych w rozdziale 5.5,
- 5) czas reakcji na wejście pieszego na przejście, TRP = 1,0 [s] zgodnie z rozdziałem 5.4.5.

Uzyskane wyniki przedstawiono na rys.9.1.



Rys.9.1 Wykres zależności odległości widoczności pojazdu przez pieszego LWP na przejściu sugerowanym od prędkości pojazdów VDv na odcinku dojazdowym, szerokości jezdni LPP i prędkości pieszego na przejściu VP.

Wyniki obliczeń wskazują istotny wpływ na odległość widoczności LWP: szerokości jezdni (długości przejścia) L_{PP} , prędkości pieszego VP i prędkości pojazdów VDv na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych. Biorąc pod uwagę prędkość przemieszczania się osób z niepełnosprawnościami oraz dzieci i osób starszych można zauważyć, że odległości dobrej widoczności dla tych grup pieszych są znacznie większe od standardowych. Biorąc pod uwagę, że większość sugerowanych przejść dla pieszych w miastach znajduje się w obszarach zamieszkania lub w strefie 30 km/h, to odległość widoczności LWP na ulicy o szerokości 6,0 [m] wyniesie, w zależności od prędkości pieszego, od 40,0 – 60,0 [m] z prawej strony do 55,0 – 90,0 [m] z lewej strony przejścia. Natomiast gorsza sytuacja będzie występować na drogach zamiejskich, gdzie przy przejściu przez drogę z pobocznymi (LP = 9,0 m) i prędkości pojazdów na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych $VDv \geq 70,0$ [km/h] odległość widoczności LWP wyniesie, w zależności od prędkości pieszego, od 110,0 – 180,0 [m] z prawej strony do 170,0 – 290,0 [m] z lewej strony przejścia. Zapewnienie tak dużego obszaru dobrej widoczności może stanowić istotną przeszkodę przy wyznaczaniu sugerowanych przejść dla pieszych na drogach zamiejskich.

9.3. Metoda szacowania przepustowości pieszych i pojazdów w obszarze przejścia dla pieszych

9.3.1. Metoda szacowania wpływu podziału struktury kierunkowej

W wytycznych projektowania przejść dla pieszych [214] zaproponowano metodę szacowania przepustowości chodnika lub innego urządzenia dla pieszych dla pieszych według w zależności od przepustowości bazowej, szerokości chodnika, struktury kierunkowej i rodzaju terenu korzystając z wyników badań opisanych w rozdz. 5 i 7.

Zaproponowaną w wytycznych WR-D-41-1 zależność do szacowania przepustowości chodników zaadaptowano także do szacowania przepustowości przejścia dla pieszych bez sygnalizacji według wzoru (9.2).

$$C_{pbs} = C_{po} \cdot D_{pp} \quad (9.2)$$

Metoda ta może być stosowana w przypadku priorytetu dla pieszych na przejściu tj. bez wpływu pojazdów na zachowania pieszych. W tabl. 9.5 przedstawiono wartości liczbowe przepustowości bazowej C_{po} dla warunków wzorcowych ustalone na podstawie badań terenowych i symulacyjnych (rozdz. 5.6. i 7) dla dwóch przypadków struktury kierunkowej potoku pieszych. Zgodnie z zasadami przyjmowanymi w wytycznych obliczenia przepustowości innych krajów, wartości bazowe CPO zaokrąglono (tabl. 9.5), w celu lepszej percepcji przez użytkowników.

Tab.9.5 Przepustowość bazowa C_{po} przejścia dla pieszych [214].

Charakterystyka trasy dla pieszych	Struktura kierunkowa		Przepustowość bazowa	
	SKP [%]	WPK [-]	C_{po}	
			[P/h/m]	[P/min./m]
Chodnik - teren płaski, ruch jednokierunkowy	100/0	1,00	5400	90
Chodnik - teren płaski, ruch dwukierunkowy	50/50	0,50	3600	60

Biorąc pod uwagę wyniki badań i modele zależności fundamentalnej (rozdz. 7) zaproponowano poszerzenie możliwości uwzględniania zakresu struktury kierunkowej potoku pieszych WPK w szacowaniu przepustowości przejścia dla pieszych zarówno w jednym jak i w dwóch kierunkach. Przepustowość całkowitą przejścia dla pieszych $C_{pbs,c}$ uwzględniającą potok pieszych przemieszczający się w dwóch kierunkach szacuje się według wzoru (9.4):

$$C_{pbs,c} = C_{po} \cdot D_{pp} \cdot WSK_c \quad (9.4)$$

Przepustowość kierunkową przejścia dla pieszych $C_{pbs,k}$ uwzględniającą potok pieszych przemieszczający się w jednym kierunku w opozycji do kierunku przeciwnego, szacuje się według wzoru (9.5):

$$C_{pbs,k} = C_{po} \cdot D_{pp} \cdot WSK_k \quad (9.5)$$

gdzie:

C_{PBS} – przepustowość przejścia dla pieszych bez sygnalizacji [os./h/m], [os./min/m],

C_{po} – przepustowość bazowa przejścia dla pieszych bez sygnalizacji [os./h/m], [os./min/m], ustalona na podstawie badań opisanych w rozdz. 7; wartość bazową przyjmuje się na podstawie tabl.9.5 dla terenu płaskiego w zależności od struktury kierunkowej potoku pieszych SKP,

DPP – szerokość przejścia dla pieszych [m],

SKP – struktura kierunkowa potoku pieszych, stanowiąca procentowy podział natężenia ruchu pieszych na poszczególne kierunki [%],

WKP – współczynnik podziału kierunkowego potoku pieszych na przejściu dla pieszych [-],

WSK_c - współczynnik wpływu podziału struktury kierunkowej potoku WKP na przepustowość całkowitą przejścia dla pieszych [-].

WSK_k - współczynnik wpływu podziału struktury kierunkowej potoku WPK na przepustowość kierunkową (jednego kierunku ruchu pieszych), przy uwzględnieniu oporu ruchu pieszych przemieszczających się w przeciwnym kierunku [-].

Wskaźniki WSK zestawiono w tab.9.6. Opracowano je na podstawie wyników badań przedstawionych w rozdziale 7, uwzględniając wpływy struktury kierunkowej WPK na przepustowość przejścia dla pieszych, uwzględniono także korekty wynikające z zaokrąglenia wartości liczbowych przepustowości bazowej. Dlatego wartości liczbowe wskaźników odbiegają nieco od wyników badań i analiz przedstawionych w rozdziale 7.

Tab.9.6 Współczynnik wpływu podziału struktury kierunkowej potoku na przepustowość przekroju lub przepustowość

Struktura kierunkowa potoku pieszych		Współczynnik wpływu struktury kierunkowej potoku pieszych na przepustowość przejścia	
SKP [%]	WPK [-]	Na przepustowość całkowitą (w dwóch kierunkach) WSK _c [-]	Na przepustowość kierunkową (w jednym kierunku) WSK _k [-]
0/100	0,00	1,00	0,140
10/90	0,10	0,883	0,192
20/80	0,20	0,793	0,218
30/70	0,30	0,727	0,252
40/60	0,40	0,685	0,295
50/50	0,50	0,666	0,333
60/40	0,60	0,685	0,358
70/30	0,70	0,727	0,405
80/20	0,80	0,793	0,520
90/10	0,90	0,883	0,720
100/0	1,00	1,000	1,000

9.3.2. Metoda szacowania wpływ ruchu pojazdów na przepustowość przejścia

W rzeczywistych warunkach przepustowość przejścia dla pieszych z priorytetem dla pojazdów (np. przejścia sugerowanego) zależy natężenia ruchu pojazdów, liczby pasów ruchu (długości przejścia), liczby kierunków ruchu pojazdów na jezdni. Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych badań (rozdziale 8) proponuje się metodę szacowania przepustowości tego rodzaju przejść o szerokości $D_{pp} = 4,0$ m, za pomocą wzoru (9.6).

$$C_p = 1000 \cdot (A - B \cdot \ln(Qv)) \quad (9.6)$$

gdzie:

C_p – przepustowość przejścia dla pieszych z priorytetem dla pojazdów [os./h],

Qv – natężenie ruchu pojazdów [poj./h],

A, B – współczynniki równania, wartości zestawione w Tab.9, ustalone na podstawie analiz przedstawionych w rozdziale 8.

Tab.9.7 Współczynniki równania służące do szacowania przepustowości przejścia dla pieszych z priorytetem dla pojazdów

Jezdnia	Liczba pasów ruchu	Współczynniki równania	
		A	B
Dwukierunkowa	2 (1x2)	19,43	2,44
	4 (1x4)	12,55	1,33
Jednokierunkowa	2 (2x2)	25,93	2,59
	3 (2x3)	11,34	1,13

Wartości liczbowe przepustowości przejść dla pieszych C_p o szerokości $C_{pp} = 4,0$ m, dla analizowanych przekrojów poprzecznych, w zależności od natężenia ruchu pojazdów C_v (w zakresie od 0 – 3000 poj./h) zestawiono w tab.9..

Tab.9.8 Przepustowość przejścia dla pieszych o szerokości 4 [m]

Natężenie ruchu pojazdów Q_v [poj./ h]	Przepustowość przejścia dla pieszych o szerokości 4 [m] C_{ppo} [P/h]			
	Przekrój jezdni			
	1x2 (dwa kierunki ruchu)	1x4 (dwa kierunki ruchu)	2 (2x2) (jeden kierunek ruchu)	3 (2x3) (jeden kierunek ruchu)
0	11500	12500	11500	11300
100	8250	6400	11000	5600
200	6550	5500	8700	4700
400	4800	4500	6400	3800
600	3800	4000	5050	3300
800	3100	3600	4100	2900
1000	2500	3300	3350	2700
1200	2050	3100	2750	2500
1400	1700	2900	2250	2200
1600	1350	2700	1800	2100
1800	1050	2500	1400	1900
2000	800	2400	1050	1800
2500	300	2100	400	1500
3000	60	1800	70	1300

9.3.3. Metoda szacowania wpływ ruchu pojazdów na przepustowość jezdni

W przypadku priorytetu dla pieszych przepustowość jezdni ulicy w obszarze przejścia zależy od przekroju poprzecznego jezdni (liczba pasów ruchu) i natężenia ruchu pieszych. Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych badań (rozdz. 8) proponuje się metodę szacowania przepustowości jezdni w analizowanym obszarze za pomocą wzoru (9.6).

$$C_v = 1000 \cdot A \cdot \exp(-0,001 \cdot Q_p) \quad (9.7)$$

gdzie:

C_v – przepustowość jezdni w obszarze przejścia dla pieszych z priorytetem dla pieszych [poj./h],

Q_p – natężenie ruchu pieszych [p/h],

A – współczynniki równania, wartości zestawione w tab.9., ustalone na podstawie analiz przedstawionych w rozdziale 8.

Tab.9.9 Współczynniki równania służące do szacowania przepustowości jezdni ulicy w obszarze przejścia z priorytetem dla pieszych

Jezdnia	Liczba pasów ruchu	Współczynnik równania
		A
Dwukierunkowa	2 (1x2)	3,00
	4 (1x4)	6,14
Jednokierunkowa	2 (2x2)	3,60
	3 (2x3)	4,89

Tab.9.10 Przepustowość jezdni drogi

Natężenie ruchu pieszych Q_p [P / h]	Przepustowość jezdni drogi C_v [poj./h]			
	Liczba pasów ruchu na jezdni			
	2 (1x2)	4 (1x4)	2 (2x2)	3 (2x3)
0	3000	6100	3600	5200
100	2720	5550	3260	4530
200	2460	5000	2950	3990
400	2011	4100	2430	3250
600	1650	3350	1980	2670

800	1350	2750	1620	2190
1000	1100	2250	1320	1790
1200	900	1850	1070	1460
1400	740	1500	870	1200
1600	610	1250	730	980
1800	500	1000	600	800
2000	410	830	490	660
2500	250	500	300	400
3000	150	300	180	250
3500	90	180	110	150
4000	55	110	70	90

9.4. Metoda oceny warunków ruchu na przejściach dla pieszych

Do oceny warunków ruchu na przejściach dla pieszych stosuje się różne miary: straty czasu pieszych, straty czasu pojazdów, gęstość pieszych, stopień wykorzystania przepustowości przejścia dla pieszych. Ze względu na ograniczony zakres danych dotyczących strat czasu, do oceny warunków ruchu na przejściach proponuje się przyjąć stopień wykorzystania przepustowości przejścia dla pieszych jako miarę warunków ruchu. Stopień wykorzystania przepustowości X_p oblicza się na podstawie zależności (9.8). Klasę warunków ruchu pieszego PSR (PLOS) określa się przyrównując otrzymane wyniki X_p do wartości granicznych $X_{p,gr}$. W X_p – stopień wykorzystania przepustowości przejścia dla pieszych [-],

$X_{p,gr}$ – graniczne wartości stopnia wykorzystania przepustowości przejścia dla pieszych, dla poszczególnych klas warunków ruchu [-],

Q_p – natężenie ruchu pieszych [P/h], [P/min.],

$C_{p,kr}$ – natężenie krytyczne potoku pieszych [P/h/m],

C_p – przepustowość przejścia dla pieszych [P/ h/, P/min/].

W tab.9.11 zestawiono wartości graniczne natężeń krytycznych dla potoku pieszych w warunkach wzorcowych $Q_{p,kr}$ oraz wartości graniczne $X_{p,gr}$ dla poszczególnych klas warunków ruchu.

$$X_p = \frac{Q_p}{C_{pp}} \quad (9.6)$$

gdzie:

X_p – stopień wykorzystania przepustowości przejścia dla pieszych [-],

$X_{p,gr}$ – graniczne wartości stopnia wykorzystania przepustowości przejścia dla pieszych, dla poszczególnych klas warunków ruchu [-],

Q_p – natężenie ruchu pieszych [P/h], [P/min.],

$C_{p,kr}$ – natężenie krytyczne potoku pieszych [P/h/m],

C_p – przepustowość przejścia dla pieszych [P/ h/, P/min/].

Tab.9.11 Stopień wykorzystania przepustowości przejścia dla pieszych X_p [30]

Warunki ruchu pieszego		Natężenie krytyczne potoku pieszych dla warunków wzorcowych $Q_{p,kr}$ [P/h/m]	Stopień wykorzystania przepustowości na przejściach dla pieszych $X_{p,gr}$ [-]
Klasa	PSR (PLOS)		
Bardzo dobre	A	≤ 1200	$< 0,22$
Dobre	B	≤ 1800	0,22 - 0,33
Średnie	C	≤ 2400	0,33 - 0,44
Umiarkowane	D	≤ 3600	0,44 - 0,66
Złe	E	> 3600	$> 0,66$
Bardzo złe	F	zmiennie	zmiennie

Natomiast w tab.9. zaproponowano klasy dopuszczalności warunków ruchu pieszego, które zostały wykonane na potrzeby wytycznych projektowania infrastruktury dla pieszych. Przy czym jako dopuszczalną klasę warunków ruchu zaleca się: $\leq C$ (na przejściach dla pieszych bezkolizyjnych), natomiast $\leq D$ (na przejściach dla pieszych kolizyjnych).

Tab.9.12 Klasy dopuszczalności warunków ruchu pieszego

Klasa dopuszczalności warunków ruchu pieszego		Przejście dla pieszych
Zalecane	Klasa warunków ruchu PSR	≤ C (przejścia dla pieszych bezkolizyjne)
		≤ D (przejścia dla pieszych kolizyjne)
Tolerowane	Klasa warunków ruchu PSR	D
	Stopień wykorzystania przepustowości Xp	D
Niedopuszczalne	Klasa warunków ruchu PSR	E, F
	Stopień wykorzystania przepustowości Xp	E, F

9.5. Koncepcja wielokryterialnej metody wyboru rodzaju przejścia

9.5.1. Wprowadzenie

Wybór określonego wariantu rozwiązania przejścia dla pieszych jest procesem wiążącym się z wymiernymi konsekwencjami finansowymi, społecznymi, środowiskowymi, funkcjonalnymi i technicznymi. Opracowanie metody wyboru rozwiązania wymaga, zatem wsparcia naukowego. Wcześniej często stosowano metodę kosztów i korzyści, ale poszerzenie zakresu stosowania zasad zrównoważonego rozwoju wymaga uwzględnienia większej liczby kryteriów i zastosowania metody wielokryterialnej do wyboru rozwiązania. Celem analiz wielokryterialnych jest wybór rozwiązania optymalnego z punktu widzenia celu inwestycji, pod kątem różnych kryteriów o charakterze ilościowym oraz jakościowym. Pozwala to na praktyczne uwzględnienie czynników związanych zarówno z technicznymi parametrami inwestycji, kosztami, jej oddziaływaniem na otoczenie czy możliwością uzyskania poprawy sprawności czy też warunków ruchu. Narzuca to jednak konieczność rzetelnego opracowania zbioru kryteriów reprezentujących cele realizacji zadania inwestycyjnego oraz ustalenia ich znaczenia w procesie decyzyjnym tak, aby uzyskać wiarygodne i powtarzalne wyniki.

Podejmowanie decyzji o wyborze rozwiązania polega na wyborze jego wariantu ze zbioru przygotowanych wariantów dopuszczalnych, których realizacja jest realna tzn. nie występuje ich dyskwalifikacja ze względu na np. budżet inwestora, lokalizację wariantu, która jest dopuszczalna ze względu na obowiązujące przepisy prawne, technologię wykonania itp. W tym celu konieczna jest optymalizacja wyboru, do celów, której służyć może analiza wielokryterialna, a jej wynikiem powinno być podjęcie decyzji optymalnej dla założonych warunków brzegowych.

W celu optymalnego wyboru wariantu rozwiązania inwestycyjnego przeprowadza się analizę wszystkich wariantów dopuszczalnych pod względem stopnia realizacji celu, który rozbija się na cele częściowe, w zależności od wymagań. Cele częściowe dobiera się w ten sposób, aby reprezentowały różne aspekty funkcjonowania rozwiązania i stanowiły jednocześnie kryteria oceny poszczególnych wariantów. Każdemu wariantowi, zatem przypisuje się zestaw ocen reprezentujących poszczególne kryteria. Znaczenie poszczególnych kryteriów ustala się za pomocą wag, które są kluczowymi elementami stosowania analizy wielokryterialnej, a ich właściwy dobór może przesądzić o wyborze wariantu rozwiązania. Najczęściej do oceny wariantów przyjmuje się kryteria mierzalne opisujące stopień realizacji poszczególnych celów w każdym z analizowanych wariantów. W wyniku przeprowadzenia analizy wielokryterialnej warianty rozwiązania przejścia dla pieszych powinny być uszeregowane na przykład według liczby przyznanych punktów.

9.5.2. Założenia metody i procedura oceny rozwiązań dla pieszych

W wytycznych planowania tras dla pieszych WR-D-41-1 [214] przedstawiono ogólne zasady doboru infrastruktury punktowej na drogach zamiejskich i ulicach, które składają się z trzech elementów:

1. Zebranie i przygotowanie niezbędnych danych,
2. Wyboru zbioru dopuszczalnych rozwiązań (wariantów rozwiązania),
3. Wybór rekomendowanego rozwiązania.

Nie określono metody wyboru rekomendowanego rozwiązania, dlatego w podsumowaniu niniejszej pracy przedstawiono koncepcję wyboru rozwiązania przejścia dla pieszych.

