POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA INŻYNIERIA LĄDOWA I TRANSPORT
DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. Anna Wytrykowska

Metoda oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych stosowanych na przejściach dla pieszych

Promotor
dr hab. inż. Piotr Tomczuk, prof. uczelni

Promotor pomocniczy
dr inż. Marcin Chrzanowicz

WARSZAWA 2022

Autorka pracy pragnie podziękować:
Promotorowi oraz Promotorowi pomocniczemu za opiekę merytoryczną, cenne uwagi i sugestie oraz zaangażowanie, dzięki którym możliwe było napisanie tej pracy.
Rodzicom za pomoc oraz wsparcie podczas realizacji pracy.

STRESZCZENIE

Tematem dysertacji jest opracowanie metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych stosowanych na przejściach dla pieszych w aspekcie bezpieczeństwa ruchu drogowego. Podjęta w pracy tematyka wynika zarówno z niskiego poziomu bezpieczeństwa na drogach w porze nocnej jak i potrzeby uwzględnienia czynników oświetleniowych w działaniach podejmowanych na rzecz poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego.

W niniejszej pracy poruszono zagadnienia wpływu oświetlenia na bezpieczeństwo użytkowników dróg na przejściach dla pieszych niesterowanych sygnalizacją świetlną. Na wstępie zaprezentowano przegląd wymagań formalno-prawnych w zakresie oświetlenia oraz metod oceny parametrów oświetleniowych w kontekście bezpieczeństwa ruchu drogowego. Przegląd literatury wykazał, że w zakresie przejść dla pieszych, problem wpływu czynników oświetleniowych na bezpieczeństwo pozostaje nierozpoznany.

Autorka rozprawy podjęła się określenia zależności pomiędzy parametrami oświetleniowymi a liczbą konfliktów ruchowych. Sformułowano następującą tezę pracy: dodatni kontrast sylwetki pieszego z tłem jezdni wpływa na ograniczenie konfliktów w ruchu drogowym. Głównym celem pracy było zaproponowanie metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych stosowanych na przejściach dla pieszych.

Na podstawie wykonanych badań terenowych oraz analizy danych pochodzących od zarządcy drogi ustalono współczynnik korelacji między wybranymi parametrami oraz określono wartości kontrastu luminancji występujące na przejściach dla pieszych dla różnych warunków oświetleniowych. Uzyskane wyniki wykorzystane zostały do opracowania metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych. Ocena opiera się na analizie liczby konfliktów ruchowych na podstawie danych o warunkach oświetleniowych na przejściu dla pieszych i w jego otoczeniu oraz prędkości średniej pojazdów. Metodę opracowano z zastosowaniem metod heurystycznych (wnioskowania rozmytego). Układ wnioskujący zaprojektowano z wykorzystaniem wiedzy eksperckiej oraz badań własnych.

Opracowana metoda może posłużyć do oceny zasadności stosowania rozwiązań dedykowanych na przejściach dla pieszych, wspomagać zarządców dróg przy ustalaniu prawidłowych parametrów oświetleniowych, a także zostać wykorzystana do oceny oświetlenia w aspekcie szacowania poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Słowa kluczowe: przejście dla pieszych, oświetlenie uliczne (drogowe), kontrast, liczba konfliktów ruchowych, bezpieczeństwo ruchu drogowego

ABSTRACT

Evaluation of effectiveness of dedicated lighting solution used at pedestrian crossings

The subject of the dissertation is to develop a method for assessing the effectiveness of dedicated lighting solutions used at pedestrian crossings in terms of road safety. The subject of the work results from the low level of road safety at night and the need to take into account lighting factors in the activities undertaken to improve road safety.

The study discusses the impact of lighting on the safety of road users at pedestrian crossings not controlled by traffic lights. At the beginning is presented an overview of the formal and legal requirements in the field of lighting and methods of assessing lighting parameters in the context of road safety. The literature review showed that in the area of pedestrian crossings, the problem of the influence of lighting factors on safety remains unrecognized.

The author of the dissertation undertook to determine the relationship between lighting parameters and the number of traffic conflicts. The following thesis was formulated: the positive contrast of a pedestrian's silhouette with the background of the road reduces conflicts in road traffic. The main purpose of the work was to propose a method for assessing the effectiveness of dedicated lighting solutions used at pedestrian crossings.

Based on the performed field tests and data from the road administrator, the correlation coefficient between the selected parameters was determined and the contrast values at pedestrian crossings were determined for various lighting conditions. The obtained results were used to develop a method for assessing the effectiveness of dedicated lighting solutions. The assessment is based on the analysis of the number of traffic conflicts, based on data on lighting conditions and the average speed of vehicles. The method was developed using heuristic methods (fuzzy inference). The inference system was designed based on expert knowledge and own research.

The developed method can be used to assess the legitimacy of using solutions dedicated to pedestrian crossings, as well as help road managers in determining the correct lighting parameters. The proposed method can be used to assess lighting in road safety assessments.

Keywords: pedestrian crossing, road lighting, contrast, number of traffic conflicts, road safety

SPIS TREŚCI

Streszczenie 4
Abstract 5
Wykaz najważniejszych pojęć i definicji 8
1. Wstęp 11
1.1. Wprowadzenie 11
1.2. Przegląd stanu wiedzy 13
1.2.1. Przegląd sposobów oświetlenia przejść dla pieszych 13
1.2.2. Przegląd metod oceny stanu oświetlenia na przejściach dla pieszych 18
1.2.3. Przegląd metod oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego 25
1.2.4. Stan badań w zakresie wpływu oświetlenia na bezpieczeństwo ruchu drogowego 32
1.2.5. Przegląd metod oceny skuteczności stosowanych środków poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego 36
1.2.6. Analiza danych o wypadkach drogowych 39
1.3. Wnioski 44
2. Cel i teza pracy 46
2.1. Motywacja podjęcia tematu 46
2.2. Określenie celu głównego i celów szczegółowych pracy 47
2.3. Przyjęcie tezy pracy 47
3. Omówienie założeń metody 48
3.1. Wprowadzenie do metody 48
3.2. Podstawowe założenia metody 50
4. Pozyskanie danych w zakresie wybranych parametrów oświetleniowych oraz wybranych parametrów wpływających na bezpieczeństwo pieszych na przejściach dla pieszych 52
4.1. Opis poligonu badawczego 52
4.2. Opracowanie pozyskanych danych 55
4.2.1. Wybór metod i narzędzi pomiarowych 55
4.2.2. Analiza pozyskanych wyników badań 59
4.3. Analiza wyników inspekcji stanu oświetlenia przejść dla pieszych realizowanego przez Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie 78
5. Sformułowanie metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych stosowanych na przejściach dla pieszych 91

5.1. Opis metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych..... 91
5.2. Modelowanie rozmyte w zastosowaniu do oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych 92
5.2.1. Fuzyfikacja danych wejściowych..... 94
5.2.2. Zdefiniowanie reguł oceny..... 99
5.2.3. Agregacja następników reguł 100
5.2.4. Defuzyfikacja 100
5.2.5. Wyniki układu wnioskującego 102
5.3. Ocena skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych..... 103
5.4. Szacowanie liczby konfliktów ruchowych..... 105
5.5. Weryfikacja zaproponowanej metody..... 108
5.6. Walidacja zaproponowanej metody 114
6. Podsumowanie i wnioski..... 117
Bibliografia..... 121
Spis rysunków 131
Spis tabel 135

WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH POJĘĆ I DEFINICJI

Kontrast C jest to różnica w wyglądzie dwóch części pola widzenia oglądanych równocześnie lub kolejno. Kontrast można opisać równaniem [137]:

$$C = \frac{L_O - L_T}{L_T}$$

gdzie:
L_O – luminancja obiektu (pieszego) [cd/m^2],
L_T – luminancja tła (jezdni) [cd/m^2].

Konflikt ruchowy definiowany jest jako sytuacja ruchowa wskazująca na oddziaływanie pomiędzy dwoma użytkownikami drogi, którzy poruszają się w sposób grożący kolizją [55].

Luminancja danego punktu P powierzchni, w danym kierunku (C, γ) jest to iloraz elementarnej światłości $I(C, \gamma)$, jaką cechuje się nieskończenie małe otoczenie ds punktu P w tym kierunku oraz pola pozornej powierzchni dS' tego otoczenia, widzianego z tego kierunku [137]:

$$L(C, \gamma) = \frac{dI(C,\gamma)}{dS'} = \frac{dI(C,\gamma)}{dS cos\varepsilon} \text{ [cd/m}^2\text{]}$$

gdzie:
$dI(C, \gamma)$ – światłość elementu dS w kierunku (C, γ),
dS – elementarne otoczenie punktu P,
dS' - wielkość pozorna elementu dS z kierunku (C, γ),
ε – kąt płaski między kierunkiem (C, γ) i wektorem normalnym *n,*
n – wektor normalny do powierzchni S w punkcie P.

Natężenie oświetlenia *E* w danym punkcie powierzchni jest to suma działania wiązek świetlnych o luminancji L(C, γ), które z obszaru półprzestrzeni widzianej z danego punktu oświetlają ten punkt powierzchni. Natężenie oświetlenia można opisać równaniem [137]:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \int_{2\pi} \mathrm{L}(C, \gamma) \cos\varepsilon d\omega \text{ [lx]}$$

Przejście dla pieszych jest to powierzchnia jezdni, drogi dla rowerów lub torowiska przeznaczona do przechodzenia przez pieszych, oznaczona odpowiednimi znakami drogowymi.

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Od lat bezpieczeństwo ruchu drogowego w Polsce stanowi istotny problem społeczno-ekonomiczny. Pod względem liczby ofiar śmiertelnych wypadków drogowych, Polska znajduje się na czołowych miejscach wśród krajów Unii Europejskiej [30]. Rocznie odnotowuje się wysoką liczbę ofiar wypadków drogowych, wśród których dużą grupę stanowią piesi [30, 32].

Na przestrzeni lat coraz częściej dostrzegany jest problem widzialności sylwetki pieszego w porze nocnej. Należy podkreślić, że w Polsce w pięciu z dwunastu miesięcy (I, II, X, XI, XII) znaczna część szczytu (porannego i popołudniowego) ruchu drogowego wypada już po zachodzie lub przed wschodem słońca [48, 51]. Stosowanie wymagań formalnych i norm oświetleniowych ma na celu realizację przez instalacje oświetleniowe zakładanych warunków oświetleniowych, przyczyniając się do poprawy bezpieczeństwa na drogach.

Potrzeba wdrażania nowych rozwiązań poprawiających bezpieczeństwo pieszych, zaliczanych do grupy niechronionych użytkowników dróg, wpłynęła na dynamiczny rozwój systemów oświetlenia ulicznego. Obecnie na rynku oświetleniowym pojawia się szereg rozwiązań przeznaczonych do oświetlenia przejść dla pieszych, wśród których należy wymienić: aktywne oświetlenie lampami sygnałowymi, oprawy dedykowane o specjalnie uformowanej bryle światłości, czy inteligentne systemy oświetleniowe.

Producenci opraw oświetleniowych opracowali rozwiązania techniczne umożliwiające wyróżnienie sylwetki pieszego z tła jezdni na przejściach dla pieszych w porze o ograniczonej widoczności. Działanie dedykowanych opraw oświetleniowych o specjalnie uformowanej bryle światłości, przeznaczonych do stosowania na przejściach dla pieszych, opiera się na zapewnieniu kontrastu dodatniego sylwetki pieszego z tłem obserwacji. Zadanie to jest realizowane poprzez wprowadzenie światła z podwójnie asymetrycznych opraw oświetleniowych na pionową płaszczyznę sylwetki pieszego, przekraczającego jezdnię.

Rozwiązania te są coraz częściej stosowane przez zarządców dróg w ramach poprawy stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego. Przykładowo w Warszawie od co najmniej 5 lat sukcesywnie wdraża się dedykowane oświetlenie na przejściach dla pieszych. Tylko w 2019 roku zastosowano dedykowane oświetlenie na 400 obiektach [132].

Wraz ze wzrostem stosowania dedykowanych opraw oświetleniowych wzrasta zainteresowanie ich skutecznością. W ślad za wdrażaniem rozwiązań technicznych powinny iść odpowiednie badania i analizy oceniające efekty działania zastosowanego środka zaradczego, jakim w tym przypadku jest oświetlenie dedykowane przejść dla pieszych.

W niniejszej pracy podjęto się opracowania autorskiej metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych stosowanych na przejściach dla pieszych w aspekcie bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Rozprawa została podzielona na sześć głównych rozdziałów.

W pierwszym rozdziale skupiono się na przeglądzie literatury w kontekście analizy stosowanych metod badania i oceny oświetlenia oraz bezpieczeństwa ruchu drogowego na przejściach dla pieszych.

Na podstawie wniosków z przeprowadzonego przeglądu literatury w rozdziale drugim sformułowano tezę i cel pracy.

W rozdziale trzecim zaproponowano i opisano autorską metodę oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych oraz przedstawiono podstawowe założenia metody.

Kolejny rozdział dysertacji poświęcony został zagadnieniom związanym z pozyskaniem danych niezbędnych do budowy modelu oceny. W rozdziale tym przedstawiono opis poligonu badawczego z określeniem podstawowych parametrów i lokalizacji wybranych obiektów. Opisano przyjęte metody badawcze oraz przedstawiono uzyskane wyniki badań. Następnie opracowano pozyskane dane.

W rozdziale piątym sformułowano metodę oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych w aspekcie poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego. Określono zasady dokonania oceny z uwzględnieniem parametrów oświetleniowych oraz wybranych parametrów ruchu kołowego i pieszego. Opisano zastosowanie układu wnioskowania rozmytego w ocenie skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych. Następnie wykonano i opisano proces walidacji i weryfikacji modelu. Tym samym potwierdzono tezę pracy.

W rozdziale końcowym przedstawiono ogólne podsumowanie dysertacji, dokonano oceny zrealizowanego celu pracy oraz dowodów przyjętych tez. Wskazano na dalsze kierunki prac badawczych możliwych do kontynuowania w ramach podjętego zagadnienia.

1.2. Przegląd stanu wiedzy

1.2.1. Przegląd sposobów oświetlenia przejść dla pieszych

Wymagania w zakresie oświetlenia przejść dla pieszych wynikają z obowiązujących przepisów i regulacji prawnych, opracowanych na podstawie zaleceń Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej CIE [25]. W raportach CIE zawarte są informacje w zakresie wytycznych do opracowania i realizacji projektów oświetlenia ulicznego (zasad i poziomów oświetlenia) oraz procedur inspekcji i pomiarów oświetlenia. W raporcie [25] CIE przedstawiła zalecenia dla obszarów uczęszczanych przez pieszych użytkowników dróg.

Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN), na podstawie wytycznych CIE [25] opracował raporty dotyczące m.in. oświetlenia dróg [15, 86]. W efekcie w krajach członkowskich CEN (Austria, Belgia, Cypr, Dania, Estonia, Finlandia, Francja, Grecja, Hiszpania, Holandia, Irlandia, Islandia, Litwa, Luksemburg, Łotwa, Malta, Niemcy, Norwegia, Polska, Portugalia, Republika Czeska, Słowacja, Słowenia, Szwajcaria, Szwecja, Węgry, Woszech i Zjednoczone Królestwo) stosowane są jednolite zapisy norm w zakresie oświetlenia ulicznego.

W niektórych krajach dodatkowe wymagania w zakresie oświetlenia przejść dla pieszych stosowane są jako uzupełnienie dla wymagań oświetlenia ulicznego. Odrębne regulacje wprowadzono w: Australii i Nowej Zelandii [83], Czechach [108], Flandrii [120], Niemczech [84, 85], Norwegii [121], Szwajcarii [105], Szwecji [72], USA [6, 13], Wielkiej Brytanii [15], Włoszech [29]. Przytoczone regulacje przedstawiają wymagania i sposoby oświetlenia przejść dla pieszych dla danego kraju zarówno za pomocą oświetlenia ulicznego jak i specjalnego, dedykowanego oświetlenia przejść dla pieszych. Przykładowo w Niemczech [84, 85], Czechach [12, 108], Australii i Nowej Zelandii [83] szczegółowe wymagania dla stosowania rozwiązań dedykowanych opisano wartościami natężenia oświetlenia. Ponadto zdefiniowano wymiary geometryczne siatki pomiarowej dla weryfikacji rozwiązań stosowanych na przejściach dla pieszych.

W Polsce konieczność oświetlenia przejść dla pieszych wynika z §109 ust. 1 Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz. U. 43 poz. 430 z późniejszymi zmianami) [98]. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej wskazuje Polską Normę –PN-EN 13201:2016: Oświetlenie dróg [86] jako dokument określający wymagania techniczne dla oświetlenia ulicznego. W załączniku B przywołanej normy omówiono wymagania dla oświetlenia przejść dla pieszych.

Ponadto w 2017 roku na zlecenie Skarbu Państwa – Ministra Infrastruktury i Budownictwa przygotowano „Wytyczne prawidłowego oświetlenia przejść dla pieszych” [65, 66]. Celem opracowania było ustalenie wymagań, zaleceń i wytycznych w zakresie oświetlenia przejść dla pieszych w Polsce. W wytycznych przedstawiono założenia, procedurę oceny oświetlenia, a także procedurę ustalania poziomu oświetlenia i doboru rozwiązania na przejściach dla pieszych. Ponadto, w celu zapewnienia poprawnych warunków oświetleniowych przy zapewnieniu kontrastu dodatniego, zdefiniowano klasy oświetlenia na przejściach dla pieszych przy stosowaniu rozwiązań dedykowanych.

Analiza dostępnej literatury wykazała brak jednolitego sposobu oświetlenia przejść dla pieszych. Istniejące regulacje zakładają oświetlenie przejść dla pieszych zapewniając wysoki kontrast dodatni lub ujemny, jednocześnie wyróżniając sylwetkę pieszego poprzez stosowanie wyższych poziomów natężenia oświetlenia lub innej barwy światła [65].

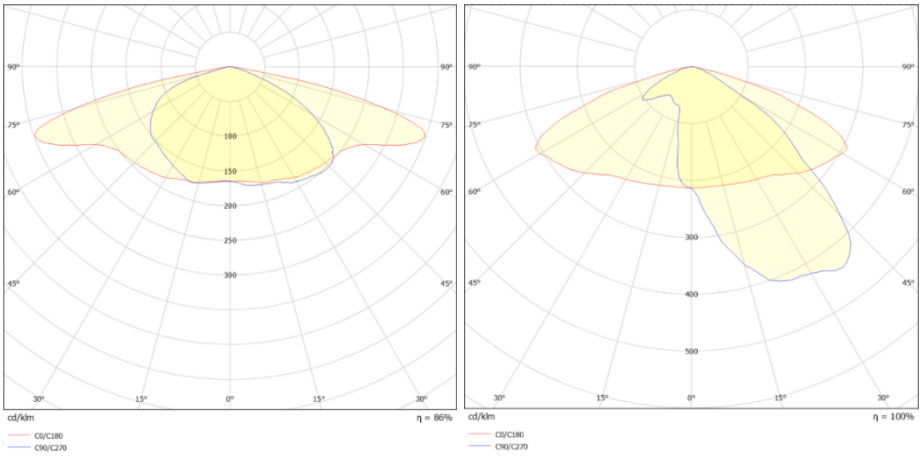
W Polsce do oświetlenia przejść dla pieszych stosuje się oświetlenie uliczne (drogowe) lub oświetlenie dedykowane. W zależności od zastosowanego rozwiązania można otrzymać różne parametry oświetleniowe.

Podstawowym parametrem oświetlenia na przejściu dla pieszych jest kontrast luminancji sylwetki pieszego na tle jezdni. Kontrast definiowany jest jako różnica w wyglądzie dwóch części pola widzenia oglądanych równocześnie lub kolejno. Kontrast może przyjąć wartość ujemną w przedziale $(-1 \div 0)$ lub wartość dodatnią w przedziale $(0 \div \infty)$ [13, 137].

Kontrast ujemny oznacza postrzeganie sylwetki pieszego jako ciemnego obiektu na jasnym tle. Na rysunku 1.1. przedstawiono przykład ujemnego kontrastu luminancji sylwetki pieszego z tłem. Kontrast ujemny najczęściej spotykany jest przy stosowaniu na przejściach dla pieszych opraw oświetlenia ulicznego [13, 137].

Rys. 1.1. Kontrast luminancji sylwetki pieszego z tłem
(zdjęcie po lewej stronie – kontrast ujemny, zdjęcie po prawej stronie – kontrast dodatni)
Źródło: Opracowano na podstawie [109]

Typowe oprawy oświetlenia ulicznego charakteryzują się symetrycznym rozsyłem wiązki świetlnej w płaszczyźnie C0-C180. Na rysunku 1.2. przedstawiono przykładowe symetryczne krzywe światłości opraw oświetlenia ulicznego.



Rys. 1.2. Symetryczna krzywa światłości oprawy oświetlenia ulicznego
Źródło: www.schreder.com (dostęp: 21.04.2020)

Zgodnie z obowiązującymi przepisami poziom oświetlenia ulicznego na przejściach dla pieszych dobierany jest na podstawie lokalizacji. W zależności od kategorii drogi, jej parametrów technicznych oraz warunków ruchu będą występowały różne sposoby rozmieszczania opraw oraz ich parametry techniczne. Na rysunku 1.3. przedstawiono przykład oświetlenia przejścia dla pieszych za pomocą opraw ulicznych w kontraście ujemnym.

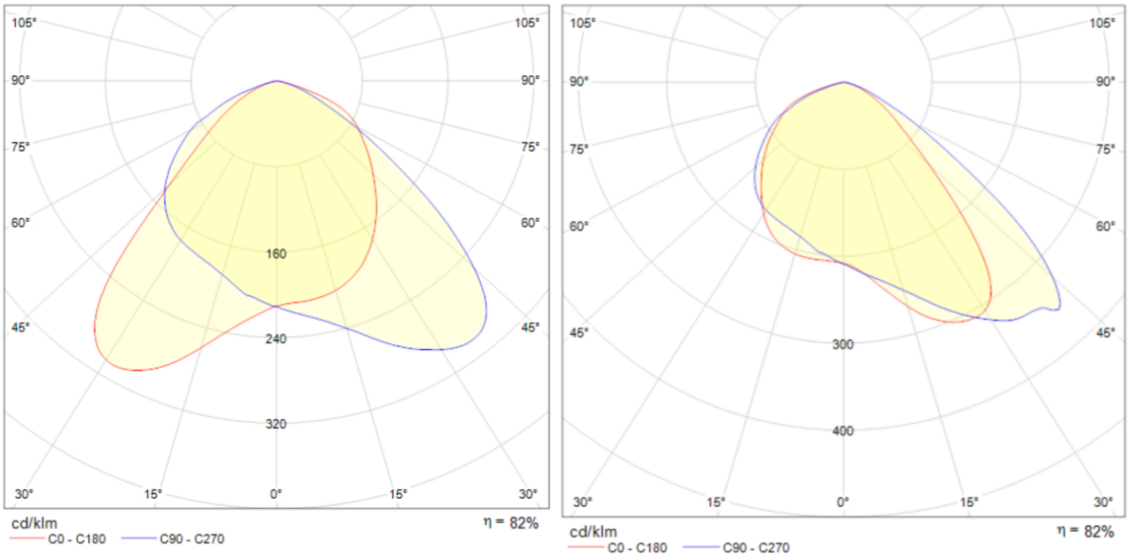
Rys. 1.3. Przykłady oświetlenia przejść dla pieszych za pomocą opraw oświetlenia ulicznego
Źródło: opracowanie własne

Coraz częściej spotykane jest doświetlenie obszaru przejścia dla pieszych za pomocą dodatkowej oprawy oświetleniowej na wysięgnikach typu Y, V, T. Rozwiązanie to umożliwia doświetlenie oraz wyróżnienie zarówno przejścia dla pieszych jak i stref oczekiwania [66, 116]. Zastosowanie dodatkowej oprawy poprawia widoczność pieszego. Rozwiązanie to umożliwia uzyskanie wysokiego kontrastu ujemnego dla jednego kierunku ruchu i kontrastu dodatniego lub ujemnego dla kierunku drugiego (uzależnione jest to od położenia latarni względem pieszego przechodzącego przez przejście). Ponadto usytuowanie latarni względem przejścia dla pieszych odgrywa dużą rolę w uzyskaniu zakładanych poziomów oświetleniowych i uzyskaniu kontrastu pieszego z tłem. Postrzeganie sylwetki pieszego przy zastosowaniu oświetlenia ulicznego z użyciem dodatkowej oprawy na wysięgniku typu Y przedstawiono na rysunku 1.4.

Rys. 1.4. Przykład oświetlenia przejścia dla pieszych wyłącznie za pomocą oświetlenia ulicznego z użyciem dodatkowej oprawy na wysięgniku typu Y

Źródło: opracowanie własne

Zastosowanie do oświetlenia przejść dla pieszych opraw dedykowanych, o asymetrycznej bryle światłości (rys. 1.5.), umożliwia uzyskanie kontrastu dodatniego sylwetki pieszego dla obydwu kierunków ruchu pojazdów [13]. Kierowca postrzega wtedy pieszego w postaci jasnego obiektu na ciemnym tle jezdni. Na rysunku 1.6. przedstawiono przykład doświetlenia przejścia dla pieszych za pomocą opraw dedykowanych. Rozwiązanie to umożliwia zwiększenie natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej i wpływa na poprawę widzialności pieszego oraz rozszerzenie oświetlenia na sąsiadujące strefy oczekiwania pieszego na wejście na jezdnię.



Rys. 1.5. Przykładowe asymetryczne krzywe światłości opraw dedykowanych do oświetlenia przejść dla pieszych (optyka lewa i prawa)

Źródło: www.thornlighting.pl (dostęp: 21.04.2020)

Rys. 1.6. Przykład oświetlenia przejścia dla pieszych za pomocą opraw dedykowanych

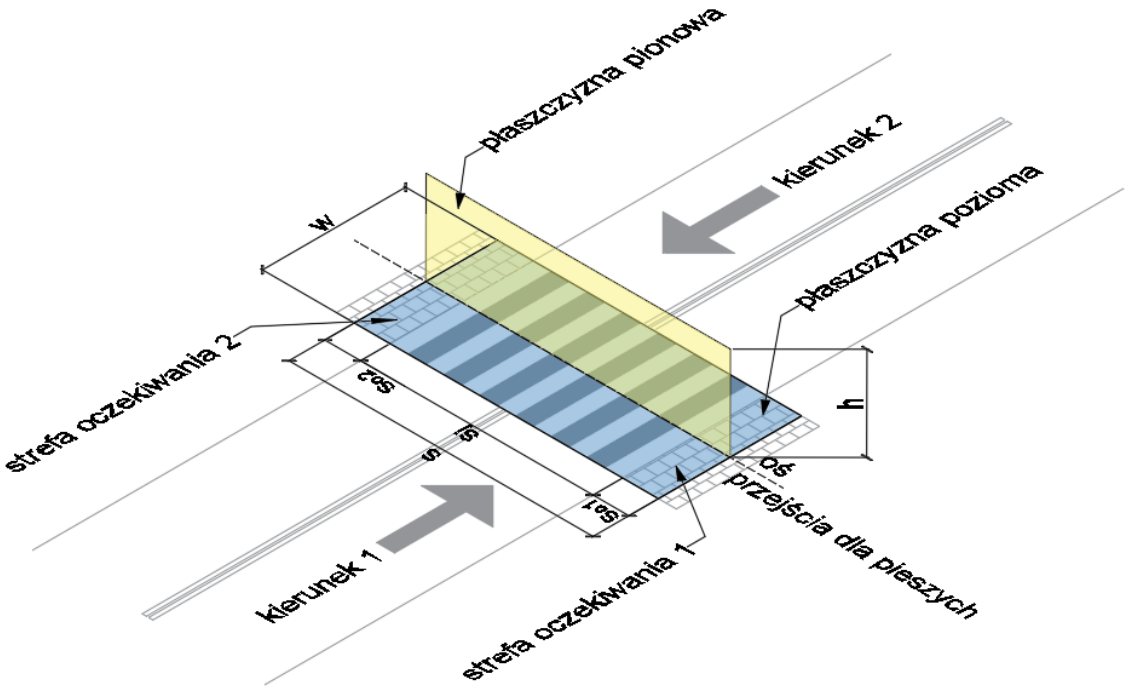
Źródło: opracowanie własne

Z powyższego wynika, że na przejściu dla pieszych można uzyskać dwie sytuacje oświetleniowe - pieszy widoczny w kontraście ujemnym (oświetlenie uliczne) lub dodatnim (oświetlenie oprawami dedykowanymi do przejść dla pieszych). Rekomendowanym rozwiązaniem, poprawiającym widoczność pieszego, jest rozwiązanie dedykowane. W przeciwieństwie do oświetlenia ulicznego, dodatkowe prawidłowo zastosowane oprawy o asymetrycznych rozsyłach światłości, pozwalają na uzyskanie równomiernego oświetlenia o wysokich parametrach technicznych (luminancji sylwetki pieszego) w całym przekroju przejścia dla pieszych.

1.2.2. Przegląd metod oceny stanu oświetlenia na przejściach dla pieszych

Jednym z kryteriów służących do oceny oświetlenia jest natężenie oświetlenia, definiowane jako stosunek elementarnego strumienia świetlnego padającego na powierzchnię stanowiącą elementarne otoczenie danego punktu oraz jej wartości [66, 111, 116]. Natężenie oświetlenia jest jednym z podstawowych parametrów oświetleniowych i służy do opisania wymagań normatywnych [13, 137]. Ponadto parametry natężenia oświetlenia są stosowane do oceny stanu oświetlenia przejść dla pieszych [8, 33, 37, 50, 53, 58, 59, 77, 89, 93, 94, 100, 109 – 111, 113, 127].

W odniesieniu do przejść dla pieszych należy wyróżnić płaszczyznę poziomą E_h i płaszczyznę pionową E_v. Na rysunku 1.7. przedstawiono płaszczyzny natężenia oświetlenia.



Rys. 1.7. Płaszczyzny pomiarowe natężenia oświetlenia

h- wysokość płaszczyzny pionowej, w – szerokość przejścia dla pieszych, s – długość przejścia dla pieszych, s_j – szerokość jezdni, s_{o1}, s_{o2} – szerokość stref oczekiwania

Źródło: opracowanie własne

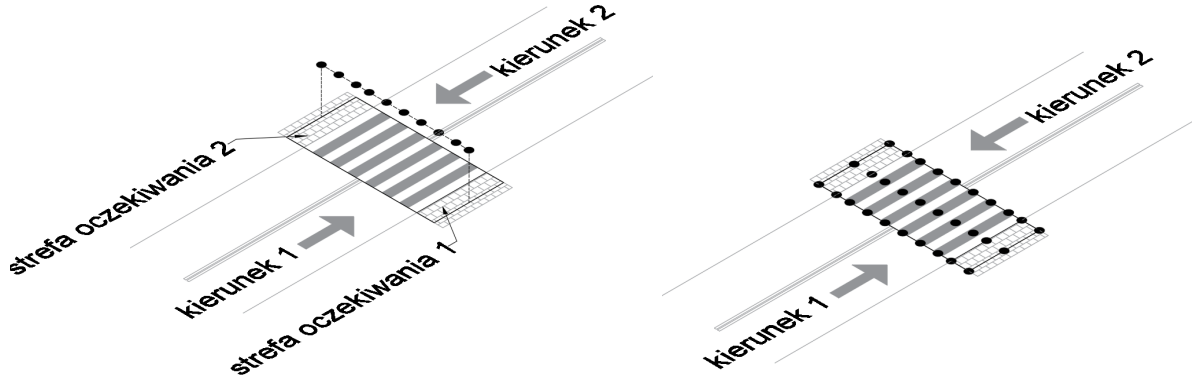
Płaszczyzna pozioma związana jest z natężeniem oświetlenia jezdni, tj. powierzchni przejścia dla pieszych i stref oczekiwania [66, 111]. Dla płaszczyzny poziomej wyznacza się następujące parametry:

- minimalne poziome natężenie oświetlenia $E_{h\,min}$ [lx],
- maksymalne poziome natężenie oświetlenia $E_{h\,max}$ [lx].

– średnie poziome natężenie oświetlenia $E_{h\ śr}$ [lx].
– równomierność rozkładu natężenia oświetlenia w płaszczyźnie poziomej ($E_{h\ min}/E_{h\ śr}$),
– parametr $E_{h\ min}/E_{h\ max}$ określający największą występującą różnicę wartości natężenia oświetlenia w płaszczyźnie poziomej.

Płaszczyzna pionowa związana jest z natężeniem oświetlenia sylwetki pieszego [66, 111]. Liczba płaszczyzn pionowych zależy od rodzaju drogi. W przypadku drogi jednokierunkowej przyjmuje się jedną płaszczyznę, w przypadku drogi dwukierunkowej – dwie związane z kierunkami ruchu. Dla płaszczyzny pionowej wyznacza się następujące parametry:
– minimalne pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\ min}$ [lx],
– maksymalne pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\ max}$ [lx],
– średnie pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\ śr}$ [lx],
– równomierność natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej ($E_{v\ min}/E_{v\ śr}$),
– parametr $E_{v\ min}/E_{v\ max}$ określający największą występującą różnicę wartości natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej.

W pracach [111, 113, 127] przedstawiono uproszczoną procedurę oceny oświetlenia na przejściach dla pieszych opracowaną w oparciu o wymagania normy [86]. Procedura ta zakłada przeprowadzenie wizji lokalnej obejmującej pomiary natężenia oświetlenia w płaszczyznach pionowej i poziomej. Na rysunku 1.8. przedstawiono przykładowe siatki pomiarowe dla obydwu płaszczyzn.



Rys. 1.8. Przykładowe siatki pomiarowe dla płaszczyzny pionowej i poziomej (rysunek po lewej stronie: płaszczyzna pionowa, po prawej stronie – płaszczyzna pozioma)
Źródło: opracowanie własne

Pomiary natężenia oświetlenia należy wykonać za pomocą wzorcowanych mierników. Pozyskane dane należy poddać analizie w celu otrzymania ww. parametrów. Otrzymane wyniki

należy porównać z wartościami natężenia oświetlenia określonymi dla klasy oświetleniowej i na ich podstawie dokonać oceny stanu oświetlenia.

Dla pomiarów natężenia oświetlenia w płaszczyźnie poziomej E_h przyjęto klasy oświetleniowe C, związane z oświetleniem stref konfliktowych [86]. W tabeli 1.1. przedstawiono klasy C poziomego natężenia oświetlenia wraz z przypisanymi wartościami punktowymi (ocenami).

Dla pomiarów pionowego natężenia oświetlenia E_v na przejściach dla pieszych przyjęto klasy oświetleniowe EV związane z oświetleniem powierzchni pionowych [86]. W tabeli 1.2. przedstawiono klasy EV pionowego natężenia oświetlenia wraz z przypisanymi wartościami punktowymi (ocenami).

Tabela 1.1. Klasy oświetlenia w płaszczyźnie poziomej E_h na przejściu dla pieszych i ich wartości punktowe

Poziom klasy C	**Punkty**	**Poziome natężenie oświetlenia**	
		$E_{hśr}$ **[lx]** (wartość najniższa, wartość oczekiwana)	U_o (wartość najniższa)
C0	6	50	0,4
C1	5	30	
C2	4	20	
C3	3	15	
C4	2	10	
C5	1	7,5	
Brak	0	<7,5	-

Źródło: opracowano na podstawie [86, 127]

Tabela 1.2. Klasy oświetlenia w płaszczyźnie pionowej E_v na przejściu dla pieszych i ich wartości punktowe

Poziom klasy EV	**Punkty**	**Pionowe natężenie oświetlenia**
		$E_{vśr}$ **[lx]** (utrzymywane)
EV1	6	50
EV2	5	30
EV3	4	10
EV4	3	7,5
EV5	2	5
EV6	1	0,5
Brak	0	<0,5

Źródło: opracowano na podstawie [86, 127]

Na podstawie otrzymanych wartości punktowych należy określić obiektywną ocenę sumaryczną oświetlenia zgodnie ze wzorem [127]:

$$\text{ocena obiektywna} = \text{klasa } C*0{,}33 + \text{klasa } EV1*0{,}33 + \text{klasa } EV2*0{,}33 \qquad (1.1.)$$

gdzie:

klasa *C* – wartość punktowa odpowiadająca klasie C natężenia oświetlenia w płaszczyźnie E_h,

klasa *EV1* – wartość punktowa odpowiadająca klasie EV natężenia oświetlenia w płaszczyźnie E_v dla kierunku 1,

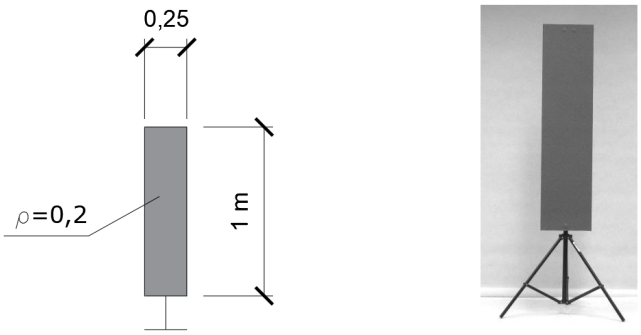
klasa *EV2* – wartość punktowa odpowiadająca klasie EV natężenia oświetlenia w płaszczyźnie E_v dla kierunku 2.

Parametry natężenia oświetlenia pozwalają na zweryfikowanie zakładanych wartości projektowych oraz kontrolę i ocenę stanu oświetlenia na przejściach dla pieszych. Jednak nie pozwalają na uwzględnienie luminancji tła, na którym obserwowany jest pieszy przez kierowcę zbliżającego się do przejścia.

Do oceny widzialności sylwetki pieszego na przejściu dla pieszych, obok natężenia oświetlenia, zaleca się stosowanie kryterium luminancji i kontrastu luminancji [13]. W dokumentach normatywnych i literaturze nie ma określonej procedury pomiarowej. Badania luminancji do oceny oświetlenia drogowego zostały wykorzystane w pracach: [1, 8, 9, 20, 33, 93, 111, 119, 131].

Poniżej przedstawiono koncepcję metody wyznaczania luminancji i kontrastu luminancji sylwetki pieszego z tłem na przejściu dla pieszych opracowaną na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej [111].

Omawiana procedura zakłada wykorzystanie obiektu testowego odwzorowującego boczną sylwetkę pieszego na przejściu dla pieszych. Zastosowany obiekt testowy został pokryty materiałem o rozproszonej charakterystyce odbicia i współczynniku $\rho = 0{,}2$. Założenie to przedstawia niekorzystną sytuację obserwacji pieszego przez kierowcę tj. pieszy ubrany w ciemne ubranie. Na rys. 1.9. przedstawiono podstawowe wymiary oraz widok obiektu zastosowanego w badaniach.



Rys. 1.9. Podstawowe wymiary oraz widok obiektu zastosowanego w badaniach
Źródło: opracowano na podstawie [111]

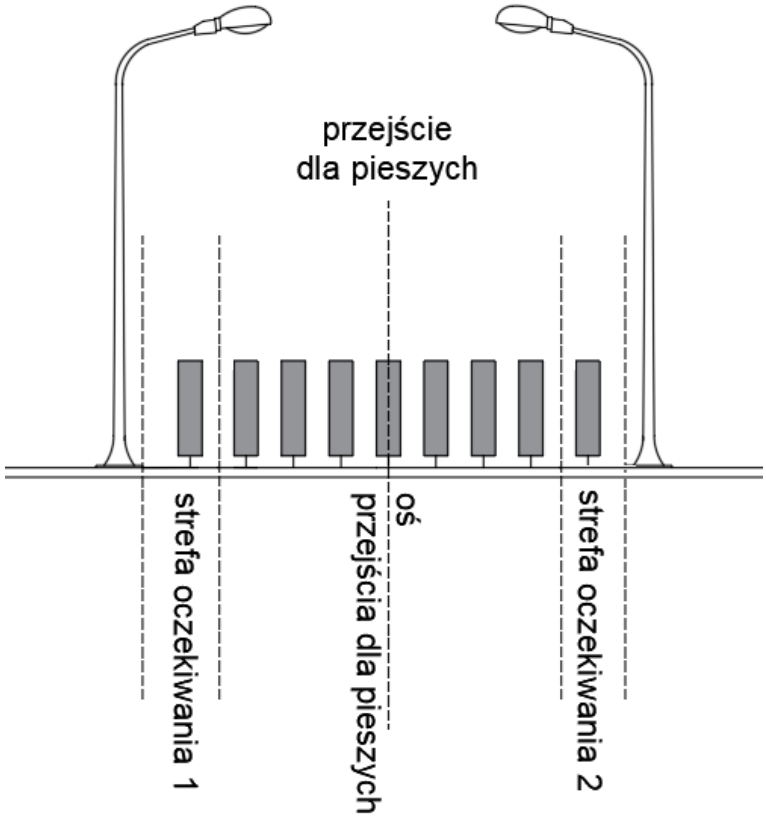
Procedura wyznaczania luminancji oraz obliczenie kontrastu luminancji sylwetki pieszego z tłem, obserwowanego przez kierowcę zbliżającego się do przejścia dla pieszych, odbywa się w następujących etapach:

1. pomiar geometrii przejścia dla pieszych,
2. usytuowanie obiektów testowych na przejściu dla pieszych,
3. określenie kierunków obserwacji obiektów testowych,
4. pomiary luminancji obiektu i luminancji tła dla przyjętych kierunków obserwacji,
5. obliczenie kontrastu luminancji obiektów z tłem dla poszczególnych obiektów i wartości średniej.

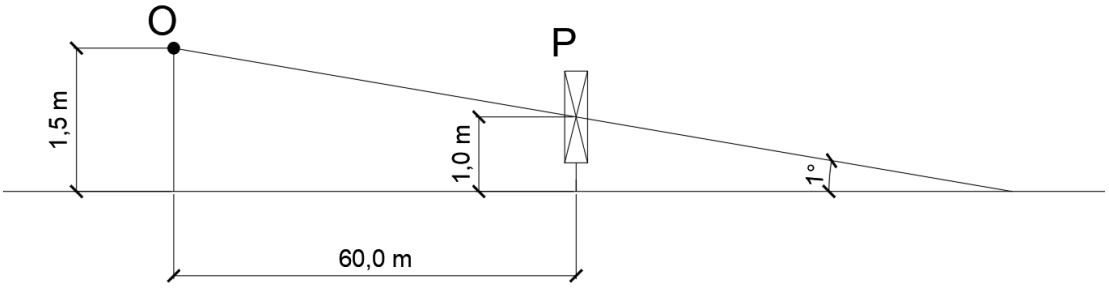
Ustalenie parametrów geometrycznych przejścia dla pieszych jest niezbędne do określenia położenia obiektów testowych. Obiekty testowe należy usytuować w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez oś przejścia dla pieszych tak, aby swoim zakresem znalazły się w strefach oczekiwania, na pasie (pasach) ruchu kierunku zgodnego z kierunkiem obserwacji oraz na pasie (pasach) ruchu kierunku przeciwnego do kierunku obserwacji. Lokalizację obiektów testowych na przejściu dla pieszych przedstawiono na rysunku 1.10.

Przed przystąpieniem do badań należy przyjąć kierunki obserwacji. Są one tożsame z dozwolonymi na danym odcinku drogi kierunkami ruchu pojazdów (w przypadku drogi jednokierunkowej - jeden kierunek obserwacji, w przypadku drogi dwukierunkowej – dwa kierunki obserwacji).

Przy pomiarze luminancji według omawianej metody ważne jest zachowanie odpowiednich odległości między obserwatorem i obiektem. Geometrię pomiaru przedstawiono na rysunku 1.11. Obserwator powinien znajdować się w odległości ok. 60,0 m od obiektu usytuowanego w osi przejścia dla pieszych. Głowica przyrządu pomiarowego powinna być usytuowana na wysokości 1,5 m nad poziomem drogi.



Rys. 1.10. Lokalizacja obiektów testowych na przejściu dla pieszych
Źródło: opracowano na podstawie [111]



Rys. 1.11. Geometria pomiaru luminancji
Źródło: opracowano na podstawie [111]

Do pomiaru luminancji wykorzystuje się miernik punktowy lub matrycowy. Pomiar luminancji wykonuje się dla każdego kierunku ruchu pojazdów. W omawianym opracowaniu wykorzystano miernik matrycowy, będący profesjonalnym aparatem fotograficznym umożliwiającym zarejestrowanie obrazu luminancji. Obraz rejestrowany jest w postaci

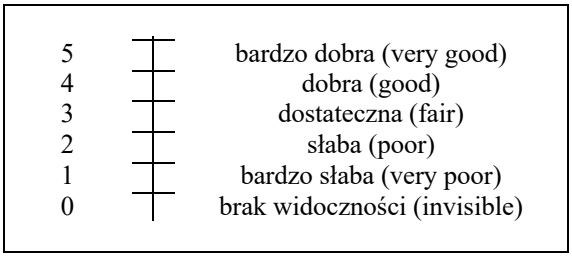
fotografii cyfrowych, a jego przetwarzanie i prezentacja wyników możliwa jest za pomocą specjalistycznego oprogramowania pomiarowego.

W USA do wyznaczania wartości poziomu widzialności wykorzystuje się metodę STV [2, 23, 24]. Parametr STV zdefiniowany został jako miara widzialności dwuwymiarowego obiektu o określonych wymiarach geometrycznych (0,2 m x 0,2 m) [5]. Służy on, obok parametru luminancji, do sprecyzowania widoczności obiektu na jezdni.

Metoda STV sprowadza się do obliczenia „poziomu widzialności" VL, związanego z warunkami obserwacji standardowego obiektu umieszczonego na jezdni, w określonej odległości od obserwatora. Wartość widzialności STV jest obliczana na podstawie usytuowania obiektu i jego parametrów odbiciowych. W efekcie otrzymuje się kontrast luminancji obiektu i tła, a także możliwe jest obliczenie luminancji zamglenia. Szczegółowy algorytm obliczania wartości widzialności z modelu STV opisany jest w ANSI/IESNA RP-8-00. Roadway Lighting [4].

Model STV nie jest skierowany bezpośrednio dla oceny warunków widoczności na przejściach dla pieszych, ale przyjęcie odpowiednich założeń pozwala na obliczenie poziomu widzialności także w tym miejscu.

Po zastosowaniu opisanego w [4] algorytmu obliczeń otrzymuje się wartość VL, którą można zinterpretować w odniesieniu do skali przedstawionej na rysunku 1.12. Przedstawiona skala odnosi się do metody STV. Uzyskanych danych nie należy porównywać z danymi pozyskanymi dla innych obiektów o odmiennych wymiarach geometrycznych i warunkach odbiciowych oraz dla innej geometrii pomiaru.



Rys. 1.12. Skala ocen poziomu widoczności w metodzie STV

Źródło: opracowano na podstawie [111]

1.2.3. Przegląd metod oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego

Oceny zagrożenia w ruchu drogowym można dokonać na podstawie przeprowadzonych badań terenowych i analizy zgromadzonych danych. Najczęściej spotykanym podejściem do oceny zagrożeń jest analiza danych o wypadkach drogowych.

W krajach europejskich dane o wypadkach drogowych najczęściej gromadzone są przez Policję. W niektórych krajach dane o wypadkach drogowych dodatkowo gromadzone są przez szpitale (Dania, Holandia, Grecja, Szwecja, Hiszpania i Słowenia) lub przez organizacje rządowe (Belgia, Portugalia, Węgry) [11]. W Polsce baza danych o wypadkach drogowych prowadzona jest przez Biuro Ruchu Drogowego Komendy Głównej Policji [32]. W krajach Unii Europejskiej dane o wypadkach drogowych zbierane są w Community Road Accident Database (CARE) [31] i Eurostat database [30]. Inne, międzynarodowe bazy danych to: International Road Traffic and Accident Database (IRTAD), UNECE Statistical Database oraz The WHO Mortality Database.

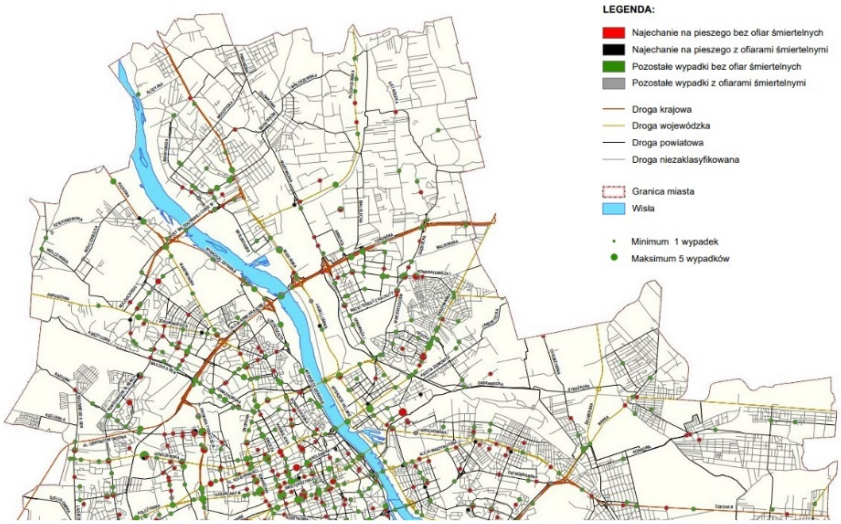
Na podstawie liczby wypadków można określić częstość ich występowania oraz wskaźnik wypadkowości. Częstość wypadków definiowana jest jako liczba wypadków na danym odcinku drogi zarejestrowana w określonym czasie. Wskaźnik wypadkowości jest to stosunek liczby wypadków do stopnia narażenia uczestnika ruchu drogowego. Stopień narażenia uczestników ruchu drogowego na ryzyko zostania ofiarą wypadku oblicza się na podstawie liczby kolizji (spotkań) między uczestnikami ruchu drogowego [39, 41].

Dane o wypadkach drogowych można wykorzystać do identyfikacji miejsc niebezpiecznych. W literaturze można wyróżnić dwa podejścia: identyfikację tzw. „czarnych punktów" (Black Spot Management – BSM) lub identyfikację niebezpiecznych odcinków („czarnych odcinków") [40, 63, 64].

Metoda bazująca na tzw. „czarnych punktach" (BSM) sprowadza się do określenia, na podstawie liczby ofiar i wypadków drogowych oraz oceny ryzyka indywidualnego i społecznego, miejsc najbardziej niebezpiecznych, tj. z największą liczbą wypadków lub ofiar wypadków drogowych. Wyznaczenie „czarnych punktów" polega na podziale fragmentu sieci drogowej na krótkie odcinki, a następnie ich kategoryzacji na podstawie liczby wypadków, przyjętych miar bezpieczeństwa oraz inspekcji w terenie. Określenie tzw. „czarnych punktów" umożliwia identyfikację miejsc szczególnie zagrażających bezpieczeństwu ruchu drogowego, takich jak skrzyżowania lub przejścia dla pieszych. Metoda ta ma zastosowanie w Austrii, Danii, Niemczech, Węgrzech, Norwegii, Portugalii i innych krajach europejskich [40, 63].

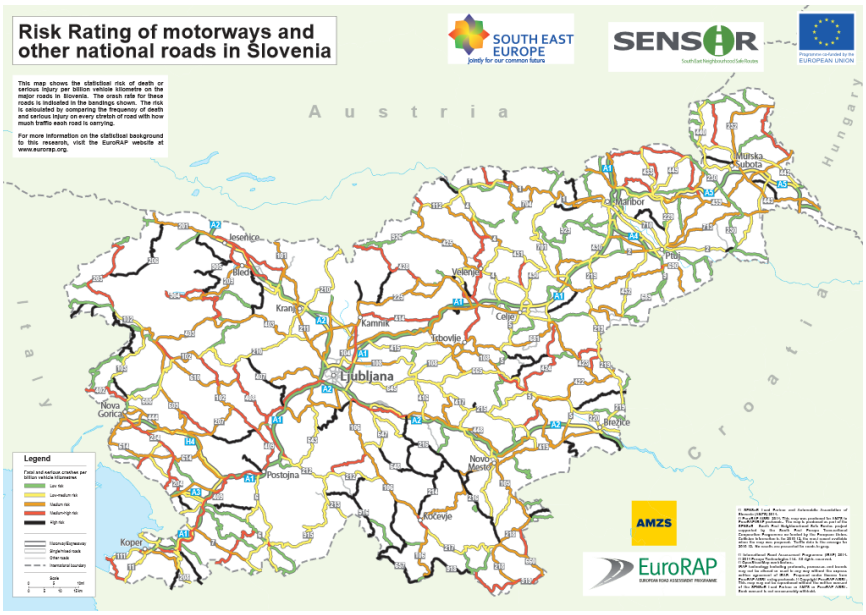
Na rysunku 1.13. przedstawiono przykład koncentracji wypadków w miejscach niebezpiecznych w Warszawie.

Metoda wyznaczania tzw. „czarnych odcinków” dróg (Network Safety Management – NSM) pozwala na identyfikację niebezpiecznych odcinków dróg ze wskazaniem zagrożeń oraz oszacowaniem ryzyka. Metoda ta znalazła zastosowanie w Niemczech, Francji czy Danii [40, 63]. Na rysunku 1.14. przedstawiono przykładową mapę ryzyka stworzoną na podstawie identyfikacji niebezpiecznych odcinków dróg.



Rys. 1.13. Koncentracja wypadków drogowych w miejscach szczególnie niebezpiecznych w Warszawie

Źródło: opracowano na podstawie [132]

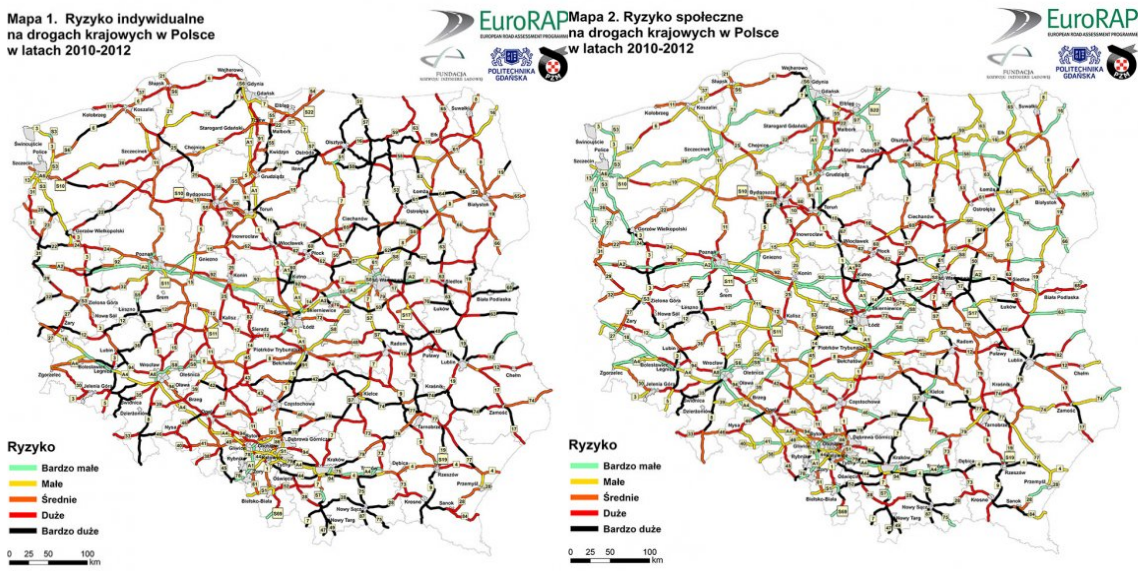


Rys. 1.14. Przykład klasyfikacji odcinków pod kątem ryzyka na przykładzie Słowenii

Źródło: opracowano na podstawie [43]

W Polsce w 2012 roku opublikowana została ustawa [118] określająca warunki identyfikacji odcinków niebezpiecznych. Wyróżniono klasyfikację odcinków dróg ze względu na koncentrację wypadków śmiertelnych (analizę istniejącej sieci drogowej pod względem liczby wypadków śmiertelnych, w wyniku której wytypowane zostaną najbardziej niebezpieczne odcinki dróg o dużej liczbie wypadków śmiertelnych) oraz ze względu na bezpieczeństwo sieci drogowej (analizę istniejącej sieci drogowej, w wyniku której wytypowane zostają odcinki dróg o dużej możliwości poprawy bezpieczeństwa oraz zmniejszenia kosztów wypadków drogowych).

W rezultacie, na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, opracowana została metoda identyfikacji miejsc niebezpiecznych [16]. Metoda ta opiera się na analizie ryzyka indywidualnego i społecznego. Klasyfikacja odcinków ze względu na koncentrację wypadków powstała bazując na ryzyku indywidualnym, natomiast klasyfikacja odcinków ze względu na bezpieczeństwo sieci drogowej bazuje na ryzyku społecznym [63, 64, 75]. Na rysunku 1.15. przedstawiono mapy ryzyka indywidualnego oraz społecznego dla sieci dróg krajowych w Polsce.



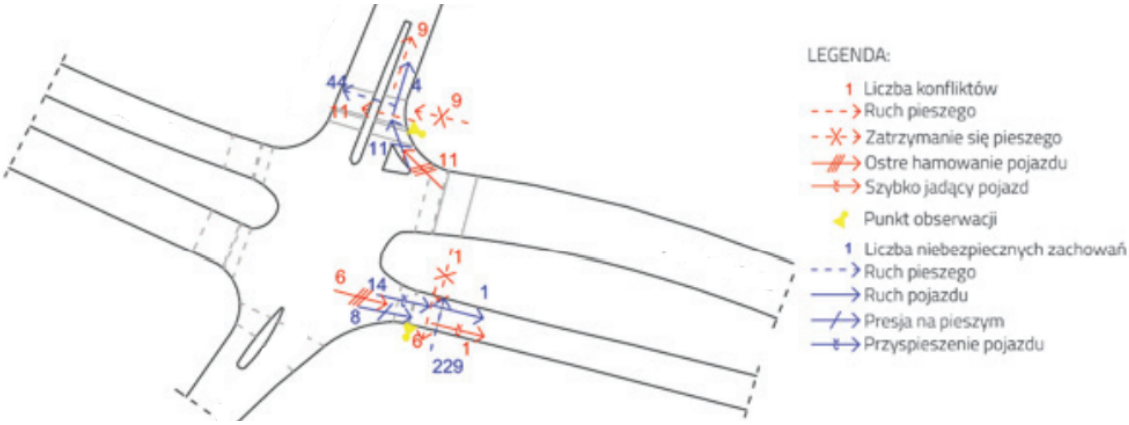
Rys. 1.15. Klasyfikacja odcinków ze względu na koncentrację wypadków oraz bezpieczeństwo sieci dróg krajowych w Polsce

Źródło: opracowano na podstawie [43, 63, 64, 75]

Innym podejściem do oceny zagrożeń w ruchu drogowym jest badanie i analiza zachowań uczestników ruchu drogowego z wykorzystaniem metody konfliktów ruchowych. Metoda ta opiera się na analizie konfliktów ruchowych, definiowanych jako sytuacje ruchowe

wskazujące na oddziaływanie pomiędzy dwoma użytkownikami drogi, którzy poruszają się w sposób grożący kolizją [55].

Omawiana metoda opiera się na zdefiniowaniu konfliktów ruchowych oraz procesie ich powstawania. Głównym źródłem danych o konfliktach są obserwacje terenowe. Wykrycie konfliktu wymaga równoczesnej obserwacji uczestników ruchu drogowego. Analizie poddawane jest wzajemne oddziaływanie między użytkownikami drogi, występowanie potencjalnego punktu kolizji, rodzaj konfliktu ruchowego oraz jego potencjalne skutki [73, 92]. Na rysunku 1.16. przedstawiono przykładowy schemat konfliktu ruchowego między pieszym a kierowcą na przejściu dla pieszych.



Rys. 1.16. Przykładowy schemat konfliktu ruchowego na przejściu dla pieszych
Źródło: opracowano na podstawie [61, 92]

Uzyskane dane o konfliktach ruchowych można przedstawić za pomocą diagramu konfliktów oraz tablicy zawierającej zebrane informacje. W uzupełnieniu można dodać dodatkowe wykresy oraz nagrania wideo przedstawiające zdefiniowane typy konfliktów [73, 92].

Pozyskane dane umożliwiają ocenę zagrożenia w ruchu drogowym poprzez np. oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku drogowego wg wzoru 1.1.:

$$PLW = \sum_{i=1}^{n} PLW_i = \sum_{i=1}^{n} W_i \cdot LKR_i \qquad (1.2.)$$

gdzie:

PLW – prawdopodobna liczba wypadków, które mogą wystąpić na badanym obiekcie w przyjętym okresie czasu,

PLW_i – prawdopodobna liczba wypadków odpowiadająca i-temu rodzajowi lub powadze konfliktu,

W_i – prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku typu i związanego z konfliktem typu *i*,

LKR_i – liczba konfliktów ruchowych typu *i*.

W Polsce metoda konfliktów ruchowych na przejściach dla pieszych wykorzystywana była m.in. w projekcie MOBIS realizowanym na Politechnice Warszawskiej [27, 87]. Głównym celem projektu było opracowanie metody oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego przy użyciu analiz obrazu wideo. Metoda konfliktów ruchowych, w aspekcie oceny zagrożeń w ruchu drogowym, została wykorzystana w pracach [14, 21, 22, 57, 61, 70, 87, 95, 102, 107].

Zagadnienia związane z zastosowaniem metody konfliktów ruchowych zostały szczegółowo omówione w opracowaniu [92], przy okazji realizacji projektu *In-depth undstanding of accident – InDev*. Projekt ten realizowany jest w ramach funduszu Horyzont 2020 przez dziewięć europejskich uczelni. Celem projektu jest ustalenie i zrozumienie przyczyn wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu drogowego.

Innym podejściem do oceny stanu zagrożenia w ruchu drogowym jest przeprowadzanie regularnych, kompleksowych inspekcji stanu bezpieczeństwa infrastruktury drogowej. Inspekcje te służą identyfikacji nieprawidłowości na przedmiotowych odcinkach dróg niezależnie od liczby wypadków drogowych [19]. Ocenie poddawane są m.in. stan techniczny elementów drogi, oznakowanie oraz warunki widoczności. W Polsce obowiązek kontroli drogi i jej otoczenia wynika m.in. z Ustawy z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych [118]. W literaturze światowej [42] wyróżnia się inspekcję drogi (Road Safety Inspection – RSI, Road Safety Review – RSR), audyt brd (RSA) oraz ocenę oddziaływania drogi na bezpieczeństwo ruchu drogowego.