Przyjęto następujące założenia do proponowanej metody:

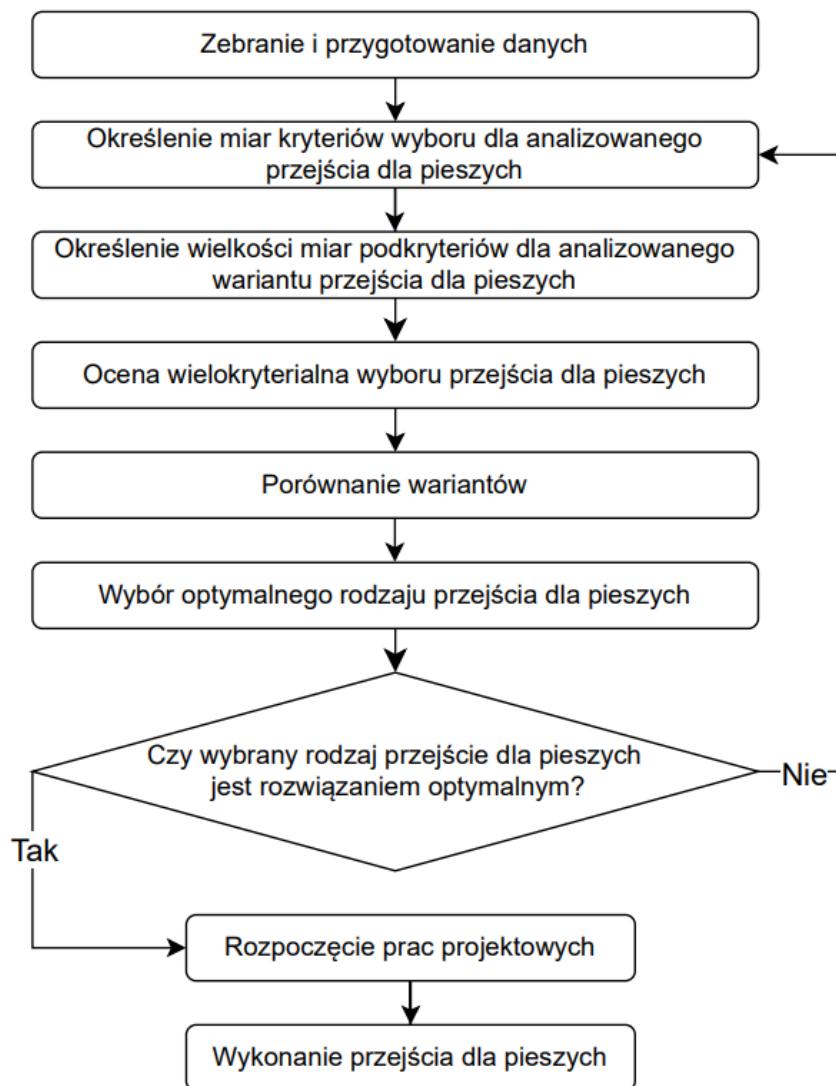
1. Metoda powinna umożliwiać wybór rozwiązań dla pieszych zlokalizowanych na ulicach o prędkości dopuszczalnej do 50 km/h, według jednolitych zasad doboru typu przejścia dla

pieszych dla nowej inwestycji lub możliwość weryfikacji poprawności zastosowanego rodzaju przejścia dla pieszych w przypadku istniejącego przejścia;

2. Metoda powinna umożliwiać osiągnięcie wysokiej, jakości projektów drogowych oraz dostarczenie narzędzi ułatwiających podejmowanie decyzji dotyczących wyboru rodzaju przejścia dla pieszych;
3. W metodzie nie uwzględniano wpływu samochodów ciężarowych.
4. Metoda umożliwia zintegrowaną ocenę poszczególnych wariantów, uwzględniającą przyjęte kryteria, w skali punktowej od 0 do 100.

Na rysunku 9.2 przedstawiono schemat procedury oceny i wyboru rozwiązań przejść dla pieszych w proponowanej metodzie wielokryterialnej. Procedura składa się z sześciu kroków.

Pierwszym krokiem przy wykonywaniu procedury jest zebranie i przygotowanie danych poprzez wizję lokalną w terenie, która dostarczy nam danych o otoczeniu ulicy, generatorach ruchu pieszego i kołowego, sąsiedztwie innych przejść dla pieszych, jeśli występują. Podczas wizji w terenie, należy zebrać dane o natężeniu ruchu pieszych i pojazdów. Jeżeli, zbieramy dane dla nowoprojektowanego przejścia dla pieszych, powyższe czynności wykonuje się w oparciu o mapy i projekty wraz z identyfikacją generatorów ruchu pieszego i kołowego w otoczeniu planowanej inwestycji oraz prognozy natężenia ruchu pieszego i kołowego. Dla nowoprojektowanego przejścia dla pieszych, prognozy i analiz ruchu wykonywane są metodą wskaźnikową [214] lub przy użyciu wielopoziomowego modelu ruchu [117],[116].



Rys.9.2 Diagram przepływu informacji w procesie koncepcyjnym metody przejścia dla pieszych w mieście

Podstawowymi danymi do prowadzenia procedury wyboru są:

- charakterystyki geometryczne i organizacji ruchu na przejściu dla pieszych i na ulicy (rodzaj przejścia, szerokość przejścia, liczba jezdni, klasa drogi i prędkość dopuszczalna),
- dane o ruchu: pieszych (natężenie, struktura, prędkość) i pojazdów (natężenie, struktura, prędkość),
- dane o sprawności funkcjonowania przejścia (przepustowość przejścia dla pieszych, przepustowość jezdni dla pojazdów),
- dane o bezpieczeństwie ruchu,
- dane o warunkach ruchu,
- dane o kosztach budowy i kosztach użytkowników przejścia.

Wybór dopuszczalnych wariantów rozwiązań przejścia dla pieszych zależy od potrzeb zgłaszanych przez użytkowników i inwestorów, uwarunkowań lokalnych i inwencji projektanta. W kolejnych krokach (opisanych w kolejnych punktach) należy dobrać kryteria, podkryteria i miary je opisujące. Następnie należy oszacować wielkości miar poszczególnych podkryteriów oraz przeprowadzić ocenę poszczególnych wariantów, który stanowić będzie podstawę wyboru najbardziej korzystnego wariantu rozwiązania przejścia dla pieszych. Po wybraniu najkorzystniejszego rodzaju przejścia dla pieszych można przystąpić do prac projektowych i wykonanie przejścia dla pieszych

9.5.3. Kryteria wyboru

W procedurze postępowania przy wyborze typu nowego lub modernizacji istniejącego przejścia dla pieszych zaproponowano metodę wielokryterialną. Metoda ta umożliwia ocenę analizowanego rozwiązania z punktu widzenia celów, jakie ma spełnić projektowane rozwiązanie przejścia dla pieszych. Każdy z przyjętych celów stanowi, kryterium oceny. Do oceny poszczególnych wariantów przejścia dla pieszych zaproponowano cztery grupy kryteriów (KG) i osiem podkryteriów (kryteriów cząstkowych - KC) i miar podkryteriów (X) obejmujących: bezpieczeństwo ruchu drogowego, sprawność przejścia, warunki ruchu i koszty budowy i koszty użytkowników przejść dla pieszych. W tab.9. zestawiono grupy kryteriów, podkryteria i miary podkryteriów proponowanych w metodzie wielokryterialnej wyboru rodzaju (rozwiązania) przejścia dla pieszych.

Tab.9.13 Zestawienie grup kryteriów, podkryteriów i miar podkryteriów proponowanych w metodzie wielokryterialnej wyboru rodzaju przejścia dla pieszych

Grupa kryteriów KG		Podkryteria (kryteria cząstkowe) KC		Miary podkryteriów X	
KG ₁	Bezpieczeństwo ruchu	KC ₁	Bezpieczeństwo ruchu na przejściu dla pieszych	LWP	Liczba ofiar śmiertelnych [ofiar/3 lata]
				RX	Poziom ryzyka, liczba punktów [pkt]
KG ₂	Sprawność przejścia	KC ₂	Przepustowość przejścia	CP	Przepustowość pieszych [os./h]
		KC ₃	Przepustowość jezdni	CV	Przepustowość pojazdów [poj./h]
KG ₃	Warunki ruchu	KC ₄	Warunki ruchu pieszych	PLOS	Klasa warunków ruchu pieszego [-]
		KC ₅	Warunki ruchu pojazdów	PSR (VLOS)	Klasa warunków ruchu kołowego [-]
KG ₄	Koszty	KC ₆	Koszty budowy przejścia	KB	Koszty budowy [mln zł]
		KC ₇	Koszty użytkowników przejścia	KU	Koszty użytkowników [mln zł/rok]

Miary poszczególnych podkryteriów ustala się następująco:

Bezpieczeństwo ruchu. Przyjęto dwie miary stosowane wymiennie:

LWP - liczbę ofiar śmiertelnych wypadków na przejściach dla pieszych, stosowaną dla istniejących przejść dla pieszych, w przypadku, gdy dostępne są dane o wypadkach drogowych na przejściu, ustalone zgodnie z zasadami przedstawionymi w WR-D-41-1,

RX - liczbę punktów uzyskanych w analizie ryzyka przeprowadzonej dla analizowanego wariantu przejścia dla pieszych zgodnie z zasadami przedstawionymi w WR-D-41-1.

Sprawność przejścia. Przyjęto dwie miary stosowane równolegle:

CP - przepustowość przejścia dla pieszych oszacowana dla każdego analizowanego wariantu przejścia dla pieszych zgodnie z zasadami przedstawionymi w rozdz. 8 niniejszej pracy oraz w WR-D-41-1 [xx],
CV - przepustowość jezdni dla pojazdów oszacowana dla każdego analizowanego wariantu przejścia dla pieszych zgodnie z zasadami przedstawionymi w rozdz. 8 niniejszej pracy oraz w WR-D-41-1 [xx].

Warunki ruchu na przejściu. Przyjęto dwie miary stosowane równolegle:

PLOS - poziom swobody ruchu pieszego (w zakresie od A = 6 do F = 1) , określony dla każdego analizowanego wariantu przejścia dla pieszych zgodnie z zasadami przedstawionymi w rozdz. 8 niniejszej pracy oraz w WR-D-41-1 [214].

PSR (VLOS) - poziom swobody ruchu pojazdów (w zakresie od A = 6 do F = 1) , określony dla każdego analizowanego wariantu przejścia dla pieszych zgodnie z zasadami przedstawionymi w rozdz. 8 niniejszej pracy oraz w WR-D-41-1 [214].

Koszty przejścia. Przyjęto dwie miary stosowane równolegle:

KB - koszty budowy przejścia dla pieszych oszacowana indywidualnie dla każdego analizowanego wariantu przejścia dla pieszych,

KU - koszty użytkowników (pieszych i pojazdów) przejścia dla pieszych oszacowana indywidualnie dla każdego analizowanego wariantu przejścia dla pieszych.

9.5.4. Ocena i wybór wariantu rozwiązania

Każdy z przyjętych wariantów jest oceniany oddzielenie na podstawie przyjętych podkryteriów. Wartość każdej miary jest normalizowana według zasad przedstawionych wzorami (9.9) i (9.10).

$$PX_{i,k} = \frac{100 \cdot X_{i,k}}{X_{max,k}} \quad (9.9)$$

lub

$$PX_{i,k} = \frac{100 \cdot (X_{max,k} - X_k)}{X_{max,k} - X_{min,k}} \quad (9.10)$$

Następnie przeprowadza się ocenę zintegrowaną każdego wariantu na podstawie ważonej sumy punktów z każdego kryterium według wzoru (9.11).

$$SP_i = \sum_{j=1}^m WK_{j,k} \cdot PX_i \quad (9.11)$$

gdzie:

$$WK_{j,k} = WKG_j \cdot WKC_k \quad (9.12)$$

przy czym:

$$\sum_{k=1}^4 WKG_k = 1,0 \quad (9.13)$$

$$WKC_1 = WKC_2 + WKC_3 = WKC_4 + WKC_5 = WKC_6 + WKC_7 = 1,0 \quad (9.14)$$

gdzie:

SP_i – suma ważona unormowanej oceny punktowej wariantu i [pkt], w zakresie od 0 do 100,

PX_{i,j} – unormowana liczba punktów cząstkowych przypisanych dla miary X w podkryterium j, w wariantcie i [pkt], w zakresie od 0 do 100,

WK_{j,k} – współczynnik wagowy dla podkryterium k, w grupie kryteriów j,

WKG_j – współczynnik wagowy dla grupy kryteriów j,

WKC_k – współczynnik wagowy dla podkryterium k,

X_{i,k} – wartość liczbowa miary reprezentującej podkryterium k, w wariantcie i,

X_{min,k} – minimalna wartość liczbowa miary reprezentującej podkryterium k,

X_{max,k} – maksymalna wartość liczbowa miary reprezentującej podkryterium k.

Proponowane wagi dla grup kryteriów i poszczególnych podkryteriów przedstawiono w tab.9. Wartości wag WKG dla grup kryteriów ustalono na podstawie badań ankietowych przedstawionych w rozdz. 5. Natomiast wagi dla podkryteriów WKC zaproponowano na podstawie analizy literatury i doświadczeń własnych. Wzorem innych metod w ważeniu podkryteriów zastosowano trzy podejścia:

- 1) waga $WKC_{k,1}$ – uwzględniająca priorytety dla pieszych;
- 2) waga $WKC_{k,2}$ – uwzględniająca równo pieszych i pojazdy;
- 3) waga $WKC_{k,3}$ – uwzględniająca priorytety dla pojazdów.

Uzyskaną sumę ważoną punktów SP_i dla każdego wariantu rozwiązania przejścia dla pieszych, należy przyjąć, jako podstawę oceny wariantów rozwiązania. Oceniane warianty należy uszeregować w kolejności od największej do najmniejszej liczby punktów.

Za najkorzystniejszy wariant rozwiązania przejścia dla pieszych należy uznać wariant o największej ważonej sumie punktów SP_{max} tj. najlepiej spełniająca wszystkie analizowane kryteria oceny.

Tab.9.14 Wartość wagi kryterium i podkryterium

Kryteria wyboru rozwiązania				Podkryteria					
Symbol	Nazwa	Waga grupy kryteriów (-)		Symbol	Nazwa	WKCk	Waga podkryteriów		
							Wariant ważności podkryteriów		
							WKCk,1 [-]	WKCk,2 [-]	WKCk,3 [-]
KB	Bezpieczeństwo ruchu drogowego	WKG1	0,28	KB.1	liczba wypadków z pieszymi	WKC1	1,00	1,00	1,00
				KB.2	ryzyko wypadków	WKC1	1,00	1,00	1,00
KS	Sprawność	WKG2	0,24	KS.1	przepustowość drogi	WKC2	0,25	0,50	0,75
				KS.2	przepustowość przejścia dla pieszych	WKC3	0,75	0,50	0,25
KW	Warunki ruchu pieszego	WKG3	0,24	KW.1	warunki ruchu pojazdów VLOS	WKC4	0,25	0,50	0,75
				KW.2	warunki ruchu pieszych PLOS	WKC5	0,75	0,50	0,25
KK	Koszty przejścia dla pieszych	WKG4	0,24	KK.1	koszty budowy	WKC6	0,50	0,50	0,50
				KK.2	koszty uczestników	WKC7	0,50	0,50	0,50

10. PODSUMOWANIE PRACY

10.1. Wnioski

Do dobrego planowania, projektowania i utrzymania urządzeń infrastruktury dla pieszych niezbędna jest wiedza na temat przepływu potoków pieszych, metod oceny warunków i komfortu przemieszczania się pieszych oraz oceny sprawności i skuteczności funkcjonowania rozwiązań urządzeń infrastruktury dla pieszych. Badania przepływu potoków pieszych rozpoczęły w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku i zaowocowały wieloma modelami zachowań pieszych w tym modelem zależności fundamentalnej pomiędzy parametrami ruchu pieszego QP-VP-DP opracowanym przez Fruina [121],[65] i rozwijanym przez wielu innych badaczy [163],[200],[217], [232], [227]. Jednakże wiedza na temat przepływu potoków pieszych jest nadal niewystarczająca i ustępuje wiedzy na temat innych rodzajów transportu. Zainteresowanie modelowaniem przepływu potoków pieszych obejmuje systemy transportowe, wydarzenia sportowe, miejsca kultu, demonstracje polityczne, urządzenia ewakuacyjne, które różnią się rodzajem obiektu, charakterystyką i zachowaniami uczestników, ale mają także wspólne cechy, gdyż dotyczą pieszego. W ostatnich latach wraz z rozwojem zainteresowania zagadnieniami Zrównoważonego Rozwoju i Nowego Urbanizmu wzrosło zainteresowanie problematyką zachowań pieszych, ruchu pieszego oraz funkcjonowaniem urządzeń dla pieszych. W tym czasie w Polsce w badaniach naukowych niewiele poświęcono uwagi pieszemu użytkownikowi ruchu drogowego. Ożywienie tym tematem nastąpiło wraz z pracami badawczymi prowadzonymi przez Politechnikę Warszawską [167], [165], [171], Instytut Transportu Samochodowego [41], Politechnikę Krakowską [24] i Politechnikę Gdańską [94], [133] lecz prace były ukierunkowane głównie na badania zachowań pieszych i kierowców w obszarze przejść dla pieszych oraz zagadnienia bezpieczeństwa ruchu pieszego na przejściach. Nie prowadzono prac badawczych dotyczących makroskopowych modeli opisujących zależności pomiędzy parametrami ruchu i sformułowania fundamentalnej zależności w ruchu pieszym dla warunków polskich. Dopiero zapotrzebowanie zgłoszone w 2016 roku przez Ministerstwo Infrastruktury na opracowanie projektu wytycznych projektowania infrastruktury dla pieszych [66],[68] wywołało potrzebę prowadzenia prac badawczych związanych z problematyką funkcjonowania urządzeń infrastruktury dla pieszych. Dlatego celem głównym rozprawy doktorskiej była identyfikacja najbardziej istotnych czynników wpływających na funkcjonowanie przejść dla pieszych oraz opracowanie modeli matematycznych zależności fundamentalnej między podstawowymi parametrami ruchu na przejściach dla pieszych w obszarze miejskim na poziomie makroskopowym.

Na podstawie przeprowadzonych badań ankietowych, terenowych i symulacyjnych oraz prac analitycznych i wyników modelowania sformułowano następujące wnioski:

1. Wiele ośrodków decyzyjnych (rządowych i samorządowych) oraz planiści, projektanci oraz różne grupy społeczne dostrzegły, że ruch pieszy jest podstawowym i zarazem ważnym sposobem przemieszczania się, będąc ważnym ogniwem w uzyskaniu bardziej ekologicznego i zdrowszego środowiska, w którym żyją mieszkańcy miast.
2. Na przestrzeni ostatnich lat, rozwój technologii i narzędzi rozwinął sposób gromadzenia informacji z badań terenowych, która pozytywnie wpłynęła na dokładność analizy zgromadzonych danych. Celem poszerzenia zakresu analiz, możliwe stało się wykorzystywanie narzędzi do mikrosymulacji ruchu bazujących na wynikach z badań terenowych.
3. Przeprowadzono serię badań ankietowych dotyczących zachowań użytkowników przejść dla pieszych oraz badań terenowych (na przejściach dla pieszych oraz zwodzonej kładce dla pieszych) i symulacyjnych na wybranych przejściach dla pieszych, których wyniki umożliwiły opisanie wybranych charakterystyk ruchu pieszego: prędkości, luk czasowych, strat czasu, a także dostarczenie niezbędnych danych do prowadzenia modelowania wybranych charakterystyk ruchu (co stanowiło realizację 1 celu naukowego pracy).
4. Opracowano matematyczne modele zależności fundamentalnej pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu potoku pieszych QP-VP-DP na wybranych przejściach dla pieszych w miastach w Polsce. Zaproponowano i zbudowano modele matematyczne tej zależności charakteryzujące się, najlepszym dopasowaniem rozkładu do danych z pomiarów terenowych i symulacji numerycznych oraz duże podobieństwo do modeli opracowanych przez Fruina i innych badawczy

- [121],[163],[200],[217],[227]. Opracowano modele zależności fundamentalnej dla jednego i dla dwóch kierunków ruchu w potoku pieszych (co stanowiło realizację 2 celu naukowego rozprawy).
5. Opracowane modele wykorzystano do badania zależności pomiędzy parametrami ruchu oraz do analizy wpływu wybranych czynników na przepustowość i warunki ruchu na przejściach dla pieszych (co stanowiło realizację 3 celu naukowego rozprawy). W trakcie realizacji procesu badawczego udowodniono, że:
 - występuje ścisła zależność pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu pieszych opisana zależnością fundamentalną QP-VP-DP umożliwiającą łatwe określenie wartości liczbowych brakujących parametrów w przypadku ograniczonych danych pomiarowych,
 - na przepustowość przejścia dla pieszych istotnie wpływają: rodzaj przejścia (a w tym stopień priorytetów dla pieszych na przejściu), natężenie ruchu pieszego i struktura kierunkowa potoku pieszych w przypadku przejść z priorytetem dla pieszych, a natężenie ruchu pojazdów i długość przejścia w przypadku przejścia z priorytetem dla pojazdów;
 - na przepustowość jezdni położonej w obszarze przejścia dla pieszych wpływa natężenie ruchu pieszych i przekrój poprzeczny ulicy (liczba pasów ruchu) w przypadku przejścia z priorytetem dla pieszych.
 6. Przedstawiona rozprawa zawiera elementy oryginalności w skali Polski, a w szczególności:
 - zastosowanie narzędzi do mikro symulacji ruchu pieszego i kołowego w obszarze przejść dla pieszych;
 - opracowanie pierwszych w Polsce modeli matematycznych zależności fundamentalnej pomiędzy podstawowymi parametrami ruchu pieszego: natężeniem, prędkością i gęstością pieszych (QP-VP- DP), zarówno dla jednokierunkowego jak i dwukierunkowego potoku pieszych;
 - zastosowanie współczynnika podziału kierunkowego ruchu pieszych do metody szacowania przepustowości przejść dla pieszych;
 - opracowanie modeli matematycznych zależności natężenia ruchu pieszych od natężenia ruchu pojazdów na wybranych przekrojach ulic w przypadku przejść z priorytetem dla pojazdów,
 - opracowanie modeli matematycznych zależności natężenia ruchu pojazdów od natężenia ruchu pieszych na wybranych przekrojach ulic w przypadku przejść z priorytetem dla pieszych,
 - opracowanie koncepcja metody oceny wielokryterialnej oceny funkcjonowania przejścia dla pieszych.