W literaturze spotyka się również wykorzystanie reguł logiki rozmytej do oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego. Przykładowo w Chinach na podstawie wnioskowania rozmytego przygotowano model oceny bezpieczeństwa ruchu dla Pekinu i Szanghaju [76]. Wskaźniki zdefiniowano jako m.in. liczbę wypadków na 100 tys. mieszkańców, liczbę wypadków na 10 tys. pojazdów, liczbę wypadków na 100 km dróg, wskaźnik śmiertelności wypadków drogowych, stan dróg oraz wskaźniki związane z zarządzaniem bezpieczeństwem ruchu drogowego. Inne wykorzystanie zasad logiki rozmytej pokazano w pracy [123]. W artykule przedstawiono model predykcji wypadków drogowych oparty na regułach logiki rozmytej. W pracy [36] przedstawiono model prognozowania zdarzeń drogowych, z zastosowaniem logiki rozmytej, pozwalający na identyfikację czynników ryzyka związanych z charakterystyką drogi. Metody sztucznej inteligencji w ocenie bezpieczeństwa ruchu drogowego znalazły również zastosowanie w pracach [35, 56, 101, 104].

Uzupełnieniem dla powyższych metod mogą być badania ankietowe, analizy obrazu cyfrowego z kamer pomiarowych lub pomiary i analizy parametrów ruchu (np. prędkość

pojazdu, natężenia ruchu, starty czasu). Dane te mogą stanowić istotną informację dla zarządzania bezpieczeństwem ruchu drogowego.

Pozyskane dane i informacje stanowią bazę dla budowy modeli matematycznych. W analizie bezpieczeństwa ruchu często wykorzystuje się modele regresji liniowej. Modele te sprowadzają się do oszacowania wartości zmiennej zależnej przy pomocy zmiennych niezależnych. W przypadku analiz bezpieczeństwa ruchu drogowego zmiennymi zależnymi będą wskaźniki wypadkowe (np. liczba wypadków, gęstość wypadków), natomiast zmiennymi niezależnymi będą czynniki wpływające na bezpieczeństwo ruchu drogowego, tj. prędkość pojazdu, natężenie ruchu, liczba zatrzymań, długość drogi hamowania, itd. [41]. W celu dokładnego wyjaśnienia zmiennej zależnej należy dążyć do zdefiniowania jak największej liczby zmiennych niezależnych. Ogólną postać modelu regresji liniowej można przedstawić wg wzoru 1.2. [57]:

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_{ji} + \varepsilon_i \tag{1.3.}$$

gdzie:

$i = 1,2, \dots, n; j = 1,2, \dots, m,$

y_i – obserwowana wartość losowej zmiennej zależnej,

x_{ji} – obserwowane nielosowe zmienne niezależne,

β_j , β_0 – nieznane parametry modelu, współczynniki zmiennej zależnej,

ε_i – nieobserwowalna zmienna reprezentująca składnik błędu losowego.

Modele regresyjne są najczęściej stosowaną metodą opisu i identyfikacji cech warunkujących bezpieczeństwo ruchu drogowego [18, 47]. Metoda ta została wykorzystana m.in. przy ocenie zagrożeń w ruchu drogowym w pracy [17], przy budowie modelu predykcji wypadków drogowych i ocenie bezpieczeństwa ruchu drogowego w pracy [38], przy ocenie wpływu nocnych ograniczeń widoczności na bezpieczeństwo ruchu drogowego [133].

Innymi badaniami mającymi zastosowanie w analizie bezpieczeństwa ruchu drogowego są graficzne modele Bayesa. W przeciwieństwie do modeli regresyjnych sieci bayesowskie umożliwiają np. równorzędne traktowanie zmiennych oraz możliwość obliczania dużej liczby danych przy niewielkich rozmiarach prób.

Zmienne o charakterze dyskretnym przyporządkowywane są do węzła będącego zbiorem zdarzeń losowych. Każda zmienna $X_1, \dots, X_n$ sieci Bayesa jest opisana zestawem prawdopodobieństw warunkowych $P(X_k|Par_G(X_k))$. Prawdopodobieństwa warunkowe są danymi wejściowymi do budowy modelu. Sieć Bayesa reprezentowana jest przez prawdopodobieństwo łączne wg wzoru 1.3. [57]:

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{k=1}^{n} P(X_k | Par_G(X_k)) \quad (1.4.)$$

gdzie:

P – prawdopodobieństwo łaczne,

$X_1, \dots, X_n$ – zmienne sieci Bayesa,

$P(X_k | Par_G(X_k))$ – zestaw prawdopodobieństw warunkowych.

Sieci bayesowskie w sposób graficzny prezentują probabilistyczne zależności przyczynowo – skutkowe pomiędzy różnymi zmiennymi losowymi. Sieci Bayesa wykorzystywane są w analizach wypadkowych opartych na prawdopodobieństwach warunkowych [34, 133].

W literaturze do badania bezpieczeństwa ruchu drogowego wykorzystywane są metody szacowania relatywnego zagrożenia. Metody te zakładają, że miarą zagrożenia są ilorazy zdarzeń występujące w określonych okolicznościach. Podejście to wykorzystane zostało w pracach [49, 133]. Autorzy opracowania oszacowali wzrost ryzyka w porze niedostatecznej widoczności za pomocą tzw. „ilorazów zdarzeń" IZ, określonych wzorem 1.4.:

$$IZ = \frac{LW^{noc}/Q^{noc}}{LW^{dzień}/Q^{dzień}} \quad (1.5.)$$

gdzie:

IZ – iloraz zdarzeń,

$LW^{dzień/noc}$- liczba wypadków odpowiednio w porze nocnej lub w ciągu dnia [$^{szt.}/_{okres\ analizy}$],

$Q^{dzień/noc}$- natężenie ruchu odpowiednio w porze nocy lub w ciągu dnia [$^{P}/_{okres\ analizy}$].

Liczba wypadków odniesiona została do miary wystawienia na ryzyko, tj. natężenia ruchu. Relatywność oceny polega na rezygnacji z estymacji bezwzględnych wartości wskaźników wypadkowych na rzecz szacowania ilorazu uproszczonych wskaźników będących przedmiotem badań.

Ważnym aspektem zarządzania bezpieczeństwem ruchu drogowego są zagadnienia związane z analizą ryzyka. W analizach ryzyka należy wyróżnić ryzyko indywidualne oraz ryzyko społeczne.

Ryzyko indywidualne definiuje się jako prawdopodobieństwo wystąpienia strat określonego rodzaju w wypadku drogowym i można je opisać wzorem 1.5.:

$$RI = \sum_{i=1}^{n} P_i S_i \tag{1.6.}$$

gdzie:

RI – ryzyko indywidualne,

P_i – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia i-tego rodzaju w jednostce czasu (*i=1, 2, ..., n*),

S_i – strata, wyrażająca skutki zdarzenia i-tego rodzaju w jednostce czasu,

n – liczba rodzajów zdarzenia.

Ryzyko społeczne występuje, gdy obszar analizy wykracza poza system człowiek – pojazd - droga. Uogólniony model ryzyka społecznego opisuje wzór 1.6.:

$$RS = E \cdot P \cdot S \cdot I \tag{1.7.}$$

gdzie:

RS – ryzyko społeczne,

E – narażenie, reprezentujące ilościową miarę wystawienia uczestników ruchu na potencjalne zagrożenie,

P – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niebezpiecznego,

S – straty społeczne,

I – poziom interwencji.

Metody zarządzania ryzykiem inżynierii ruchu zostały opisane w sposób szczegółowy w pracy [64].

1.2.4. Stan badań w zakresie wpływu oświetlenia na bezpieczeństwo ruchu drogowego

Wpływ oświetlenia na bezpieczeństwo ruchu drogowego najczęściej oceniany jest na etapie przeprowadzania inspekcji stanu bezpieczeństwa infrastruktury drogowej. Jednym z ocenianych czynników jest wzajemna widoczność geometryczna i widzialność uczestników ruchu. W ramach badania widzialności osoby kontrolujące mają za zadanie ocenę warunków oświetleniowych. Wieloletnie doświadczenia [61, 62, 66, 111] wykazały, że w ramach przeprowadzanych inspekcji stanu dróg i ich otoczenia wskazywana jest jedynie obecność oświetlenia, bez wykonywania podstawowych pomiarów parametrów oświetleniowych.

W Polsce pierwsze działania w zakresie uwzględnienia parametrów oświetleniowych w kompleksowej inspekcji stanu bezpieczeństwa dróg publicznych podjął w 2016 roku Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie. W ramach opracowania “Audyt BRD przejść dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej na drogach zarządzanych przez ZDM w dzielnicach Śródmieście,

Ochota, Praga Południe pod kątem skuteczności oświetlenia tych przejść i zastosowanej organizacji ruchu" [7] wykonano kompleksowe pomiary natężenia oświetlenia w płaszczyźnie przejścia. W 2016 roku badaniom poddane zostało blisko tysiąc przejść dla pieszych. W kolejnych latach ZDM kontynuował prace, aby docelowo w 2020 roku przeprowadzić kompleksową inspekcję na wszystkich ponad 4000 przejściach dla pieszych (będących w zarządzie ZDM). Na rysunku 1.17. przedstawiono lokalizację przejść dla pieszych objętych badaniem do 2020 roku.

Rys. 1.17. Lokalizacja ponad 4000 przejść dla pieszych objętych audytem BRD i oświetlenia w 2020 roku

Źródło: opracowano na podstawie [7]

W ramach zadania, obok metodologii oceny infrastruktury drogowej, przedstawiona została autorska, kompleksowa metoda oceny poziomu zagrożenia z uwagi na stan oświetlenia. Metoda ta zakładała przeprowadzenie, przez wykwalifikowane zespoły, wizji lokalnej oraz pomiarów natężenia oświetlenia w płaszczyznach poziomej i pionowej. Dla każdego z przejść

dla pieszych wykonano pomiar w 30 punktach w płaszczyźnie poziomej (krawędzie przejścia dla pieszych, oś przejścia dla pieszych) oraz w 20 punktach w płaszczyźnie pionowej (w osi przejścia dla pieszych dla obu kierunków ruchu).

Ocena końcowa przejścia była wypadkową oceny wynikającej z pomierzonych wartości i oceny subiektywnej zespołu pomiarowego. Do oceny wyników wykorzystano wymagania normatywne. W ramach przeprowadzonych prac zarządca drogi otrzymał: aktualne dane o poziomie oświetlenia, klasyfikację miejsc niebezpiecznych, wskazanie nieprawidłowości oraz proponowane rozwiązania naprawcze.

Należy jednak zauważyć, że pomimo chęci połączenia inspekcji stanu bezpieczeństwa infrastruktury drogowej z kompleksowymi badaniami parametrów oświetleniowych wyniki te zostały przedstawione w formie dwóch niezależnych baz danych [7]. Wykonawca opracowania nie porównał zbiorczo ocen otrzymanych w ramach analizy bezpieczeństwa ruchu elementów infrastruktury i inspekcji stanu oświetlenia.

Innym podejściem do uwzględnienia oświetlenia w inspekcji stanu bezpieczeństwa na przejściach dla pieszych wykazali się Włosi. Departament Inżynierii Transportu „Luigi Tocchetti" opracował model oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego odnoszący się do przejść dla pieszych. Badania, z wykorzystaniem omawianego modelu przeprowadzono w jednym z włoskich miast (Giugliano) [80]. Opracowana przez Włochów metoda opiera się na analizie 6 grup czynników: lokalizacja, widoczność, dostępność, organizacja ruchu, oświetlenie, ruch uliczny. Czynniki te zostały szczegółowo opisane i uzupełnione o wagi punktowe. Na rysunku 1.18. przedstawiono fragment opisu czynników oraz ich wagi punktowe zastosowane przez włoskich naukowców.

TABLE 1 Pedestrian Crosswalk Checklist (Sections a, b, and c)

	Safety Issue	Weight
a	**Location**	**2**
a1	Road alignment	2
a2	Consistency between road width and crosswalk typology	2
a3	Interaction with parking, approach i	3
a4	Coordination with bus stops, approach i	3
a5	Interaction with parking, approach j	3
a6	Coordination with bus stops, approach j	3
a7	Coordination with desired pedestrian routes	1
a8	Coordination with sidewalks	1
a9	Distance from other crosswalks	1
a10	Distance from stop line	1
a11	Distance from junctions	1
a12	Distance from traffic signals	1

Rys. 1.18. Lista czynników wpływających na bezpieczeństwo przejść dla pieszych i ich wagi punktowe wg Włoskiej procedury oceny BRD

Źródło: opracowano na podstawie [80]

Procedura zakłada przypisanie oceny każdemu z czynników, odpowiednio:

- 0, jeśli nie wpływa na bezpieczeństwo,
- 1, jeśli występuje ryzyko zagrożenia w ruchu drogowym,
- 2, jeśli znacząco wpływa na bezpieczeństwo.

Następnie należy obliczyć współczynnik bezpieczeństwa oraz wskaźnik ryzyka. Wynik pozwala na określenie poziomu bezpieczeństwa wg kryteriów zawartych w [80]. Podobnie jednak jak w przypadku większości tego typu badań, w metodzie nie uwzględniono badania parametrów oświetleniowych. Aktualizacja metody oraz wyniki przeprowadzonych badań zaprezentowane zostały w pracy [79].

Do badań wpływu oświetlenia na bezpieczeństwo ruchu drogowego wykorzystywano również analizy danych o wypadkach drogowych. W badaniach tych określano wpływ warunków oświetleniowych na wzrost zagrożenia wystąpienia wypadku drogowego w porze nocnej. W badaniach opartych na analizie danych o wypadkach drogowych, często obok wzajemnej widzialności, analizowano stan psychofizyczny, zmęczenie i sprawność uczestników ruchu drogowego [41]. Przykładowo badania oparte na analizach danych statystycznych były przeprowadzone w USA, gdzie na podstawie danych o wypadkach drogowych z udziałem pieszych w latach 1986 – 2003 na Florydzie oszacowano ryzyko wystąpienia wypadku w porze nocnej [103].

W Holandii na podstawie danych o wypadkach drogowych w latach 1987 – 2006 określono wpływ oświetlenia na ilość wypadków drogowym w porze nocnej [124]. Zastosowano dwa estymatory wpływu, a wyniki skonfrontowano stosując techniki metaanalizy. W wyniku badań stwierdzono, że oświetlenie wpływa na zmniejszenie liczby wypadków w porze nocnej, szczególnie tych z udziałem niechronionych uczestników ruchu drogowego.

W pracy [89] badano zależności między natężeniem oświetlenia na skrzyżowaniach a liczbą wypadków drogowych. Na podstawie danych o wypadkach drogowych sprzed i po wprowadzeniu danego rozwiązania oświetleniowego oraz na podstawie przeprowadzonych pomiarów natężenia oświetlenia określono średnie, oczekiwane poziomy natężenia oświetlenia na skrzyżowaniach.

W Grecji [130] przeprowadzono badanie wpływu warunków oświetleniowych na częstość i skutki wypadków drogowych. Analizie statystycznej (wykorzystano model regresji nieliniowej) poddano m.in. liczbę wypadków i ofiar śmiertelnych, warunki atmosferyczne i warunki oświetleniowe. Wyniki pokazały, że stosowanie oświetlenia ulicznego wpływa na poprawę bezpieczeństwa ruchu drogowego.

W Chinach przeprowadzono badania wpływu oświetlenia na bezpieczeństwo ruchu drogowego z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych [129]. W metodzie tej wykorzystano dane terenowe z dziesięciu odcinków dróg. Wyniki pokazały, że poziom oświetlenia wpływa na zminimalizowanie zagrożeń w ruchu drogowym, zachowania użytkowników oraz zmniejszenie prędkości.

W Szwajcarii przeprowadzono badania wpływu oświetlenia na prędkość pojazdu [33]. Analizy oparte zostały na pomiarach prędkości i natężenia oświetlenia. Na podstawie otrzymanych danych opracowano zależność pomiędzy prędkością a natężeniem oświetlenia. W badaniach uwzględniono dodatkowe czynniki mogące wpłynąć na końcowy wynik (np. natężenie ruchu, warunki atmosferyczne). Badania wykazały spadek prędkości w wyniku zwiększenia natężenia oświetlenia.

Badanie wpływu oświetlenia na prędkość pojazdów przedstawiono również w publikacjach: [10, 60, 135]. Podobnie jak w przypadku wyżej opisanych prac wykazano spadek prędkości przy poprawie warunków oświetleniowych.

W Nowej Zelandii ocenę wpływu oświetlenia na bezpieczeństwo ruchu drogowego wykonano wykorzystując podstawowe parametry oświetleniowe [58, 59]. Zaproponowana przez naukowców metoda opiera się na wykorzystaniu tzw. metody zależności. Wartość parametrów oświetleniowych została zestawiona z danymi o wypadkach drogowych z pięciu ostatnich lat. W ramach przeprowadzonych badań zmierzono: luminancję, równomierność oraz natężenie oświetlenia. Badania zostały przeprowadzone w obszarze miejskim w oparciu o dane o wypadkach drogowych i informacje o warunkach oświetleniowych. Do dalszej analizy pozyskanych danych wykorzystano uogólniony model liniowy. We wnioskach wskazano silny związek między średnią luminancją drogi a bezpieczeństwem ruchu drogowego. W ramach przeprowadzonych badań opracowano metodę umożliwiającą badanie wpływu oświetlenia na wypadkowość w porze nocnej.

1.2.5. Przegląd metod oceny skuteczności stosowanych środków poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego

Najczęściej spotykanym podejściem do oceny efektywności stosowanych środków poprawiających bezpieczeństwo ruchu drogowego jest analiza prędkości pojazdów. W analizach porównywane są: profil prędkości, prędkość średnia i prędkość eksploatacyjna, definiowana jako kwantyl V(85%) prędkości pojazdów w ruchu swobodnym.

W Polsce przykładem badań wpływu zastosowanych środków uspokojenia ruchu na bezpieczeństwo ruchu drogowego (brd) z wykorzystaniem prędkości są badania

przeprowadzone na Politechnice Białostockiej [136]. Badania zrealizowano przy udziale pięciu kierowców, których zadaniem był przejazd po wybranych ulicach zlokalizowanych w Białymstoku. Każdy z samochodów wyposażono w rejestrator GPS. Badania przeprowadzono w godzinach szczytu komunikacyjnego. W efekcie otrzymano informacje o czasie, położeniu i prędkości każdego z pojazdów. Wpływ środków uspokojenia ruchu na bezpieczeństwo ruchu drogowego oceniono na podstawie analizy otrzymanych profili prędkości średniej dla każdej z badanych lokalizacji. W efekcie otrzymano informację na temat skuteczności i efektywności stosowanych rozwiązań w oparciu o parametr prędkości.

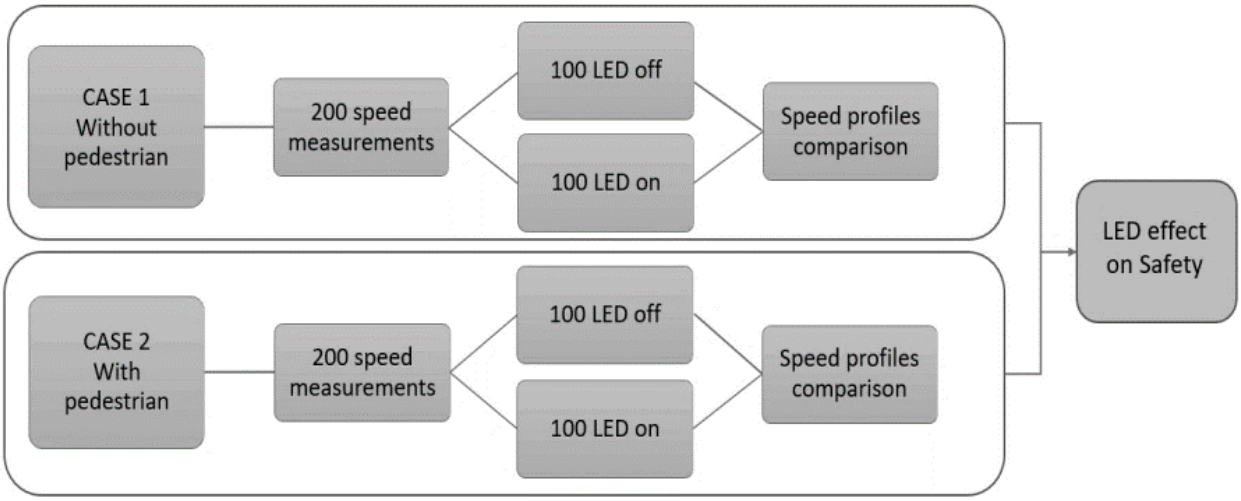
W Hiszpanii badania wpływu prędkości na brd przeprowadzono w mieście Burgos [52]. Poligon badawczy stanowiły ulice o podobnych parametrach drogowych i ruchowych, na których zastosowano, bądź nie, elementy uspokojenia ruchu. Wykonano analizę porównawczą prędkości pojazdów na ulicach, na których zastosowano elementy uspokojenia ruchu z prędkością pojazdów na ulicach, gdzie nie zastosowano takich rozwiązań. W wyniku badań otrzymano informację o wpływie danego rozwiązania na prędkość pojazdu, a w efekcie na jego skuteczność w aspekcie bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Inne podejście zaprezentowali Włosi. W mieście Cagliari przeprowadzono badanie wpływu progów zwalniających na bezpieczeństwo ruchu drogowego [91]. Badaniu poddano 23 lokalizacje. W ramach oceny skuteczności dokonano analizy prędkości na progach zwalniających, w ich bezpośrednim sąsiedztwie, na przejściach dla pieszych oraz na odcinkach prostych ulic, na których one występowały. Przeprowadzone badania wykazały znaczne przekroczenia prędkości w badanych lokalizacjach. Badania nie wykazały redukcji prędkości na przejściach dla pieszych, jedynie w bezpośredniej lokalizacji progów zwalniających odnotowano spadek prędkości. Badania te pokazały brak skuteczności stosowania progów zwalniających, a we wnioskach zarekomendowano stosowanie innych rozwiązań służących do uspokojenia ruchu drogowego.

W pracy [90] przedstawione zostały włoskie badania mające na celu opracowanie metody oceny wpływu zastosowania dodatkowego oznakowania linii P-10 (oznakowanie poziome przejścia dla pieszych), za pomocą diod LED, na zachowania kierowców w porze nocnej. Zaproponowana metoda opierała się na analizie prędkości pojazdów na wyznaczonych odcinkach dróg. Pomiary prędkości przeprowadzono na ulicach Rzymu, z zastosowaniem fotoradaru. Na rysunku 1.19. przedstawiono przyjętą metodologię badań. Badania prędkości przeprowadzone zostały dla czterech sytuacji:

- obecność pieszego na przejściu dla pieszych przy włączonym systemie LED,
- brak pieszych na przejściach dla pieszych przy włączonym systemie LED,

- obecność pieszego na przejściu dla pieszych przy wyłączonym systemie LED,
- brak pieszych na przejściach dla pieszych przy wyłączonym systemie LED.



Rys. 1.19. Metodologia przeprowadzania badań wpływu dodatkowego oświetlenia linii P-10 na zachowania kierowców zaproponowana przez włoskich naukowców

Źródło: opracowano na podstawie [90]

Na podstawie otrzymanych danych opracowano profile prędkości dla ww. sytuacji. Wyniki wskazały pozytywny wpływ stosowania dodatkowego oznakowania przejść dla pieszych za pomocą aktywnych elementów. W ramach przeprowadzonych badań wykazano spadek prędkości pojazdów o 19,3% na przejściach dla pieszych, na których zastosowano przedmiotowy system.

Do oceny skuteczności zastosowanych rozwiązań poprawiających bezpieczeństwo ruchu drogowego można wykorzystać bazy danych o wypadkach drogowych. Na podstawie analizy porównawczej danych o liczbie i skutkach wypadków, na przedmiotowym odcinku drogi, w okresie przed i po wdrożeniu danego rozwiązania, można wysnuć wnioski o jego skuteczności. W badaniach brytyjskich na podstawie analizy danych o wypadkach drogowych określono wpływ zastosowanych rozwiązań na redukcję liczby wypadków drogowych [71].

Niejednokrotnie do oceny skuteczności elementów infrastruktury drogowej wykorzystuje się metodę „przed – po". Metoda ta polega na przeprowadzeniu kompleksowych badań parametrów ruchu (np. natężeń ruchu i prędkości). Badania należy wykonać w co najmniej dwóch okresach, tj. przed i po wprowadzeniu danego rozwiązania. Wnioski następują po analizie porównawczej otrzymanych danych. Zastosowanie badań „przed – po" w odniesieniu do zagadnień bezpieczeństwa ruchu drogowego zostało szerzej omówione

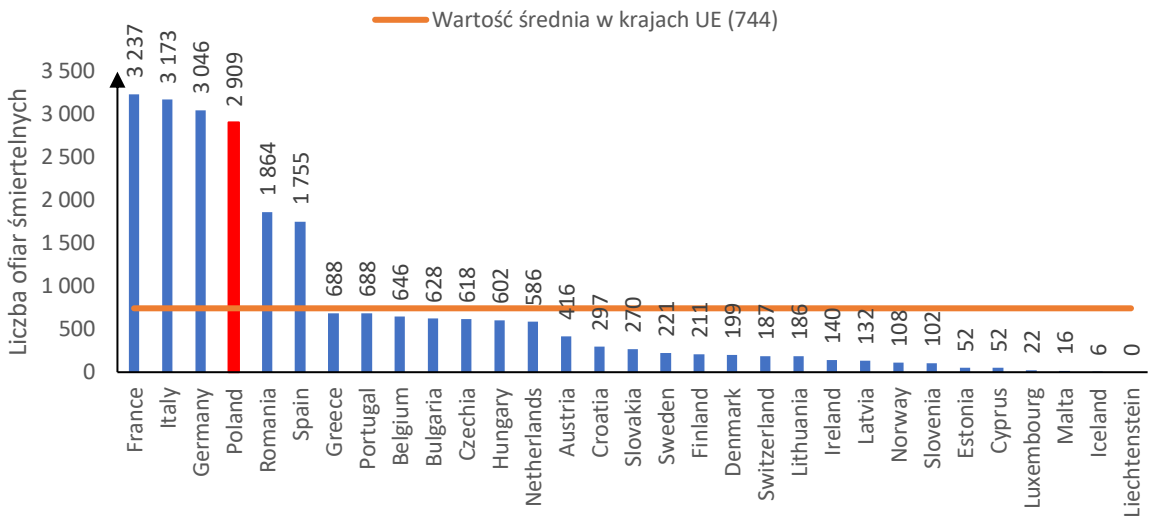
w pracy „Observational Before/After Studies in Road Safety. Estimating the Effect of Highway and Traffic Engineering Measures on Road Safety" [54]. Badania przed – po do oceny skuteczności stosowanych rozwiązań drogowych zastosowano w pracach: [69, 82].

Przykładem wykorzystania badań „przed – po" w Polsce jest opracowanie „Analiza bezpieczeństwa ruchu na tzw. Aktywnych Przejściach dla Pieszych" wykonana przez pracowników Instytutu Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej [14]. Na 8 przejściach dla pieszych objętych programem instalacji tzw. aktywnych przejść dla pieszych przeprowadzono badania terenowe w 3 okresach: przed, bezpośrednio po i miesiąc po realizacji inwestycji. Badania opierały się na długotrwałym pomiarze warunków ruchu za pomocą nagrań wideo.

W ramach opracowania wykonano analizę bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz analizę porównawczą procentu przepuszczeń pieszego, średniego czasu oczekiwania pieszego na przejście, średniego wskaźnika konfliktów oraz prędkości pojazdów dla wszystkich okresów. Analiza danych wykazała częściowo pozytywny wpływ zastosowanych rozwiązań oraz potwierdziła ich skuteczność w badanych lokalizacjach.

1.2.6. Analiza danych o wypadkach drogowych

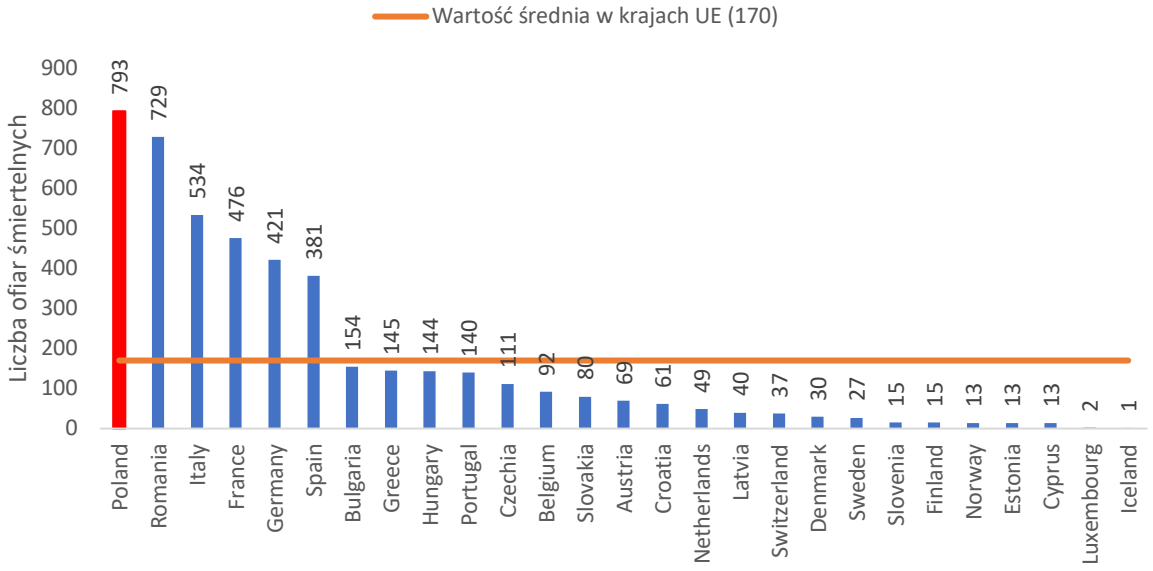
Rocznie w Polsce rejestruje się dużą liczbę wypadków drogowych. Jak wynika z danych aktualnie udostępnionych w [30], w 2019 roku Polska znalazła się w czołówce wśród krajów Unii Europejskiej z najwyższą liczbą ofiar śmiertelnych. Na rysunku 1.20. przedstawiono liczbę ofiar śmiertelnych w wypadkach drogowych w krajach Unii Europejskiej.



Rys. 1.20. Liczba ofiar śmiertelnych wypadków drogowych w krajach Unii Europejskiej w 2019 roku

Źródło: opracowano na podstawie [30]

Analiza danych statystycznych o wypadkach drogowych w krajach Unii Europejskiej wykazała, że w Polsce odnotowano najwyższą liczbę ofiar śmiertelnych wśród pieszych [30]. Na rysunku 1.21. przedstawiono liczbę ofiar śmiertelnych wśród pieszych w krajach UE w 2019 roku. W zestawieniu nie ujęto krajów, dla których dane były niezaktualizowane.