10.2. Propozycje wykorzystania wyników badań

Zaproponowane w pracy rozwiązania dotyczące metodyki prowadzenia prac analitycznych i projektowych mogą być zastosowane w praktyce. Dotyczy to w szczególności:

1. Metodyki szacowania prędkości średniej grup pieszych w zależności od wieku i poziomu sprawności na podstawie badań terenowych oraz prędkości potoku pieszych w zależności od wielkości ruchu pieszego i struktury kierunkowej na przejściach dla pieszych z priorytetem dla pieszych na podstawie badań symulacyjnych, (co stanowi realizację 1 celu praktycznego rozprawy).
2. Metodyki szacowania przepustowości przejść z priorytetem dla pieszych z wykorzystaniem zaproponowanego modelu tab.7 zależności fundamentalnej pomiędzy parametrami ruchu pieszego QP-VP-DP dla jednokierunkowego ruchu pieszych oraz modelu tab.9. zależności fundamentalnej QP-VP-DP dla dwukierunkowego ruchu pieszych w potoku (co stanowi realizację 2 celu praktycznego rozprawy).
3. Wybranych parametrów ruchu pieszych (prędkość średnia, straty czasu) oraz przepustowości przejść dla pieszych rekomendowanych, jako materiał do wykorzystania w wytycznych projektowania infrastruktury dla pieszych WR-D-41-1, co stanowi realizację celu praktycznego nr 3 rozprawy).

10.3. Kierunki dalszych prac badawczych

Przedstawione w pracy wyniki badań ankietowych, terenowych i symulacyjnych, opracowane modele, koncepcje i metody nie wyczerpują zagadnień związanych z problematyką analizy i oceny funkcjonowania urządzeń dla ruchu pieszych. Biorąc pod uwagę aspekty funkcjonalne, społeczne, środowiskowe i ekonomiczne konieczne jest prowadzenie dalszych prac badawczych i rozwojowych. Najważniejszymi kierunkami dalszych prac, zdaniem autorki, niezbędnych do rozpoznania zagadnienia funkcjonowania i doboru urządzeń dla obsługi ruchu pieszych są:

1. Wprowadzenie do programu kompleksowych badań ruchu (w tym Generalnego Pomiaru Ruchu) pomiaru natężenia i struktury ruchu pieszego na drogach różnego typu, rodzaju przekroju poprzecznego, rodzaju zagospodarowania otoczenia drogi.
2. Wykonanie większej liczby badań terenowych na różnych rodzajach przekroju chodnika i przejścia dla pieszych, które pozwolą na pozyskanie większej liczby danych pozwalających na weryfikację lub adaptację opracowanej zależności fundamentalnej parametrów ruchu pieszego QP-VP-DP do różnych warunków geometrycznych, organizacyjnych i ruchowych, a także z uwzględnieniem takich obiektów jak wyjścia z imprez masowych, schody i pochylnie na przystankach transportu publicznego itp.
3. Pomiar i modelowanie zmienności parametrów ruchu pieszego w obszarze przejść dla pieszych w ciągu doby, w celu dostarczenia modeli zmian tych parametrów do zastosowań w modelach symulacyjnych funkcjonowania przejść dla pieszych.
4. Przeprowadzenie badań terenowych i symulacyjnych umożliwiających opracowanie metodyki oceny poziomu warunków ruchu (PLOS) infrastruktury liniowej (trasy i drogi dla pieszych) oraz infrastruktury punktowej (przejścia dla pieszych) w Polsce.
5. Wykonanie badań i opracowanie metody analizy ekonomicznej dla przejść dla pieszych z wykorzystaniem metodę analizy kosztów w cyklu życia LCC (Life Cycle Costing) urządzeń infrastruktury dla pieszych.
6. Kontynuowanie badań bezpieczeństwa ruchu pieszego oraz opracowanie katalogu skuteczności i efektywności rozwiązań dla pieszych.

11. WYKAZ LITERATURY

- [1] ALHAJYASEEN, WAEL K.M. ; NAKAMURA, HIDEKI: Quality of pedestrian flow and crosswalk width at signalized intersections. W: *IATSS Research* t. 34 (2010), Nr. 1, ss. 35–41
- [2] ALHAJYASEEN, WAEL K M ; NAKAMURA, HIDEKI: Estimating the minimum required width of signalized crosswalks considering bi-directional pedestrian flow and different age groups. W: *Asian Transport Studies ATS, Eastern Asia Society for Transportation Studies (EASTS)* t. 1 (2010), Nr. 2, ss. 181–198
- [3] ALHAJYASEEN, WAEL ; NAKAMURA, HIDEKI: Modeling and Analysis of Pedestrian Flows (2009), Nr. December, ss. 611–620
- [4] AMINI, ROJA EZZATI ; KATRAKAZAS, CHRISTOS ; ANTONIOU, CONSTANTINOS: Negotiation and decision-making for a pedestrian roadway crossing: A literature review. W: *Sustainability (Switzerland)* t. 11 (2019), Nr. 23, ss. 1–24
- [5] APPELYARD, BRUCE S: Pedestrian and bicycle planning (2018), Nr. I, ss. 366–374
- [6] AUTHORITY, NATIONAL ROADS: Pedestrian Crossing Specification and Guidance (2011), Nr. April
- [7] B, ANOUER BENNAJEH ; BECHIKH, SLIM ; SAID, LAMJED BEN ; AKNINE, SAMIR: *A fuzzy logic-based anticipation car-following model A Fuzzy Logic-Based Anticipation Car-Following Model* : Springer International Publishing, 2018 — ISBN 9783319998107
- [8] BAGESHWAR, VIBHOR ; GARRARD, WILIAM ; RAJAMANI, RAJESH: Model Predictive Control of Transitional Maneuvers for Adaptive Cruise Control Vehicles. W: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 53 (2004), ss. 1573–1585
- [9] BAŁ, JADWIGA ; BAŁ-GAJDA, DOROTA: Wybrane Czynniki Psychologiczne Wpływające na Czas Reakcji Kierowcy. W: *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* t. 5 (2013), Nr. 96, ss. 21–30
- [10] BAK, RADOSŁAW ; KIEC, MARIUSZ: Influence of midblock pedestrian crossings on urban street capacity. W: *Transportation Research Record* (2012), Nr. 2316, ss. 76–83
- [11] BANDO, MASAKO ; HASEBE, KATSUYA ; NAKANISHI, KEN ; NAKAYAMA, AKIHIRO: Analysis of optimal velocity model with explicit delay. W: *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics* t. 58 (1998), Nr. 5, ss. 5429–5435
- [12] BATTY, MICHAEL: PAPERS (2016), Nr. January 1993
- [13] BEGG, D. J. ; STEPHENSON, S. ; ALSOP, J. ; LANGLEY, J.: Impact of graduated driver licensing restrictions on crashes involving young drivers in New Zealand. W: *Injury Prevention* t. 7 (2001), Nr. 4, ss. 292–296
- [14] DE BEULE, MATTHIAS ; VAN DEN POEL, DIRK ; VAN DE WEGHE, NICO: An extended Huff-model for robustly benchmarking and predicting retail network performance. W: *Applied Geography* t. 46 (2014), ss. 80–89
- [15] BHATTACHARYYA, KINJAL ; KRISHNAN, K.N. ; MAITRA, BHARGAB: Analytical and microsimulation models for investigating vehicle class-specific gap acceptance behavior at urban intersections with nonlane-based traffic operations. W: *Asian Transport Studies* t. 6, Elsevier Ltd (2020), Nr. June, s. 100012
- [16] BIBRI, SIMON ELIAS ; KROGSTIE, JOHN ; KÄRRHOLM, MATTIAS: Compact city planning and development: Emerging practices and strategies for achieving the goals of sustainability. W: *Developments in the Built Environment* t. 4 (2020), Nr. June
- [17] BIURO ANALIZ DOKUMENTACJI I KORESPONDENCJI - KANCELARIA SENATU: Bezpieczeństwo pieszych w ruchu drogowym , a regulacje prawne . Przyczyny wypadków i możliwości poprawy sytuacji (2020)
- [18] BIURO ROZWOJU MIASTA GDAŃSKA: Gdańskie Badania Ruchu 2016 wraz z opracowaniem transportowego modelu symulacyjnego Gdańska t. 56 (2016), s. 5
- [19] BOMBAY, TECHNOLOGY: Critical Gap Analysis based on Pedestrian Behavior during Peak-Hour Traffic at Unprotected Midblock Crosswalks (2016), Nr. March
- [20] BRIAN L. BOWMAN, JOHN J.FRUIN, CHARLES V.ZEGEER: *Planning Design and Maintenance of Pedestrian Facilities* : Federal Highway Administration, 1989
- [21] BUCHMÜLLER, STEFAN; ; WEIDMANN, ULRICH: Parameters of pedestrians, pedestrian traffic and walking facilities. W: *ETH Zurich Research Collection* t. 132. Zurich (2007), Nr. July, ss. 12–19 — ISBN 8610828378018
- [22] BUCHMÜLLER, STEFAN: Pedestrian and Transport Facility Attributes as Input Parameters for Microscopic Pedestrian Simulations (2006)
- [23] BUDZISZEWSKI, TOMASZ ; MENDEL, TADEUSZ: Wyniki kompleksowych badań ruchu Gdańsk 2009 oraz przykład ich wykorzystania do szacowania funkcji oporu przestrzeni. W: *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie . Seria : Materiały Konferencyjne* (2009), s. 2009
- [24] BUDZYŃSKI, MARCIN ; GUMIŃSKA, LUCYNA ; JELIŃSKI, ŁUKASZ ; GOBIS, ANNA ; ZAREMBSKI, JACEK ;

- OSKARBSKA, IZABELA ; BYTNERI, DANIEL: Badania zachowań pieszych i relacji pieszy-kierowca wrzesień – grudzień 2018 r. (2015), Nr. 1
- [25] CAIRNEY, PETER: Pedestrian Safety in Australia. (1999), Nr. December
- [26] CESTAC, J ; DELHOMME, P: European road users' risk perception and mobility. W: *The SARTRE* t. 4 (2012), Nr. November 2012
- [27] CH2MHILL: *Review of Pedestrian Crossing Guidance LTN*, 2018
- [28] CHAKROBORTY, PARTHA ; KIKUCHI, SHINYA: Evaluation of the General Motors based car-following models and a proposed fuzzy inference model. W: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* t. 7 (1999), Nr. 4, ss. 209–235 — ISBN 1302831364
- [29] CHANDLER, ROBERT ; HERMAN, ROBERT ; ELLIOTT, MONTROLL.: Traffic Dynamics Studies in Car Following, *INFORMS* (1958), ss. 165–184
- [30] CHARACTERISTICS, TRANSIT ; TRANSIT, GENERAL ; CONCEPTS, CAPACITY ; CAPACITY, VEHICLE ; CAPACITY, PERSON ; POLICY, OPERATOR ; CHARACTERISTICS, PASSENGER DEMAND ; TIME, DWELL ; I IN.: *Highway Capacity Manual*, 2000 — ISBN 0309066816
- [31] CHENG, LIN ; YARLAGADDA, RAGAMAYI ; FOOKES, CLINTON ; YARLAGADDA, PRASAD K D V: A review of methodologies behaviours in modelling pedestrian group t. 1 (2014), Nr. 1, ss. 2–13
- [32] CHENG, SHUO ; LI, LIANG ; ZHAO, LIN: Multiple-Objective Adaptive Cruise Control System Integrated With DYC (2019)
- [33] CHODUR, JANUSZ ; GACA, STANISŁAW ; GONDEK, STANISŁAW ; KIEĆ, MARIUSZ ; OSTROWSKI, KRZYSZTOF ; WOJTAL, REMIGIUSZ ; WOŹNIAK, KRYSZTIAN: Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej (2004)
- [34] CHOJNICKI ZBIGNIEW: Grawitacji I Potencjału W Badaniach Przestrzenno-Ekonomicznych (1966)
- [35] CITY OF DENVER: Uncontrolled Pedestrian Crossing (2017), Nr. October
- [36] CLIFTON, KELLY J. ; SINGLETON, PATRICK A. ; MUHS, CHRISTOPHER D. ; SCHNEIDER, ROBERT J.: Representing pedestrian activity in travel demand models: Framework and application. W: *Journal of Transport Geography* t. 52, Elsevier Ltd (2016), ss. 111–122
- [37] COHEN, JONATHAN: Microscopic pedestrian simulation: an exploratory application of Agent-Based modelling (2018), Nr. November
- [38] COST: Country Report for Germany Compiled by Olaf Czogalla and Juergen Gerlach in the framework of t. 1987 (2007), Nr. 942
- [39] COWAN, R. J.: Adams' Formula Revised. W: *Traffic Engineering and Control* t. 25 (1984), Nr. 5, ss. 272–274
- [40] DAAMEN, WINNIE: *Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities*, 2004 — ISBN 9040725217
- [41] DĄBROWSKA-LORANC, MARIA ; SKOCZYŃSKI, PRZEMYSŁAW ; WACOWSKA-ŚLĘZAK, JUSTYNA ; ZIELIŃSKA, ANNA: Badania zachowań pieszych i relacji (2018)
- [42] DALLMEYER, JÖRG ; LATTNER, ANDREAS D ; SCHUMANN, RENE: Don ' t Go with the Ant Flow : Ant-inspired Traffic Routing in Urban Environments (2012)
- [43] DAVIDICH, MARIA ; KOŠTER, GERTA: Predicting pedestrian flow: A methodology and a proof of concept based on real-life data. W: *PLoS ONE* t. 8 (2013), Nr. 12
- [44] DHINGRA, S.L.: Quality of Service Beyond the Traditional Fundamental Diagram. W: „*Traffic Flow Theory Historical Research Perspectives*”, 75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory t. E-C149 (2011), Nr. June, ss. 86–106
- [45] DIAL, R B: A probabilistic multipath traffic assignment algorithm which obviates pathenumeration. W: *Transportation Research* t. 5 (1971), Nr. 2, ss. 83–111
- [46] DIAS, JULLIERME EMILIANO ALVES ; PEREIRA, GUILHERME AUGUSTO SILVA ; PALHARES, REINALDO MARTINEZ: Longitudinal Model Identification and Velocity Control of an Autonomous Car. W: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* t. 16 (2015), Nr. 2, ss. 776–786
- [47] DIVISION, TRANSPORTATION ; SAFETY, HIGHWAY ; HANOVER, PROGRAMS: Pedestrian Flow Modeling for Prototypical Maryland Cities (2004)
- [48] DOBREBADANIA.PL: *Pen-And-Paper personal interviews (PAPI)*,. . — <https://dobrebadania.pl/papi-ang-paper-and-pencil-interview/>
- [49] DRIDI, MOHAMED H.: Pedestrian Flow Simulation Validation and Verification Techniques. W: *Physics.Data-an* t. XXI (2014), Nr. 1, ss. 1–19
- [50] DRIDI, MOHAMED H.: Simulation of High Density Pedestrian Flow: Microscopic Model t. XXI (2015), Nr. 1, ss. 81–95
- [51] DUDA, JERZY ; ADAMCZYK, MAREK ; KIEŁTYKA, ZBIGNIEW: Instrukcja Oceny Stanu Nawierzchni Dróg Publicznych w Miastach (1999)
- [52] DURRANI, UMAIR ; LEE, CHRIS ; MAOH, HANNA: Calibrating the Wiedemann's vehicle-following model using mixed vehicle-pair interactions. W: *Transportation Research Part C: Emerging*

- Technologies* t. 67, Elsevier Ltd (2016), ss. 227–242
- [53] EBOLI, LAURA ; FORCINITI, CARMEN ; MAZZULLA, GABRIELLA ; BELLIZZI, MARIA GRAZIA: Establishing Performance Criteria for Evaluating Pedestrian Environments. W: *Sustainability (Switzerland)* t. 15 (2023), Nr. 4
- [54] ELVIK, RUNE ; HOYE, ALENA ; VAA, TRULS: *The Handbook of Road Safety Measures* : Bingley: Emerald Group Publishing, 2009
- [55] EPOMM: *epomm*. URL <http://www.epomm.eu>
- [56] EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE-GENERAL TRANSPORT AND ENERGY: *Speeding*, 2009
- [57] FACILITY, PEDESTRIAN ; BEST, DESIGN: Best practices for pedestrian master planning and design (2005)
- [58] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION: *Theory History and Implementation Snapshot by Model Type*. URL <http://ngsim.fhwa.dot.gov>
- [59] FENTON, BONNIE ; NASH, ANDY ; WEDDERBURN, MARTIN: Ruch pieszy, ruch rowerowy i korki uliczne (2018), Nr. 635998
- [60] FGSV: Empfehlungen für Fußgängerverkehrsanlagen (2002)
- [61] FHWA: Walkways, Sidewalks, and Public Spaces 13.1 (2008)
- [62] FHWA SAFETY PROGRAM: FHWA Safety Program Pedestrian Hybrid Beacon Guide-Recommendations and Case Study
- [63] FI, ISTVÁN ; KOVÁCS IGAZVÖLGYI, ZSUZSANNA: Travel time delay at pedestrian crossings based on microsimulations. W: *Periodica Polytechnica Civil Engineering* t. 58 (2014), Nr. 1, ss. 47–53
- [64] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN UND VERKEHRSWESEN: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. W: *Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Köln, 2002*. Köln (2002)
- [65] FRUIN, JOHN J.: Pedestrian planning and design (1970)
- [66] GACA, STANISŁAW ; GOBIS, ANNA ; GUMIŃSKA, LUCYNA ; JAMROZ, KAZIMIERZ ; MACKUN, TOMASZ ; SZMAGLIŃSKI, JACEK: *Wytyczne projektowania infrastruktury dla pieszych Część 3: Projektowanie przejść dla pieszych* : Ministerstwo Infrastruktury, Departament Dróg Publicznych ul. Chałubińskiego 4/6, 00-968 Warszawa, 2020
- [67] GACA, STANISŁAW ; KIEĆ, MARIUSZ: Metoda Pośredniej Oceny Bezpieczeństwa Pieszych Na Przejściach. W: *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture* t. 63 (2016), ss. 201–208
- [68] GACA, STANISŁAW ; OKRASZEWSKA, ROMANIKA ; BIRR, KRYSZTIAN ; BUDZYŃSKI, MARCIN ; GOBIS, ANNA ; JAMROZ, KAZIMIERZ ; MACKUN, TOMASZ ; MICHALSKI, LECH ; I IN.: Wytyczne projektowania infrastruktury dla pieszych. WRD-41-1: Wytyczne planowania tras dla pieszych. Projekt przygotowany na zlecenie Ministerstwa Infrastruktury (2020)
- [69] GACA, STANISŁAW ; SUCHORZEWSKI, WOJCIECH ; TRACZ, MARCIN: *Inżynieria ruchu drogowego*, 2014
- [70] GAO, YU ; RAKHA, HESHAM: Calibration and Comparison of the VISSIM and INTEGRATION Microscopic Traffic Simulation Models. Thesis submitted to the Virginia Polytechnic Institute and State University. W: *Fuel* (2008), Nr. January, ss. 1–67
- [71] GIPPS, P. G.: A behavioural car-following model for computer simulation. W: *Transportation Research Part B* t. 15 (1981), Nr. 2
- [72] GIPPS, P.G ; MARKSJO, B: A microsimulation model for pedestrian flows., *Mathematics and Computers in Simulation* (1985)
- [73] GOBIS, ANNA ; JAMROZ, KAZIMIERZ ; JELIŃSKI, ŁUKASZ: Application of the LifeRoSE Method in Functionality Evaluation of Road Safety Equipment. W: *Journal of KONBiN* t. 50 (2020), Nr. 3, ss. 43–65
- [74] GOVERNMENT OF AUSTRALIA: Metropolitan Adelaide Traffic Simulation and Assessment Model (MATSAM) Traffic Simulation Model Development Guidelines Aimsun Next (2019), Nr. February
- [75] GOVERNMENT OF WESTERN AUSTRALIA: Planning and designing for pedestrians: guidelines (2012), s. 221
- [76] GREENSHIELDS, B: A study of traffic capacity, Highway Research Board Proceedings. National Research Council (USA) (1935)
- [77] GROBPLANUNG ; PLANUM ZÜRICH ; ASTRA ; VSS: Grundlagen für den Fussverkehr (2011)
- [78] GRUNDY, CHRIS ; STEINBACH, REBECCA ; WILKINSON, PAUL ; GREEN, JUDITH: 20 mph zones and Road Safety in London A report to the London Road Safety Unit. W: *Transport for London* (2008)
- [79] GUMIŃSKA, LUCYNA ; WACHNICKA, JOANNA ; WIERZBICKA, JULIA: Analiza zachowań użytkowników dróg na przejściach dla pieszych na podstawie badań terenowych (2012), Nr. MARCH 2014, ss. 2285–2293
- [80] HASSAN, SITI ASMAH: Improving Pedestrian Facilities At Signalised Crossings. W: *Social*