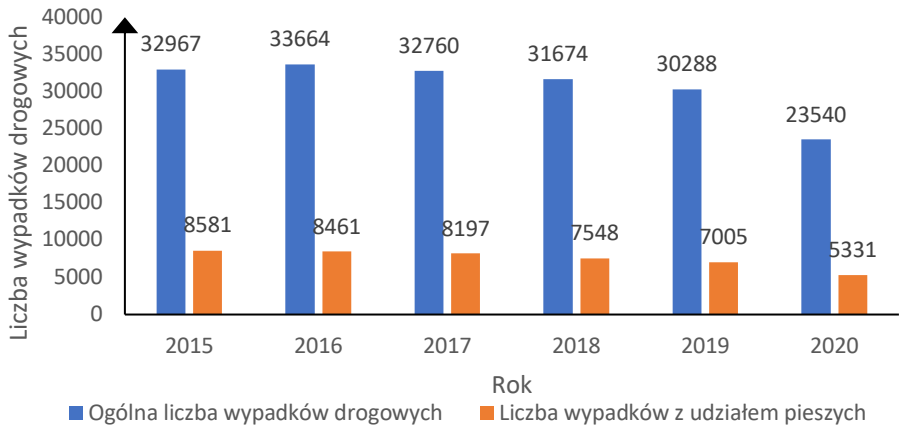


Rys. 1.21. Liczba ofiar śmiertelnych wśród pieszych w krajach Unii Europejskiej w 2019 roku

Źródło: opracowano na podstawie [30]

Analiza statystyczna wypadków drogowych prowadzona przez Komendę Główną Policji [32] wskazuje pieszych jako grupę najbardziej narażoną na niebezpieczeństwo. W ujęciu ogólnym w 2020 roku odnotowano łącznie 23540 wypadki drogowe, w wyniku których rannych zostało 26463 osób, a 2491 odniosło śmierć. W 2020 roku wypadki z udziałem pieszych stanowiły 22% ogółu wypadków drogowych. Jak wynika z danych statystycznych KGP piesi stanowili ok. 18% ogółu poszkodowanych (rannych oraz zabitych w wypadkach drogowych). Mimo zauważalnego postępu wskaźnik wypadków drogowych utrzymuje się na wysokim poziomie. Na rysunku 1.22. przedstawiono liczbę wypadków drogowych z udziałem pieszych w stosunku do ogólnej liczby wypadków w latach 2015 – 2020.

Najwięcej wypadków drogowych z udziałem pieszych odnotowuje się w obszarze zabudowanym. W 2020 roku w obszarze zabudowanym zarejestrowano 4735 wypadki drogowe, w których zginęło 425 osób a 4394 zostało rannych. Jednocześnie w terenie niezabudowanym odnotowano 500 wypadków z udziałem pieszych, w których zginęło 206 osób, a 306 zostało rannych. Oznacza to, że wypadki drogowe poza terenem zabudowanym są tragiczniejsze w skutkach, a pieszy jest bardziej narażony na śmierć.

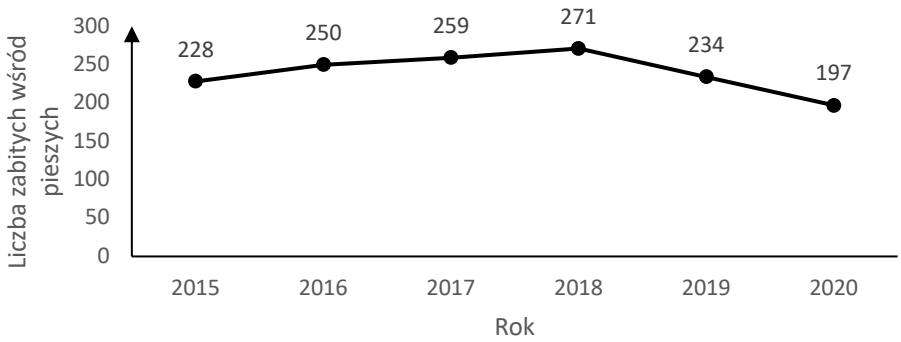


Rys. 1.22. Liczba wypadków drogowych z udziałem pieszych w stosunku do ogólnej liczby wypadków w latach 2015 – 2020

Źródło: opracowano na podstawie [32]

Analiza danych o wypadkach drogowych wskazuje przejścia dla pieszych jako miejsca, w których pieszy jest narażony na największe ryzyko. W 2020 roku w rejonie przejść dla pieszych doszło do 2678 wypadków drogowych, co stanowi ponad 50% wypadków drogowych z udziałem pieszych. W wypadkach tych zginęło 197 osób (31% ogółu ofiar śmiertelnych wśród pieszych), a 2581 zostało rannych (55% ogółu rannych pieszych).

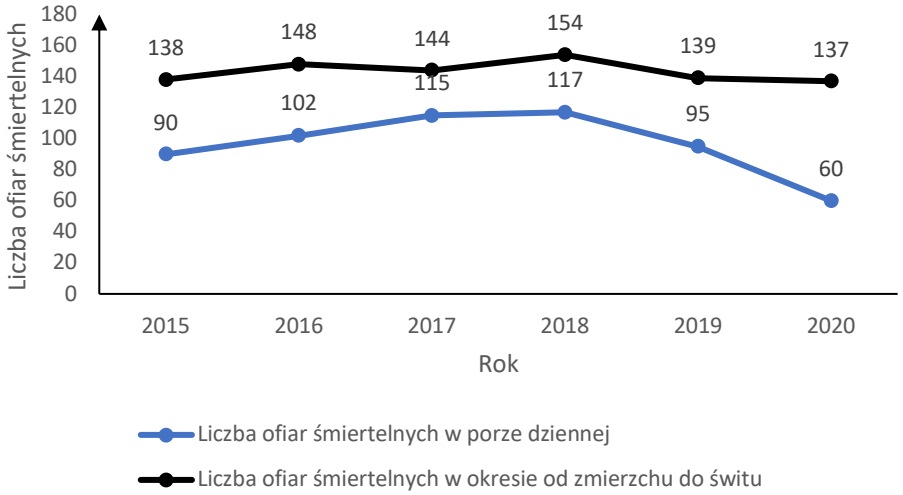
W 2020 roku odnotowano spadek liczby wypadków i ofiar śmiertelnych na przejściach dla pieszych w stosunku do lat poprzednich. W 2020 roku liczba wypadków drogowych na przejściach dla pieszych zmniejszyła się o ponad 22% w stosunku do roku 2019 i o ponad 28% w stosunku do roku 2018. Zauważono również redukcję liczby ofiar śmiertelnych (o ok. 15% w stosunku do 2019 roku i o ok. 27% w stosunku do 2018 roku). Na rysunku 1.23. przedstawiono zmiany liczby ofiar śmiertelnych w latach 2015 – 2020.



Rys. 1.23. Liczba ofiar śmiertelnych wśród pieszych na przejściach dla pieszych w Polsce w latach 2015 – 2020

Źródło: opracowano na podstawie [32]

Pomimo odnotowanej tendencji spadkowej sytuacja na przejściach dla pieszych nadal jest niepokojąca. Szczególną uwagę należy zwrócić na liczbę wypadków drogowych oraz ich skutki w okresie ograniczonej widoczności, tj. od zmierzchu do świtu [106]. W 2020 roku 41% wypadków na przejściach dla pieszych wystąpiło w porze o ograniczonej widoczności. W wypadkach tych zginęło 137 osób (69% ofiar śmiertelnych na przejściach dla pieszych). W ciągu ostatnich pięciu lat, 58% ofiar wypadków drogowych na przejściach dla pieszych traci życie w okresie od zmierzchu do świtu. Na rysunku 1.24. przedstawiono zestawienie liczby ofiar śmiertelnych na przejściach dla pieszych w porze dziennej i w porze o ograniczonej widoczności.

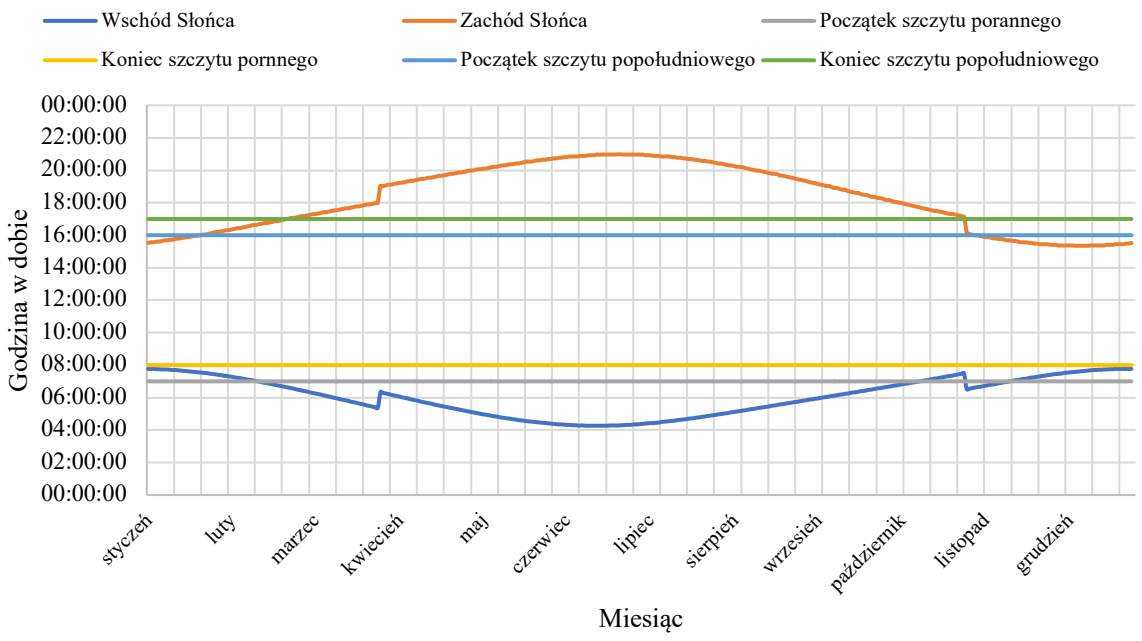


Rys. 1.24. Liczba ofiar śmiertelnych na przejściach dla pieszych w porze dziennej i w porze o ograniczonej widoczności w latach 2015 - 2020

Źródło: opracowano na podstawie [106]

Powyższa sytuacja jest niepokojąca z uwagi na fakt występowania wzmożonego ruchu pojazdów i pieszych w porze dziennej. Należy jednak zwrócić uwagę na czas trwania poszczególnych okresów doby w ciągu roku. Ze względu na położenie geograficzne Polski, występują znaczące różnice w czasie trwania „godzin nocnych" w ciągu roku [51].

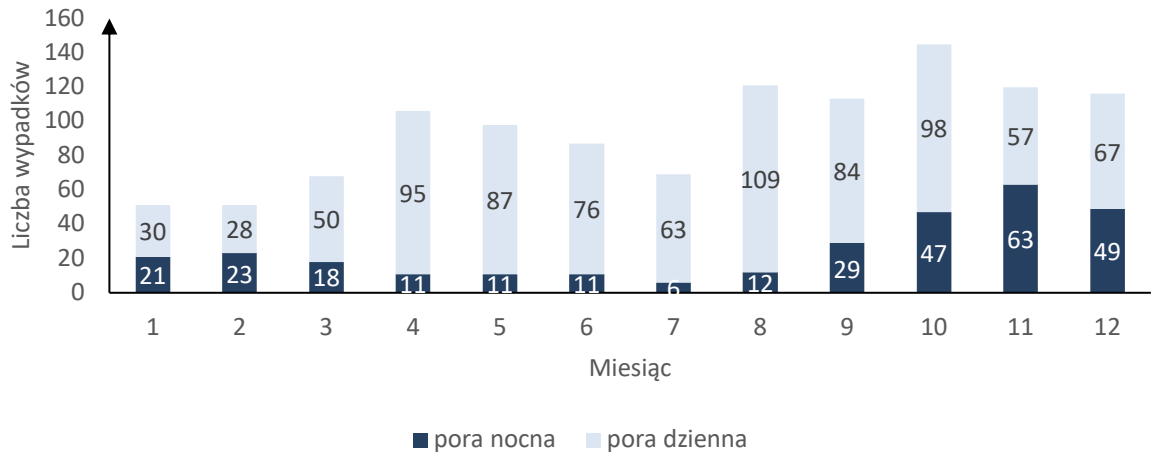
Dla porównania autorka pracy przeanalizowała długość trwania poszczególnych okresów pory doby w Polsce. Wykazano, że okres od zmierzchu do świtu jest niewiele krótszy od pory dziennej. Stosunek trwania „nocy" do „dnia" w przybliżeniu wynosi 49% do 51%. W efekcie, w ciągu roku, część godzin szczytu komunikacyjnego przypada w okresie o ograniczonej widoczności. Na rysunku 1.25. przedstawiono przykładową analizę godzin wschodu i zachodu słońca w ciągu roku dla m. st. Warszawa z uwzględnieniem orientacyjnych godzin szczytu porannego i popołudniowego.



Rys. 1.25. Przykładowa analiza godzin wschodu i zachodu słońca w ciągu roku dla m. st. Warszawa z uwzględnieniem orientacyjnych godzin szczytu porannego i popołudniowego

Źródło: opracowano na podstawie [51, 66, 77]

Zależność między liczbą wypadków a porą doby potwierdzają statystyki wypadków drogowych prowadzone przez Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie. Na rysunku 1.26. przedstawiono miesięczny rozkład liczby wypadków drogowych z uwzględnieniem pory doby. W miesiącach jesienno – zimowych, kiedy godziny szczytu wypadają w porze o ograniczonej widoczności, zauważalny jest wzrost liczby wypadków.



Rys. 1.26. Miesięczny rozkład liczby wypadków drogowych z uwzględnieniem pory doby w Warszawie w 2019 roku

Źródło: opracowano na podstawie [132]

1.3. Wnioski

Przeprowadzona analiza danych statystycznych o wypadkach drogowych wskazała przejścia dla pieszych jako miejsca szczególnie niebezpieczne, zwłaszcza w porze o ograniczonej widoczności [30, 32, 106].

W celu ograniczenia liczby wypadków drogowych producenci opraw oświetleniowych wprowadzają na rynek nowe rozwiązania umożliwiające poprawę wzajemnej widoczności pieszych i kierowców w porze nocnej. Przykładowym sposobem oświetlenia przejścia dla pieszych jest zastosowanie tzw. dedykowanych opraw oświetleniowych. Umożliwiają one oświetlenie sylwetki pieszego tak, aby z kierunku obserwacji kierowcy był on postrzegany w kontraście dodatnim [111, 116]. Obowiązujące w Polsce przepisy [86, 98] nie rozwiązują jednak problemu stosowania oraz skuteczności tego rozwiązania, a zarządcy dróg są zdani na zalecenia producentów i własne doświadczenia. Sposoby oświetlenia przejść dla pieszych zostały zaproponowane w pracy [66].

Przegląd stanu badań w zakresie metod i sposobów inspekcji stanu oświetlenia wskazał jako podstawę oceny zastosowanie parametrów oświetleniowych tj. natężenia oświetlenia oraz luminancji [86, 111, 113].

Występujące w omówionej literaturze metody oceny zagrożeń występujących w ruchu drogowym często deprecjonują czynnik oświetleniowy [40, 55, 63, 73, 92]. Przykładowo metoda konfliktów ruchowych nie uwzględnia warunków oświetleniowych.

Wpływ oświetlenia na bezpieczeństwo ruchu drogowego często oceniany jest na podstawie subiektywnej oceny warunków oświetleniowych [19, 80] lub analizy danych o wypadkach drogowych [41, 103, 124]. W pracy [129] zaproponowano ocenę oświetlenia na podstawie badania zachowań uczestników ruchu drogowego oraz jego wpływu na prędkość średnią pojazdów. Oceny wpływu oświetlenia na bezpieczeństwo ruchu drogowego na podstawie warunków oświetleniowych podjął się w 2016 roku Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie [7]. Jednak w omówionej pracy zabrakło zestawienia i połącznia danych z inspekcji stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz inspekcji stanu oświetlenia. Inne podejście zaproponowano w Nowej Zelandii [58, 59], gdzie zmierzone parametry natężenia oświetlenia i luminancji porównano z danymi o wypadkach drogowych, co w efekcie pozwoliło na określenie zależności między parametrami oświetleniowymi a bezpieczeństwem ruchu drogowego w porze nocnej. W ocenie autorki pracy przyjęta metoda oceny jest uproszczona. Jak wskazują analizy statystyczne wypadków drogowych, główną przyczyną zdarzeń są zachowania uczestników ruchu drogowego. W związku z powyższym analizę wpływu

oświetlenia na bezpieczeństwo ruchu drogowego należy rozszerzyć o badanie zachowań na drodze i ich skutków w kontekście panujących warunków oświetleniowych.

Do oceny skuteczności środków poprawiających bezpieczeństwo ruchu drogowego stosuje się analizy porównawcze, często bazujące na analizie profili prędkości [52, 91, 134], analizie danych o wypadkach drogowych [71], oraz badaniach „przed – po” [14, 54].

2. CEL I TEZA PRACY

2.1. Motywacja podjęcia tematu

Zainteresowanie autorki pracy tematyką oświetlenia w aspekcie ruchu drogowego związane jest z pracami badawczymi realizowanymi na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej [28, 110, 114, 116, 117, 125, 128] oraz pracą zawodową, w której na co dzień spotyka się z problemami bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Na podstawie analizy literatury można stwierdzić, iż problem wpływu czynników oświetleniowych na bezpieczeństwo pieszych użytkowników dróg nie jest rozpoznany. Nie opracowano dotychczas metody uwzględniającej, w kompleksowej ocenie bezpieczeństwa ruchu drogowego, warunki oświetleniowe w otoczeniu przejść dla pieszych. Brak prowadzonych badań wypadkowości w porze nocnej z uwzględnieniem czynników oświetleniowych skutkuje ograniczeniem wiedzy na temat poziomu zagrożeń. Ponadto brak jest badań oceny skuteczności stosowanych rozwiązań oświetleniowych i ich wpływu na zachowania uczestników ruchu drogowego.

Zagadnienia dotyczące oceny skuteczności rozwiązań oświetleniowych w aspekcie bezpieczeństwa ruchu drogowego z wykorzystaniem parametrów natężenia oświetlenia i luminancji oraz parametrów ruchu w odniesieniu do przejść dla pieszych nie były dotychczas omawiane.

Podjęta tematyka pracy dotycząca oceny skuteczności dedykowanych systemów oświetleniowych stosowanych na przejściach dla pieszych wynika z potrzeby uwzględnienia czynników oświetleniowych, w prowadzonych działaniach na rzecz poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego, zapotrzebowania zarządców infrastruktury drogowej na opracowanie metody oceny skuteczności instalowanych rozwiązań oświetleniowych oraz zainteresowań naukowych autorki pracy. W dotychczasowych badaniach [28, 110, 114, 115, 116, 117, 125, 126, 128] autorka pracy poruszała zagadnienia wykorzystania metod oceny ryzyka w zarządzaniu bezpieczeństwem w ruchu drogowym oraz inspekcji stanu oświetlenia przejść dla pieszych.

Niniejsza praca wpisuje się w obecny trend podnoszenia poziomu bezpieczeństwa na przejściach dla pieszych. Omawiana w pracy problematyka dotyczy badań i oceny skuteczności stosowanych rozwiązań oświetleniowych w aspekcie poprawy bezpieczeństwa.

W pracy przedstawione zostały badania: widzialności sylwetki pieszego na przejściu wyznaczonym na podstawie kontrastu luminancji pieszego z tłem, natężenia oświetlenia, wybranych parametrów ruchu oraz badania liczby konfliktów ruchowych przy zastosowaniu

różnych rodzajów oświetlenia przejść dla pieszych. W niniejszej pracy zaproponowano metodę oceny skuteczności stosowania dedykowanych opraw oświetleniowych (o rozsyłach asymetrycznych) na przejściach dla pieszych realizujących funkcjonalność kontrastu dodatniego sylwetki pieszego na tle jedni, z wykorzystaniem parametrów oświetleniowych i parametrów ruchu drogowego. Zaproponowana metoda pozwoli również na ocenę wpływu dodatkowego oświetlenia na bezpieczeństwo ruchu drogowego na przejściu dla pieszych.

2.2. Określenie celu głównego i celów szczegółowych pracy

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury oraz analizy dostępnych metod oceny stanu oświetlenia, bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz skuteczności stosowanych rozwiązań poprawiających bezpieczeństwo ruchu drogowego sformułowano cel główny pracy jako:

Opracowanie metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych stosowanych na przejściach dla pieszych w aspekcie bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Zadania podjęte w niniejszej pracy koncentrują się na realizacji poniższych celów cząstkowych:

- ocena wpływu poziomu kontrastu luminancji na zachowania uczestników ruchu drogowego,
- ocena zasadności stosowania odpowiednich poziomów oświetlenia na przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą dedykowanych rozwiązań oświetleniowych.

Celem utylitarnym pracy jest ustalenie zasadności stosowania rozwiązań technicznych do oświetlenia przejść dla pieszych z wykorzystaniem specjalistycznych opraw oświetleniowych służących do wytworzenia kontrastu dodatniego.

2.3. Przyjęcie tezy pracy

W oparciu o postawione cele pracy oraz własne doświadczenia, w niniejszej pracy podjęto próbę udowodnienia następującej tezy:

Dodatni poziom kontrastu luminancji sylwetki pieszego z tłem jezdni wpływa na ograniczenie konfliktów w ruchu drogowym.

Potwierdzenie lub odrzucenie powyższej tezy będzie równoznaczne z osiągnięciem zakładanych celów pracy.

3. OMÓWIENIE ZAŁOŻEŃ METODY

3.1. Wprowadzenie do metody

Z przeprowadzonych studiów literatury polskiej i zagranicznej wynika konieczność przeprowadzenia analiz bezpieczeństwa ruchu drogowego w porze nocnej i dziennej. Analizy te należy wykonać w oparciu o badania terenowe. Kompleksowa ocena bezpieczeństwa ruchu opiera się na analizie szeregu czynników związanych z działaniem systemu człowiek – pojazd – droga [48]. Czynniki te wynikają z parametrów geometrycznych drogi, jej usytuowania, lokalizacji oraz otoczenia, stanu psychicznego i fizycznego kierowcy, a także stanu technicznego pojazdu. W przypadku oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego w porze nocnej należy zbadać zachowania uczestników ruchu drogowego w różnych warunkach oświetleniowych.

Próba opracowania ujednoliconej metody w oparciu o czynniki związane z bezpieczeństwem ruchu drogowego i oświetleniem wiąże się z zdefiniowaniem dużej liczby zmiennych wejściowych do modelu. W takich przypadkach często występuje problem z jednoznacznym, ilościowym opisem danych wejściowych oraz ich wzajemnym powiązaniem. Jednym ze sposobów umożliwiających uzyskanie jednoznacznej oceny na podstawie szeregu, niezależnych od siebie, zmiennych wejściowych jest zastosowanie reguł logiki rozmytej. Jak wynika z przeprowadzonego przeglądu literatury modelowanie rozmyte znalazło zastosowanie w ocenie bezpieczeństwa ruchu drogowego [35, 36, 56, 76, 101, 104, 123].

Zaproponowana w rozprawie metoda opiera się na obiektywnej ocenie wyselekcjonowanych czynników wpływających na poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego na przejściach dla pieszych. W ramach opracowania metody przeprowadzono badania terenowe na przejściach dla pieszych oświetlonych różnymi systemami oświetleniowymi. Zaproponowana metoda bazuje na analizie parametrów natężenia oświetlenia i luminancji na przejściu dla pieszych w kontekście liczby konfliktów ruchowych oraz prędkości pojazdów w porze nocnej z wykorzystaniem reguł logiki rozmytej.

Zastosowanie kryterium natężenia oświetlenia i luminancji pozwala na określenie wartości kontrastu oraz ocenę widzialności sylwetki pieszego na przejściu dla pieszych. W tym celu należy przeprowadzić stosowne pomiary i analizy. Do przeprowadzenia badań terenowych luminancji i natężenia oświetlenia autorka pracy proponuje zastosowanie metod opisanych w rozdziale 1.2.2 oraz w pracach: [111, 113, 127].

W celu określenia liczby konfliktów ruchowych zastosowano metodykę omówioną w rozdziale 1.2.3 oraz w pracach [73, 92]. Informacja o liczbie i rodzajach konfliktów pozwala na określenie wzajemnych relacji między pieszymi a kierowcami na przejściach dla pieszych przy różnych warunkach oświetleniowych.

Ponadto, w oparciu o badania przedstawione w rozdziale 1.2.5 oraz pracach: [52, 91, 136] zdecydowano się na uwzględnienie prędkości pojazdów na przejściach dla pieszych przy różnych warunkach oświetleniowych.

Otrzymane wyniki pomiarów stanowią bazę dla określenia funkcji przynależności oraz zakresów zmienności przyjętych zmiennych wejściowych oraz wyjściowych. Na podstawie doświadczeń zebranych w rozdziale pierwszym określono reguły systemu wnioskowania rozmytego i operatory logiki rozmytej. W efekcie przeprowadzonych analiz otrzymano liczbę konfliktów ruchowych. Następnie obliczono wskaźnik liczb konfliktów ruchowych, który posłużył do ostatecznej oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych na podstawie przyjętych kryteriów.

Opracowanie autorskiej metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych przebiegało w następujących etapach:

- przyjęcie kryteriów oceny oraz wytypowanie obszarów pomiarowych w oparciu o ustalenia eksperckie,
- badania terenowe, mające na celu uzyskanie danych wejściowych do systemu logiki rozmytej,
- analiza rozkładu kontrastu na przejściach dla pieszych w Warszawie, w oparciu o dane udostępnione przez zarząd dróg,
- zaprojektowanie systemu opartego o prawa logiki rozmytej, mającego na celu określenie liczby konfliktów ruchowych na podstawie danych o warunkach oświetleniowych,
- zaprojektowanie aplikacji w środowisku Matlab-Simulink, mającej na celu zautomatyzowanie obliczeń w zaproponowanej ocenie,
- wykonanie testów poprawności działania systemu.

Zaproponowane podejście pozwoli na porównanie zachowań uczestników ruchu drogowego w różnych warunkach oświetleniowych. W efekcie zarządcy dróg dostaną informację o efektywności stosowanych rozwiązań i ich wpływie na bezpieczeństwo ruchu drogowego.

3.2. Podstawowe założenia metody

W celu opracowania jednolitej metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych, w niniejszej pracy zaproponowano zastosowanie zasad logiki rozmytej. Opracowanie procedur stosowanych w metodzie poprzedzone zostało stosownymi badaniami terenowymi.

Jak wykazała analiza danych o wypadkach [32, 106] najwięcej wypadków drogowych z udziałem pieszych ma miejsce na przejściach dla pieszych niesterowanych sygnalizacją świetlną, zlokalizowanych na drogach dwupasowych – dwukierunkowych w terenie zabudowanym.

Na podstawie analizy ww. danych o wypadkach drogowych oraz ograniczonych możliwości przeprowadzenia pomiarów rzeczywistych w terenie zdecydowano, że opracowana metoda skierowana będzie do oceny przejść dla pieszych:

- niesterowanych sygnalizacją świetlną,
- zlokalizowanych na drogach dwupasowych – dwukierunkowych,
- zlokalizowanych w terenie zabudowanym.

Należy jednak podkreślić, że zastosowanie zasad logiki rozmytej pozwala na rozbudowę zaproponowanej metody o dodatkowe warunki.

Badania terenowe przeprowadzono na przejściach dla pieszych zlokalizowanych na terenie m.st. Warszawa. Obiekty do badań wybrano sugerując się zastosowanym systemem oświetleniowym oraz charakterystyką drogi i ruchu na drodze.

W ramach badań zarejestrowano następujące dane:

- natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej przejścia dla pieszych,
- natężenie oświetlenia w płaszczyźnie poziomej przejścia dla pieszych,
- luminancję obiektu (pieszego),
- luminancję tła (jezdni),
- natężenie ruchu pieszego i kołowego,
- prędkość pojazdów,
- liczbę konfliktów ruchowych.

Badania prędkości oraz parametrów oświetleniowych przeprowadzono z wykorzystaniem specjalistycznych narzędzi pomiarowych. Do badań wybrano przejścia dla pieszych oświetlone za pomocą trzech rozwiązań tj: oświetlenia ulicznego, dodatkowej oprawy ulicznej na wysięgniku oraz oświetlenia dedykowanego.

Badania zachowań pieszych i kierowców oraz natężenia ruchu przeprowadzono przy użyciu analizy obrazu wideo. W ramach badań wykorzystano kamery pomiarowe. Kamery zlokalizowano tak, aby rejestrowały sytuację na przejściu dla pieszych oraz w jego otoczeniu.

Badania przeprowadzono w okresie jesienno - zimowym, kiedy odnotowano wcześniejsze zapadanie zmroku. Na wszystkich analizowanych przejściach dla pieszych w dniach wtorek – czwartek wykonano 3 - godzinne nagrania w godzinach 19:00 – 22:00.

Obok danych pozyskanych w ramach własnych badań terenowych wykorzystano, za zgodą zarządcy infrastruktury, wyniki audytu BRD przejść dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej na drogach zarządzanych przez ZDM w Warszawie pod kątem skuteczności oświetlenia tych przejść i zastosowanej organizacji ruchu w latach 2016 – 2019 [7].

Otrzymane wyniki zostały opracowane za pomocą podstawowych metod statystycznych. Na ich podstawie określono wzajemne zależności między wybranymi parametrami. Analiza otrzymanych danych została wykorzystana do opracowania kryteriów oraz metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych w oparciu o prawa logiki rozmytej.

4. POZYSKANIE DANYCH W ZAKRESIE WYBRANYCH PARAMETRÓW OŚWIETLENIOWYCH ORAZ WYBRANYCH PARAMETRÓW WPŁYWAJĄCYCH NA BEZPIECZEŃSTWO PIESZYCH NA PRZEJŚCIACH DLA PIESZYCH

4.1. Opis poligonu badawczego

W ramach realizacji pracy doktorskiej przeprowadzono badania terenowe na wybranych przejściach dla pieszych zlokalizowanych na terenie m.st. Warszawa. Przejścia dla pieszych wybrano zgodnie z założeniami przedstawionymi w rozdziale 3.2.

Jednym z najważniejszych kryteriów doboru był zastosowany system oświetleniowy. Do badań wybrano przejścia dla pieszych oświetlone oprawami dedykowanymi, oświetleniem ulicznym lub dodatkowymi oprawami ulicznymi zamontowanymi na wysięgniku. Do celów realizacji pracy przyjęto następujące nazewnictwo stosowanych rozwiązań oświetleniowych:

- typ A – oświetlenie uliczne,
- typ B – oświetlenie dodatkowymi oprawami na wysięgniku,
- typ C – oświetlenie dedykowane.

Do badań wytypowano 60 przejść dla pieszych. W tabeli 4.1. przedstawiono opis lokalizacji wybranych punktów pomiarowych.

Tabela 4.1. Opis przejść dla pieszych wytypowanych do badań

Typ/numer przejścia dla pieszych	Lokalizacja przejścia dla pieszych
A1	Przejście dla pieszych przez zachodni wlot ul. Madalińskiego na skrzyżowaniu z ul. Łowicką.
A2	Przejście dla pieszych przez wschodni wlot ul. Madalińskiego na skrzyżowaniu z ul. Karłowicza.
A3	Przejście dla pieszych przez ul. Dąbrowskiego na skrzyżowaniu z ul. Bałuckiego.
A4	Przejście dla pieszych przez wschodni wlot ul. Dąbrowskiego na skrzyżowaniu z ul. Wiśniową.
A5	Przejście dla pieszych przez zachodni wlot ul. Dąbrowskiego na skrzyżowaniu z ul. Wiśniową.
A6	Przejście dla pieszych przez ul. Konstruktorską na skrzyżowaniu z ul. Postępu.
A7	Przejście dla pieszych przez ul. Postępu na skrzyżowaniu z ul. Konstruktorską.
A8	Przejście dla pieszych przez zachodni wlot ul. 1 Sierpnia na skrzyżowaniu z ul. Sulmierzycką.
A9	Przejście dla pieszych przez wschodni wlot ul. 1 Sierpnia na skrzyżowaniu z ul. Sulmierzycką.
A10	Przejście dla pieszych przez ul. Francuską na skrzyżowaniu z ul. Obrońców.
A11	Przejście dla pieszych przez ul. Francuską na skrzyżowaniu z ul. Walecznych.