- Sciences (2013)
- [81] HEIKOOP, HENK ; HENKENS, NIELS: Recent Developments and History of the Dutch HCM. W: *Transportation Research Procedia* t. 15, Elsevier B.V. (2016), ss. 51–62
- [82] HELBING, DIRK: A mathematical model for the behavior of pedestrians. W: *Behavioral Science* t. 36 (1991), Nr. 4, ss. 298–310
- [83] HELBING, DIRK ; FARKAS, IJ: Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. W: *Pedestrian and evacuation dynamics* t. 21 (2002), ss. 21–58 — ISBN 3540426906
- [84] HELBING, DIRK ; MOLNAR, PETER: Social force model for pedestrian dynamics. W: *Physical Review E* t. 51 (1995), Nr. 5 — ISBN 1063-651X
- [85] HELBING, DIRK ; MOLNAR, PETER ; FARKAS, ILLIAS J. ; BOLAY, KAI: Self-organizing pedestrian movement. W: *Environment and Planning B: Planning and Design* t. 28 (2001), Nr. 3, ss. 361–383 — ISBN 0265-8135
- [86] HELBING, DIRK ; MOLNAR, PETER ; MOLNAR, PETER ; MOLNAR, PETER ; MOLNAR, PETER ; MOLNAR, PETER: Social force model for pedestrian dynamics. W: *Physical Review E* t. 51 (1995), Nr. 5, ss. 4282–4286 — ISBN 1063-651X
- [87] HELBING, DIRK ; MOLNAR, PETER: Helbing 1995 - Social Force Model for Pedestrian Dynamics - annotated.pdf. W: *Physical Review E* t. 51 (1995), Nr. 5, s. 5
- [88] HELBING, VON DIRK: Sicherheit in Fußgängergruppen bei Massenveranstaltungen Massenpaniken sind seit jeher ein Problem von Großveranstaltungen , das man, ss. 1–36
- [89] HERMAN, ROBERT ; ROTHERY, RICHARD ; GAZIS, DENOS: Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow (1961)
- [90] HESS, RAINER ; KUNZ, KATHARINA: *Nachhaltigkeitsbewertung von Streckenzügen der Straßeninfrastruktur Nachhaltigkeitsbewertung von Streckenzügen der Straßeninfrastruktur* — ISBN 9783956066931
- [91] HIGHWAY, FEDERAL ; NO, ADMINISTRATION: Open Source Surrogate Safety Assessment Model, 2017 Enhancement and Update: SSAM v3.0. W: *TechBrief* t. 17 (2016), Nr. 200, s. 2p
- [92] HOOGENDOORN, SERGE P: Pedestrian travel behavior modeling. W: *10th International Conference on Travel Behavior Research* (2003), Nr. August, ss. 10–15
- [93] [HTTP://WWW.BAIS.P.LODZ.PL/POIG/INDEX.PHP/STRONA-GLOWNA-:](http://www.bais.p.lodz.pl/POIG/INDEX.PHP/STRONA-GLOWNA-:) *Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju, "Grant Łódzki"*. URL <http://www.bais.p.lodz.pl/POIG/index.php/strona-glowna->
- [94] [HTTPS://CORDIS.EUROPA.EU/PROJECT/ID/296057](https://cordis.europa.eu/project/id/296057): *CIVITAS DYN@MO (DYNAMIC citizens @ctive for sustainable MOBility)*. URL <https://cordis.europa.eu/project/id/296057>
- [95] [HTTPS://CORDIS.EUROPA.EU/PROJECT/ID/635998/PL](https://cordis.europa.eu/project/id/635998/PL): *FLOW Furthering Less Congestion by creating Opportunities for more Walking and cycling 2015-2018*. URL <https://cordis.europa.eu/project/id/635998/pl>
- [96] HU, JINGWEN ; KLINICH, KATHLEEN D: Toward designing pedestrian-friendly vehicles. W: *Umtri-2012-19* (2012), Nr. July, ss. 1–47
- [97] HUGHES, ROGER L.: A continuum theory for the flow of pedestrians. W: *Transportation Research Part B: Methodological* t. 36 (2002), Nr. 6, ss. 507–535
- [98] HUMMEL, T: Dutch Pedestrian Safety Research Review. W: *SWOV Institute for Road Safety Research* (1999), Nr. December, s. 38
- [99] 1 Prognozowanie Ruchu Trip Modelling t. 1 (2014), Nr. 1
- [100] IACONO, MICHAEL ; KRIZEK, KEVIN J. ; EL-GENEIDY, AHMED: Access to Destinations: How Close is Close Enough? Estimating Accurate Distance Decay Functions for Multiple Modes and Different Purposes (2008), s. 76
- [101] IGÁZVÖLGYI, ZSUZSANNA: *PhD thesis book Increasing pedestrians ' traffic safety through design parameters* : BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS FACULTY OF CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT OF HIGHWAY AND RAILWAY ENGINEERING, 2015
- [102] INITIATIVE GLOBAL DESIGNING CITIES: Street Design Guide. W: *Island Press* (2016), Nr. August, s. 426
- [103] „Inżynieria Ruchu”, Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności sp. z o.o., 1989. W. M. S.Datka, (1989), s. 1989
- [104] Issues in Spatial Choice MODELS OF SPATIAL CHOICE BEHAVIOR
- [105] J.G. WARDROP: Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research Author (s): J . G . Wardrop Published by : Operational Research Society Stable URL : <https://www.jstor.org/stable/3006827> t. 4 (1952), Nr. 4
- [106] JAIN, UDIT: *Guidelines for Selection of Appropriate Pedestrian Crossing Facility At Mid-Block Sections*, 2016

- [107] JAIN, UDIT ; RASTOGI, RAJAT: Re-Examination of PV2 Criteria for Developing Pedestrian Crossing Warrants. W: *Transportation Research Procedia* t. 25, Elsevier B.V. (2017), ss. 1707–1716
- [108] JAMROZ, K. ; OKRASZEWSKA, R. ; I ZESPÓŁ: Dostępność transportowa węzłów przesiadkowych dla osób ze specjalnymi potrzebami (2021)
- [109] JAMROZ, KAZIMIERZ: *Metoda zarządzania ryzykiem w inżynierii drogowej*, 2011
- [110] JAMROZ, KAZIMIERZ ; CHRZANOWICZ, MARCIN ; KORNALEWSKI, LESZEK ; MACKUN, TOMASZ ; TOMCZUK, PIOTR: *WR-D-41-4-02 Wytuczne projektowania infrastruktury dla pieszych Część 4: Projektowanie oświetlenia przejść dla pieszych Wzorce i standardy rekomendowane przez Ministra właściwego ds. transportu*, 2018 — ISBN 2018231030
- [111] JAMROZ, KAZIMIERZ ; GACA, STANISŁAW ; MACKUN, TOMASZ ; RYCHLEWSKA, JUDYTA: *Propozycja metody wyboru urządzeń brd dla pieszych - Konferencje specjalistyczne, Organizacja Ruchu 2016*, 2016
- [112] JAMROZ, KAZIMIERZ ; GACA, STANISŁAW ; MICHALSKI, LECH ; KIEĆ, MARIUSZ ; BUDZYŃSKI, MARCIN ; GUMIŃSKA, LUCYNA ; KUSTRA, WOJCIECH ; MACKUN, TOMASZ ; I IN.: *Ochrona Pieszych*, 2014 — ISBN 9788376105277
- [113] JAMROZ, KAZIMIERZ ; KACZMAREK, JOANNA: Jak zmniejszyć poziom ryzyka pieszych w ruchu drogowym w PKolsce ? t. 2000 (2006), ss. 40–47
- [114] JAMROZ, KAZIMIERZ ; MICHALSKI, LECH ; I INNI: *Kompleksowe badania zachowań transportowych w Gdańsku w 1999 roku*, 1999
- [115] JAMROZ, KAZIMIERZ ; OKRASZEWSKA, ROMANIKA ; MICHALSKI, LECH ; GUMIŃSKA, LUCYNA ; MACKUN, TOMASZ: Projekt wytucznych planowania tras dla pieszych. W: *Transport Miejski i Regionalny* t. 10 (2020), ss. 22–36
- [116] JAMROZ, KAZIMIERZ ; OSKARBSKI JACEK ; GUMIŃSKA LUCYNA ; IN.), (I: Zastosowanie wielopoziomowego modelu ruchu dla systemu TRISTAR (2012), Nr. January 2016
- [117] JAMROZ, KAZIMIERZ ; OSKARBSKI, JACEK ; KUSTRA, WOJCIECH ; GUMIŃSKA, LUCYNA: Wielopoziomowe modelowanie ruchu-koncepcja i doświadczenia praktyczne (2011)
- [118] JAMROZ, KAZIMIERZ ; TOMCZUK, PIOTR ; MACKUN, TOMASZ ; CHRZANOWICZ, MARCIN ; MALASEK, JACEK ; ZAWIESKA, JAKUB ; KORNALEWSKI, LESZEK ; KRUKOWICZ, TOMASZ: Wytuczne prawidłowego oświetlenia przejść dla pieszych – Raport z przeprowadzonych studiów i analiz. W: *Krajowa Rada Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego* (2017)
- [119] JASKIEWICZ, FRANK: Pedestrian Level of Service Based on Trip Quality. W: *TRB Circular E-C019: Urban Street Symposium* (2001)
- [120] JOHANSSON, EMMI: Pedestrians in microscopic traffic simulation (2013)
- [121] JOHN J.FRUIN: *Designing for pedestrians: a level-of-service concept* : Highway Research Board, 1971
- [122] JOHNSTON, R. B.: Arsenic and the 2030 Agenda for sustainable development. W: *Arsenic Research and Global Sustainability - Proceedings of the 6th International Congress on Arsenic in the Environment, AS 2016* (2016), ss. 12–14 — ISBN 9781138029415
- [123] KAZIMIERZ JAMROZ, STANISŁAW GACA, LECH MICHALSKI I INNI: *Opracowanie metodologii badań i koncepcji systemu monitorowania wybranych zachowań uczestników ruchu drogowego na sieci dróg w Polsce wraz z przedstawieniem rekomendacji wdrożeniowych Część B - Badania i analiza zagrożeń pieszych uczestników ruchu drogowego*, 2013
- [124] KAZIMIERZ, JAMROZ ; TOMASZ, MACKUN ; GOBIS, ANNA ; ŻÓŁTOWSKA, JOANNA: Projekt wytucznych projektowania infrastruktury punktowej dla pieszych (2020)
- [125] KAZIMIERZ, JAMROZ ; TOMASZ, MACKUN ; GUMIŃSKA, LUCYNA ; JANUSZ, RÓŻKOWSKI: Projekt wytucznych projektowania infrastruktury liniowej dla pieszych. W: *Transport Miejski i Regionalny* (2020)
- [126] KERR, ALAN PETER: Assessing the impact of underground railway stations on busy pedestrian streets – a case study of Bond Street Crossrail station (2008), ss. 1–20
- [127] *KfVS Querungshilfen für Fussgänger*, 2000
- [128] KIM, SANGGU: Basic capacity formulation for pedestrians at unsignalized crosswalks on two-way roadways. t. 5 (2003), ss. 50–65
- [129] KIM, SANGYOUP ; CHOI, JAISUNG ; KIM, SUNGKYU ; TAY, RICHARD: Personal space, evasive movement and pedestrian level of service. W: *Journal of Advanced Transportation* t. 44 (2014), Nr. March 2013, ss. 267–283 — ISBN 0957-4174
- [130] KIRCHNER, ANSGAR ; NISHINARI, KATSUHIRO ; SCHADSCHNEIDER, ANDREAS: Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics. W: *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics* t. 67 (2003), Nr. 5, s. 10
- [131] KIYOTA, MASARU ; VANDEBONA, UPALI ; KATAFUCHI, NAOMICHI ; INOUE, SHINICHI: Bicycle and Pedestrian Traffic Conflicts on Shared Pavements. W: *Vélo Mondial 2000* (2000), s. 9

- ISBN 8195228895
- [132] KOMETANI, E. AND SASAKI, T.: On the Stability of Traffic Flow. (1958)
- [133] KRAJOWA RADA BEZPIECZEŃSTWA RUCHU DROGOWEGO: Metodologia systematycznych badań zachowań pieszych i relacji pieszy - kierowca wraz z przeprowadzeniem badań pilotażowych (2015), Nr. November 2016
- [134] KRUG, ETIENNE: Bezpieczeństwo pieszych - podręcznik bezpieczeństwa drogowego dla decydentów i praktyków. W: *Światowa Organizacja Zdrowia* (2013)
- [135] KRYSZEK, RYSZARD: *Syntetyczny wskaźnik jakości ruchu ulicznego*, 1980
- [136] KUROWSKA, KRYSZYNA ; KRYSZEK, HUBERT ; KIETLIŃSKA, EWA: The use of gravity model in spatial planning. W: *10th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2017* (2017), Nr. April, ss. 27–28 — ISBN 9786094760440
- [137] KUZIA, MICHAŁ: Problemy Transportu i Logistyki nr 4/2016 (36). W: *Problemy Transportu i Logistyki nr 4/2016* (36) t. 2016 (2016), Nr. 4
- [138] LI, XIAOMENG ; YAN, XUEDONG ; LI, XINGANG ; WANG, JIANGFENG: Using Cellular Automata to Investigate Pedestrian Conflicts with Vehicles in Crosswalk at Signalized Intersection. W: *Discrete Dynamics in Nature and Society* t. 2012 (2012), ss. 1–16
- [139] LIEBERMAN, EB: Brief History of Traffic Simulation. W: *Traffic and Transportation Simulation* (2014), Nr. April, ss. 55–63
- [140] LINDENMANN, HANS PETER: The Effects on Road Safety of 30 Kilometer Per Hour Zone. W: *ITE Journal* t. 76 (2005), Nr. June, ss. 50–54
- [141] LITMAN, TODD: Evaluating Active Transport Benefits and Costs. W: *Victoria Transport Policy Institute* (2016), ss. 134–140
- [142] LORD, D ; SMILEY, A ; HAROUN, A: Pedestrian Accidents with Left-turning Traffic at Signalized Intersections: Characteristics, Human Factors and Unconsidered Issues. W: *77th Annual Transportation Research Board Meeting* t. Washington (1998), Nr. 416
- [143] MA, XIAOLIANG ; ANDRÉASSON, INGMAR: Predicting the effect of various ISA penetration grades on pedestrian safety by simulation. W: *Accident Analysis and Prevention* t. 37 (2005), Nr. 6, ss. 1162–1169 — ISBN 0001-4575
- [144] MACIOSZEK, ELŻBIETA: *Model ruchy na małych rondach dla potrzeb obliczania przepustowości.*, 2006
- [145] MACIOSZEK, ELŻBIETA: Czynniki przyczyniające się do śmierci pieszych w wypadkach drogowych. W: *XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Systemy Logistyczne – Teoria i Praktyka (Warszawa, 3 - 5 września 2023 r.)*, 2023, ss. 97–112
- [146] MACIOSZEK, ELŻBIETA ; WOJNAR, GRZEGORZ: Charakterystyka urządzeń służących pieszym. W: : *Systemy transportowe: Teoria i praktyka. XII Konferencja naukowo-techniczna, 12-13 października 2015, Katowice. Materiały konferencyjne*, 2015, s. 37
- [147] MARKOWSKI, MICHAEL J: Modeling behaviour in vehicular and pedestrian traffic flow. W: *Civil Engineering* (2008), ss. 1–162
- [148] MARTIN, JEAN LOUIS ; WU, DAN: Pedestrian fatality and impact speed squared: Cloglog modeling from French national data. W: *Traffic Injury Prevention* t. 19 (2018), Nr. 1, ss. 94–101
- [149] MICHAELS, R.M. (1963): Perceptual Factors in Car following. (1963)
- [150] MICHAELS, R M ; COZAN, L W: Perceptual and Field Factors Causing Lateral Displacement. W: *Highway Research Record* t. 25 (1963), ss. 1–13
- [151] MIRONOWICZ, IZABELA: *Wybrane teorie urbanistyki współczesnej*, 2015 — ISBN 9788364333033
- [152] MOHLER, BETTY J ; THOMPSON, WILLIAM B ; CREEM-REGEHR, SARAH H ; PICK, HERBERT L JR ; WARREN, WILLIAM H JR: Visual flow influences gait transition speed and preferred walking speed. W: *Experimental brain research* t. 181. Germany (2007), Nr. 2, ss. 221–228
- [153] MOUDON, ANNE VERNEZ: TARGETING PEDESTRIAN INFRASTRUCTURE IMPROVEMENTS: A Methodology to Assist Providers in Identifying Suburban Locations with Potential Increases in Pedestrian Travel. W: *Research Project T1803, Task 11 "Pedestrian Infrastructure* (2001), Nr. September, s. 26
- [154] NABIELEK, K ; HAMERS, DAVID ; EVERS, DAVID: Cities in Europe: Facts and figures on cities and urban areas. (2016), s. 34 — ISBN 978-94-91506-97-0
- [155] NEMETH, BRYAN: Evaluation Incorporating Highway Capacity Manual Unsignalized Pedestrian Crossing (2014), Nr. June
- [156] NEW JERSEY BICYCLE AND PEDESTRIAN RESOURCE CENTER: Pedestrian Safety at Bus Stops Study (2012)
- [157] NEWELL, G. F.: A simplified car-following theory: A lower order model. W: *Transportation Research Part B: Methodological* t. 36 (2002), Nr. 3, ss. 195–205
- [158] NORTH JERSEY TRANSPORTATION PLANNING AUTHORITY: Bus Stop Safety Toolbox 1 (2013)

- [159] NZ TRANSPORT AGENCY: Guidelines for the Selection of Pedestrian Facilities. W: *Report* (2007), s. New Zealand
- [160] NZ TRANSPORT AGENCY: *Pedestrian planning and design guide*, 2009 — ISBN 9780478352290
- [161] OECD: Road Safety Annual Report 2014 (2014) — ISBN 9789282107669
- [162] OKETCH, TIMOTHY ; CARRICK, MARZENNA: Calibration and validation of a micro-simulation model in network analysis. W: *Proceedings of the 84th TRB Annual Meeting* (2005), Nr. January
- [163] OLDER, S.J.: Movement of pedestrians on footways in shopping streets. W: *Traffic Eng Control* t. 10 (1968)
- [164] OLSON, PAUL L: Visibility problem in nighttime driving. W: *SAE Technical Paper* (1987), Nr. 870600
- [165] OLSZEWSKI, P. ; OSIŃSKA, B. ; SZAGAŁA, P. ; SKOCZYŃSKI, P. ; ZIELIŃSKA, A.: Problems with Assessing Safety of Vulnerable Road Users Based on Traffic Accident Data. W: *Archives of Civil Engineering* t. 62 (2016), Nr. 4, ss. 149–168
- [166] OLSZEWSKI, PIOTR S: „WALKING AS A MODE OF TRANSPORT – A PLANNING AND POLICY PERSPECTIVE” - „RUCH PIESZY JAKO ŚRODEK TRANSPORTU Z PERSPEKTYWY PLANOWANIA I POLITYKI TRANSPORTOWEJ”, 2007 — ISBN 9780333227794
- [167] OLSZEWSKI, PIOTR S ; CZAJEWSKI, WITOLD: Badanie zachowań uczestników ruchu na przejściach dla pieszych na podstawie analizy obrazu % DGDQLH] DFKRZDĚ XF] HVWQLNyZ UXFKX QD SU] HMĜFLDFK dla pieszych na podstawie analizy obrazu (2014), Nr. October
- [168] ORŁOWSKA, I. ; DZIUBIŃSKI, M.: Stochastyczny charakter procesu ewakuacji ludzi z budynków. W: *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza* t. 50 (2018), ss. 90–106
- [169] OSKARBSKI, JACEK ; MARCINKOWSKI, TOMASZ ; MOWIŃSKI, KRYSZTIAN ; ZAWISZA, MARCIN ; ŻARSKI, KAROL ; OSKARBSKA, IZABELA ; GUMIŃSKA, LUCYNA ; OSKARBSKI, GRZEGORZ: *RID Rozwój Innowacji Drogowych, RAPORT OKRESOWY ZADANIE 4, Wielokryterialne metody oceny wpływu usług ITS na poziom bezpieczeństwa i sprawności ruchu*, 2018
- [170] OSÓB, ORAZ PREFERENCJE: OCENA SYSTEMU TRANSPORTOWEGO (2016)
- [171] PACKAGE, WORK: Dissemination plan - InDev (2013), Nr. 265212, ss. 1–84
- [172] PAPADIMITRIOU, ELEONORA ; FILTNESS, ASHLEIGH ; THEOFILATOS, ATHANASIOS ; ZIAKOPOULOS, APOSTOLOS: Comparative assessment and ranking of infrastructure related crash risk factors. W: *Road Safety & Simulation International Conference 2017* (2017), ss. 1–10
- [173] PARK, BYUNGKYU BRIAN ; WON, JONGSUN: Microscopic Simulation Model Calibration and Validation Handbook (2006), s. 174
- [174] PEDESTRIAN, AERODROME ROAD ; STOP, B U S ; FEASIBILITY, INTRODUCTION: London Borough of Barnet Traffic & Development Design Team AERODROME ROAD PEDESTRIAN FACILITY AND BUS STOP INTRODUCTION FEASIBILITY
- [175] PETZOLDT, TIBOR: On the relationship between pedestrian gap acceptance and time to arrival estimates. W: *Accident Analysis and Prevention* t. 72 (2014), ss. 127–133
- [176] PLAN, ACTION: Pedestrian Safety. W: *Pediatrics* t. 124 (2009), Nr. 2, ss. 802–812 — ISBN 9789241505352
- [177] PLAN, ACTION ; COMMITTEE ON INJURY, VIOLENCE ; PLAN, ACTION: Pedestrian Safety. W: *Pediatrics* t. 124 (2009), Nr. 2, ss. 802–812 — ISBN 9789241505352
- [178] POLSKI ZWIĄZEK NIEWIDOMYCH, [HTTP://PZN.ORG.PL/URZADZENIA-ULATWIAJACE-PRZEMIESZCZANIE-SIE](http://pzn.org.pl/urzadzenia-ulatwiajace-przemieszczanie-sie): *Urządzenia ułatwiające przemieszczanie się*. URL <http://pzn.org.pl/urzadzenia-ulatwiajace-przemieszczanie-sie>
- [179] PREUSSER, DAVID F. ; LEAF, WILLIAM A. ; DEBARTOLO, KAREN B. ; BLOMBERG, RICHARD D. ; LEVY, MARVIN M.: The effect of right-turn-on-red on pedestrian and bicyclist accidents. W: *Journal of Safety Research* t. 13 (1982), Nr. 2, ss. 45–55 — ISBN 0022-4375
- [180] PROSPECTS, WORLD URBANIZATION: Here and Now : We Must Change (2022), ss. 5–16
- [181] PTV GROUP: PTV VISSIM 10 User Manual (2018), ss. 265–297
- [182] PUSHKAREV, BORIS ; ZUPAN, JEFFERY: *Urban Space for Pedestrians*, 1975
- [183] R. WIEDEMANN: *Simulation des Straßenverkehrsflusses, Reports of the Institute for Transport Studies* : University Karlsruhe, 1974
- [184] R.KRYSTEK, K.JAMROZ, L.MICHALSKI, R.MARZĄŁEK, P.PACZUL: *Technika konfliktów ruchowych*. Gdańsk, 1991
- [185] RADWAN, E ; DARIUS, B ; WU, J ; ABOU-SENNA, H: Simulation of pedestrian safety surrogate measures (2016), s. 13p
- [186] RAFF, MORTON S.: A Volume Warrant For Urban Stop Signs A Volume Warrant For Urban Stop Signs. W: *the Eno Foundation for Highway Traffic Control* (1950)
- [187] RAFORD, NOAH ; RAGLAND, DAVID R.: Pedestrian Volume Modeling for Traffic Safety and Exposure Analysis : The Case of Boston , Massachusetts. W: *Transportation Research Board 85th Annual Meeting* t. M (2005)

- [188] RAKHA, HESHAM ; GAO, YU: Calibration of steady-state car-following models using macroscopic loop detector data. W: *Final Report: VT-2008-01* (2010), s. 24
- [189] REN, HUI: *Exam of the Relationship of Traffic Flow, Density and Speed with RADAR Data*, 2018 — ISBN 9788578110796
- [190] ROBERT, ROZENEK ; JERZY, PRZASNYSKI ; GREMZA, MICHAŁ: *Kwalifikacja zdarzeń drogowych oraz polecenia i sygnały wydawane przez policjanta na miejscu zdarzenia drogowego*, 2015
- [191] RODRIGUE, JEAN PAUL: The Geography of Transport Systems. W: *The Geography of Transport Systems* (2020) — ISBN 9781003860327
- [192] ROMANOWSKA, ALEKSANDRA: Makroskopowe modele ruchu potoku pojazdów na odcinkach międzywęzłowych autostrad i dróg ekspresowych (2019)
- [193] ROSEN, E ; SANDER, U: Pedestrian Fatality Risk as a Function of Car Impact Speed. W: *Accident Analysis & Prevention* t. 41 (2009), Nr. 3, ss. 536–542
- [194] ROUPHAIL, NAGUI M. ; ALLEN, D. PATRICK: Recommended Procedures Chapter 13, „Pedestrians,” of the Highway Capacity Manual. W: *Highway capacity Manual* (1998), Nr. February, ss. 1–56
- [195] ROZPORZĄDZENIE MINISTRA INFRASTRUKTURY I ROZWOJU: Dz.U. 2015 poz. 1314 (2015), Nr. 47, ss. 1–10 — ISBN 8405040100000
- [196] *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie*, Dz.U.99.43.430, 1999
- [197] *RTA Road User's Handbook*, 2010
- [198] SADRAYI, ARASH ; SAFFARZADEH, MAHMOUD ; BOROUJERDIAN, AMIN MIRZA: An Assessment of the Impact of Pedestrian Refuge Islands on Vehicle Speed Changes and Pedestrian Safety : Case Study in Tehran t. 3 (2015), Nr. 4
- [199] SAHALEH, AMIR SOHRAB ; BIERLAIRE, MICHEL ; FAROOQ, BILAL ; DANALET, ANTONIN: Scenario Analysis of Pedestrian Flow in Public Spaces. W: *Swiss Transport Research Conference 2012* (2012), Nr. May
- [200] SARKAR, A K ; JANARDHAN, K S V S: A Study on Pedestrian Flow Characteristics. W: *Transportation Research Board* (1997)
- [201] SAVANNAH SIMULATIONS AG: *SimWalk User Guide* (2017)
- [202] SCIENCE, DIRECTORATE F O R ; OF, PROGRAMME ; THE, CO-OPERATION I N ; OF, FIELD ; TRANSPORT, ROAD ; LINKAGES, INTERMODAL: DSTI / DOT / RTR / RS7 (98) 1 / FINAL Unclassified Scientific Expert Group on the Safety of Vulnerable Road Users (RS7). W: *Group* t. 7 (1998), Nr. 98, ss. 1–229
- [203] SCIENCES, SAFETY ; MANAGEMENT, EVIDENCE ; SOUTH, SYDNEY ; AREA, WEST ; SERVICE, HEALTH: Pedestrian-Cyclist Collisions: Issues and Risk. Grzebieta R.H. 1 , McIntosh A.M. 2 , and Chong S. 3 (2011), Nr. September, ss. 1–2
- [204] SEJMU, KANCELARIA ; EUROPEJSKIEJ, UNII ; POLSKIE, U E ; POLSKIE, U E ; POLSKIE, U E ; EUROPEJSKIEGO, W E PARLAMENTU ; POLSKIE, U E ; POLSKIE, U E ; I I N.: Dz.U. 1997 Nr 98 poz. 602, Prawo o ruchu drogowym (2016), Nr. 98, ss. 1–260
- [205] SEJMU, KANCELARIA ; EUROPEJSKIEJ, UNII ; POLSKIE, U E ; POLSKIE, U E ; POLSKIE, U E ; EUROPEJSKIEGO, W E PARLAMENTU ; POLSKIE, U E ; POLSKIE, U E ; I I N.: Dz. U. z 2020 r. poz. 110, z późn. zm. USTAWA z dnia 25 lutego 2021 r. o zmianie ustawy – Prawo o ruchu drogowym. DZIAŁ I Przepisy ogólne zasady ruchu na drogach publicznych , w strefach zamieszkania oraz w strefach ruchu ; zasady i warunki dopuszczenia p (2021), Nr. 98, ss. 1–257
- [206] SEJMU, KANCELARIA ; ZE, Z C ; ZA, A R S ; LI, P O ; PO, E J ; PA, OCHRONY ; OCHRONY, INSPEKCJI: Dz.U. 2018 poz. 1990 (2018)
- [207] SEYFRIED, ARMIN ; RUPPRECHT, TOBIAS ; PASSON, OLIVER ; STEFFEN, BERNHARD ; KLINGSCH, WOLFRAM ; BOLTES, MAIK: New insights into pedestrian flow through bottlenecks. W: *Transportation Science*, 43:395–406 t. 43 (2007), Nr. 3, s. 16 — ISBN 1526-5447
- [208] SHAABAN, KHALED ; HAMAD, HASSAN: Group Gap Acceptance: A New Method to Analyze Driver Behavior and Estimate the Critical Gap at Multilane Roundabouts. W: *Journal of Advanced Transportation* t. 2018 (2018), ss. 1–10
- [209] SIEDLECKA, JADWIGA ; BORTKIEWICZ, ALICJA: Znaczenie stanu narządu wzroku dla kierowcy t. 64 (2013), Nr. 3, ss. 419–425
- [210] ŠIMUNOVIĆ, L.; GRGUREVIĆ, I.; ŠKRINJAR, J.P.: Selecting optimal pedestrian crossing using multi-criteria decision-making. W: *Promet - Traffic - Traffico* t. 22 (2010), Nr. 2, ss. 105–116 — ISBN 0353-5320
- [211] ŠIMUNOVIĆ, LJUPKO ; ĆOSIĆ, MARIO ; VUJČIĆ, TOMISLAV: The Impact of Bus Stop Location on Pedestrian Safety. W: *12th International Symposium Proceedings Road Accident Prevention 2014- Novi Sad, Serbia* (2014), Nr. October, ss. 127–135

- [212] SPW: Guide des traversées piétonnes, Direction de la Sécurité des Infrastructures routières (2009)
- [213] STANISŁAW, GACA ; KAZIMIERZ, JAMROZ ; ANNA, GOBIS ; LUCYNA, GUMIŃSKA ; JACEK, JAMROZ ; ŁUKASZ, JELIŃSKI ; WOJCIECH, KUSTRA ; TOMASZ, MACKUN ; I IN.: Wytyczne projektowania infrastruktury dla pieszych, Część 2: Projektowanie dróg dla pieszych (2022)
- [214] STANISŁAW, GACA ; ROMANIKA, OKRASZEWSKA ; KRYSYAN, BIRR ; MARCIN, BUDZYŃSKI ; ANNA, GOBIS ; KAZIMIERZ, JAMROZ ; TOMASZ, MACKUN ; LECH, MICHAŁSKI ; I IN.: Wytyczne projektowania infrastruktury dla pieszych, Część 1: Planowanie sieci tras dla pieszych (2022)
- [215] STEFANIUK, ELZBIETA ; BOSACKA, KAROLINA ; HRYNIEWICZ, WALERIA: Walidacja i weryfikacja metod i testów diagnostycznych w laboratorium mikrobiologicznym. W: *Postępy Mikrobiologii* t. 54 (2015), Nr. 4, ss. 415–424
- [216] SWANSON, DAVID A.: On the Relationship Among Values of the Same Summary Measure of Error when it is Used Across Multiple Characteristics at the Same Point in Time: An Examination of MALPE and MAPE. W: *Review of Economics & Finance* t. 5 (2015), Nr. 1, ss. 1–14, ISSN(p) 1923-7529, ISSN(e) 1923-8401
- [217] TANARIBOON, Y. ; HWA, S.S.: Pedestrian Characteristics Study in Singapore., *Journal of Transportation Engineering* (1986)
- [218] TEKNO, KARDI: Micro-PedSim User Manual
- [219] TFL RAIL & UNDERGROUND – STATION MODELLING: Station modelling with Legion Spaceworks: Best Practice Guide. W: *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents* (2014)
- [220] TOMCZUK, PIOTR: Ogólne zasady oświetlenia przejść dla pieszych (2016)
- [221] TRACZ, MARIAN ; TARKO, ANDRZEJ ; GACA, STANISŁAW: INTERSECTION SAFETY RESEARCH IN CRACOW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (1990), Nr. Table 2, ss. 12–19
- [222] TRB: *Highway Capacity Manual, Washington, 2010* — ISBN 9780309160773
- [223] TREIBER, MARTIN ; HENNECKE, ANSGAR ; HELBIG, DIRK: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. W: *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics* t. 62 (2000), Nr. 2, ss. 1805–1824
- [224] UK, TRANSPORT SAFETY RESEARCH CENTRE - LOUGHBOROUGH UNIVERSITY: Identification of vehicle related risk factors (2016)
- [225] VAGVERKET VÄGUTFORMNING 94 (2002)
- [226] VAHIDI, ARDALAN ; ESKANDARIAN, AZIM: Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control. W: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* t. 4 (2003), Nr. 3, ss. 132–153
- [227] VIRKLER, R ; ELAYADATH, SATHISH: Pedestrian Speed-Flow-Density Relationships (1992), Nr. 8
- [228] VISTULA, VIA: Gdańskie Badania Ruchu 2016 (2016)
- [229] VAN WAGENINGEN-KESSELS, FEMKE ; VAN LINT, HANS ; VUIK, KEES ; HOOGENDOORN, SERGE: Genealogy of traffic flow models. W: *EURO Journal on Transportation and Logistics* t. 4 (2014), Nr. 4, ss. 445–473 — ISBN 1367601400455
- [230] WANG, YANBING ; WANG, ZIRAN ; HAN, KYUNGTAE ; TIWARI, PRASHANT ; WORK, DANIEL B.: Gaussian Process-Based Personalized Adaptive Cruise Control. W: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* t. 23, IEEE (2022), Nr. 11, ss. 21178–21189
- [231] WEE, LIT KOH ; LIN, LIN ; ZHOU, SUIPING: Modelling and simulation of pedestrian behaviours. W: *Proceedings - Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation, PADS* (2008), Nr. May 2024, ss. 43–50 — ISBN 9780769531595
- [232] WEIDMANN, ULRICH: Transporttechnik der Fussgänger, Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturauswertung) (1993), Nr. 90, s. 110
- [233] WICHER, JERZY: Is It Worth Limiting the Travel Speed ? W: *Acrhiwun Motoryzacji* t. 69 (2015), ss. 105–114
- [234] WINCEK, JAROSŁAW: Podział Zadań Przewozowych w Gdańsku – stan istniejący i potencjał zmian Modal split in Gdańsk – existing state and potential for change (2016)
- [235] WITKOWSKI, J.: *Pieszcy w ruchu drogowym* : Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1978
- [236] WORLD HEALTH ORGANIZATION: *Pedestrian Safety. A ROAD SAFETY MANUAL FOR DECISION-MAKERS AND PRACTITIONERS*, 2004 — ISBN 9789241505352
- [237] WU, HAOLING ; YUAN, ZHENZHOU ; LI, HUIXUAN ; TIAN, JUNFANG: Research on the Effects of Heterogeneity on Pedestrian Dynamics in Walkway of Subway Station. W: *Discrete Dynamics in Nature and Society* t. 2016 (2016)
- [238] WU, JIAWEI: Analysis of Pedestrian Safety Using Micro- simulation and Driving Simulator (2017)
- [239] WYSOCKI, MAREK ; ZAŁUSKI, DANIEL: *Ekspertyza w zakresie dostępności kolejowych obiektów obsługi podróżnych z niepełnosprawnościami oraz ograniczoną możliwością poruszania.*, 2016 — ISBN 9788365709042

- [240] WYTRYKOWSKA, ANNA ; TOMCZUK, PIOTR: PRZEGLĄD METOD BADAŃ ZACHOWAŃ (2018)
- [241] XIAO, HAIFENG ; AMBADIPUDI, RAVI ; HOURDAKIS, JOHN ; MICHALOPOULOS, PANOS: Methodology for Selecting Microscopic Simulators : Comparative Evaluation of AIMSUN and VISSIM. W: *Security* (2005), ss. 1–32
- [242] YE, RUI ; ZHAN, ZHONGHAO ; CHRAIBI, MOHCINE ; LIAN, LIPING ; ZHANG, JUN ; SONG, WEIGUO: Investigating the effect of stairs on the bidirectional movement of pedestrians. W: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* t. 2020, IOP Publishing (2020), Nr. 2
- [243] YUHASKI STEVEN, MACGREGOR SMITH: Modeling circulations systems in buildings using state dependent queueing models (1989), ss. 319–338 — ISBN 9788578110796
- [244] ZĘBALA, JAKUB ; CIĘPKA, PIOTR ; REZA, ADAM: Pedestrian acceleration and speeds. W: *Problems of Forensic Sciences* t. 91 (2012), ss. 227–234
- [245] ZEGER, CHARLES V. ; STEWART, J. RICHARD ; HUANG, HERMAN H. ; LAGERWEY, PETER A. ; FEAGANES, JOHN ; CAMPBELL, BJ: Safety Effects of Marked Versus Unmarked Crosswalks at Uncontrolled Locations. W: *Fhwa* (2005), Nr. September, s. 114
- [246] ZHANG, JUN: *Pedestrian fundamental diagrams: Comparative analysis of experiments in different geometries*. t. 14, 2012 — ISBN 9783893368259
- [247] ZHANG, TIANYA TERRY ; PH, D ; JIN, PETER J ; PH, D ; MCQUADE, SEAN T ; PH, D ; BAYEN, ALEXANDRE ; PH, D ; LIN.: Car-Following Models : A Multidisciplinary Review, ss. 1–20
- [248] ZHENG, CHANG JIANG ; HE, RUI ; WAN, XIA ; WANG, CHEN: The Study on In-City Capacity Affected by Pedestrian Crossing. W: *Mathematical Problems in Engineering* t. 2016 (2016)
- [249] ZHOU, ZHI ; LI, LINHENG ; QU, XU ; RAN, BIN: A self-adaptive IDM car-following strategy considering asymptotic stability and damping characteristics. W: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* t. 637 (2024), Nr. January
- [250] ZONG, FANG ; WANG, MENG ; TANG, MING ; LI, XIYING ; ZENG, MENG: An Improved Intelligent Driver Model Considering the Information of Multiple Front and Rear Vehicles. W: *IEEE Access* t. 9 (2021), ss. 66241–66252

ZAŁĄCZNIK 1. OPIS I WYNIKI BADAŃ ANKIETOWYCH

Z.1.1 Badania ankietowe pieszych. Ocena poziomu akceptowalności środków uspokojenia ruchu

W badaniach ankietowych pieszych prowadzono na sieci ulic w Gdańsku oraz Kartuzach, wzięło udział około 750 respondentów, przy czym 679 (310 kobiet i 370 mężczyzn) udzieliło odpowiedzi na przedstawione pytania. Wskaźnik WRR wyniósł 90,5 %. Wywiad z pieszymi ankieterzy prowadzili w 19 punktach położonych na odcinkach poza skrzyżowaniami, w obrębie skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej i z sygnalizacją świetlną [133]. Badanie akceptacji środków uspokojenia ruchu przeprowadzono metodą analizy ilościowej PAPI (Paper & Pen Personal Interview) [48].

Badanie dotyczyło oceny zachowań kierowców przez pieszych na odcinku dojazdowym do przejścia dla pieszych. Celem badania wśród pieszych użytkowników drogi było rozpoznanie, które środki uspokojenia ruchu drogowego, w ocenie pieszego, mają istotny wpływ na zagrożenie wypadkami pieszych użytkowników drogi. Wspecjalizowani ankieterzy przeprowadzali wywiady osobiście w wytypowanych punktach pomiarowych w terenie za pomocą specjalnie przygotowanych ankiet. Ankieterzy zadawali pytania i odnotowywali odpowiedzi na kartce z wydrukowaną ankietą.

Ankieta obejmowała kilka pytań badawczych, z których tylko kilka związanych było z tematyką niniejszej pracy. Pierwsza część pytań dotyczyła charakterystyki respondenta w zakresie: płeć, wiek, posiadane prawo jazdy, sposobu korzystania z samochodu. Druga część dotyczyła między innymi oceny poziomu akceptowalności wybranych 14 środków uspokojenia ruchu drogowego wpływających na zagrożenie wypadkami pieszych użytkowników drogi (tab.Z 1.1).