Typ/numer przejścia dla pieszych	Lokalizacja przejścia dla pieszych
A12	Przejście dla pieszych przez ul. Francuską na skrzyżowaniu z ul. Berezyńską.
A13	Przejście dla pieszych przez ul. Międzynarodową na skrzyżowaniu z ul. Wąwolnicką.
A14	Przejście dla pieszych przez ul. Międzynarodową na skrzyżowaniu z ul. Angorską.
A15	Przejście dla pieszych przez północny wlot ul. Międzynarodowej na skrzyżowaniu z ul. Walecznych.
A16	Przejście dla pieszych przez południowy wlot ul. Międzynarodowej na skrzyżowaniu z ul. Walecznych.
A17	Przejście dla pieszych przez ul. Międzynarodową w rejonie posesji nr 40.
A18	Przejście dla pieszych przez ul. Międzynarodową na skrzyżowaniu z ul. Brazylijską.
A19	Przejście dla pieszych przez ul. Paryską w rejonie posesji nr 26.
A20	Przejście dla pieszych przez ul. Paryską na skrzyżowaniu z ul. Szczuczyńską.
B1	Przejście dla pieszych przez północny wlot ul. Białobrzeskiej na skrzyżowaniu z ul. Częstochowską.
B2	Przejście dla pieszych przez ul. Deotymy zlokalizowane w rejonie Szkoły Podstawowej nr 388.
B3	Przejście dla pieszych przez południowy wlot ul. Deotymy na skrzyżowaniu z ul. Batalionu AK „Pięść”.
B4	Przejście dla pieszych przez północny wlot ul. Płockiej na skrzyżowaniu z ul. Żytnią.
B5	Przejście dla pieszych przez południowy wlot ul. Płockiej na skrzyżowaniu z ul. Żytnią.
B6	Przejście dla pieszych przez ul. Batorego w rejonie Klubu Stodoła.
B7	Przejście dla pieszych przez ul. Świętego Bonifacego na skrzyżowaniu z ul. Kaspijską.
B8	Przejście dla pieszych przez ul. 1 Sierpnia na skrzyżowaniu z ul. Solińską.
B9	Przejście dla pieszych przez zachodni wlot ul. Nowolipie na skrzyżowaniu z ul. Żelazną.
B10	Przejście dla pieszych przez ul. Żytnią na skrzyżowaniu z ul. Wolność.
B11	Przejście dla pieszych przez ul. Żytnią na skrzyżowaniu z ul. Karolkową.
B12	Przejście dla pieszych przez zachodni wlot ul. Żytniej na skrzyżowaniu z ul. Tyszkiewicza.
B13	Przejście dla pieszych przez ul. Gdańską na skrzyżowaniu z ul. Jana Chryzostoma Paska.
B14	Przejście dla pieszych przez ul. Gdańską na skrzyżowaniu z ul. Księdza Trószyńskiego.
B15	Przejście dla pieszych przez ul. Gwieździstą w rejonie wjazdu na teren ogródków działkowych.
B16	Przejście dla pieszych przez ul. Gwieździstą w rejonie posesji nr 7.
B17	Przejście dla pieszych przez ul. Potocką na skrzyżowaniu z ul. Urzędniczą.

Typ/numer przejścia dla pieszych	Lokalizacja przejścia dla pieszych
B18	Przejście dla pieszych przez ul. Potocką na skrzyżowaniu z ul. Gdańską.
B19	Przejście dla pieszych przez ul. Włościańską w rejonie posesji nr 15.
B20	Przejście dla pieszych przez ul. Włościańską na skrzyżowaniu z ul. Gąbińską.
C1	Przejście dla pieszych przez północny wlot ul. Białobrzeskiej na skrzyżowaniu z ul. Lelechowską.
C2	Przejście dla pieszych przez ul. Deotymy w rejonie posesji nr 56.
C3	Przejście dla pieszych przez południowy wlot ul. Deotymy na skrzyżowaniu z ul. Ożarowską.
C4	Przejście dla pieszych przez wschodni wlot ul. Madalińskiego na skrzyżowaniu z ul. Kwiatową.
C5	Przejście dla pieszych przez wschodni wlot ul. Madalińskiego na skrzyżowaniu z ul. Króżańską.
C6	Przejście dla pieszych przez północny wlot ul. Płockiej na skrzyżowaniu z ul. Grenady.
C7	Przejście dla pieszych przez ul. Płocką zlokalizowane w rejonie posesji nr 34.
C8	Przejście dla pieszych przez ul. Kłobudzką na skrzyżowaniu z ul. Taborowej.
C9	Przejście dla pieszych przez ul. Płocką na skrzyżowaniu z ul. Zawiszy.
C10	Przejście dla pieszych przez północny wlot ul. Smoczej na skrzyżowaniu z ul. Miłą.
C11	Przejście dla pieszych przez ul. Smoczą w rejonie posesji nr 19.
C12	Przejście dla pieszych przez południowy wlot ul. Smoczej na skrzyżowaniu z ul. Nowolipki.
C13	Przejście dla pieszych przez ul. Smoczą na skrzyżowaniu z ul. Nowolipie.
C14	Przejście dla pieszych przez ul. Stawki na skrzyżowaniu z ul. Smoczą.
C15	Przejście dla pieszych przez ul. Tatarską na skrzyżowaniu z ul. Kozielską.
C16	Przejście dla pieszych przez ul. Żytnią w rejonie posesji nr 42.
C17	Przejście dla pieszych przez ul. Potocką na skrzyżowaniu z ul. Marii Kazimiery.
C18	Przejście dla pieszych przez ul. Potocką na skrzyżowaniu z ul. Bieniewicką.
C19	Przejście dla pieszych przez ul. Krasińskiego w rejonie posesji 57.
C20	Przejście dla pieszych przez ul. Krasińskiego na skrzyżowaniu z ul. Przesnyską.

Źródło: opracowanie własne

4.2. Opracowanie pozyskanych danych

4.2.1. Wybór metod i narzędzi pomiarowych

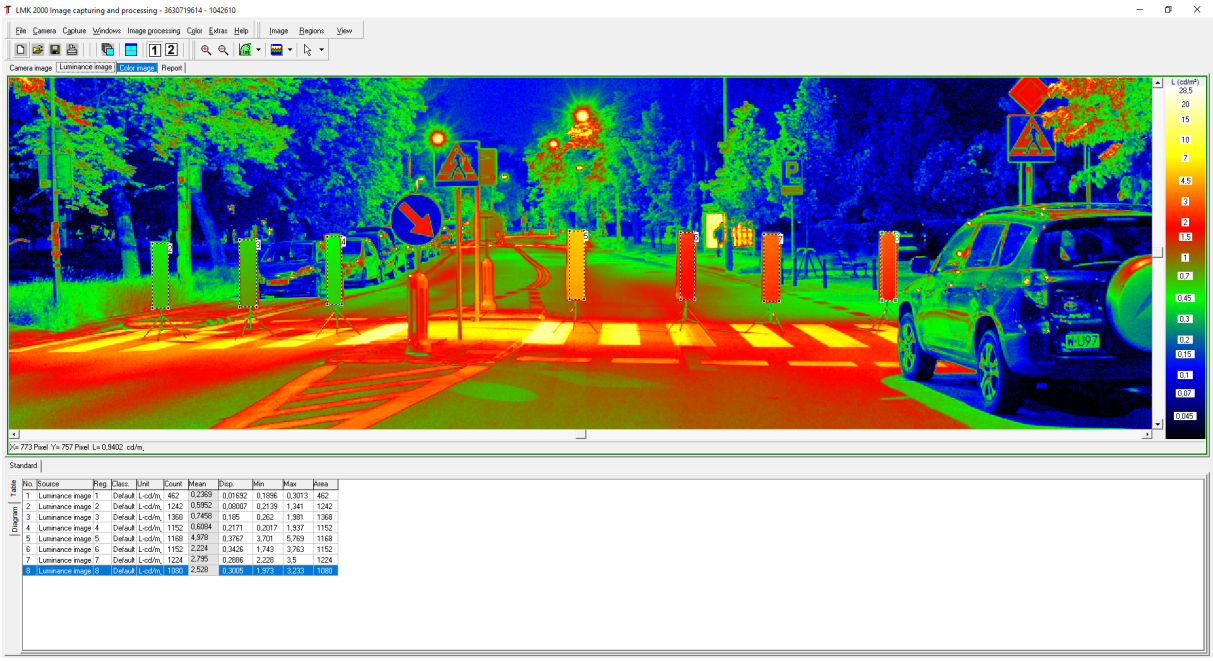
W ramach realizacji pracy doktorskiej wykorzystano wyniki przeprowadzonych badań terenowych. Analizie poddano: natężenie oświetlenia, luminancję oraz kontrast sylwetki pieszego na przejściu dla pieszych, natężenie ruchu drogowego, prędkość pojazdów oraz liczbę konfliktów ruchowych w rejonie przejść dla pieszych.

Pomiar natężenia oświetlenia przeprowadzono zgodnie z procedurą przedstawioną w pracach: [77, 109, 110, 127] i omówioną w rozdziale 1.2.2. Na każdym z przejść dla pieszych wykonano łącznie pomiary dla 50 punktów zlokalizowanych w płaszczyźnie poziomej E_h oraz pionowej E_v. Na podstawie uzyskanych danych określono i przyjęto następujące parametry:

- minimalne poziome natężenie oświetlenia $E_{h\ min}$ [lx],
- maksymalne poziome natężenie oświetlenia $E_{h\ max}$ [lx],
- średnie poziome natężenie oświetlenia $E_{h\ śr}$ [lx],
- równomierność natężenia oświetlenia w płaszczyźnie poziomej ($E_{h\ min}/E_{h\ śr}$),
- parametr $E_{h\ min}/E_{h\ max}$ określający największą występującą różnicę wartości natężenia oświetlenia w płaszczyźnie poziomej,
- minimalne pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\ min}$ [lx],
- maksymalne pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\ max}$ [lx],
- średnie pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\ śr}$ [lx],
- równomierność rozkładu natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej ($E_{v\ min}/E_{v\ śr}$),
- parametr $E_{v\ min}/E_{v\ max}$ określający największą występującą różnicę wartości natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej,
- klasa oświetlenia w płaszczyźnie poziomej E_h,
- klasa oświetlenia w płaszczyźnie pionowej E_v.

Na każdym z przejść dla pieszych przeprowadzono pomiar luminancji dla dwóch kierunków obserwacji. Pomiar wykonano z odległości 60 m dla każdego kierunku ruchu pojazdów, zgodnie z procedurą opisaną w publikacjach [109, 111, 113] oraz omówioną w rozdziale 1.2.2.

Zdjęcia luminancji poddane zostały analizie w programie LMK 2000, w wyniku której otrzymano wartości luminancji tła oraz luminancji obiektu. Na rysunku 4.1. przedstawiono wygląd oprogramowania do analizy zdjęć luminancji.



Rys. 4.1. Wygląd interfejsu programu LMK 2000

Źródło: opracowanie własne

Następnie wg wzoru 4.1. obliczono kontrast C sylwetki pieszego na przejściu dla pieszych dla każdego kierunku ruchu pojazdów.

$$C = \frac{L_O - L_T}{L_T} \tag{4.1.}$$

gdzie:

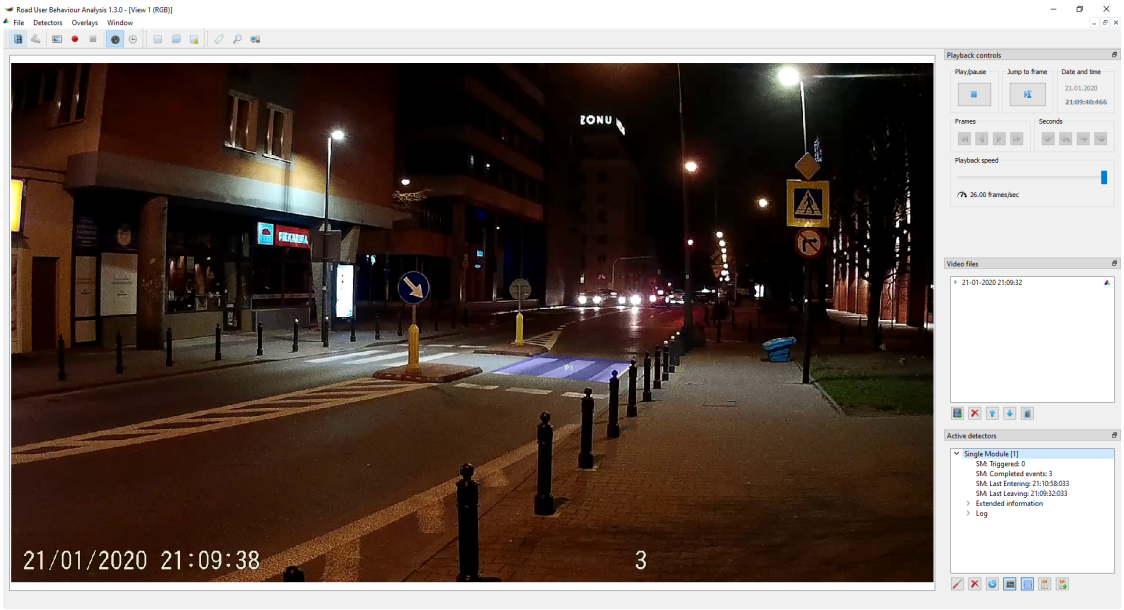
C – kontrast luminancji sylwetki pieszego z tłem,

L_O – luminancja obiektu (pieszego),

L_T – luminancja tła (jezdni).

Na przełomie 2019 i 2020 roku, w okresie jesienno - zimowym, w godzinach 19:00 – 22:00, przeprowadzono nagrania wideo mające na celu rejestrację zachowań uczestników ruchu drogowego oraz podstawowych parametrów ruchu. W czasie przeprowadzonych pomiarów nie występowały opady atmosferyczne, a nawierzchnia jezdni i chodników była sucha.

Na podstawie nagrań wykonano pomiary natężenia ruchu pieszego i kołowego oraz badano liczbę konfliktów ruchowych. Analizę obrazu wideo przeprowadzono za pomocą specjalistycznego oprogramowania RUBA 1.3.0 [3, 68, 78, 96]. Na rysunku 4.2. przedstawiono wygląd interfejsu programu RUBA 1.3.0.



Rys. 4.2. Wygląd interfejsu oprogramowania do analizy obrazu wideo RUBA 1.3.0
Źródło: opracowano na podstawie [96]

Z wykorzystaniem detektorów obecności w programie RUBA 1.3.0 zebrano dane o natężeniu ruchu kołowego i pieszego dla każdego z przejść dla pieszych. Do analizy przyjęto godzinę, w której natężenie ruchu odpowiednio pieszego i kołowego było największe. Na podstawie otrzymanych wyników obliczono stosunek natężenia ruchu pieszego do kołowego.

Dane z rejestratora wideo wykorzystano również do weryfikacji konfliktów ruchowych pomiędzy kierowcami a pieszymi. Odnotowano m.in. sytuacje takie jak: gwałtowne hamowanie przed przejściem dla pieszych, nieustąpienie pierwszeństwa pieszemu, wjazd pojazdu na przejście dla pieszych, gdy pieszy jeszcze się po nim poruszał, czy wtargnięcie pieszego na przejście dla pieszych przed jadącym pojazdem. W pracy wykorzystano wskaźnik liczby konfliktów mówiący o relacji pomiędzy liczbą konfliktów ruchowych w stosunku do natężenia ruchu pieszego i kołowego. Wskaźnik ten został obliczony wg wzoru [92]:

$$CR = \frac{10^3 \times LK}{Q_v \times Q_p} \tag{4.2.}$$

gdzie:

CR – wskaźnik konfliktów *conflict rate*,

LK – liczba odnotowanych konfliktów w godzinie,

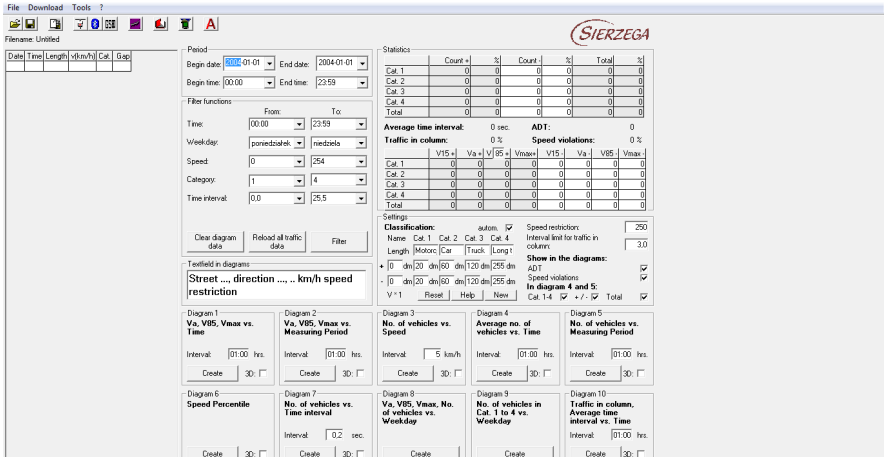
Q_v – natężenie ruchu kołowego [poj/h],

Q_p – natężenie ruchu pieszego [P/h].

Kolejnym mierzonym parametrem była prędkość pojazdów w obrębie przejścia dla pieszych. Do wyznaczenia prędkości wykorzystano specjalistyczny radar firmy Sierzega - Vehicle Traffic Counter SR4 (rys. 4.3.). Urządzenie pozwala na pomiar prędkości w zakresie od 0 do 200 km/h w przekroju jedno- lub dwukierunkowym. Dodatkowo pozwala na rejestrację pomiaru natężenia ruchu oraz prędkości w zależności od struktury rodzajowej pojazdów. Odczyt danych odbywa się za pomocą aplikacji mobilnej Sierzega Terminal. Umożliwia ona pobranie danych w czasie rzeczywistym oraz przesłanie ich w formie elektronicznej na dowolne urządzenie.

Rys. 4.3. Pomiar prędkości za pomocą radaru Sierzega - Vehicle Traffic Counter SR4
Źródło: opracowanie własne

Dane dotyczące prędkości pojazdów opracowano z wykorzystaniem programu oferowanego przez producenta, umożliwiającego określenie m.in. prędkości średniej, 15% kwantyl prędkości oraz udziału pojazdów przekraczających dopuszczalną prędkość. Na rysunku 4.4. przedstawiono okno programu Sierzega 5.4 służącego do analizy otrzymanych danych.



Rys. 4.4. Wygląd programu Sierzega
Źródło: opracowanie własne

4.2.2. Analiza pozyskanych wyników badań

W ramach prowadzonych badań porównano szereg parametrów zmierzonych na przejściach dla pieszych oświetlonych trzema różnymi sposobami. Poniżej przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań w zależności od rodzaju oświetlenia. W tabeli 4.2., przedstawiono wyniki badań przeprowadzone na przejściach dla pieszych, na których nie zastosowano dodatkowych systemów oświetleniowych (tj. obiekty numer: A1 – A20 wg tabeli 4.1.).

Analizując poniższe zestawienie (tabela 4.2.) stwierdzono, że przejścia oświetlone za pomocą opraw ulicznych charakteryzują się niskimi poziomami oświetlenia zarówno w płaszczyźnie poziomej jak i pionowej. Najniższa odnotowana wartość natężenia oświetlenia w płaszczyźnie poziomej wyniosła 2 lx (dla obiektu A15), natomiast w płaszczyźnie pionowej – 1 lx (dla obiektu A6). Najwyższe odnotowane natężenie oświetlenia wyniosło 71,9 lx dla płaszczyzny poziomej (dla obiektu A19) oraz 39,4 lx dla płaszczyzny pionowej (dla obiektu A5). Średnie natężenie oświetlenia wyniosło odpowiednio 19,88 lx dla płaszczyzny poziomej oraz 10,72 lx dla płaszczyzny pionowej. W obydwu przypadkach dla 55% badanych obiektów odnotowano wartości średnie natężenia oświetlenia niższe od wartości obliczonej dla wszystkich obiektów. Kolejnym parametrem charakteryzującym natężenie oświetlenia jest jego równomierność. Średnia równomierność rozkładu natężenia oświetlenia dla wszystkich przebadanych przejść dla pieszych w analizowanej grupie (typ A) wyniosła 0,47 w płaszczyźnie poziomej oraz 0,57 w płaszczyźnie pionowej. Warto zauważyć, że 0,4 to najniższa dopuszczalna wartość, w przypadku wyznaczenia klasy oświetleniowej.

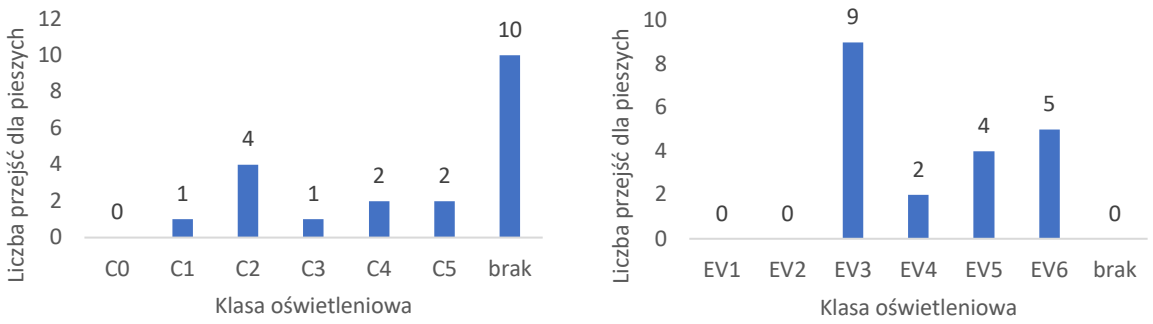
Analiza powyższych danych przekłada się na rozkład klas oświetleniowych C dla przejść dla pieszych oświetlonych oprawami ulicznymi, traktowanymi jako obszary konfliktowe (klasyfikacja omówiona w rozdziale 1.2.2). W przypadku płaszczyzny poziomej dla 50% badanych przypadków nie uzyskano klasy oświetleniowej C z uwagi na niskie wartości średniego natężenia oświetlenia oraz brak równomierności rozkładu oświetlenia. Dla pomiarów przeprowadzonych w płaszczyźnie pionowej dla większości przypadków uzyskano klasy odpowiadające najniższym poziomom oświetlenia – EV6 i EV5. Na rysunku 4.5. przedstawiono rozkład natężenia oświetlenia w poszczególnych klasach oświetleniowych w płaszczyźnie poziomej oraz płaszczyźnie pionowej.

Tabela 4.2. Zestawienie wyników badań dla przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw ulicznych (typ A)

Badane parametry		Obiekt numer:																			
		A1	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**	**A7**	**A8**	**A9**	**A10**	**A11**	**A12**	**A13**	**A14**	**A15**	**A16**	**A17**	**A18**	**A19**	**A20**
Natężenie oświetlenia w płaszczyźnie poziomej	minimalne poziome natężenie oświetlenia $E_{h\,min}$ [lx]	6	9	4,0	5,5	5,30	2,40	4,90	4,80	2,50	5,40	4,80	10,00	18,10	17,00	2,00	14,00	22,00	8,50	35,30	4,60
	maksymalne poziome natężenie oświetlenia $E_{h\,max}$ [lx]	12	22	7,50	10,00	59,10	18,00	18,30	30,40	33,40	17,30	36,20	37,00	34,50	31,00	47,00	28,00	67,00	16,60	71,90	31,20
	średnie poziome natężenie oświetlenia $E_{h\,śr}$ [lx]	9,67	16,13	6,30	7,28	27,46	5,54	13,39	18,18	20,15	10,38	11,92	25,54	26,13	23,67	13,67	21,37	45,69	12,92	60,03	22,19
	równomierność natężenia oświetlenia ($E_{h\,min}/E_{h\,śr}$)	0,62	0,56	0,63	0,76	0,19	0,43	0,37	0,26	0,12	0,52	0,40	0,39	0,69	0,72	0,15	0,66	0,48	0,66	0,59	0,21
	parametr $E_{h\,min}/E_{h\,max}$	0,5	0,41	0,53	0,55	0,09	0,13	0,27	0,16	0,07	0,31	0,13	0,27	0,52	0,55	0,04	0,50	0,33	0,51	0,49	0,15
	klasa oświetlenia w płaszczyźnie poziomej E_h	C5	C3	brak	brak	brak	brak	brak	brak	brak	C4	C4	brak	C2	C2	brak	C2	C2	C5	C1	brak
Natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej	minimalne pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\,min}$ [lx]	1,5	10,5	3,00	3,25	4,80	1,00	3,90	2,55	4,40	3,90	2,90	11,05	8,95	16,00	3,00	5,50	8,00	6,05	12,15	7,90
	maksymalne pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\,max}$ [lx]	3,5	18,5	5,75	5,25	39,40	9,45	11,35	9,50	15,80	12,05	11,75	27,40	15,75	26,50	7,50	8,50	30,90	10,35	23,10	18,05
	średnie pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\,śr}$ [lx]	2,85	15,1	4,35	4,23	18,08	4,80	9,34	6,23	10,52	7,34	6,27	19,75	12,56	22,45	3,85	7,20	17,33	8,47	19,19	14,46
	równomierność natężenia oświetlenia ($E_{v\,min}/E_{v\,śr}$)	0,51	0,65	0,69	0,76	0,37	0,22	0,48	0,41	0,52	0,61	0,56	0,56	0,72	0,70	0,72	0,69	0,48	0,72	0,68	0,54
	parametr $E_{v\,min}/E_{v\,max}$	0,42	0,56	0,52	0,62	0,12	0,11	0,34	0,27	0,28	0,32	0,25	0,40	0,57	0,60	0,40	0,65	0,26	0,58	0,53	0,44
	klasa oświetlenia w płaszczyźnie pionowej E_v	EV6	EV3	EV6	EV6	EV3	EV6	EV4	EV5	EV3	EV5	EV5	EV3	EV3	EV3	EV6	EV5	EV3	EV4	EV3	EV3

Badane parametry		Obiekt numer:																			
		A1	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**	**A7**	**A8**	**A9**	**A10**	**A11**	**A12**	**A13**	**A14**	**A15**	**A16**	**A17**	**A18**	**A19**	**A20**
Luminancja	Luminancja obiektu L_O [cd/m^2]	1,02	1,18	0,28	0,27	1,15	0,31	0,59	0,40	0,67	0,47	0,40	1,26	0,80	1,43	0,25	0,46	1,10	0,54	1,22	0,92
	Luminancja tła L_T [cd/m^2]	0,91	0,9	0,44	0,49	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,62	1,62	1,66	1,23	1,23	2,08	2,08	2,08	2,08
	Kontrast sylwetki pieszego z tłem jezdni	0,79	0,49	-0,37	-0,45	0,08	-0,71	-0,44	-0,63	-0,37	-0,56	-0,63	-0,23	-0,51	-0,14	-0,80	-0,63	-0,47	-0,74	-0,41	-0,56
Natężenie ruchu	Natężenie ruchu pieszego [P/h]	68	104	81	75	17	49	32	35	53	30	104	28	22	37	56	23	69	43	30	55
	Natężenie ruchu kołowego [poj/h]	412	556	243	224	166	345	253	245	266	237	313	249	202	185	222	226	347	217	181	327
	Stosunek natężenia ruchu pieszego do kołowego	0,17	0,19	0,33	0,33	0,10	0,14	0,13	0,14	0,20	0,13	0,33	0,11	0,11	0,20	0,25	0,10	0,20	0,20	0,17	0,17
Konflikty ruchowe	Liczba konfliktów ruchowych	2	3	8	5	7	4	8	9	7	6	4	4	4	5	9	6	8	8	8	6
	Wskaźnik liczby konfliktów	0,06	0,06	0,41	0,32	2,52	0,23	0,98	1,08	0,50	0,83	0,14	0,62	0,97	0,77	0,76	1,21	0,32	0,80	1,44	0,33
Prędkość pojazdów	Prędkość minimalna v_{min} [km/h]	9	8	8	7	9	10	8	9	7	9	8	7	8	10	8	10	8	8	7	9
	Prędkość maksymalna v_{max} [km/h]	66	68	57	62	58	65	61	55	62	56	57	56	61	61	55	64	60	63	63	59
	Prędkość średnia $v_{śr}$ [km/h]	48,4	44,7	35,1	33,8	55,1	31,4	37,4	30,8	29,3	28,2	28,1	43,9	43,4	25,5	41,3	38,7	29,6	31,7	30,4	41,6
	Kwantyl 15 prędkości [km/h]	25	26	26	26	26	26	25	26	27	25	26	26	25	27	26	25	26	26	26	26
	Kwantyl 85 prędkości [km/h]	43	37	35	35	36	39	36	38	36	35	36	38	38	38	36	39	39	38	38	37
	Udział pojazdów przekraczających prędkość dopuszczalną [%]	7	3	7	5	6	6	6	5	7	9	10	5	9	10	9	7	10	6	9	5

Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.5. Rozkład przejść dla pieszych przypisanych do poszczególnych klasa oświetleniowych (typ A).

Wykres po lewej stronie – płaszczyzna pozioma – klasy C, po prawej stronie – płaszczyzna pionowa – klasy EV.

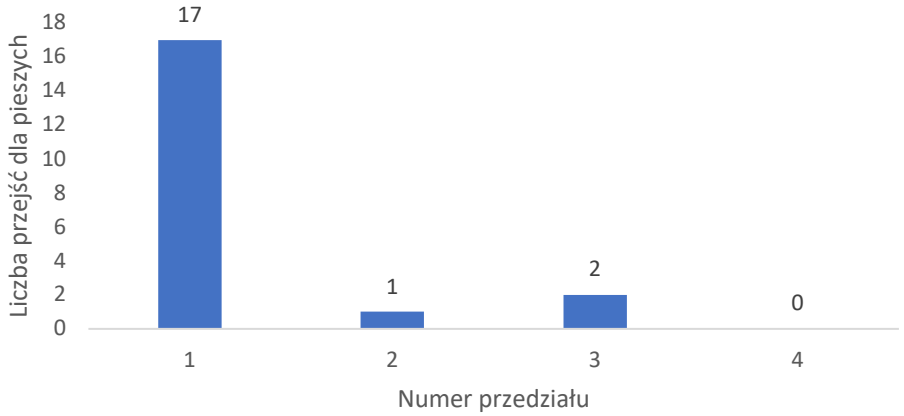
Źródło: opracowanie własne

Wyniki uzyskane w ramach pomiarów natężenia oświetlenia przekładają się na wyniki pomiarów luminancji. Na podstawie otrzymanych wyników pomiaru luminancji sylwetki pieszego oraz jezdni obliczono wartość kontrastu. Na rysunku 4.6. przedstawiono rozkład kontrastu w oparciu o przedziały przedstawione w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Przedziały występowania kontrastu sylwetki pieszego z tłem

Lp.	Przedział [-]	Opis przedziału
1	$-1 \leq C < -0{,}1$	Kontrast ujemny akceptowalny
2	$-0{,}1 \leq C \leq 0{,}1$	Kontrast nieakceptowalny, zerowy lub bliski zero
3	$0{,}1 < C \leq 1{,}5$	Kontrast dodatni minimalny
4	$C > 1{,}5$	Kontrast dodatni akceptowalny

Źródło: opracowano na podstawie [65, 111, 112, 113]



Rys. 4.6. Rozkład kontrastu w oparciu o przedziały przedstawione w tabeli 4.3.