Tab.Z 1.1 Zestawienie pytań badawczych skierowanych do pieszych

Oceń poziom akceptowalności środków uspokojenia ruchu od 1 (najgorsze) do 5 (najlepsze)					
Środki uspokojenia ruchu	Ocena, klasa akceptowalności (PW)				
Grupa pieszych	1	2	3	4	5
Małe rondo					
Mini rondo					
Skrzyżowanie wyniesione					
Progi liniowe					
Progi wyspowe					
Przejścia wyniesione					
Azyl w krawężnikach					
Azyl bez krawężników					
Wyspa wjazdowa do miejscowości					
Strefa 30 km/h					
Strefa zamieszkania					
Lokalne ograniczenia prędkości					
Fotorejestrator					
Skrzyżowanie równorzędne					

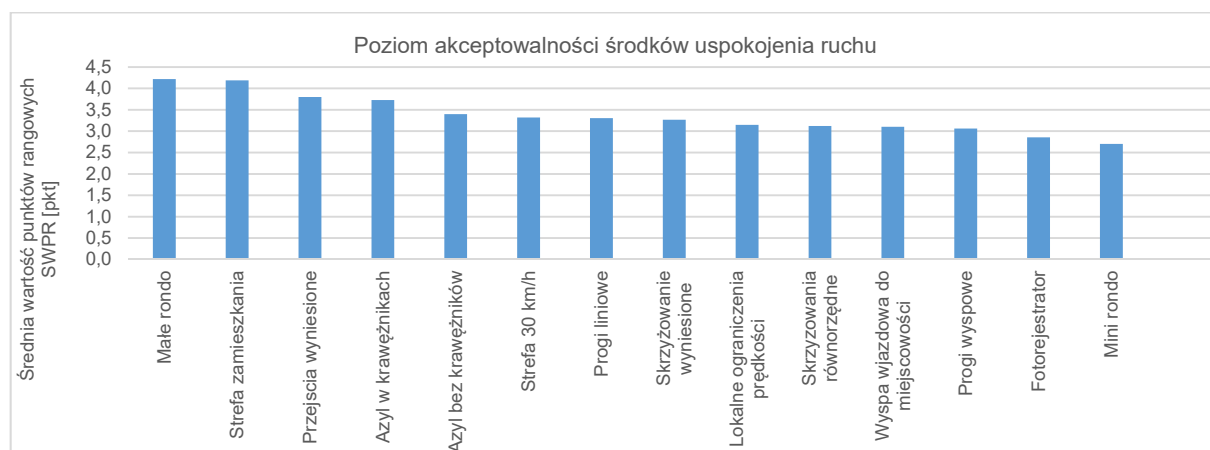
W tab.Z 1.2 zestawiono charakterystykę przyjętych klas akceptowalności PW wraz z udziałem uzyskanych odpowiedzi przypisanych poszczególnym klasom akceptowalności. W tab.Z 1.2 przedstawiono rozkład liczby odpowiedzi ekspertów z podziałem na poszczególne środki wraz z przypisaniem poziomu akceptowalności (rangi). Błąd oceny wynosił 0,012. Minimalna wielkość próby przy poziomie istotności 0,05 była 80. Zatem uzyskana liczba odpowiedzi była większa od minimalnej. Natomiast na rys.Z 1.1 przedstawiono rozkład odpowiedzi z uwzględnieniem średniej wartości punktów rangowych SWPR.

Tab.Z 1.2 Klasyfikacja poziomu akceptowalności środków uspokojenia ruchu

Poziom akceptowalności PW				
Klasa	Ranga	Akceptowalność	ULO [%]	USP [%]
PW ₁	1	Bardzo mała	13,4	4,0
PW ₂	2	Mała	13,9	8,2
PW ₃	3	Średnia	21,2	18,8
PW ₄	4	Duża	24,6	29,2
PW ₅	5	Bardzo duża	26,9	39,8

Tab.Z 1.3 Zestawienie opinii pieszych z uwzględnieniem wielkości wpływu poszczególnych środków uspokojenia ruchu na dojazdach do przejść dla pieszych na bezpieczeństwo ruchu

L.p.	Środki uspokojenia ruchu	Liczba odpowiedzi					Suma odpowiedzi	Suma punktów rangowych	Średnia wartość punktów rangowych	Udział opinii pozytywnych
		Poziom akceptowalności								
		Bardzo mały	Mały	Średni	Duży	Bardzo duży				
		1	2	3	4	5	SLO	SPR	SWPR	UOP [%]
1	Małe rondo	15	32	99	178	355	679	2863	4,2	93,1
2	Strefa zamieszkania	29	38	72	177	363	679	2844	4,2	90,1
3	Przejście wyniesione	37	68	125	210	237	677	2573	3,8	84,5
4	Wyspa azylu w krawężnikach	54	66	130	189	240	679	2532	3,7	82,3
5	Wyspa azylu bez krawężników	61	93	187	188	148	677	2300	3,4	77,3
6	Strefa 30 km/h	89	105	143	184	158	679	2254	3,3	71,4
7	Progi liniowe	108	90	140	166	174	678	2242	3,3	70,8
8	Skrzyżowania	66	105	206	180	119	676	2209	3,3	74,7
9	Lokalne ograniczenia prędkości	131	100	134	162	150	677	2131	3,2	65,9
10	Skrzyżowania równorzędne	79	94	140	119	99	531	1658	3,1	67,4
11	Wyspa wjazdowa do miejscowości	111	100	192	158	117	678	2104	3,1	68,9
12	Progi wyspowe	117	139	137	156	129	678	2075	3,1	62,2
13	Fotorejestrator	190	114	122	108	144	678	1936	2,9	55,2
14	Mini rondo	167	152	152	124	80	675	1823	2,7	52,7
	Razem	1254	1296	1979	2299	2513	9341	31544	3,38	72,7



Rys.Z 1.1 Rozkład odpowiedzi z uwzględnieniem średniej wartości punktów rangowych SWPR

Z.1.2 Badania ankietowe opinii kierowców. Ocena zachowań kierowców na przejściach dla pieszych

Przeprowadzono także badania zachowań kierowców dojeżdżających do różnych urządzeń stosowanych dla obsługi ruchu pieszego w Polsce. W badaniach ankietowych wzięło udział około 105 kierowców, z których 90 (39 kobiet i 51 mężczyzn) udzieliło odpowiedzi na przedstawione pytania. Wskaźnik WRR wyniósł 85,7 %. Wywiad ankietowy z kierowcami został przeprowadzony na parkingach w obszarach miejskich w miejscowościach Gdynia, Gdańsk, Sopot, Pruszcz Gdański, Tczew, Kartuzy.

Celem badań ankietowych z kierowcami było określenie zachowań kierowców (jadącego z kierunku X lub Y) w obrębie przejścia dla pieszych, gdy widzą pieszego. Wspecjalizowani ankieterzy przeprowadzali wywiady osobiście w wytypowanych punktach pomiarowych w terenie za pomocą specjalnie przygotowanych ankiet. Ankieterzy zadawali pytania i odnotowywali odpowiedzi na kartce z wydrukowaną ankietą. Ankieta obejmowała pytania badawcze, z których tylko kilka dotyczyły tematyki niniejszej pracy. W pierwszej części ankiety znajdowały się pytania dotyczące charakterystyki respondenta w zakresie: płeć, wiek, średnia liczba przejechanych kilometrów w roku, źródło i cel podróży. Dalsza część ankiety dotyczyła pytania, zmiany zasad pierwszeństwa pieszych na przejściu oraz zachowań (innych) kierowców wobec pieszych (ustępują pieszym, nie ustępują pieszym) tab.Z 1.4 jadąc odpowiednio z kierunku X oraz kierunku Y (rys.Z 1.2).

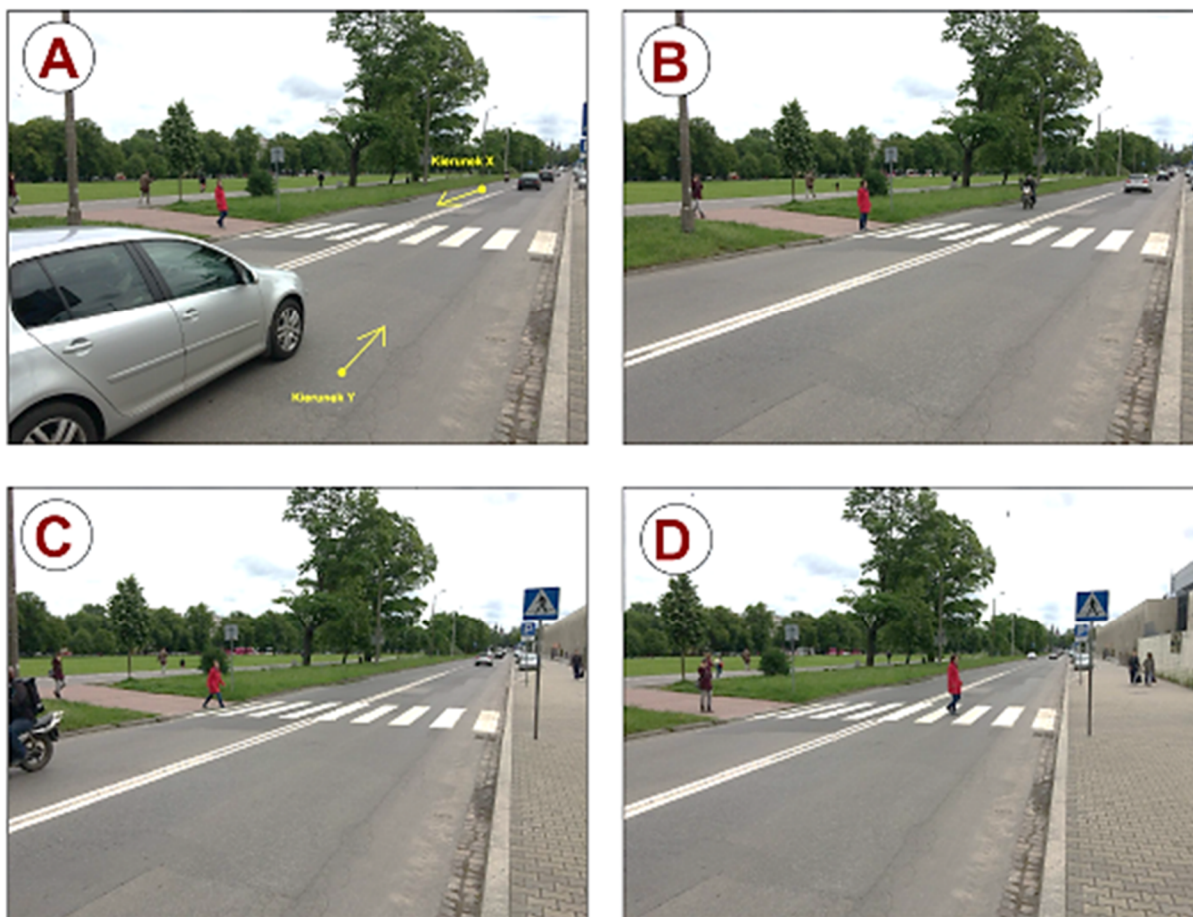
tab.Z 1.4 Zestawienie pytań badawczych dotyczących opinii kierowców

I. Czy powinno się zmienić przepisy dotyczące pierwszeństwa pieszych na przejściu ?		Tak		Nie	
II. Opinie kierujących - kierunek X (Kierujący znajduje się na pasie ruchu, od strony zbliżającego się pieszego do przejścia)					
Sytuacja (strefa)	Kierowca powinien się zatrzymać		Kierowca nie powinien się zatrzymywać		
	Tak	Nie	Tak	Nie	
A - pieszy dochodzi do przejścia dla pieszych					
B - pieszy znajduje się przy krawędzi przejścia dla pieszych					
C - pieszy wchodzi na przejście dla pieszych					
III. Opinie kierujących - kierunek Y (Kierujący znajduje się na pasie ruchu dalszym, niż kierunek zbliżającego się pieszego do przejścia)					
Sytuacja (strefa)	Kierowca powinien się zatrzymać		Kierowca nie powinien się zatrzymywać		
	Tak	Nie	Tak	Nie	
A - pieszy dochodzi do przejścia dla pieszych					
B - pieszy znajduje się przy krawędzi przejścia dla pieszych					
C - pieszy wchodzi na przejście dla pieszych					
D - pieszy znajduje się na przejściu dla pieszych					

Zbiornicze wyniki badań ankietowych wykonanych w grupie kierowców przedstawione w tab.Z 1.5 Błąd oceny wynosił 0,039. Minimalna wielkość próby przy poziomie istotności 0,05 wynosiła 46, Zatem uzyskana liczba odpowiedzi była większa od minimalnej.

Tab.Z 1.5 Zestawienie wyników badań dotyczących pierwszeństwa pieszych na przejściu.

Czy powinno się wprowadzać przepisy dotyczące pierwszeństwa pieszych na przejściu ?				
Liczba odpowiedzi	Udział odpowiedzi	Liczba odpowiedzi	Udział odpowiedzi	Suma odpowiedzi SLO
Tak	UOP [%]	Nie	UON [%]	
84	93,3	6	6,7	90

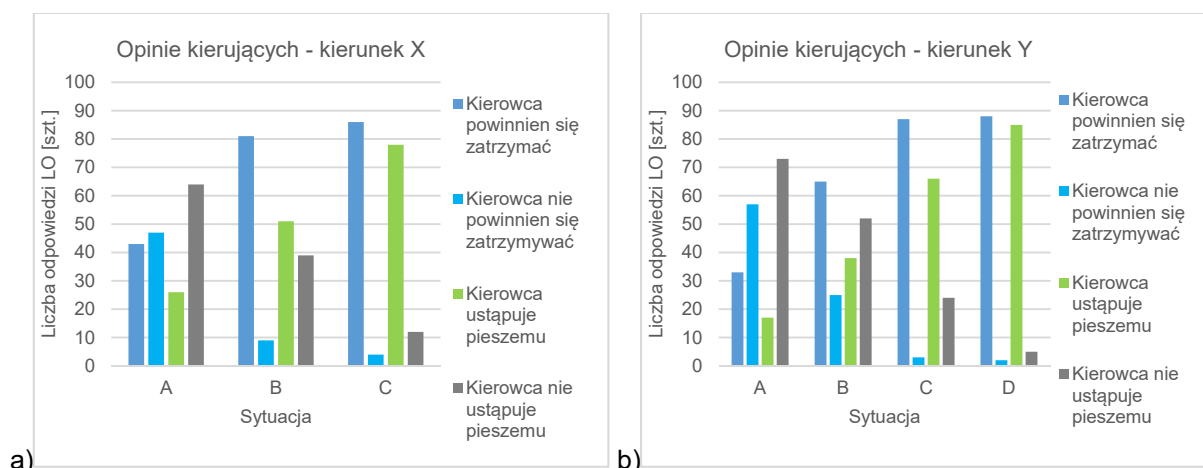


Rys.Z 1.2 Sytuacje (strefy pobytu pieszego) przedstawione kierowcom podczas badań ankietowych

Wyniki przeprowadzonych badań ankietowych kierowców zestawiono w Tab.Z 1.6 i na rys.Z 1.3.

Tab.Z 1.6 Zestawienie wyników z pytań badawczych dotyczących zachowań kierowców

Opinie kierujących - kierunek X (pieszy na pasie ruchu pojazdu)										
Sytuacja	Kierowca powinien się zatrzymać					Kierowca nie powinien się zatrzymywać				
	Tak	UOP [%]	Nie	UON [%]	Suma odpowiedzi SLO	Tak	UOP [%]	Nie	UON [%]	Suma odpowiedzi SLO
A	43	47,8	47	52,2	90	26	28,9	64	71,1	90
B	81	90,0	9	10,0	90	51	56,7	39	43,3	90
C	86	95,6	4	4,4	90	78	86,7	12	13,3	90
Opinie kierujących - kierunek Y (pieszy na sąsiednim pasie ruchu)										
Sytuacja	Kierowca powinien się zatrzymać					Kierowca nie powinien się zatrzymywać				
	Tak	UOP [%]	Nie	UON [%]	Suma odpowiedzi SLO	Tak	UOP [%]	Nie	UON [%]	Suma odpowiedzi SLO
A	33	36,7	57	63,3	90	17	18,9	73	81,1	90
B	65	72,2	25	27,8	90	38	42,2	52	57,8	90
C	87	96,7	3	3,3	90	66	73,3	24	26,7	90
D	88	97,8	2	2,2	90	85	94,4	5	5,6	90



Rys.Z 1.3 Rozkład odpowiedzi w zależności od lokalizacji kierowcy a) kierujący znajduje się na pasie ruchu, od strony zbliżającego się pieszego do przejścia b) kierujący znajduje się na pasie ruchu dalszym, niż kierunek zbliżającego się pieszego do przejścia

Z.1.3 Badania ankietowe opinii ekspertów zajmujących się inżynierią ruchu drogowego

Z.1.3.1 Identyfikacja czynników wpływających na funkcjonowanie przejść dla pieszych

Dla potrzeb niniejszej pracy przeprowadzono dwa badania ankietowe ekspertów inżynierii ruchu dotyczące funkcjonowania urządzeń dla pieszych. Badanie wstępne w 2016 roku i badanie uzupełniające w 2023 roku.

Celem wstępnego badania ekspertów zajmujących się inżynierią ruchu drogowego było rozpoznanie i identyfikacja czynników wpływających na funkcjonowanie przejść dla pieszych oraz uzyskanie opinii ekspertów dotyczących poziomu zagrożenia wypadkami pieszych na wybranych rodzajach przejść dla pieszych. Badania ankietowe przeprowadzono w 2016 roku wśród ponad 30 respondentów, którymi byli audytorzy bezpieczeństwa ruchu drogowego. Odpowiedzi uzyskano 25 ekspertów w wieku 30 – 60 lat, w tym 7 kobiet i 18 mężczyzn. Wskaźnik WRR wyniósł 83 %. Przy doborze grupy ekspertów skorzystano z istniejącej w Katedrze Inżynierii Drogowej bazy danych o audytorach brd biorących udział w kursach szkoleniowych.

Ankieta składała się z dwóch części. Pierwsza część pytań dotyczyła charakterystyki respondenta w zakresie: płeć, wiek oraz sposób korzystania z samochodu. Druga część dotyczyła oceny wpływu 15 czynników wybranych na podstawie studiów literatury i doświadczeń własnych ułożonych w trzech grupach czynników: ruchowych, drogowych i behawioralnych, na funkcjonowanie przejścia dla pieszych (tab.Z 1.7).

Błąd oceny wynosił 0,08. Minimalna wielkość próby przy poziomie istotności 0,05 była 20 . Zatem uzyskana liczba odpowiedzi była większa od minimalnej. Niestety próba nie była zbyt duża, dlatego wyniki potraktowano, jako wstępne rozpoznanie problemu.

Tab.Z 1.7 Zestawienie pytań badawczych w badaniach wstępnych

Które czynniki mają największy wpływ na funkcjonowanie przejść dla pieszych w mieście 0 (oceni w skali od 0 (brak wpływu) do 5 (bardzo duży wpływ) ?			
	Rodzaj czynników	Ocena	
1.	Czynniki ruchowe	natężenie ruchu pojazdów	
		natężenie ruchu pieszych	
		prędkość pojazdu	
		prędkość pieszego	
		gęstość pojazdów	
		gęstość pieszych	
		poziom swobody ruchu	
		luki czasowe między pojazdami	
2.	Czynniki ruchowe	długość przejścia dla pieszych	
		szerokość przejścia	

		lokalizacja przejścia (w obrębie skrzyżowania, między skrzyżowaniami)	
		sygnalizacja na przejściu dla pieszych	
		środki techniczne wpływające na redukcję prędkości pojazdu np., progi spowalniające, wyniesione przejścia dla pieszych	
3.	Czynniki behawioralne	zachowania pieszego	
		zachowania kierowcy	
Jak oceniasz bezpieczeństwo pieszego (oceni w skali od 1 (bardzo niebezpieczne) do 5 (bardzo bezpieczne) na przejściu dla pieszych ?			
Rodzaj przejścia			Ocena
1.	Przejście dwuetapowe przez jezdnię		
2.	Przejście przez jezdnię o przekroju 1x4 pasy ruchu		
3.	Przejście przez torowisko tramwajowe:	z sygnalizacją świetlną	
		z sygnalizacją dźwiękową „uwaga tramwaj”, bez sygnalizacji świetlnej lub dźwiękowej.	
		z wyspą azylu pomiędzy jezdnią i drogą rowerową, bez wyspy azylu pomiędzy jezdnią i drogą rowerową.	
4.	Przejście przez drogę rowerową		

W tab.Z 1.8 zestawiono charakterystykę przyjętych klas wielkości wpływu PW wraz z udziałem uzyskanych odpowiedzi przypisanych poszczególnym klasom. Natomiast w tab.Z 1.9 i na rys.Z 1.9 przedstawiono rozkład liczby odpowiedzi ekspertów z podziałem na poszczególne czynniki wraz z przypisaniem poziomu akceptowalności (rangi).

Tab.Z 1.8 Klasyfikacja poziomu wpływu wybranych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych

Poziom wpływu			Udział uzyskanych odpowiedzi	
Klasa	Ranga	Wielkość wpływu	ULO (%)	USP (%)
PW ₁	0	brak wpływu,	0,8	0
PW ₂	1	bardzo mały	7,9	2,1
PW ₃	2	mały	7,9	4,2
PW ₄	3	średni	17,3	13,7
PW ₅	4	duży	26,9	28,4
PW ₆	5	bardzo duży	39,1	51,6

Rys.Z 1.9 Zestawienie odpowiedzi z uwzględnieniem wielkości wpływu poszczególnych czynników

Lp.	Czynniki	Liczba odpowiedzi respondentów LO						Suma odpowiedzi	Suma punktów rangowych	Średnia wartość punktów w rangowych	Udział opinii pozytywnych	
		Wielkość wpływu										
		brak	bardzo mały	mały	średni	duży	bardzo duży					
		0	1	2	3	4	5					
							SLO	SPR	SWPR 0	WOP 9%)		
1	Czynniki ruchowe	Natężenie ruchu pojazdów	0	0	2	3	5	13	23	98	4,26	91,3
2		Natężenie ruchu pieszych	0	0	2	1	6	15	24	106	4,42	91,7
3		Prędkość pojazdu	0	0	1	1	7	16	25	113	4,52	96,0
4		Prędkość pieszego	0	11	4	4	1	2	22	45	2,05	31,8
5		Gęstość pojazdów	1	2	2	7	6	4	22	71	3,23	77,3
6		Gęstość pieszych	1	2	1	7	7	4	22	73	3,32	81,8
7		Poziom Swobody Ruchu	0	2	2	6	8	5	23	81	3,52	82,6
8		Luki czasowe między pojazdami	0	3	2	5	5	8	23	82	3,57	78,3
9	Czynniki drogowe	Długość przejścia dla pieszych	0	0	0	0	5	20	25	120	4,8	100
10		Szerokość przejścia	1	5	6	8	3	0	23	53	2,3	47,8
11		Lokalizacja przejścia	0	0	2	3	10	9	24	98	4,08	91,7
12		Sygnalizacja na przejściu dla pieszych	0	0	1	1	11	11	24	104	4,33	95,8
13		Środki techniczne wpływające na redukcję prędkości pojazdu np.. progi spowalniające	0	2	1	3	6	12	24	97	4,04	87,5
14	Czynniki behawioralne	Zachowania pieszego	0	1	1	6	8	9	25	98	3,92	92
15		Zachowania kierowcy	0	0	1	6	7	10	24	98	4,08	95,8
		Razem odpowiedzi	3	28	28	61	95	138	353	1337	3,79	83,3



Rys.Z 1.4 Rozkład odpowiedzi z uwzględnieniem wagi wpływu poszczególnych czynników

Z.1.3.2 Ocena poziomu zagrożenia wypadkami na przejściach dla pieszych

Badanie wpływu rodzaju przejścia na zagrożenie wypadkami pieszych prowadzono w ramach badań wstępnych i badań uzupełniających. W badaniu wstępnym wybrano 7 rodzajów przejść dla pieszych występujących na przecięciach z ulicami, torowiskami tramwajowymi i drogami dla rowerów, różniące się także wyposażeniem w urządzenia. Przyjęto pięć klas poziomu wpływu PW analizowanych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych. W tab.Z 1.10 zestawiono charakterystykę przyjętych klas poziomu wpływu PW wraz z udziałem uzyskanych odpowiedzi przypisanych poszczególnym klasom wpływu. Wyniki badań ankietowych dotyczących określenia wielkości wpływu rodzaju przejścia dla pieszych na ich funkcjonowanie przejść dla pieszych, a przede wszystkim zagrożenie wypadkami zestawiono w tab.Z 1.11.

Tab.Z 1.10 Klasyfikacja poziomu wpływu wybranych rodzajów przejść na zagrożenie wypadkami – badania wstępne

Poziom zagrożenia			Udział uzyskanych odpowiedzi	
Klasa	Ranga	Wielkość wpływu	ULO (%)	USP (%)
PW1	1	Bardzo małe	28,3	10,4
PW2	2	Małe	20,8	15,3
PW3	3	Średnie	13,3	14,6
PW4	4	Duże	24,9	26,4
PW5	5	Bardzo duże	12,7	23,3

Tab.Z 1.11 Zestawienie odpowiedzi z uwzględnieniem wielkości wpływu badanych rodzajów przejść na zagrożenie wypadkami – badania wstępne

Lp.	Rodzaj przejścia dla pieszych	Liczba odpowiedzi LO					Suma odpowiedzi	Suma punktów rangowych	Średnia wartość punktów rangowych	Udział opinii pozytywnych	
		Poziom bezpieczeństwa									
		bardzo mały	mały	średni	duży	bardzo duży					
		1	2	3	4	5	SLO	SPR	SWPR	UOP (%)	
1	Przejście dwuetapowe przez jezdnię	2	4	6	10	3	25	83	3,32	76	
2	Przejście przez jezdnię o przekroju 1x4 pasy ruchu	22	0	0	0	2	24	32	1,33	8,3	
3	Przejście przez torowisko tramwajowe	z sygnalizacją świetlną	0	0	1	17	7	25	106	4,24	100
4		z sygnalizacją dźwiękową "uwaga tramwaj"	7	7	10	1	0	25	55	2,2	44
5		bez sygnalizacji świetlnej lub dźwiękowej	9	12	3	1	0	25	46	1,84	16
6	Przejście przez	z wyspą azylu pomiędzy jezdnią i drogą rowerową	1	1	2	10	10	24	99	4,13	91,7

7	drogę rowerową	bez wyspy azylu pomiędzy jezdnią i droga rowerową	8	12	1	4	0	25	51	2,04	20
Razem odpowiedzi:			49	36	23	43	22	173	472	2,73	50,9

Uzupełniające badania ankietowe pozwoliły na uzyskanie opinii ekspertów inżynierii ruchu drogowego dotyczących określenia wielkości wpływu podstawowych rodzajów przejść dla pieszych na bezpieczeństwo ruchu w warunkach miejskich. Wybrano 6 rodzajów przejść dla pieszych (inne niż w badaniu wstępnym). Przyjęto pięć klas poziomu wpływu PW analizowanych czynników na zagrożenie wypadkami na analizowanych rodzajach przejść dla pieszych. W tab.Z 1.12 zestawiono charakterystykę przyjętych klas poziomu wpływu PW wraz z udziałem uzyskanych odpowiedzi przypisanych poszczególnym klasom wpływu. Natomiast w tab.Z 1.13 zestawiono odpowiedzi osób ankietowanych z uwzględnieniem wielkości wpływu badanych rodzajów przejść na zagrożenie wypadkami w badaniach uzupełniających.

Tab.Z 1.12 Klasyfikacja poziomu wpływu wybranych rodzajów przejść na zagrożenie wypadkami – badania uzupełniające

Poziom zagrożenia			Udział uzyskanych odpowiedzi	
Klasa	Ranga	Wielkość zagrożenia	ULO (%)	USP (%)
PW1	1	Bardzo duże	6,2	1,8
PW2	2	Duże	14,1	8,2
PW3	3	Średnie	30,1	26,2
PW4	4	Małe	27,9	32,4
PW5	5	Bardzo małe	21,7	31,5

Tab.Z 1.13 Zestawienie odpowiedzi z uwzględnieniem wielkości wpływu badanych rodzajów przejść na zagrożenie wypadkami – badania uzupełniające

Lp	Rodzaj przejścia dla pieszych	Liczba odpowiedzi LO					Suma odpowiedzi	Suma punktów rangowych	Średnia wartość punktów rangowych	Udział opinii pozytywnych
		Poziom bezpieczeństwa								
		bardzo mały	mały	średni	duży	bardzo duży				
		1	2	3	4	5	SLO	SPR	SWPR	UOP (%)
1	Przejście dwupoziomowe	0	0	5	8	33	46	212	4,610	100
2	Przejście zwykłe z sygnalizacją świetlną	0	0	7	18	21	46	198	4,3	100
3	Przejście zwykłe, wyniesione	0	0	16	25	5	46	173	3,76	100
4	Przejście zwykłe z azylem	1	4	21	19	1	46	153	3,13	89,1
5	Przejście typu zwykłe	4	16	21	5	0	46	119	1,8	56,5
6	Przejście sugerowane	12	19	13	2	0	46	97	1,02	32,6
Razem odpowiedzi:		17	39	83	77	60	276	952	3,450	79,7

Z.1.3.3 Ocena istotności kryteriów wyboru rodzaju przejścia dla pieszych

W celu sprawdzenia poziomu istotności kryteriów wyboru przejść dla pieszych przeprowadzono badania ankietowe wśród ekspertów. Wstępnie wybrano 8 kryteriów, które mogą być stosowane przy wyborze rodzaju przejścia dla pieszych, a w tym: bezpieczeństwo ruchu, przepustowość przejść i jezdni, warunki ruchu koszty budowy i utrzymania oraz możliwość wykonania przejścia.

Ankieta składała się z dwóch części. Pierwsza część pytań dotyczyła charakterystyki respondenta w zakresie: płeć, wiek oraz zawód. Druga część dotyczyła oceny istotności 8 kryteriów wyboru rodzaju przejścia. W tab.Z 1.14 zestawiono charakterystykę przyjętych klas istotności wpływu PW wraz z udziałem uzyskanych odpowiedzi przypisanych poszczególnym klasom wpływu.

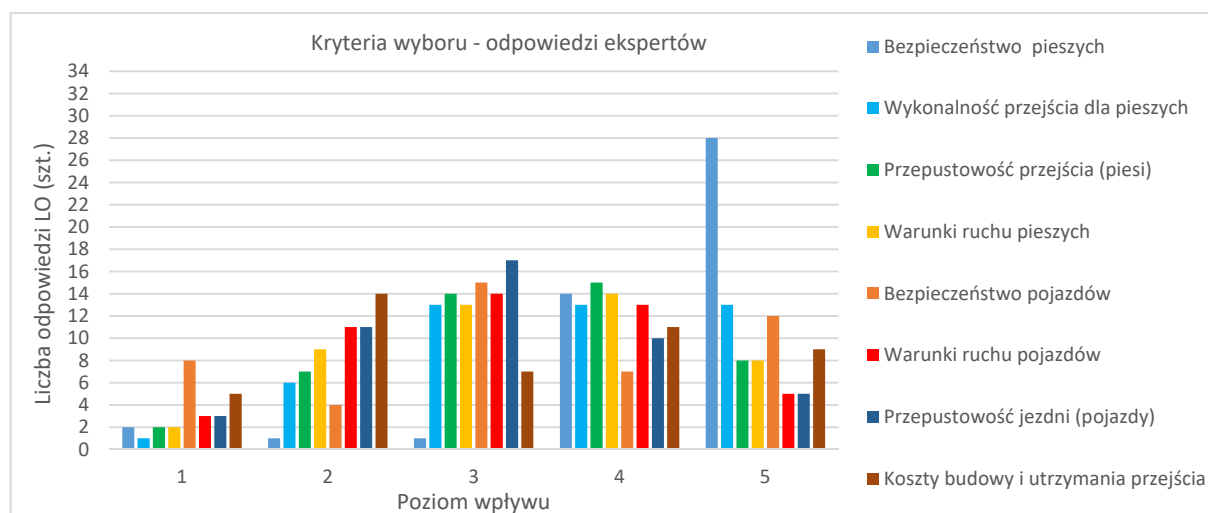
Tab.Z 1.14 Klasyfikacja poziomu wpływu wybranych kryteriów na wybór rodzaju przejścia dla pieszych

Klasa	Poziom wpływu		Udział uzyskanych odpowiedzi	
	Ranga	Istotność wpływu	ULO (%)	USP (%)
PW1	1	Bardzo mały	7,1	2,1
PW2	2	Mały	17,1	10,0
PW3	3	Średni	25,5	22,3
PW4	4	Duży	26,4	30,7
PW5	5	Bardzo duży	23,9	34,9

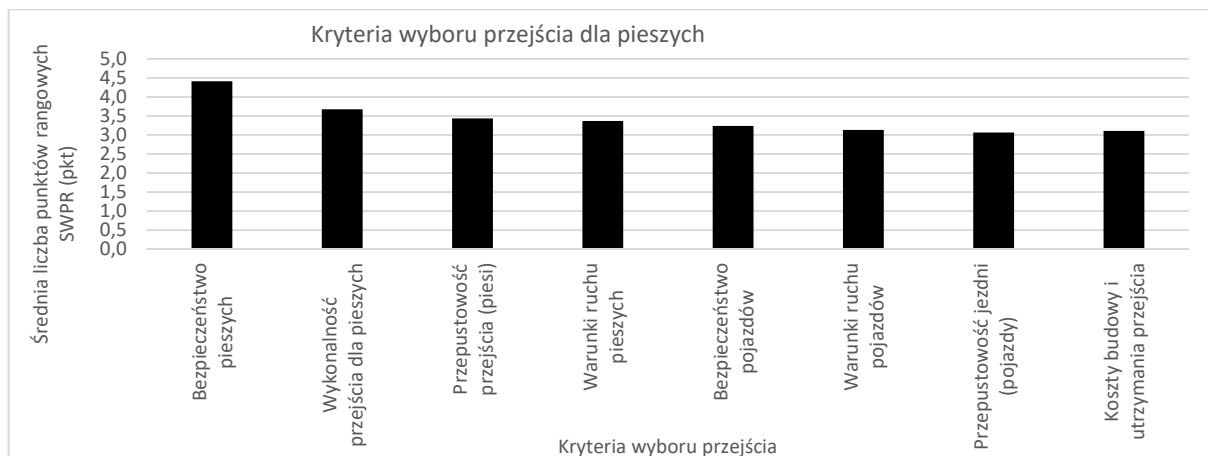
W celu uzyskania syntetycznej oceny zagregowano wyniki badań wyliczając średnią wartość punktów rangowych SPR traktowaną, jako wskaźnik istotności wpływu wybranego kryterium. Wyniki badań ankietowych dotyczących określenia istotności wpływu danego kryterium na wybór rodzaju przejścia dla pieszych zestawiono w tab.Z 1.15 oraz na rys.Z 1.5, rys.Z 1.6 i rys.Z 1.7.

Tab.Z 1.15 Zestawienie odpowiedzi ekspertów z uwzględnieniem istotności wpływu poszczególnych kryteriów na wybór rodzaju przejścia dla pieszych

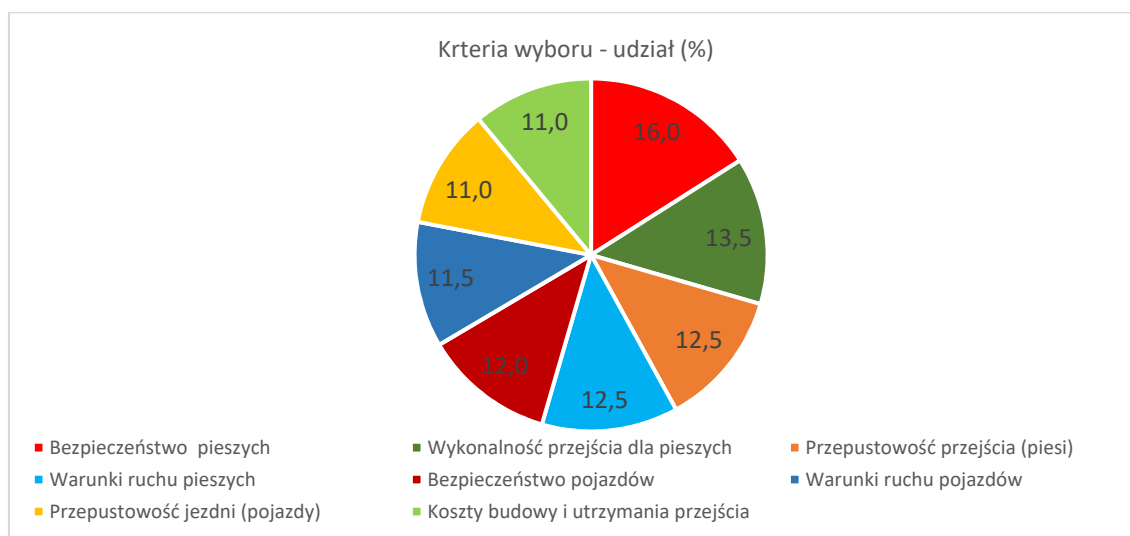
Lp.	Rodzaj przejścia dla pieszych	Liczba odpowiedzi LO					Suma odpowiedzi	Suma punktów rangowych	Średnia wartość punktów rangowych	Udział opinii pozytywnych	Udział istotności kryterium
		Istotność wpływu									
		bardzo mała	mała	średnia	duża	bardzo duża					
		1	2	3	4	5	SLO	SPR	SWPR	UOP (%)	USP (%)
1	Bezpieczeństwo pieszych	2	1	1	14	28	46	203	4,41	93,5	16,1
2	Wykonalność przejścia dla pieszych	1	6	13	13	13	46	169	3,67	84,8	13,4
3	Przepustowość przejścia (piesi)	2	7	14	15	8	46	158	3,43	80,4	12,5
4	Warunki ruchu pieszych	2	9	13	14	8	46	155	3,37	76,1	12,3
5	Bezpieczeństwo pojazdów	8	4	15	7	12	46	149	3,24	73,9	11,8
6	Warunki ruchu pojazdów	3	11	14	13	5	46	144	3,13	69,6	11,4
7	Przepustowość jezdni (pojazdy)	3	11	17	10	5	46	141	3,07	69,6	11,2
8	Koszty budowy i utrzymania przejścia	5	14	7	11	9	46	143	3,11	58,7	11,3
	Razem odpowiedzi	26	63	94	97	88	368	1262	3,43	75,8	100,0



Rys.Z 1.5 Rozkład odpowiedzi ekspertów z uwzględnieniem wielkości wpływu na bezpieczeństwo ruchu poszczególnych rodzajów przejść dla pieszych



Rys.Z 1.6 Rozkład średniej wagi istotności kryterium wyboru przejścia dla pieszych

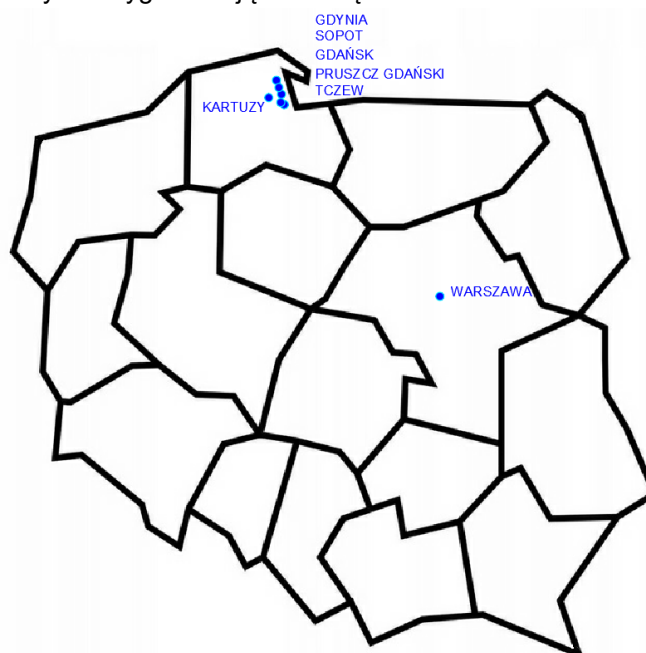


Rys.Z 1.7 Rozkład istotności analizowanych kryteriów wyboru rodzaju przejścia dla pieszych

ZAŁĄCZNIK 2. OPIS I WYBRANE WYNIKI BADAŃ TERENOWYCH

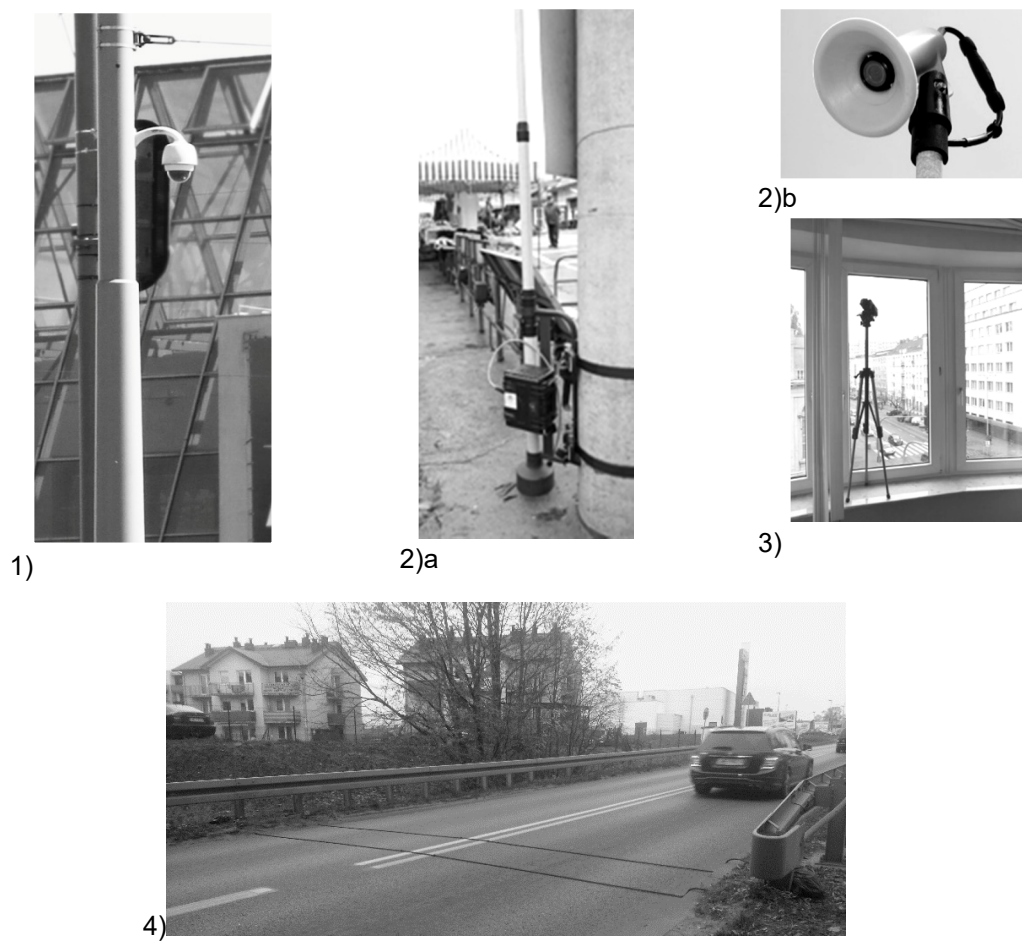
Z.2.1 Opis poligonu i metody badań terenowych prowadzonych na przejściach dla pieszych Założenia

Badania wybranych parametrów ruchu na przejściach dla pieszych prowadzono wykorzystując dostępne dane uzyskane w trakcie innych badań oraz badań terenowych prowadzonych w ramach niniejszej pracy na zwykłych przejściach dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej. Jedynie w przypadku prędkości przechodzenia pieszego przez jezdnię w celach porównawczych przeprowadzono badania także na przejściach dla pieszych z sygnalizacją świetlną.