Źródło: opracowanie własne

W przypadku przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw ulicznych dla 85% przypadków odnotowano ujemną wartość kontrastu sylwetki pieszego z tłem. Dla pozostałych przypadków otrzymano dopuszczalne wartości kontrastu (2 obiekty) oraz nieakceptowalną wartość kontrastu bliską 0 (1 obiekt) [112]. Wartość średnia kontrastu na przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw ulicznych wyniosła -0,36. Do dalszych analiz przyjęto, że na przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw ulicznych występuje kontrast ujemny.

Obok parametrów oświetleniowych, badaniom poddane zostały wybrane parametry ruchu drogowego. Dla wytypowanych obiektów przeprowadzono pomiary natężenia ruchu pieszego i kołowego. Wyniki pomiarów przedstawione zostały w tabeli 4.2.

W ramach badań analizowano zachowania uczestników ruchu drogowego, które przedstawione zostały w formie liczby konfliktów ruchowych. Na przejściach dla pieszych oświetlonych oprawami ulicznymi liczba odnotowanych konfliktów ruchowych wahała się między 2 a 9 konfliktami w ciągu mierzonej godziny. Średnia liczba konfliktów ruchowych dla tego rodzaju oświetlenia wyniosła 6. Z zarejestrowanych zachowań pieszych najniebezpieczniejsze i najczęściej występujące to: brak upewnienia się przed wejściem na jezdnię i wkraczanie bezpośrednio przed jadący pojazd oraz przechodzenie poza przejściem dla pieszych. Wśród kierowców najczęściej występującym zachowaniem było nieustąpienie pierwszeństwa pieszemu oczekującemu na przejście przez jezdnię oraz wchodzącemu na jezdnię. W związku z powyższym najczęściej występującymi konfliktami na przejściu dla pieszych w relacji pojazd – pieszy były:

- nieustąpienie pierwszeństwa pieszemu (36% konfliktów),
- wtargnięcie pieszego bezpośrednio pod jadący pojazd (24% konfliktów),
- gwałtowne hamowanie przed przejściem dla pieszych (20% konfliktów).

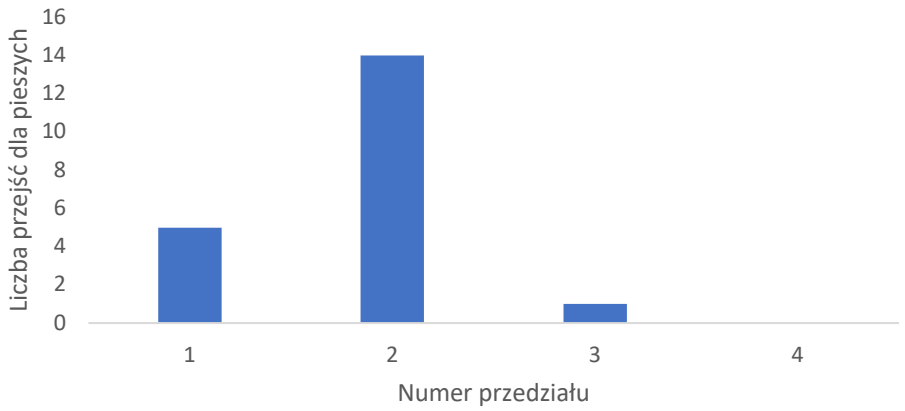
Kolejnym mierzonym parametrem była prędkość pojazdów. Na każdym z przejść dla pieszych w czasie prowadzenia pomiarów obowiązywał limit 50 km/h. Na przejściach oświetlonych za pomocą opraw ulicznych średnio 7% pojazdów przekraczało prędkość dopuszczalną. Prędkość przekraczana była o ok. 10 km/h. Prędkość minimalna odnotowana na przejściach dla pieszych to 7 km/h. Z obserwacji wynika, że niskie prędkości w rejonie przejść dla pieszych związane były z ustępowaniem pierwszeństwa pieszym przekraczającym jezdnię (zwalnianie pojazdu) lub z manewrem parkowania w rejonie przejść dla pieszych. Odnotowana prędkość maksymalna wyniosła 68 km/h, co stanowi przekroczenie o 36% dopuszczalnej

prędkości pojazdów. Wartość średnia prędkości wyniosła 36,4 km/h. Na rysunku 4.7. przedstawiono rozkład prędkości w przedziałach zawartych w tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Klasyfikacja prędkości pojazdów ze względu na bezpieczeństwo pieszych

Lp.	Przedział prędkości [km/h]	Opis przedziału
1	$v \leq 30$	Prędkość bezpieczna
2	$30 > v \geq 50$	Prędkość umiarkowanie bezpieczna
3	$50 > v \geq 70$	Prędkość niebezpieczna
4	$v > 70$	Prędkość krytyczna

Źródło: opracowano na podstawie [26, 45, 46, 62]



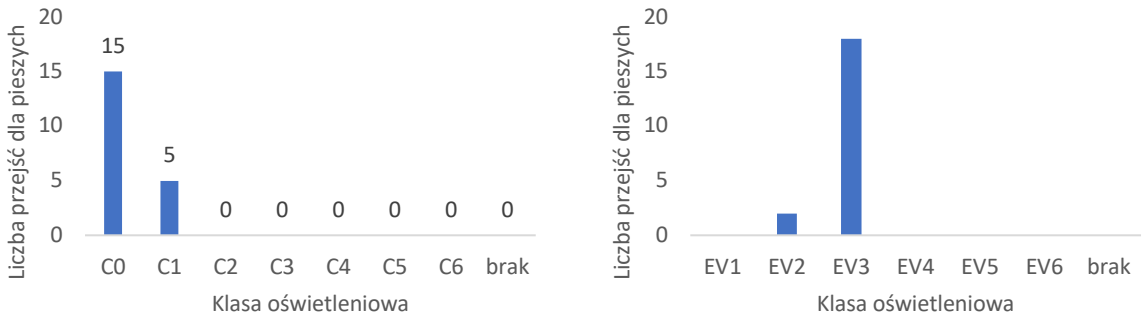
Rys. 4.7. Rozkład prędkości w oparciu o przedziały przedstawione w tabeli 4.4.
Źródło: opracowanie własne

W celu uniknięcia gruntownej przebudowy systemu oświetlenia w rejonie przejść dla pieszych oraz kosztów związanych z montażem nowych instalacji oświetleniowych, zarządcy drogi stosują dodatkowe oświetlenie przejść dla pieszych za pomocą dwóch lub większej liczby opraw ulicznych zamontowanych na dodatkowych – najczęściej podwójnych wysięgnikach. Poniżej, w tabeli 4.5., przedstawiono wyniki badań przeprowadzone na przejściach dla pieszych, na których zastosowano dodatkowe oświetlenie uliczne (tj. obiekty numer: B1-B20 wg tabeli 4.1.).

Analizując dane zawarte w tabeli 4.5. można zauważyć znaczną poprawę warunków oświetleniowych, w stosunku do przejść oświetlonych oprawami ulicznymi. Minimalne natężenie oświetlenia w płaszczyźnie poziomej wyniosło 21 lx oraz 4,75 lx, w płaszczyźnie pionowej (dla obiektu B6). Najwyższe odnotowane natężenie oświetlenia wyniosło 203 lx dla płaszczyzny poziomej (dla obiektu B6) oraz 88,5 lx dla płaszczyzny pionowej (dla obiektu B6).

Średnie natężenie oświetlenia wyniosło odpowiednio 60,92 lx dla płaszczyzny poziomej oraz 21,47 lx dla płaszczyzny pionowej. Warto zauważyć, że w przypadku zastosowania dodatkowych opraw ulicznych średnie natężenie oświetlenia wzrosło trzykrotnie dla płaszczyzny poziomej oraz dwukrotnie dla płaszczyzny pionowej. Dla 65% przebadanych przejść dla pieszych odnotowano wartość średnią natężenia oświetlenia w płaszczyźnie poziomej niższą niż 60,92 lx. W przypadku płaszczyzny pionowej dla 70% przejść dla pieszych otrzymano wyniki poniżej wartości średniej obliczonej dla wszystkich obiektów (tj. 21,47 lx). Średnia równomierność oświetlenia wyniosła 0,64 zarówno dla płaszczyzny poziomej jak i pionowej.

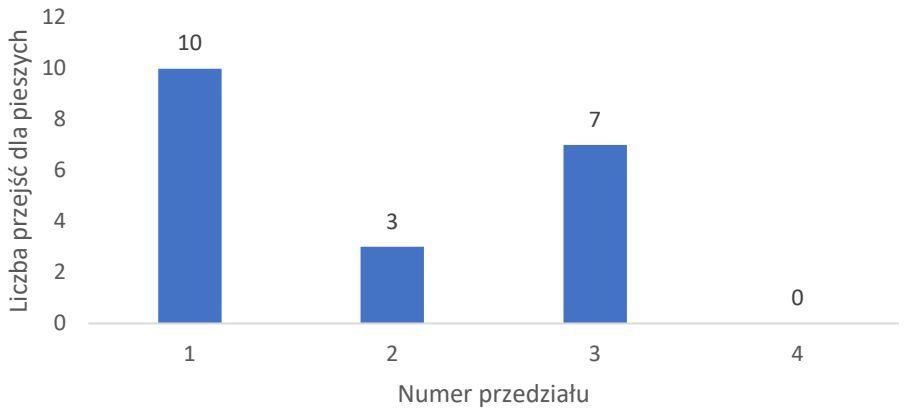
Powyższe wyniki potwierdza rozkład przejść dla pieszych w poszczególnych klasach oświetleniowych. Przejścia dla pieszych oświetlone za pomocą dodatkowej oprawy na wysięgniku otrzymały klasę oświetleniową C0 lub C1 (najwyższe wg klasyfikacji omówionej w rozdziale 1.2.2). Dla pomiarów przeprowadzonych w płaszczyźnie pionowej dla większości przypadków odnotowano EV3. Na rysunku 4.8. przedstawiono rozkład natężenia oświetlenia w poszczególnych klasach oświetleniowych w płaszczyźnie poziomej oraz płaszczyźnie pionowej.



Rys. 4.8. Rozkład natężenia oświetlenia w poszczególnych klasach oświetleniowych w płaszczyźnie poziomej oraz płaszczyźnie pionowej (typ B)
Wykres po lewej stronie – płaszczyzna pozioma, po prawej stronie – płaszczyzna pionowa.
Źródło: opracowanie własne

Wyniki przeprowadzonych pomiarów luminancji potwierdzają poprawę warunków oświetleniowych na przejściach oświetlonych za pomocą dodatkowych opraw na wysięgniku. Obliczone wartości kontrastu wskazują możliwość osiągnięcia tym sposobem wysokiego kontrastu ujemnego. Należy jednak zwrócić uwagę na niski kontrast dodatni, który może

powodować pogorszenie warunków widoczności pieszych. Na rysunku 4.9. przedstawiono rozkład kontrastu w oparciu o przedziały przedstawione w tabeli 4.3.



Rys. 4.9. Rozkład kontrastu w oparciu o przedziały przedstawione w tabeli 4.3.
Źródło: opracowanie własne

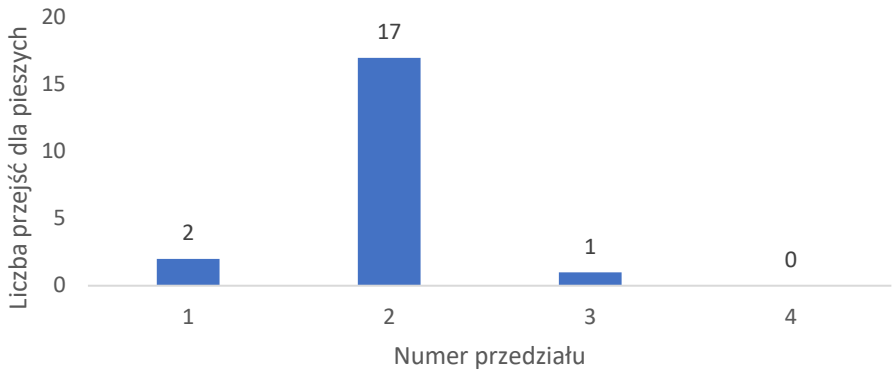
Dla 55% badanych obiektów otrzymano kontrast ujemny. Wśród przejść dla pieszych oświetlonych w kontraście ujemnym, jedno miało wartość nieakceptowaną, bliską zeru. Na pozostałych przejściach dla pieszych wstępował kontrast dodatni, z czego dla 2 przypadków otrzymano wartość poniżej wartości akceptowalnej (0,1).

Wyniki pomiarów natężenia ruchu pieszego oraz kołowego przedstawiono w tabeli 4.5.

Podobnie jak w przypadku przejść oświetlonych za pomocą opraw ulicznych analizowano zachowania uczestników ruchu drogowego. Liczba odnotowanych konfliktów wahała się między 3 a 8. Średnia liczba konfliktów na przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą dodatkowych opraw na wysięgniku wyniosła 6. Zarówno liczba konfliktów ruchowych jak i zachowania pieszych i kierowców były podobne jak w przypadku wcześniej analizowanej grupy – do najczęściej występujących konfliktów ruchowych można zaliczyć: nieustąpienie pierwszeństwa pieszemu, wtargnięcie pieszego bezpośrednio pod jadący pojazd oraz gwałtowne hamowanie przed przejściem dla pieszych.

Badanie prędkości wykazało jej nieznaczny wzrost w stosunku do przejść dla pieszych oświetlonych oprawami ulicznymi. Średnia prędkość pojazdów wyniosła 39,81 km/h. Przekraczanie dopuszczalnej prędkości odnotowano u 7% kierowców przekraczających przekrój przejścia dla pieszych. Prędkość przekraczana była o ok. 12 km/h. Najniższa odnotowana na przejściach dla pieszych prędkość to 7 km/h. Prędkość maksymalna wynosiła

88 km/h (przekroczenie o 76% dopuszczalnej prędkości pojazdów). Na rysunku 4.10. przedstawiono rozkład prędkości średniej w przedziałach zawartych w tabeli 4.4.



Rys. 4.10. Rozkład prędkości w oparciu o przedziały przedstawione w tabeli 4.4.
Źródło: opracowanie własne

Jednym ze sposobów poprawy warunków widoczności pieszych na przejściach dla pieszych jest uzyskanie kontrastu dodatniego, tj. widzialności pieszego w postaci jasnej sylwetki na ciemnym tle jezdni. W tym celu stosuje się oświetlenie przejść dla pieszych za pomocą opraw dedykowanych. Poniżej, w tabeli 4.6., przedstawiono wyniki badań przeprowadzone na przejściach dla pieszych, na których zastosowano oprawy dedykowane (tj. obiekty numer: C1 – C20 wg tabeli 4.1).

Jak wynika z przeprowadzonych pomiarów (tabela 4.6.) na przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych osiągnięto najwyższe wartości natężenia oświetlenia zarówno w płaszczyźnie poziomej jak i pionowej. Minimalne natężenie oświetlenia w płaszczyźnie poziomej wyniosło 29 lx, natomiast w płaszczyźnie pionowej 7,3 lx. Natomiast maksymalne natężenie oświetlenia wyniosło odpowiednio 238 lx dla płaszczyzny poziomej oraz 133 lx dla płaszczyzny pionowej. Średnie natężenie oświetlenia w płaszczyźnie poziomej wyniosło 90,3 lx. Jest to o 30 lx więcej niż w przypadku przejść oświetlonych dodatkowymi oprawami na wysięgniku. Dla 40% przebadanych przejść dla pieszych osiągnięto wartość poniżej średniej.

W przypadku płaszczyzny pionowej średnie natężenie oświetlenia wyniosło 50,3 lx, co stanowi wartość większą o ok 30 lx w stosunku do wcześniej analizowanych przypadków. Połowa przejść dla pieszych otrzymała wartości poniżej średniej. Dla każdego z przejść dla pieszych osiągnięto równomierność wyższą niż 0,4. Wartość średnia wyniosła 0,45. Warto zwrócić uwagę, że dla wszystkich badanych obiektów otrzymano najwyższą klasę

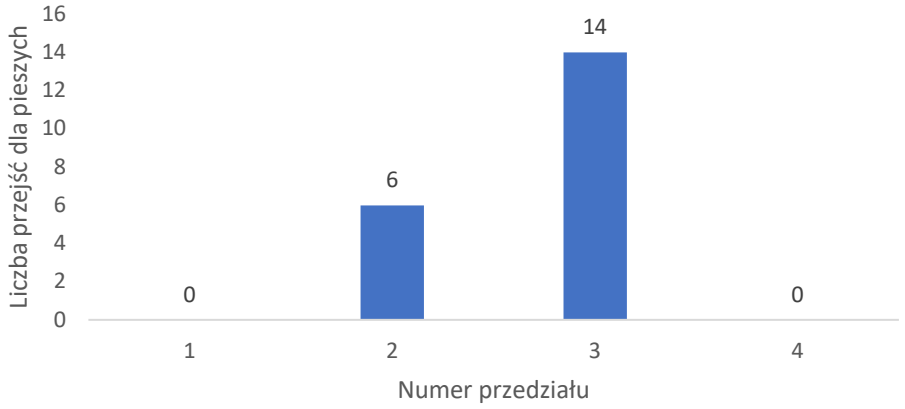
oświetleniową – C0. W przypadku płaszczyzny pionowej 9 z 20 badanych obiektów otrzymało klasę oświetleniową EV1, pozostałe – EV2.

Obliczenia kontrastu, przeprowadzone na podstawie danych z pomiaru luminancji, wykazały, że dla wszystkich przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych osiągnięto wysokie wartości kontrastu dodatniego (powyżej 1,5). Wartość średnia kontrastu wyniosła 2,05. Przeprowadzone pomiary i analizy, jak również wizja lokalna i subiektywna ocena sugerują, że na badanych przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych występują bardzo dobre warunki widoczności pieszego.

Wyniki pomiarów natężenia ruchu pieszego oraz kołowego przedstawiono w tabeli 4.6.

Poprawa warunków ruchu przełożyła się na wyniki badań konfliktów ruchowych. Na przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych odnotowano od 0 do 5 konfliktów ruchowych między pieszymi a kierowcami. Średnia liczba konfliktów ruchowych wyniosła 3. Powstałe konflikty ruchowe najczęściej wynikały z braku zachowania szczególnej ostrożności przez pieszych oraz kierowców, a w szczególności poprzez nieustępowanie pierwszeństwa pieszym oraz wtargnięcie pieszych bezpośrednio przed jadący pojazd.

Pomimo wzrostu widoczności i spadku liczby konfliktów ruchowych odnotowano wzrost prędkości pojazdów przejeżdżających przez przekrój przejścia dla pieszych. Średnia prędkość pojazdów wyniosła 53,3 km/h. Przekraczanie dopuszczalnej prędkości odnotowano u 7% kierowców. Prędkość przekraczana była o ok. 15 km/h. Najniższa odnotowana na przejściach dla pieszych prędkość to 7 km/h. Prędkość maksymalna wynosiła 88 km/h (przekroczenie o 76% dopuszczalnej prędkości pojazdów). Na rysunku 4.11. przedstawiono rozkład prędkości średniej w przedziałach zawartych w tabeli 4.4.



Rys. 4.11. Rozkład prędkości w oparciu o przedziały przedstawione w tabeli 4.4.
Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.5. Zestawienie wyników badań dla przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą dodatkowych opraw na wysięgniku (typ B)

Badane parametry		Obiekt numer:																			
		B1	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**	**B7**	**B8**	**B9**	**B10**	**B11**	**B12**	**B13**	**B14**	**B15**	**B16**	**B17**	**B18**	**B19**	**B20**
Natężenie oświetlenia w płaszczyźnie poziomej	minimalne poziome natężenie oświetlenia $E_{h\,min}$ [lx]	51,00	36,00	27,00	31,00	38,00	33,00	52,60	46,00	44,40	36,90	36,90	35,00	42,00	38,50	49,10	21,00	53,20	41,00	31,40	32,00
	maksymalne poziome natężenie oświetlenia $E_{h\,max}$ [lx]	74,00	64,00	64,00	83,00	71,00	203,00	106,30	77,60	67,80	66,20	76,30	75,40	72,00	64,00	92,10	67,00	76,00	73,00	64,40	65,50
	średnie poziome natężenie oświetlenia $E_{h\,śr}$ [lx]	66,00	50,90	48,90	60,90	55,00	85,17	77,98	66,76	56,63	57,34	65,44	58,36	58,37	53,10	77,67	50,65	66,14	56,02	52,38	54,74
	równomierność natężenia oświetlenia ($E_{h\,min}/E_{h\,śr}$)	0,77	0,71	0,55	0,51	0,69	0,4	0,67	0,69	0,78	0,64	0,56	0,60	0,72	0,73	0,63	0,41	0,80	0,73	0,60	0,58
	parametr $E_{h\,min}/E_{h\,max}$	0,69	0,56	0,42	0,37	0,54	0,16	0,49	0,59	0,65	0,56	0,48	0,46	0,58	0,60	0,53	0,31	0,70	0,56	0,49	0,49
	klasa oświetlenia w płaszczyźnie poziomej E_h	C0	C0	C1	C0	C0	C0	C0	C1	C1	C1	C1	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0
Natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej	minimalne pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\,min}$ [lx]	10,00	11,00	9,00	12,00	8,50	4,75	13,10	15,10	14,85	15,45	19,75	10,10	17,15	18,50	16,90	10,90	15,50	10,05	13,60	14,00
	maksymalne pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\,max}$ [lx]	16,50	16,50	18,00	27,50	30,50	88,50	51,50	23,60	20,40	24,35	27,50	25,50	30,15	23,65	27,05	27,50	27,00	28,50	23,95	25,80
	średnie pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\,śr}$ [lx]	13,60	14,25	14,00	20,10	20,00	38,43	30,98	19,70	18,46	21,60	24,73	20,13	26,58	21,08	22,45	20,58	20,90	21,32	20,03	20,59
	równomierność natężenia oświetlenia ($E_{v\,min}/E_{v\,śr}$)	0,74	0,79	0,67	0,59	0,42	0,12	0,42	0,77	0,79	0,78	0,77	0,62	0,60	0,87	0,83	0,55	0,74	0,50	0,59	0,68
	parametr $E_{v\,min}/E_{v\,max}$	0,60	0,67	0,50	0,43	0,27	0,05	0,25	0,64	0,73	0,63	0,72	0,40	0,57	0,78	0,62	0,40	0,57	0,35	0,57	0,54
	klasa oświetlenia w płaszczyźnie pionowej E_v	EV3	EV3	EV3	EV3	EV3	EV2	EV2	EV3	EV3	EV3	EV3	EV3	EV3	EV3	EV3	EV3	EV3	EV3	EV3	EV3
Luminancja	Luminancja obiektu L_O [cd/m^2]	0,78	0,83	0,86	0,27	0,88	2,45	1,97	1,25	1,18	1,38	1,57	1,28	1,69	1,34	1,43	1,31	1,33	1,36	1,27	1,31

Badane parametry		Obiekt numer:																			
		B1	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**B6**	**B7**	**B8**	**B9**	**B10**	**B11**	**B12**	**B13**	**B14**	**B15**	**B16**	**B17**	**B18**	**B19**	**B20**
	Luminancja tła L_T [cd/m^2]	1,07	0,67	0,57	0,77	0,86	2,00	2,15	2,08	2,08	2,08	2,08	1,26	1,66	1,66	1,66	1,05	1,05	1,05	2,16	2,16
	Kontrast sylwetki pieszego z tłem jezdni	-0,13	0,57	0,64	-0,60	0,78	0,22	-0,08	-0,40	-0,43	-0,34	-0,24	0,01	0,02	-0,19	-0,14	0,25	0,27	0,29	-0,41	-0,39
Natężenie ruchu	Natężenie ruchu pieszego [P/h]	38,00	69,00	51,00	26,00	32,00	36,00	31,00	19,00	30,00	18,00	27,00	77,00	40,00	36,00	35,00	54,00	25,00	38,00	27,00	25,00
	Natężenie ruchu kołowego [poj/h]	185,00	465,00	525,00	309,00	390,00	291,00	154,00	153,00	297,00	176,00	163,00	306,00	202,00	179,00	248,00	326,00	178,00	346,00	267,00	225,00
	Stosunek natężenia ruchu pieszego do kołowego	0,21	0,15	0,10	0,08	0,08	0,12	0,20	0,12	0,10	0,10	0,17	0,25	0,20	0,20	0,14	0,17	0,14	0,11	0,10	0,11
Konflikty ruchowe	Liczba konfliktów ruchowych	8	3	3	4	3	7	6	6	7	5	6	6	8	6	8	7	4	4	6	6
	Wskaźnik liczby konfliktów	1,15	0,11	0,11	0,51	0,21	0,62	1,24	2,00	0,73	1,52	1,45	0,27	1,01	0,87	0,88	0,37	0,92	0,31	0,79	1,12
Prędkość pojazdów	Prędkość minimalna v_{min} [km/h]	8,00	8,00	10,00	9,00	8,00	7,00	9,00	8,00	9,00	9,00	10,00	7,00	8,00	9,00	8,00	9,00	10,00	7,00	9,00	9,00
	Prędkość maksymalna v_{max} [km/h]	88,00	67,00	60,00	77,00	75,00	57,00	57,00	62,00	57,00	61,00	56,00	59,00	60,00	58,00	57,00	59,00	63,00	59,00	55,00	61,00
	Prędkość średnia $v_{śr}$ [km/h]	44,4	44	44,6	27,5	46,6	39,6	50,8	39,4	35,9	40,3	41	46	25,5	39,3	36,8	42,9	40,4	38,9	37,9	34,4
	Kwantyl 15 prędkości [km/h]	21,00	29,00	25,00	25,00	24,00	25,00	25,00	27,00	26,00	27,00	26,00	27,00	26,00	25,00	26,00	27,00	27,00	26,00	26,00	26,00
	Kwantyl 85 prędkości [km/h]	36,00	44,00	39,00	36,00	37,00	35,00	37,00	35,00	40,00	39,00	37,00	36,00	36,00	36,00	39,00	37,00	39,00	39,00	36,00	37,00
	Udział pojazdów przekraczających prędkość dopuszczalną [%]	1,00	13,00	3,00	2,00	2,00	9,00	10,00	10,00	9,00	7,00	9,00	8,00	8,00	6,00	10,00	6,00	6,00	9,00	6,00	6,00

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.6. Zestawienie wyników badań dla przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych (typ C)

Badane parametry		Obiekt numer:																			
		C1	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**	**C8**	**C9**	**C10**	**C11**	**C12**	**C13**	**C14**	**C15**	**C16**	**C17**	**C18**	**C19**	**C20**
Natężenie oświetlenia w płaszczyźnie	minimalne poziome natężenie oświetlenia $E_{h\,min}$ [lx]	56,0	39,0	41,0	54,0	56,0	39,9	40,0	51,3	31,6	39,3	29,0	58,4	45,0	54,2	37,9	60,6	34,0	45,0	40,0	38,0
	maksymalne poziome natężenie oświetlenia $E_{h\,max}$ [lx]	238,0	170,0	201,0	208,0	184,0	167,0	225,0	173,4	164,9	139,5	149,0	161,0	202,4	223,2	156,2	190,0	114,0	212,0	178,0	170,0
	średnie poziome natężenie oświetlenia $E_{h\,śr}$ [lx]	138,4	96,5	97,1	117,0	99,0	70,5	93,8	105,6	81,5	66,3	70,4	99,8	65,5	99,7	95,9	78,9	53,9	92,4	95,7	88,4
	równomierność natężenia oświetlenia ($E_{h\,min}/E_{h\,śr}$)	0,40	0,40	0,42	0,46	0,57	0,44	0,43	0,49	0,41	0,43	0,48	0,59	0,43	0,54	0,40	0,43	0,42	0,42	0,42	0,44
	parametr $E_{h\,min}/E_{h\,max}$	0,24	0,23	0,20	0,26	0,30	0,24	0,18	0,30	0,19	0,28	0,19	0,36	0,22	0,24	0,24	0,32	0,30	0,21	0,22	0,22
	klasa oświetlenia w płaszczyźnie poziomej E_h	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0	C0
Natężenie oświetlenia w płaszczyźnie	minimalne pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\,min}$ [lx]	22,0	13,5	10,5	12,0	11,0	8,0	8,0	17,5	7,3	7,5	8,0	29,0	7,6	20,0	19,2	19,5	18,0	21,3	23,6	16,5
	maksymalne pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\,max}$ [lx]	133,0	84,0	94,5	109,5	79,0	87,2	93,0	84,6	97,9	56,6	85,5	69,3	76,4	94,8	87,0	76,5	77,5	113,0	100,0	97,0
	średnie pionowe natężenie oświetlenia $E_{v\,śr}$ [lx]	77,7	49,3	45,8	61,7	45,6	42,1	39,8	55,5	51,1	34,8	41,5	47,3	39,0	50,7	55,0	54,5	46,4	55,4	58,1	54,8
	równomierność natężenia oświetlenia ($E_{v\,min}/E_{v\,śr}$)	0,27	0,27	0,23	0,19	0,24	0,12	0,19	0,32	0,33	0,31	0,30	0,61	0,19	0,35	0,32	0,62	0,41	0,38	0,38	0,30
	parametr $E_{v\,min}/E_{v\,max}$	0,16	0,16	0,11	0,10	0,13	0,09	0,08	0,21	0,07	0,13	0,09	0,42	0,10	0,21	0,22	0,44	0,23	0,19	0,24	0,17
	klasa oświetlenia w płaszczyźnie pionowej E_v	EV1	EV2	EV2	EV1	EV2	EV2	EV2	EV1	EV1	EV2	EV2	EV2	EV2	EV1	EV1	EV6	EV2	EV1	EV1	EV1
Luminancja	Luminancja obiektu L_O [cd/m2]	3,42	2,01	2,20	1,73	1,96	2,47	2,39	3,60	3,26	3,71	2,64	3,01	2,48	2,43	3,50	2,83	2,95	3,53	3,70	3,49
	Luminancja tła L_T [cd/m^2]	1,07	0,53	0,60	0,55	0,72	0,79	0,86	1,35	1,17	1,16	0,71	0,98	0,89	0,82	1,12	1,04	0,95	1,27	1,37	1,17

	Badane parametry	Obiekt numer:																			
		C1	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**	**C7**	**C8**	**C9**	**C10**	**C11**	**C12**	**C13**	**C14**	**C15**	**C16**	**C17**	**C18**	**C19**	**C20**
	Kontrast sylwetki pieszego z tłem jezdni	2,20	2,79	2,67	2,15	1,72	2,13	1,78	1,67	1,78	2,20	2,72	2,07	1,79	1,96	2,12	1,72	2,11	1,78	1,70	1,98
Natężenie ruchu	Natężenie ruchu pieszego [P/h]	33	86	58	46	75	69	32	59	30	58	62	16	37	31	66	91	28	34	32	84
	Natężenie ruchu kołowego [poj/h]	201	275	288	307	360	435	170	296	273	348	185	161	220	245	330	272	166	170	225	334
	Stosunek natężenia ruchu pieszego do kołowego	0,16	0,31	0,20	0,15	0,21	0,16	0,19	0,20	0,11	0,17	0,34	0,10	0,17	0,13	0,20	0,33	0,17	0,20	0,14	0,25
Konflikty	Liczba konfliktów ruchowych	4	4	3	2	2	3	0	1	5	3	5	2	4	3	1	5	1	3	2	5
	Wskaźnik liczby konfliktów	0,54	0,19	0,18	0,13	0,09	0,10	0,06	0,05	0,62	0,16	0,45	0,78	0,48	0,33	0,06	0,18	0,11	0,50	0,26	0,19
Prędkość pojazdów	Prędkość minimalna v_{min} [km/h]	11,00	8,00	9,00	9,00	10,00	8,00	12,00	7,00	7,00	9,00	9,00	7,00	9,00	8,00	9,00	10,00	8,00	8,00	8,00	8,00
	Prędkość maksymalna v_{max} [km/h]	67,00	62,00	74,00	72,00	70,00	85,00	88,00	59,00	59,00	63,00	57,00	60,00	62,00	58,00	58,00	58,00	58,00	65,00	61,00	62,00
	Prędkość średnia $v_{śr}$ [km/h]	45,0	52,9	40,4	59,3	56,8	48,0	56,1	57,1	56,1	44,3	62,6	42,8	62,4	61,4	58,7	51,8	50,6	62,1	43,1	53,8
	Kwantyl 15 prędkości [km/h]	28,00	28,00	22,00	28,00	30,00	36,00	31,00	25,00	26,00	25,00	26,00	27,00	25,00	27,00	27,00	26,00	25,00	27,00	26,00	27,00
	Kwantyl 85 prędkości [km/h]	40,00	43,00	38,00	39,00	43,00	50,50	45,00	36,00	37,00	38,00	38,00	36,00	37,00	37,00	36,00	37,00	38,00	39,00	40,00	36,00
	Udział pojazdów przekraczających prędkość dopuszczalną [%]	3,00	5,70	0,76	0,89	1,70	14,00	7,80	6,00	9,00	6,00	8,00	7,00	9,00	9,00	6,00	8,00	6,00	7,00	8,00	6,00

Źródło: opracowanie własne

Do oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych stosowanych na przejściach dla pieszych wykorzystane zostaną następujące parametry: natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej, kontrast sylwetki pieszego z tłem, prędkość pojazdów, wskaźnik liczby konfliktów ruchowych. W celu zbadania zależności pomiędzy ww. parametrami przeprowadzono analizę korelacji za pomocą współczynnika korelacji r Pearsona. W celu obliczenia współczynnika korelacji posłużono się poniższym wzorem [57]:

$$r_{xy} = \frac{\sum(X_i-\bar{X})\cdot(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i-\bar{X})^2\cdot\sum(Y_i-\bar{Y})^2}} = \frac{\frac{1}{n}\sum X_iY_i-\bar{X}\bar{Y}}{\sigma_X\cdot\sigma_Y} = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X\cdot\sigma_Y} \tag{4.3}$$

gdzie:

r_{xy} – współczynnik korelacji r Pearsona,

X_i, Y_i – i-te wartości obserwacji z populacji X i Y,

$\bar{X}, \bar{Y}$ – średnie z populacji X i Y,

σ_X, σ_Y – odchylenie standardowe populacji X i Y,

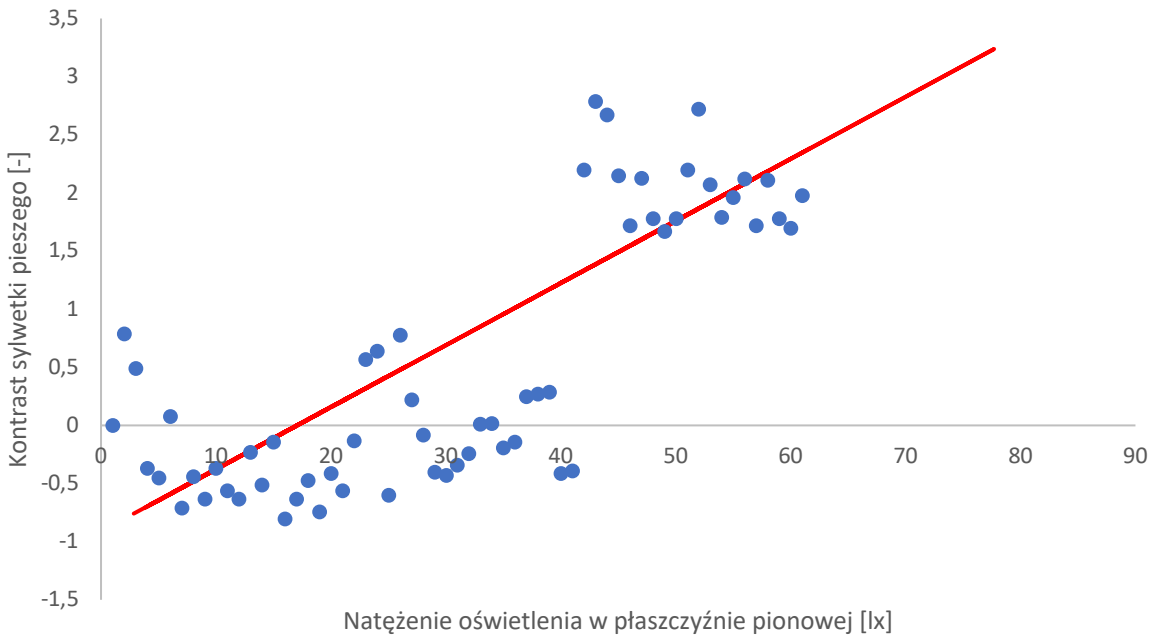
n – liczba obserwacji.

Analizie poddano zależności pomiędzy wyżej wymienionymi parametrami. Wskaźnik korelacji obliczono na podstawie wyników badań przeprowadzonych na 60 przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą różnych typów oświetlenia. W tabeli 4.7. przedstawiono wartości współczynnika korelacji dla danych relacji oraz ich interpretację. Na rysunkach 4.12. – 4.17. przedstawiono wykresy rozrzutu danych dla analizowanych przypadków.

Tabela 4.7. Zestawienie wartości współczynnika korelacji dla danych relacji wraz z ich interpretacją

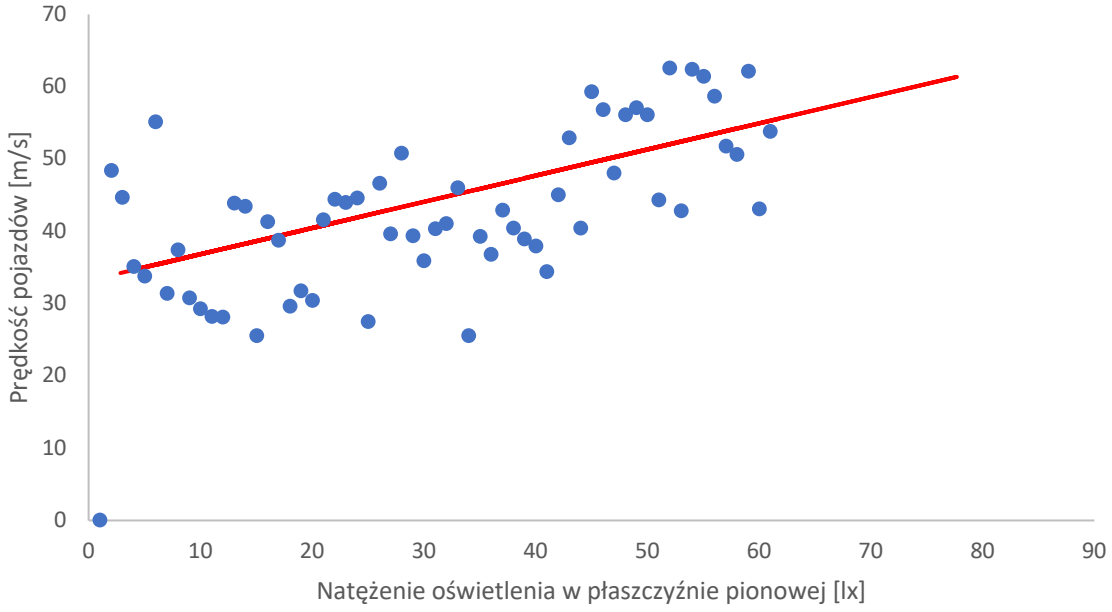
Lp.	Opis analizowanej zależności	Wartość współczynnika korelacji r Pearsona	Uproszczona interpretacja wyników
1.	natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej - kontrast sylwetki pieszego na tle jezdni	0,85	korelacja bardzo silna
2.	natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej - liczba konfliktów ruchowych	-0,56	korelacja silna
3.	natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej - prędkość średnia pojazdów	0,66	korelacja silna
4.	kontrast sylwetki pieszego na tle jezdni – prędkość średnia pojazdów	0,75	korelacja bardzo silna
5.	kontrast sylwetki pieszego na tle jezdni – liczba konfliktów ruchowych	-0,68	korelacja silna
6.	prędkość średnia pojazdów - liczba konfliktów ruchowych	-0,55	korelacja silna

Źródło: opracowanie własne



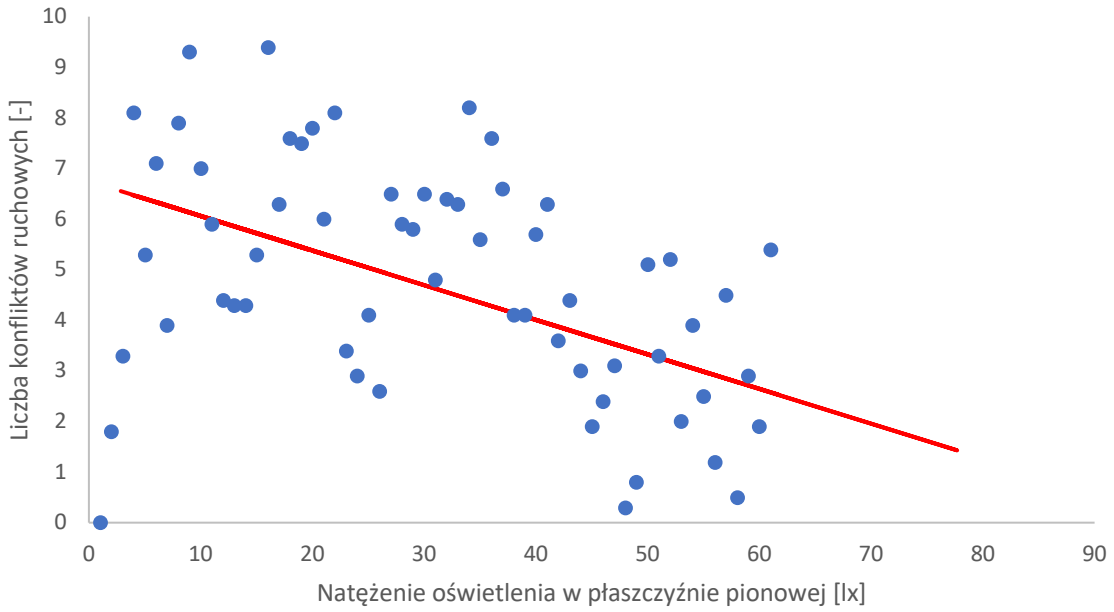
Rys. 4.12. Wykres rozrzutu danych pomiędzy natężeniem oświetlenia w płaszczyźnie pionowej a kontrastem sylwetki pieszego

Źródło: opracowanie własne



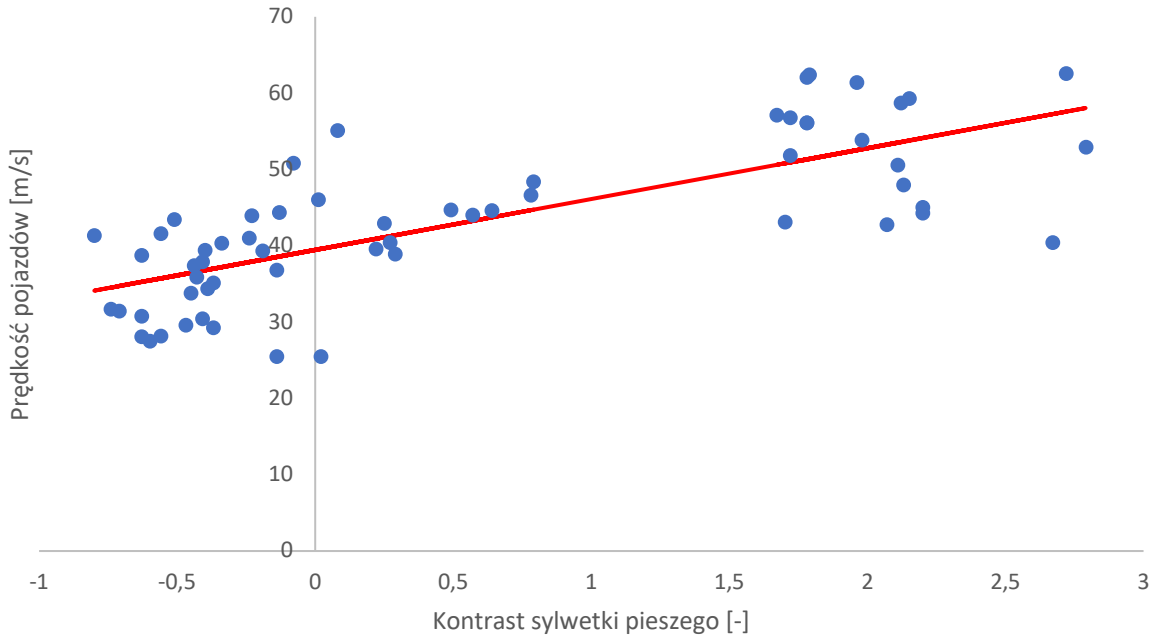
Rys. 4.13. Wykres rozrzutu danych pomiędzy natężeniem oświetlenia w płaszczyźnie pionowej a prędkością pojazdów

Źródło: opracowanie własne



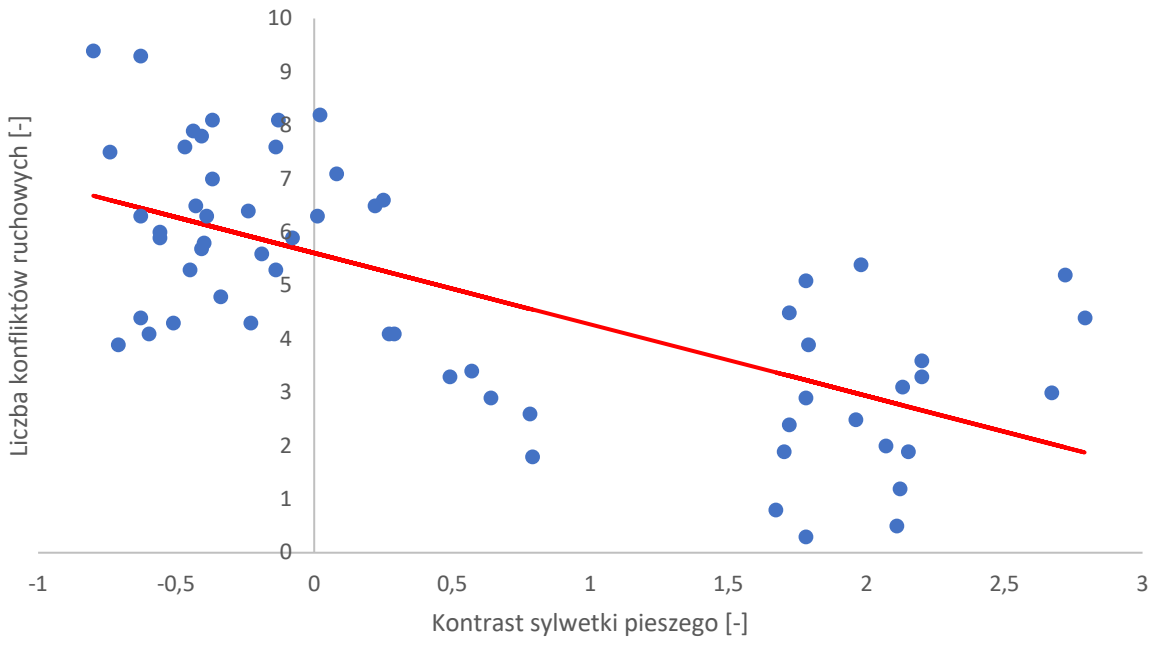
Rys. 4.14. Wykres rozrzutu danych pomiędzy natężeniem oświetlenia w płaszczyźnie pionowej a liczbą konfliktów ruchowych

Źródło: opracowanie własne



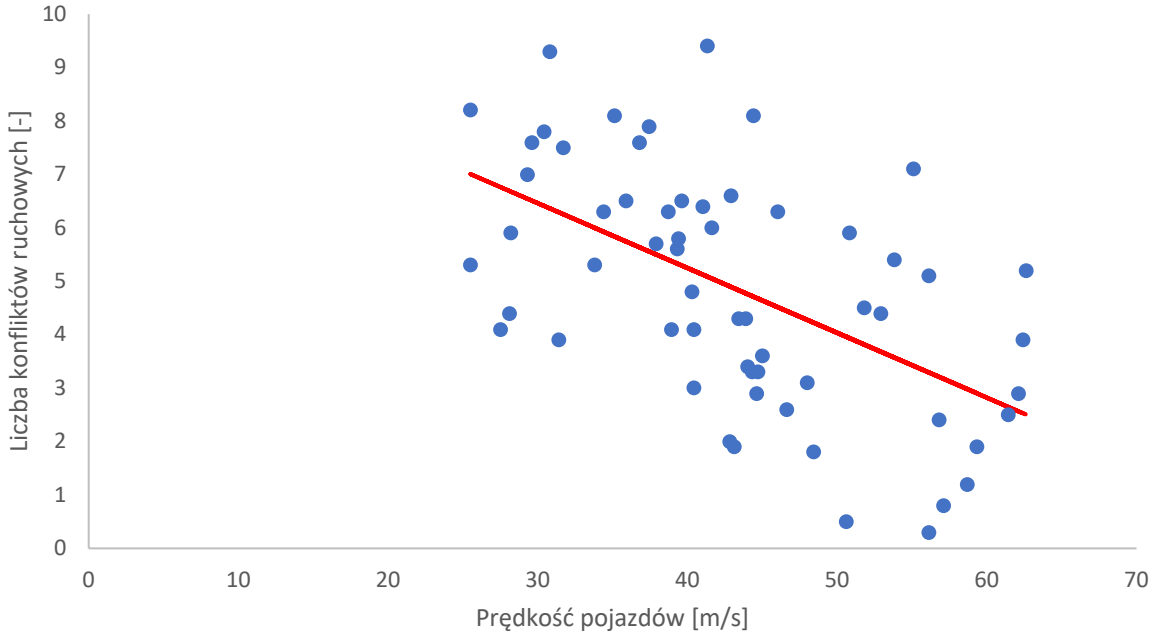
Rys. 4.15. Wykres rozrzutu danych pomiędzy kontrastem sylwetki pieszego a prędkością pojazdów

Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.16. Wykres rozrzutu danych pomiędzy kontrastem sylwetki pieszego a prędkością pojazdów

Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.17. Wykres rozrzutu danych pomiędzy prędkością pojazdów a liczbą konfliktów ruchowych

Źródło: opracowanie własne

Powyższe wyniki wskazują na silne zależności między parametrami wytypowanymi do oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych. Dla natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej oraz kontrastu sylwetki pieszego z tłem występuje bardzo silna korelacja dodatnia. Oznacza to, że wraz ze wzrostem natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej wzrasta kontrast sylwetki pieszego z tłem. W przypadku zależności pomiędzy natężeniem oświetlenia a liczbą konfliktów ruchowych oraz kontrastem a liczbą konfliktów ruchowych, odnotowano silną korelację ujemną – tzn., że wraz z poprawą warunków oświetleniowych spada liczba konfliktów ruchowych. Należy jednak zwrócić uwagę na zależność pomiędzy parametrami oświetleniowymi a prędkością pojazdów, w obydwu przypadkach wystąpiła silna korelacja dodatnia co oznacza, że poprawa warunków oświetleniowych wpływa na wzrost prędkości pojazdów.

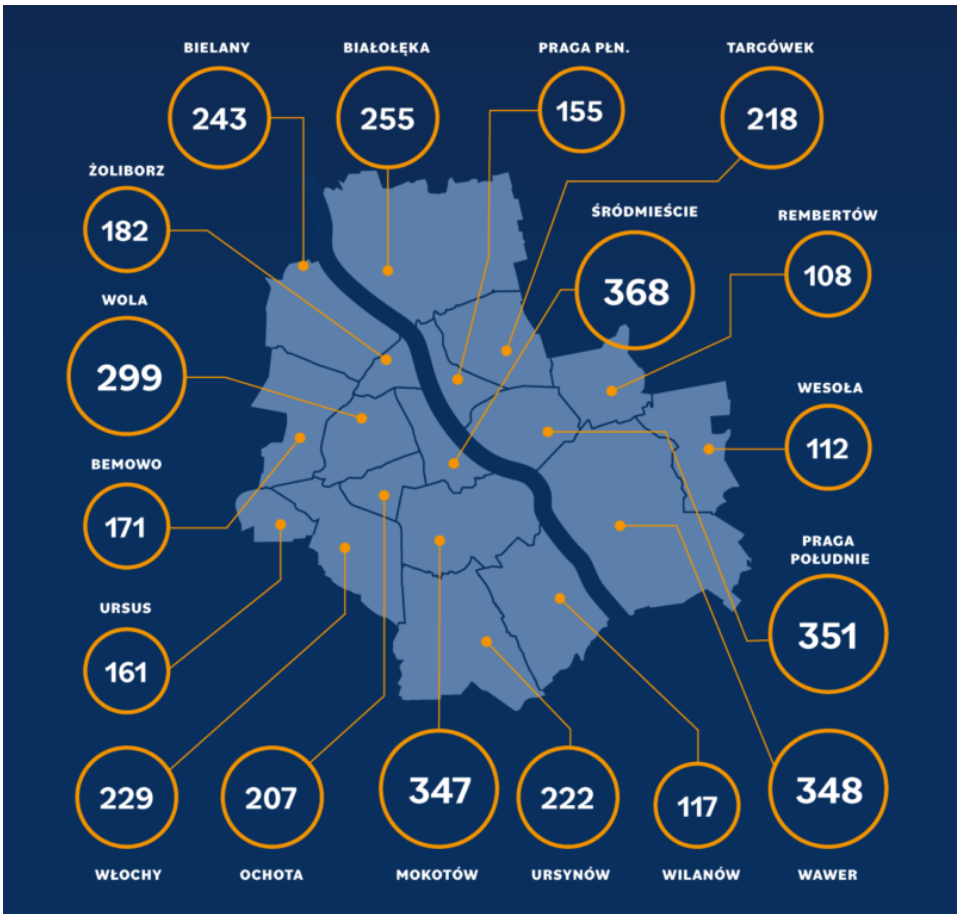
Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- przejścia dla pieszych oświetlone za pomocą opraw dedykowanych charakteryzują się dużo wyższymi wartościami natężenia oświetlenia, w płaszczyźnie poziomej i pionowej w stosunku do opraw oświetlenia ulicznego;
- w przypadku opraw oświetlenia ulicznego występują bardzo niskie wartości natężenia oświetlenia w obu płaszczyznach, (w szczególności w płaszczyźnie pionowej), co przekłada się na uzyskanie niskich klas oświetleniowych w rejonie przejść dla pieszych;
- przejścia dla pieszych oświetlone za pomocą opraw dedykowanych charakteryzują się wysokim kontrastem dodatnim;
- przejścia dla pieszych oświetlone za pomocą opraw ulicznych, zarówno pojedynczych jak i podwójnych zlokalizowanych na wysięgniku, charakteryzują się niskim kontrastem dodatnim lub kontrastem ujemnym;
- badania liczby konfliktów ruchowych wykazały, że na przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych odnotowano mniej konfliktów między pieszymi a pojazdami niż w pozostałych lokalizacjach;
- na przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw ulicznych większość konfliktów dotyczyła nieustąpienia pierwszeństwa pieszemu zbliżającemu się do przejścia;
- przeprowadzone pomiary prędkości wykazały, że na przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych odnotowano wyższe wartości prędkości średnich.

Otrzymane wyniki zostaną wykorzystane do zdefiniowania zasad oraz określenia zakresów zmienności poszczególnych parametrów oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych.

4.3. Analiza wyników inspekcji stanu oświetlenia przejść dla pieszych realizowanego przez Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie

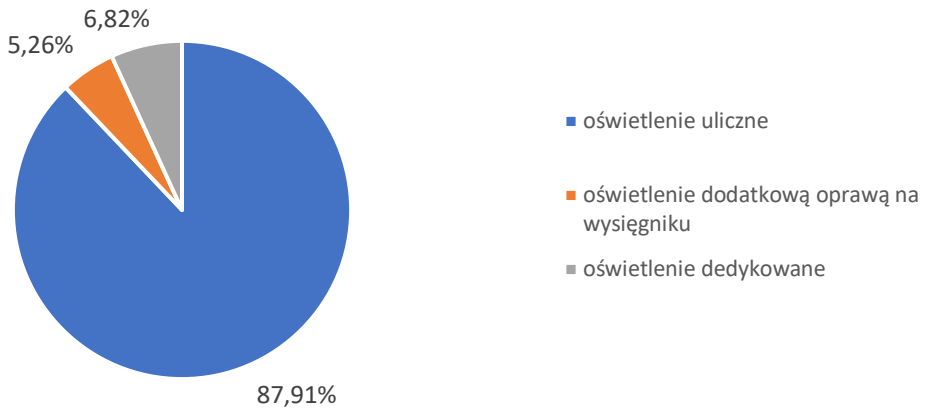
Zaproponowana metoda oceny opiera się na analizie parametrów oświetleniowych w kontekście bezpieczeństwa ruchu drogowego. W celu analizy rozkładu kontrastu luminancji na przejściach dla pieszych oraz określenia przedziałów zmienności dla tego parametru przeanalizowano wyniki audytu bezpieczeństwa ruchu drogowego, przeprowadzonego przez Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie w latach 2017 – 2020 dla ponad 4000 przejść dla pieszych niesterowanych sygnalizacją świetlną (rys. 4.18.) [7]. Badaniom poddano parametry związane zarówno z geometrią drogi, organizacją ruchu jak i oświetleniem ulicznym.



Rys. 4.18. Liczba audytowanych przejść dla pieszych na drogach zarządzanych przez Zarząd Dróg Miejskich

Źródło: opracowano na podstawie [7]

Warto zauważyć, że był to pierwszy w Polsce audyt bezpieczeństwa ruchu drogowego na przejściach dla pieszych uwzględniający kompleksowe badanie parametrów oświetleniowych. Do oceny stanu oświetlenia zastosowano procedurę opisaną w pracach [110, 111, 113] oraz omówioną w rozdziale 1.2.2. Ocenie poddano natężenie oświetlenia w płaszczyźnie poziomej i w płaszczyźnie pionowej. W efekcie otrzymano m.in. średnie natężenie oświetlenia oraz klasę oświetleniową w zależności od rodzaju drogi, przekroju, liczby pasów ruchu itp. Na rysunku 4.19. przedstawiono procentowy udział przejść dla pieszych z określonym systemem oświetleniowym. Przeprowadzona inspekcja stanu oświetlenia wykazała, że najwięcej przejść dla pieszych w Warszawie oświetlonych jest za pomocą oświetlenia ulicznego.

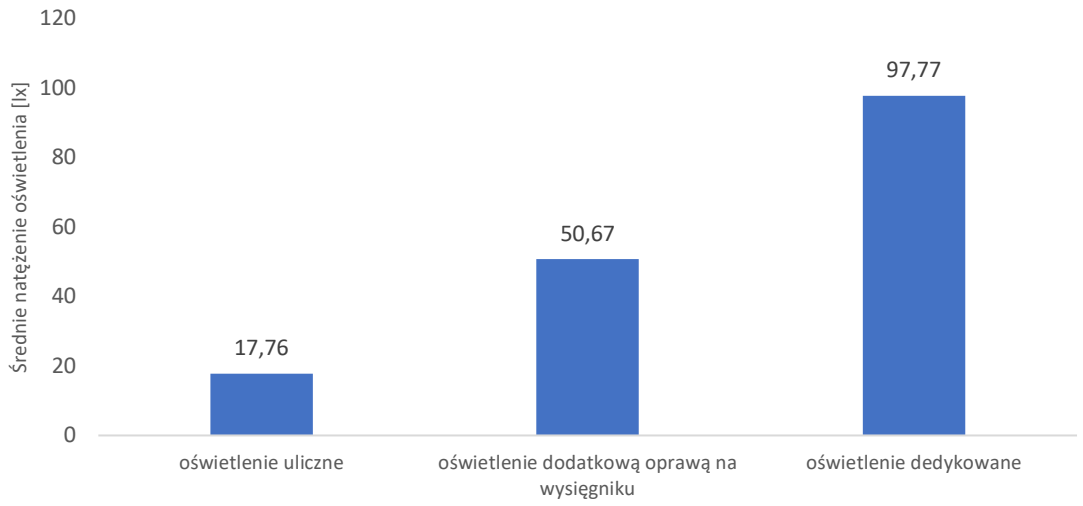


Rys. 4.19. Procentowy udział liczby przejść dla pieszych w zależności od zastosowanego typu oświetlenia

Źródło: opracowanie własne na podstawie [7]

Poniżej przedstawiono podstawowe statystyki dotyczące pomiarów natężenia oświetlenia w zależności od dzielnicy, kategorii drogi, przekroju oraz rodzaju oświetlenia. W pierwszej kolejności analizie poddano wyniki pomiarów natężenia oświetlenia w płaszczyźnie poziomej. Na rysunku 4.20. przedstawiono średnie natężenie oświetlenia w zależności od zastosowanego rozwiązania oświetleniowego.

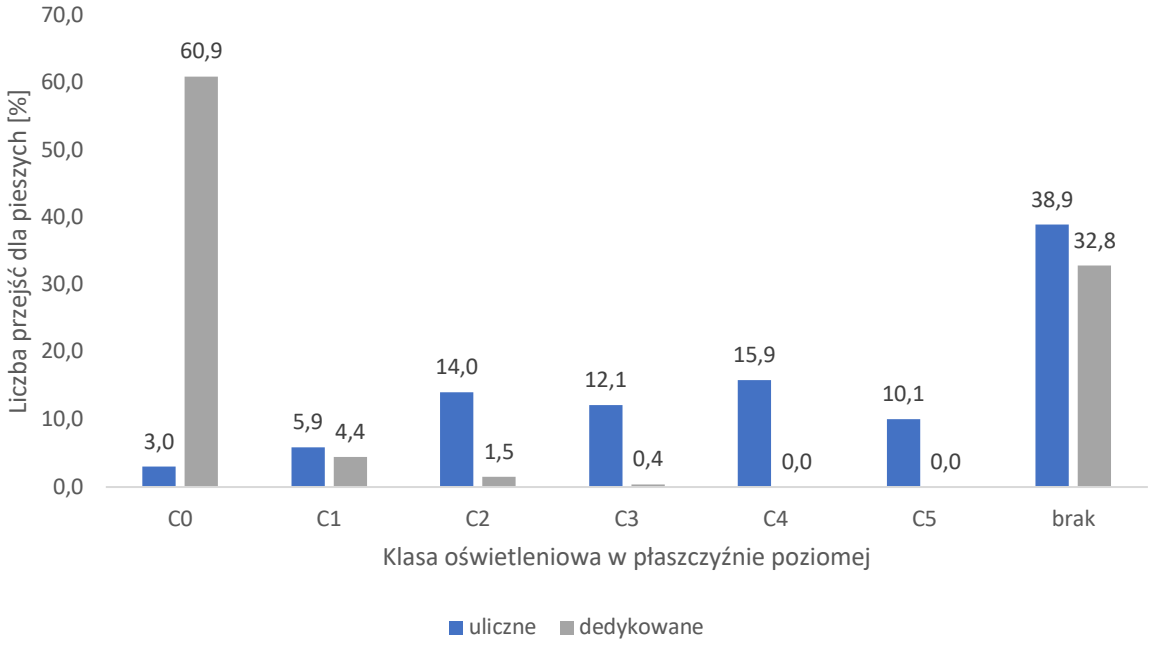
Jak wynika z poniższego wykresu najniższą wartość średniego natężenia oświetlenia na przejściu dla pieszych otrzymano w przypadku przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą oświetlenia ulicznego (17,76 lx). Analiza wyników pomiarów wykazała, że dla 25% przebadanych przejść dla pieszych odnotowano wartości natężenia oświetlenia w płaszczyźnie poziomej niższe niż 8,38 [lx], dla 50% - 15,68 [lx], natomiast dla 75% - 27,99 [lx]. Analiza otrzymanych wyników wskazuje, że najwyższe wartości natężenia oświetlenia w płaszczyźnie poziomej przejścia dla pieszych otrzymuje się przy stosowaniu opraw dedykowanych. Przejścia te uzyskiwały zazwyczaj wartość średnią natężenia oświetlenia powyżej 40 lx.