Do rejestracji parametrów ruchu oraz zachowań pieszych i kierowców wykorzystano następujące narzędzia (rys.Z 2.1):

1. na przejściach dla pieszych włączonych do Systemu Sterowania Systemu Nadzoru Wizyjnego, będącego elementem Systemu Sterowania Ruchem TRISTAR [13], wykorzystano kamery szerokokątne. Kamery są usytuowane na stałe na wysokości ok. 4,5m z możliwością obrotu o 360 stopni, dzięki czemu pole obserwacji obejmowało całe analizowane przejście dla pieszych. (rys.Z 2.1 - 1);
2. MioVision - jest to kamera mobilna rejestrująca i gromadząca dane o ruchu drogowym z wykorzystaniem platformy bazy danych. Kamera umieszczona jest na maszcie o zmiennej wysokości do 7m. (rys.Z 2.1- 2a,2b);
3. kamery cyfrowe mobilne umieszczane na statywie lub przymocowane do słupa ulicznego (rys.Z 2.1 – 3);
4. MetroCount – urządzenie zliczające natężenie wraz ze strukturą rodzajową i prędkością pojazdów, pozwalające na długoterminowe gromadzenie danych. (rys.Z 2.1-4);
5. Kamery należące do miejskiego monitoringu wizyjnego Gminy Miasta Gdańska;

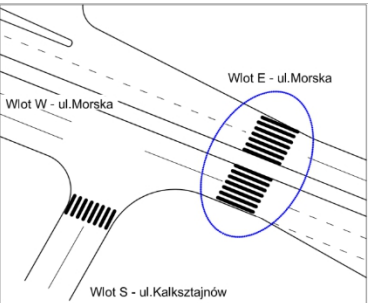
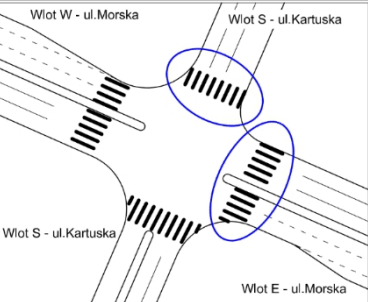
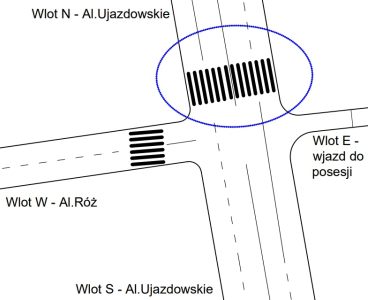


Rys.Z 2.1 Narzędzia do wideo rejestracji wykorzystane do zbierania danych o ruchu

Tab.Z 2.1 Badania terenowe zachowań pieszych i kierowców w obrębie przejść dla pieszych oraz badania parametrów ruchu pieszych – lokalizacja punktów badawczych

Przejście dla pieszych	Miasto	Lokalizacja miejsc, w których prowadzono badania terenowe				Przekrój ulicy, na której znajduje się przejście dla pieszych	Długość LP [m]	Rodzaj przejścia
		Skrzyżowanie	Ulica / Aleja / Lokalizacja	Schemat				
P1	Gdańsk	Wodnika			1x2	8,00	Bez sygnalizacji	
P2	Gdańsk	Al. Jana Pawła II – Powstańców Wielkopolskich	Jana Pawła II		2x2	19,06	Bez sygnalizacji	
P3	Gdynia	ul. Władysława IV – ul. 10 Lutego	10 Lutego		1x4	13,00	Z sygnalizacją	

Lucyna Gumińska „Badania wpływu wybranych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych w miastach”

P4	Gdynia	ul.Morska – ul.Kalksztajnow	Morska		2x2	22,57	Z sygnalizacją
P5	Gdynia	ul.Morska – ul.Kartuska	Morska		2x2	20,30	Z sygnalizacją
P6	Gdynia	ul.Morska – ul.Kartuska	Kartuska		1x2	13,93	Z sygnalizacją
P7	Warszawa	Al.Ujazdowskie – Al.Róż	Ujazdowskie		1x4	14,00	Bez sygnalizacji



Lucyna Gumińska „Badania wpływu wybranych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych w miastach”

P8	Warszawa	ul.Wiertnicza – ul.Obornicka	Wiertnicza		2x3	25,00	Bez sygnalizacji
P9	Warszawa	Plac Trzech Krzyży	Plac Trzech Krzyży		4 pasy	12,00	Bez sygnalizacji
P10	Gdańsk	Kładka dla pieszych na Wyspę Ołowianka	Schemat przedstawiono w rozdziale 5	n.d.	5,00	Kładka dla pieszych	

Celem badań terenowych było określenie podstawowych parametrów ruchu pieszego i kołowego oraz ich rozkładów i zależności w obszarze wybranych przejść dla pieszych; a w szczególności:

1. Identyfikacji rodzajów stosowanych przejść dla pieszych w Polsce oraz problemów występujących na tych przejściach,
2. Określenia wielkości ruchu pieszego i kołowego na przejściach dla pieszych w zależności od ich rodzaju,
3. Rozkładów dobowych natężeń ruchu pieszego i kołowego, zależności natężenia ruchu pieszego od natężenia ruchu kołowego oraz wielkości akceptowanych luk czasowych przez pieszych,
4. Rozkładów prędkości pieszych na przejściach dla pieszych,
5. Zmian prędkości pojazdów na dojazdach do obszaru przejścia dla pieszych,

Wyniki przeprowadzonych badań terenowych będą służyły do:

Identyfikacji podstawowych parametrów ruchu na przejściach dla pieszych

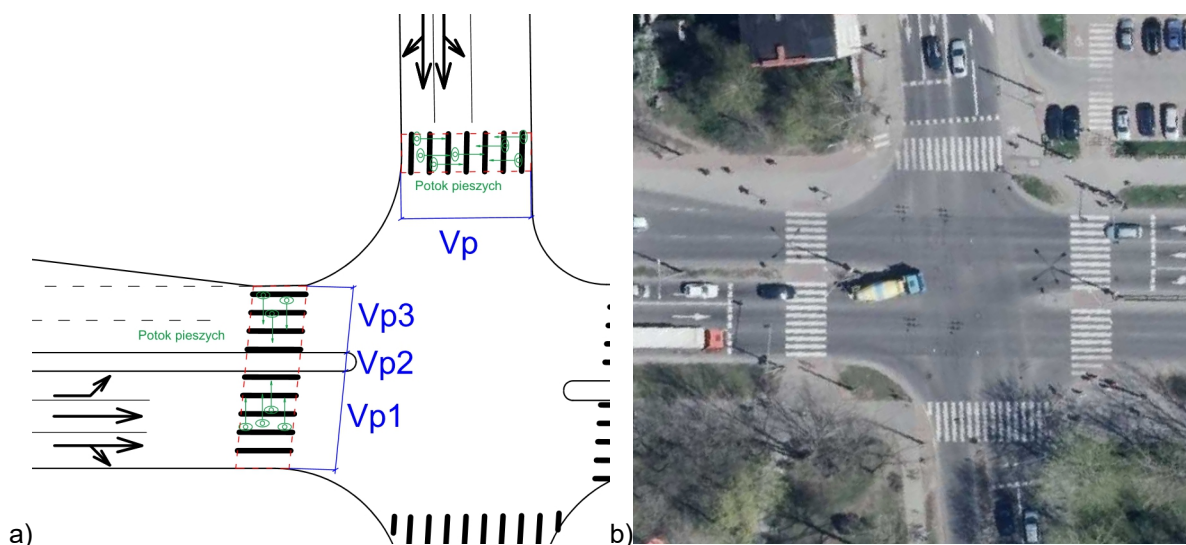
1. Budowy modeli symulacyjnych przejść dla pieszych wykorzystywanych w dalszych pracach,
2. Budowy modeli matematycznych wpływu wybranych czynników na funkcjonowanie przejść dla pieszych,
3. Opracowania fundamentalnej zależności ruchu pieszych Q-V-D (natężenie-prędkość-gęstość).

Ocenę funkcjonowania przejść dla pieszych wybrano prowadzono na dziesięciu przejściach dla pieszych zlokalizowany w Gdańsku Gdyni i Warszawie. Przedstawione wyniki badań pozwoliły na określenie prędkości pieszych na przejściach dla pieszych (rozdział 6.5), prędkości pojazdów (rozdział 6.6) na odcinkach dojazdowych do przejścia dla pieszych oraz badania zależności pomiędzy prędkością, gęstością i natężeniem ruchu (rozdział 6.7) oraz do badań mikrosymulacyjnych (rozdział 7). Ponadto wyniki tych badań pozwoliły w sposób pośredni na wykonanie koncepcji praktycznego wykorzystania wyników do oceny przejść dla pieszych przedstawionych w rozdziale 9.

Z.2.2 Opis poligonu i metody badań terenowych prowadzonych na kładce dla pieszych



Rys.Z 2.2 Narzędzia do wideo rejestracji wykorzystane do zbierania danych o ruchu

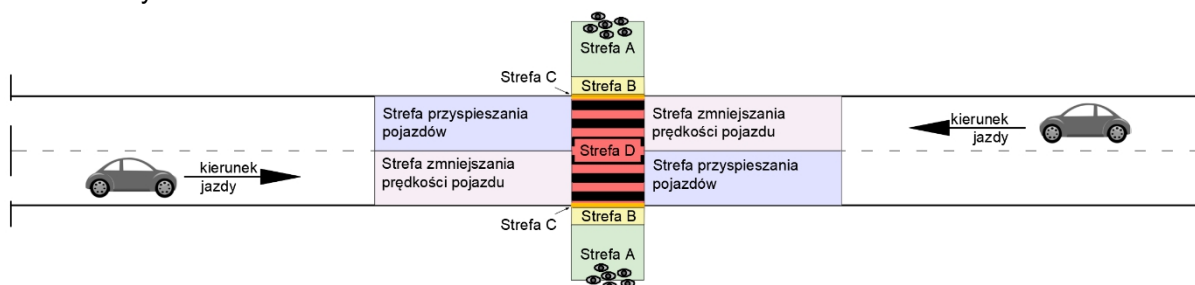


Rys.Z 2.3 a) Schemat przejścia dla pieszych b) zdjęcie satelitarne źródło: Google Maps

Z.2.3 Opis metody badań terenowych prędkości pieszych i pojazdów na przejściach dla pieszych

Z.2.3.1 Badania prędkości pieszych

Badania prowadzono z wykorzystaniem kamer filmowych. Na podstawie filmów z badań terenowych przeanalizowano zachowania około 380 pieszych na przejściach bez sygnalizacji świetlnej, uwzględniając takie czynniki jak natężenie pieszych, przedział wiekowy z podziałem na młodzież, dorośli (osoby w wieku produkcyjnym). Przeanalizowano także zachowania około 870 pieszych na przejściach z sygnalizacją świetlną z uwzględnieniem takich czynników jak natężenie pieszych, przedział wiekowy z podziałem na dzieci, młodzież i dorosłych (osoby w wieku produkcyjnym z podziałem na płeć) oraz osób starszych.



Rys.Z 2.4 Schemat przejścia dla pieszych z zaznaczeniem parametrów podlegających badaniu

Przeoglądając zarejestrowane na filmach zachowania pieszych rejestrowano czas przejścia poszczególnych pieszych przez jezdnię TPi. Prędkość pieszego VPi na przejściu dla pieszych obliczano korzystając ze wzoru (5.5.1):

$$VP_i = \frac{TP_i}{DP} \quad (\text{Wzór Z 2.1})$$

Prędkość średnią SVPj obliczano ze wzoru (5.5.2):

$$SVP_j = \sum_{i=1}^n VP_{i,j} \quad (\text{Wzór Z 2.2})$$

Wskaźnik zmienności prędkości WVP obliczano ze wzoru (5.5.3):

$$WVP_j = \frac{OVP_j}{SVP_j} \cdot 100 \quad (\text{Wzór Z 2.3})$$

gdzie:

VPi – prędkość pieszego (m/s),

TPi – czas przejścia pieszego przez jezdnię (s),

DP – długość przejścia dla pieszych (m),

SVPj – średnia prędkość j-tej grupy pieszych (m/s),

OVPj – odchylenie standardowe prędkości j-tej grupy pieszych (m/s),

WVPj – wskaźnik zmienności prędkości j-tej grupy pieszych (%), przyjęto trzy klasy zmienności prędkości:

WVP1 ≤ 25 mała zmienność, WVP2 ≤ 45 przeciętna zmienność, WVP3 > 45 silna zmienność.

W prowadzonych badaniach grupy pieszych przyjęto następująco:

- ze względu na płeć: kobieta, mężczyzna;
- ze względu na wiek: na dzieci, młodzież, i dorosłych (osoby w wieku produkcyjnym z podziałem na płeć) oraz osoby starsze.
- ze względu na rodzaj przekroju drogi: jezdnia dwukierunkowa (1x2 i 1x4 pasy ruchu) oraz jezdnia jednokierunkowa (2x2 i 2x3).

Z.2.3.2 Badania prędkość pieszych na przejściach bez sygnalizacji

Wyniki badań terenowych dla grupy pieszych przechodzących jezdnię na przejściach dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej przedstawiono w tab.Z 2.2 określone zostały wartości statystyk podstawowych. W badaniach uwzględniono tylko pieszych poruszających się prędkością swobodną. Odnotowana prędkość pieszych na przejściach bez sygnalizacji świetlnej, dla całej badanej populacji, była w zakresie od 0,32 do 3,6 [m/s]. Średnia prędkość pieszego wynosiła 1,38 m/s, natomiast moda, parametr wskazujący wartość o największym prawdopodobieństwie wystąpienia to prędkość pieszych wyniosła 1,50 [m/s]. Odchylenie standardowe przedstawia odchylenie od średniej i wynosi przeciętnie 0,40 (m/s). Kurtoza jest miarą koncentracji, wartość dodatnia dla badanej populacji wskazuje, że rozkład jest wysmukły. Wynik dodatni dla parametru skośność wskazuje prawostronną asymetrię rozkładu.

Błąd oceny wynosił 0,012. Minimalna wielkość próby przy poziomie istotności 0,05 była 73 . Zatem uzyskana liczba odpowiedzi była większa od minimalnej.

Tab.Z 2.2 Zestawienie podstawowych statystyk dla badania prędkości grupy pieszych na przejściach dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej

Statystyki	Bez sygnalizacji świetlnej
Liczba pieszych N [osób]	383
Średnia prędkość pieszych SVP [m/s]	1,38
Minimalna wartość prędkości pieszych VPmin [m/s]	0,32
Maksymalna wartość prędkości pieszych VPmax [m/s]	3,60
Moda VPm [m/s]	1,50
Odchylenie standardowe OVP [m/s]	0,40
Poziom istotności p	0,000005
Mediana VP50 [m/s]	1,38
Kurtoza [liczba]	4,65

Skośność	0,99
Błąd średniokwadratowy	0,012
Minimalna wielkość próby	73

Z.2.3.3 Badania prędkość pieszych na przejściach z sygnalizacją

Ze względu na błąd danych o grupie dzieci oraz małej próbie dla osób starszych na przejściach dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej przeprowadzono badania na przejściach dla pieszych z sygnalizacją świetlną. Wyniki badań terenowych dla populacji pieszych przechodzących przez jezdnię na przejściach dla pieszych z sygnalizacją świetlną przedstawiono na w tab.Z 2.3 określone zostały wartości statystyk podstawowych. W badaniach uwzględniono tylko pieszych poruszających się prędkością swobodną. Odnotowana prędkość pieszych na przejściach z sygnalizacją świetlną, dla całej badanej populacji, była w zakresie od 0,19 do 2,51 m/s. Średnia prędkość pieszego wynosiła 1,36 m/s, natomiast moda, parametr wskazujący wartość o największym prawdopodobieństwie wystąpienia to prędkość pieszych wyniosła 1,26 m/s. Odchylenie standardowe przedstawia odchylenie od średniej i wynosi przeciętnie 0,25 (m/s). Kurtosa jest miara koncentracji, wartość dodatnia dla badanej populacji wskazuje, że rozkład jest wysmukły. Wynik dodatni dla parametru skośność wskazuje prawostronną asymetrię rozkładu.

Błąd oceny wynosił 0,06. Minimalna wielkość próby przy poziomie istotności 0,05 była 82. Zatem uzyskana liczba odpowiedzi była większa od minimalnej.




Tab.Z 2.3 Zestawienie podstawowych statystyk dla badania prędkości grupy pieszych na przejściach dla pieszych z sygnalizacją świetlną


Statystyki	Wielkości
Liczba pieszych N [osób]	867
Średnia prędkość pieszych SVP [m/s]	1,36
Minimalna wartość prędkości pieszych VPmin [m/s]	0,19
Maksymalna wartość prędkości pieszych VPmax [m/s]	2,51
Moda VPm [m/s]	1,26
Odchylenie standardowe OVP [m/s]	0,25
Poziom istotności p	0,0026
Mediana VP50 [m/s]	1,35
Kurtoza [liczba]	2,47
Skośność	0,33
Błąd średniokwadratowy	0,06
Minimalna wielkość próby	82

ZAŁĄCZNIK 3. OPIS BADAŃ SYMULACYJNYCH

Z.3.1 Badań mikrosymulacyjne prowadzone na przejściach dla pieszych Założenia

Wzór Z 3.1 Badania terenowe zachowań pieszych i kierowców w obrębie przejść dla pieszych oraz badania parametrów ruchu pieszych – lokalizacja punktów badawczych

Przejście dla pieszych	Oznaczenie w badaniach terenowych	Lokalizacja miejsc, w których prowadzono badania terenowe						Rodzaj przejścia
		Miasto	Skrzyżowanie	Ulica / Aleja / Lokalizacja	Schemat	Przekrój ulicy na której znajduje się przejście dla pieszych	Długość LP [m]	
MSP 1.1	P1	Gdańsk	Wodnika			1x2	8,00	Bez sygnalizacji
MSP 1.2	P7	Warszawa	Al.Ujazdowskie – Al.Róż	Ujazdowskie		1x4	14,00	Bez sygnalizacji
MSP 2.1	P2	Gdańsk	Al.Jana Pawła II – Powstańców Wielkopolskich	Jana Pawła II		2x2	19,06	Bez sygnalizacji

MSP 2.2	P8	Warszawa	ul.Wiertnicza – ul.Obornicka	Wiertnicza		2x3	25,00	Bez sygnalizacji
---------	----	----------	---------------------------------	------------	---	-----	-------	---------------------