Rys. 4.20. Średnie natężenie oświetlenia w płaszczyźnie poziomej w zależności zastosowanego rodzaju oświetlenia

Źródło: opracowanie własne na podstawi [7]

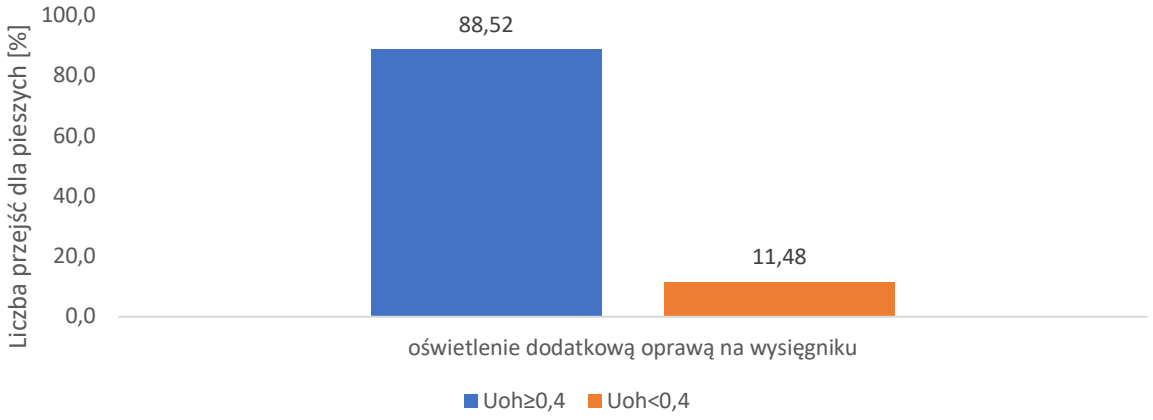
Powyższe wyniki przekładają się na liczbę przejść dla pieszych w danych klasach oświetleniowych w zależności od rodzaju oświetlenia. Na rysunku 4.21. przedstawiono procentowy rozkład liczby przejść dla pieszych w poszczególnych klasach oświetleniowych w zależności od zastosowanego oświetlenia.



Rys. 4.21. Procentowy rozkład liczby przejść dla pieszych w poszczególnych klasach oświetleniowych w zależności od zastosowanego oświetlenia

Źródło: opracowanie własne na podstawie [7]

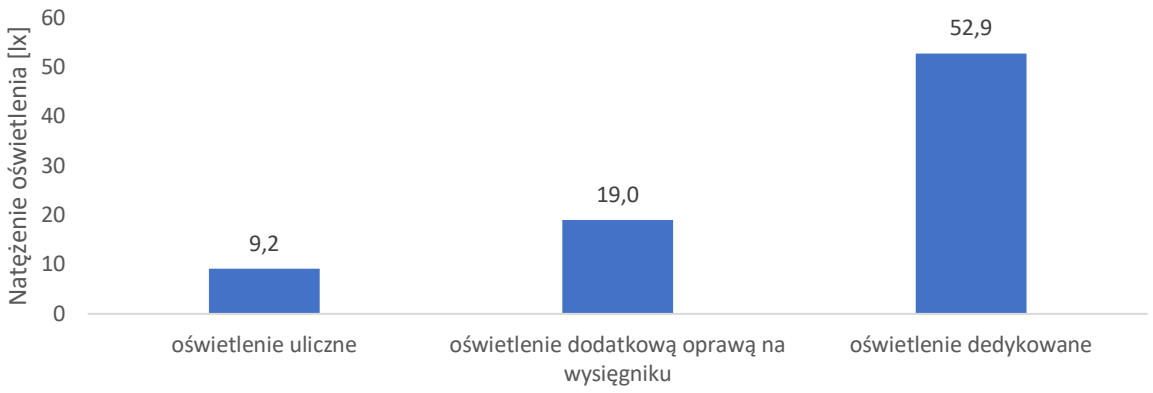
Jak wynika z analizy danych otrzymanych od Zarządu Dróg Miejskich największa liczba przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw ulicznych nie spełnia wymogów najniższej klasy oświetleniowej w odniesieniu do płaszczyzny pionowej (38,9%). Ta grupa przejść dla pieszych najczęściej występuje w klasach oświetleniowych płaszczyzny poziomej C2, C3, C4. Prawidłowe warunki oświetlenia z punktu widzenia parametru natężenia oświetlenia osiągają przejścia dla pieszych oświetlone za pomocą dwóch opraw zamontowanych na wysięgnikach. W większości przypadków przejścia te są oświetlone w klasach najwyższych, tj. C0 i C1. W przypadku opraw dedykowanych większość przejść dla pieszych uzyskała klasę C0, natomiast uwagę zwraca procent przejść dla pieszych, dla których nie odnotowano nawet najniższej klasy oświetleniowej. Powyższa sytuacja, w dużej liczbie przypadków wynika z nierównomierności rozkładu oświetlenia na przejściu dla pieszych (rys. 4.22.). Z uwagi na precyzyjnie dystrybuowaną wiązkę światła, ważnym elementem instalacji opraw dedykowanych jest ich prawidłowe usytuowanie względem płaszczyzn przejścia dla pieszych.



Rys. 4.22. Procentowy rozkład liczby przejść dla pieszych w zależności od równomierności rozkładu oświetlenia

Źródło: opracowanie własne na podstawie [7]

Dane przedstawione na powyższym wykresie potwierdzają, że głównym problemem skutkującym brakiem zapewnienia klasy oświetleniowej na przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw typu B i C jest brak równomierność rozkładu oświetlenia. W przypadku przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą dodatkowych opraw ulicznych na wysięgniku odnotowano 11,48% przypadków, gdzie równomierności oświetlenia wynosiła mniej niż 0,4. Nierównomierność oświetlenia stanowi duży problem na przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych (27% obiektów). Z tego wynika, że dla ok. 5% przejść dla pieszych brak klasy oświetleniowej odnotowano tylko z powodu niskich wartości średniego natężenia oświetlenia (poniżej 7,5 lx).

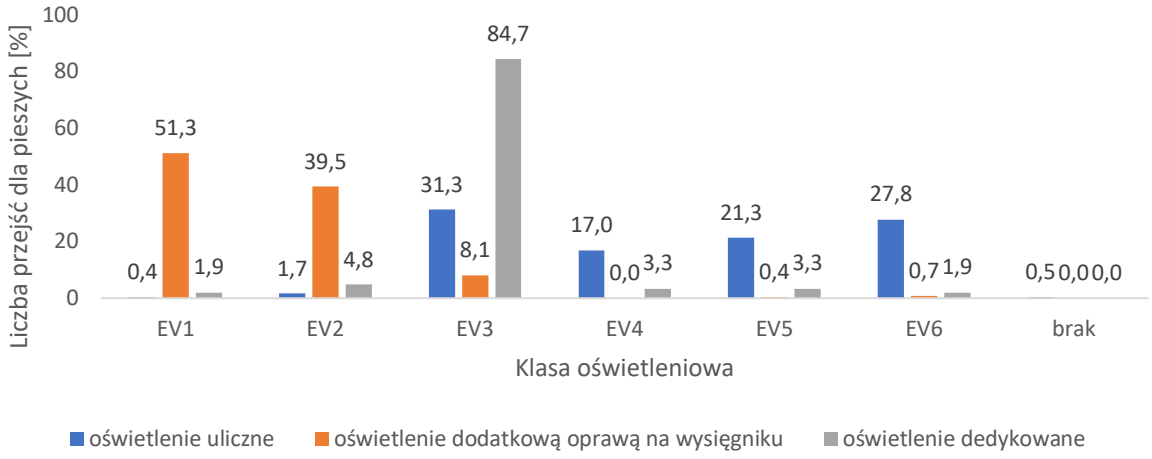


Rys. 4.23. Średnie natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej w zależności od zastosowanego rodzaju oświetlenia

Źródło: opracowanie własne na podstawie [7]

W przypadku oświetlenia w płaszczyźnie pionowej najwyższą wartość średnią otrzymano dla przejść oświetlonych oprawami dedykowanymi – 52,9 lx (rys. 4.23.). Najniższe wartości odnotowano w przypadku przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw ulicznych. Dla 3 przypadków odnotowano wartości minimalne, równe 0 lx, dla 25% przejść dla pieszych otrzymano wartość poniżej 4,17 lx, dla 50% - poniżej 7,7 lx, natomiast dla 75% wartości poniżej 13,87%. Wartość maksymalna średniego natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej wyniosła 150,9 lx.

Podobnie jak w przypadku płaszczyzny poziomej powyższe wyniki są odzwierciedleniem rozkładu liczby przejść dla pieszych w poszczególnych klasach oświetleniowych, co przedstawiono na rysunku 4.24.



Rys. 4.24. Procentowy rozkład liczby przejść dla pieszych w poszczególnych klasach oświetleniowych w zależności od zastosowanego typu oświetlenia

Źródło: opracowanie własne na podstawie [7]

Jak pokazano na powyższym wykresie przejścia dla pieszych oświetlone tylko oprawami ulicznymi najczęściej występowały w klasach EV3, EV6 oraz EV5. W przypadku przejść dla pieszych oświetlonych oprawami dedykowanymi w 85% przypadków otrzymano klasę oświetleniową EV3. Najwyższą klasę oświetleniową EV1 oraz EV2 odnotowano w przypadku przejść, na których zastosowano dodatkowe oprawy uliczne na wysięgniku.

Każde z skontrolowanych przejść dla pieszych poddano końcowej ocenie. W tabeli 4.8. przedstawiono najczęściej występujące oceny subiektywne, obiektywne i końcowe w zależności od rodzaju zastosowanego oświetlenia.

Tabela 4.8. Najczęściej występujące oceny w zależności od rodzaju przejścia dla pieszych

Sposób oświetlenia	Ocena subiektywna	Ocena obiektywna	Ocena końcowa
Oświetlenie uliczne	2	3	3
Oświetlenie dodatkowymi oprawami na wysięgniku	3	4	4
Oświetlenie dedykowane	4	5	4

Źródło: opracowanie własne na podstawie [7]

Oceny te są analogiczne do wyżej przedstawionych wyników badań – w ogólnej ocenie najlepiej wypadają przejścia dla pieszych oświetlone oprawami dedykowanymi, następnie za pomocą dwóch opraw zlokalizowanych na wysięgniku, a na końcu oprawy oświetlenia ulicznego.

Na podstawie otrzymanych wyników obliczono wartości luminancji sylwetki pieszego oraz luminancji jezdni, a następnie kontrast sylwetki pieszego na tle jezdni. Analizy kontrastu i luminancji przeprowadzono dla przejść dla pieszych zlokalizowanych na drogach dwukierunkowych o dwóch pasach ruchu.

Do obliczenia luminancji tła (jezdni) wykorzystano wartość wyznaczonego współczynnika luminancji oraz wartości natężenia oświetlenia w płaszczyźnie poziomej. Wartość luminancji średniej jezdni wyznaczono ze wzoru [137]:

$$L_{śr} = E_{hśr} \cdot q \tag{4.4}$$

gdzie:

$L_{śr}$ – luminancja średnia jezdni [cd/m^2]

$E_{hśr}$ – natężenie oświetlenia w płaszczyźnie poziomej [lx],

q – współczynnik luminancji [sr^{-1}]

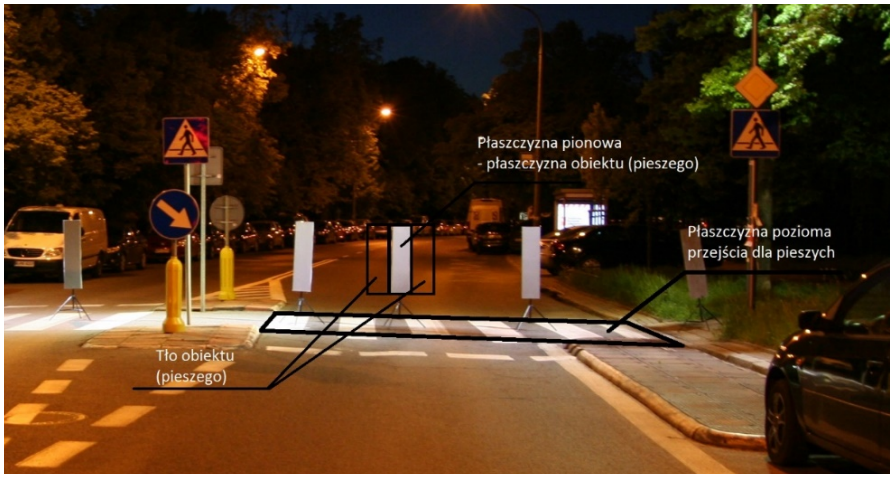
W ramach analizy przyjęto wartość stałą współczynnika luminancji obliczoną na podstawie przeprowadzonych pomiarów natężenia oświetlenia oraz luminancji dla wybranych obiektów opisanych w tabeli 4.1. Współczynnik luminancji obliczono wg wzoru 4.3. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 4.9.

Tabela 4.9. Obliczenie współczynnika luminancji

Typ / przejście	**Natężenie oświetlenia na jezdni $E_{hśr}$ [lx]**	**Luminancja jezdni [cd/m^2]**	**Współczynnik luminancji** [sr^{-1}]
A1	12,45	0,97	0,08
A2	19,25	1,39	0,07
B1	43,20	1,79	0,04
B2	29,50	2,41	0,08
B3	40,35	2,03	0,05
B4	50,90	2,34	0,05
B5	60,40	2,47	0,04
C1	47,60	1,77	0,04
C2	28,45	2,20	0,08
C3	24,80	1,82	0,07
C4	34,85	2,54	0,07
C5	25,90	1,44	0,06
C6	13,75	0,97	0,07
C7	12,70	1,71	0,13
Wartość średnia współczynnika luminancji:			**0,07**

Źródło: opracowanie własne

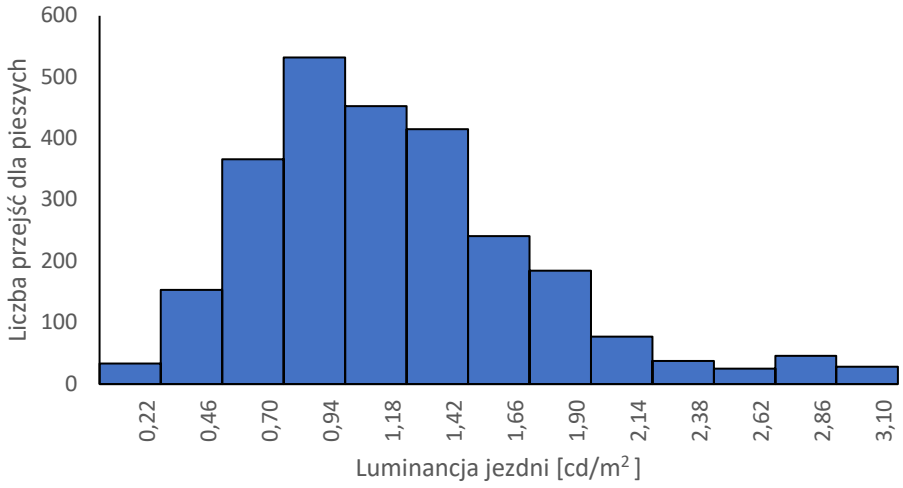
Przeprowadzone obserwacje oraz analizy wskazały, że tło jezdni dla obserwacji pieszego jest powierzchnią ulicy w znacznej odległości od przejścia dla pieszych. Tło jezdni w stosunku do sylwetki pieszego przedstawiono na rysunku 4.25.



Rys. 4.25. Lokalizacja tła sylwetki pieszego względem płaszczyzny pionowej oraz poziomej na przejściu dla pieszych

Źródło: opracowanie własne

W związku z powyższym stwierdzono, że wyniki pomiarów natężenia oświetlenia w płaszczyźnie poziomej dla przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą dodatkowych opraw na wysięgniku lub opraw dedykowanych zaburzają wyniki pomiarów luminancji powierzchni jezdni. Do dalszej analizy przyjęto, dla każdej z ulic, średnie natężenie oświetlenia w płaszczyźnie poziomej obliczone na podstawie wyników otrzymanych dla przejść dla pieszych, zlokalizowanych na danej ulicy, oświetlonych za pomocą opraw ulicznych. Przejścia dla pieszych zlokalizowane na ulicach, na których luminancja jezdni wyniosła więcej niż 3 cd/m^2 uznano jako wyniki niepewne i nie były one brane do dalszych analiz. Wartość luminancji powyżej 2 cd/m^2 odpowiada najwyższej klasie oświetlenia ulicznego. Na podstawie obserwacji oraz oceny subiektywnej stwierdzono, że osiągnięcie luminancji jezdni powyżej 3 cd/m^2 jest mało prawdopodobne na badanym przekroju i typie ulic, a otrzymane pomiary mogą być efektem zaburzeń podczas pomiarów spowodowanych przez nadjeżdżające pojazdy, lokalizację reklam świetlnych, sygnalizacji świetlnej lub wiat przystankowych. Na rysunku 4.26. przedstawiono rozkład luminancji jezdni na przejściach dla pieszych w Warszawie.



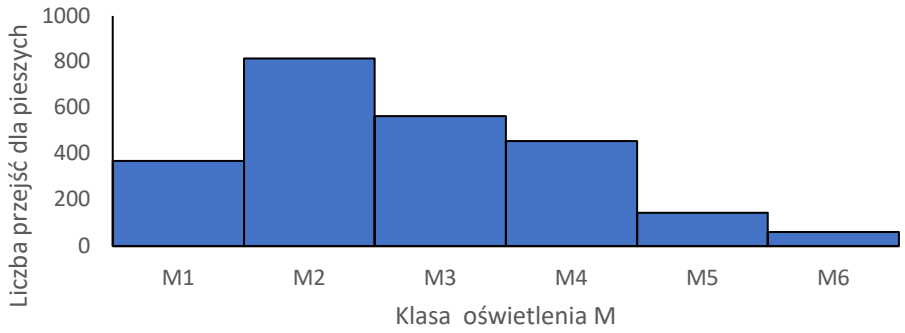
Rys. 4.26. Rozkład luminancji jezdni na przejściach dla pieszych w Warszawie
Źródło: opracowanie własne

Znajomość luminancji jezdni umożliwia dokonanie oceny jakości oświetlenia na podstawie klasy luminancyjnej [66, 86]. W tabeli 4.10. przedstawiono minimalne wartości luminancji dla klasy oświetleniowej M. Na rysunku 4.27. przedstawiono rozkład luminancji jezdni w poszczególnych klasach oświetlenia M.

Tabela 4.10. Minimalne wartości luminancji przy zastosowaniu klasy oświetleniowej M.

Poziom oświetlenia w klasie M	Luminancja średnia nawierzchni jezdni $L_{śr}$ [cd/m^2]
M1	2,00
M2	1,50
M3	1,00
M4	0,75
M5	0,50
M6	0,30

Źródło: opracowano na podstawie: [66, 86]



Rys. 4.27. Rozkład luminancji jezdni na przejściach dla pieszych w Warszawie w poszczególnych klasach oświetlenia M

Źródło: opracowanie własne

Średnia luminancja jezdni dla ulic zlokalizowanych na terenie m.st. Warszawa wynosi 1,13 cd/m^2. Minimalną luminancję jezdni obliczono dla ulic Sęczkowej (Wawer) oraz Gniewkowskiej (Wola). Wyniosła ona 0,02 cd/m^2. Oznacza to, że przejścia dla pieszych zlokalizowane w ciągu tych ulic nie zostały zakwalifikowane do żadnej klasy oświetleniowej M. Dla pomiarów przeprowadzonych na tych ulicach nie odnotowano również klasy C dla oświetlenia w płaszczyźnie poziomej. Maksymalna wartość luminancji wyniosła 2,97 cd/m^2 dla ul. Wąwozowej (Ursynów). Wartość ta odpowiada klasie oświetlenia M1. Zgodnie z wytycznymi [22] dla przejść dla pieszych zlokalizowanych na jezdniach oświetlonych w klasie M1 nie ma potrzeby stosowania dodatkowego oświetlenia. W celu osiągnięcia kontrastu dodatniego oprawy te wymagałyby zastosowania opraw o dużej mocy. Spośród analizowanych przypadków 15,3% ogółu przejść dla pieszych znajduje się w tej klasie oświetleniowej. Należy zwrócić uwagę, że 16,5% przejść dla pieszych w klasie M1 jest oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych. W pozostałych klasach oświetlenia, przejścia oświetlone za pomocą opraw dedykowanych stanowią: w klasie M6 – 9,8%, M5 – 1,4%, M4 – 4,6%, M3 – 3,7%, M2 – 6,5%.

Z powyższego wynika, że w pierwszej kolejności doświetlane są przejścia dla pieszych na ulicach o wyższych klasach oświetleniowych. Należy jednak zwrócić uwagę, że „Wytyczne prawidłowego oświetlenia przejść dla pieszych" [66] wprowadzone zostały do użytku w połowie 2018 roku, wcześniej nie było sprecyzowanych standardów dotyczących stosowania oświetlenia dedykowanego na przejściach dla pieszych w Polsce.

Na podstawie wyników pomiarów natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej wyznaczono luminancję obiektu, zakładając Lambertowski (lub najbardziej zbliżony do niego) charakter odbicia ubrania, w które ubrany jest pieszy Luminancję sylwetki pieszego obliczono wg wzoru [137]:

$$L_O = \frac{\rho E_v}{\pi} \tag{4.5}$$

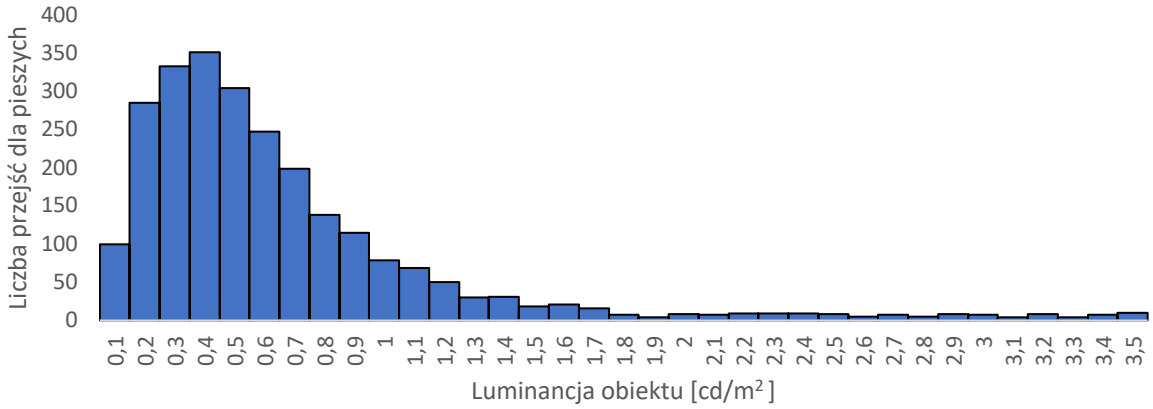
gdzie:

L_O – luminancja obiektu [cd/m^2],

ρ – całkowity współczynnik odbicia,

E_v – natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej [lx].

Wartość całkowitego współczynnika odbicia ρ przyjęto podobnie jak w przypadku metody opisanej w rozdziale 1.2.2 oraz 4.2.1 - $\rho = 0{,}2$. Na rysunku 4.28. przedstawiono rozkład luminancji sylwetki pieszego na przejściach dla pieszych w Warszawie.



Rys. 4.28. Rozkład luminancji sylwetki pieszego na przejściach dla pieszych w Warszawie
Źródło: opracowanie własne

Wartość średnia luminancji obiektu dla analizowanych przejść dla pieszych wyniosła 0,74 cd/m^2. Luminancję pieszego poniżej tej wartości odnotowano dla 72,6% badanych przejść. Wartość średnia luminancji pieszego dla przejść oświetlonych: za pomocą opraw ulicznych wniosła 0,53 cd/m^2, na których zastosowano dodatkowe oprawy na wysięgniku – 1,17 cd/m^2,

natomiast dla przejść dla pieszych, na których zastosowano oprawy dedykowane – 3,48 cd/m^2. Wartość minimalna luminancji obiektu wynosiła 0,01 cd/m^2 i została odnotowana dla przejścia dla pieszych, na którym zastosowano oprawy uliczne. W przypadku przejść dla pieszych oświetlonych oprawami dodatkowymi wartość minimalna wynosiła 0,11 cd/m^2, natomiast w przypadku opraw dedykowanych – 0,19 cd/m^2. Wartość maksymalna wyniosła 8,84 cd/m^2 i została odnotowana dla przejścia dla pieszych oświetlonego systemem dedykowanym. Dla pozostałych przypadków wartość maksymalna wyniosła odpowiednio 4,83 cd/m^2 w przypadku oświetlenia ulicznego oraz 5,69 cd/m^2 w przypadku opraw dodatkowych na wysięgniku.

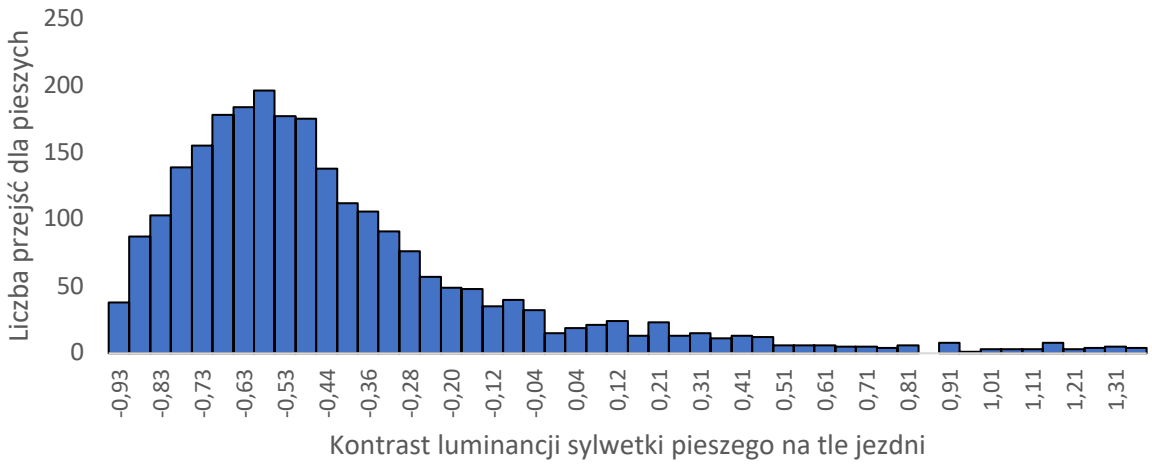
Na podstawie otrzymanych wyników luminancji jezdni oraz luminancji pieszego obliczono kontrast sylwetki pieszego na tle jezdni. W tym celu skorzystano ze wzoru 4.1.

Dla obliczonych wartości kontrastu wyznaczono podstawowe statystyki opisowe, których zestawienie przedstawiono w tabeli 4.11. Na rysunku 4.29. przedstawiono rozkład kontrastu dla wszystkich przejść dla pieszych w Warszawie.

Tabela 4.11. Zestawienie podstawowych statystyk dla obliczonych wartości kontrastu sylwetki pieszego na tle jezdni dla różnych rodzajów zastosowanego oświetlenia

Rodzaj zastosowanego oświetlenia	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Wartość średnia	Mediana	Odchylenie standardowe
Oświetlenie uliczne	-0,98	3,77	-0,50	-0,56	0,32
Dodatkowe oprawy na wysięgniku	-0,91	8,20	0,32	-0,03	1,30
Oprawy dedykowane	-0,93	18,97	1,75	1,36	2,41
Ogółem	**-0,98**	**18,97**	**-0,30**	**-0,52**	**0,98**

Źródło: opracowanie własne

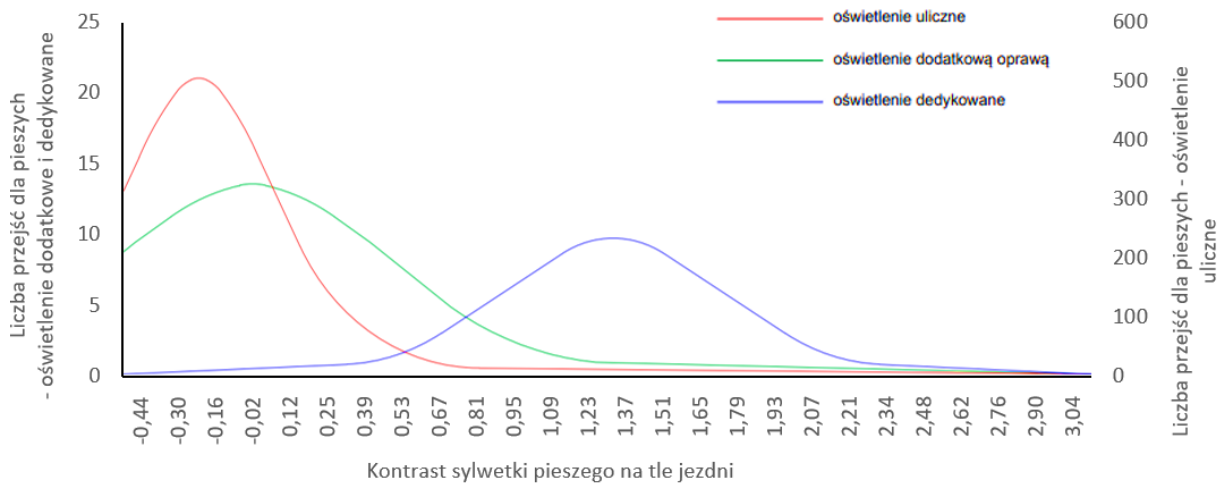


Rys. 4.29. Rozkład kontrastu luminancji sylwetki pieszego dla wszystkich przejść dla pieszych Warszawie

Źródło: opracowanie własne

Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli 4.11 kontrast luminancji sylwetki pieszego zawiera się w zakresie od -0,98 do18,97. Na przejściach dla pieszych w Warszawie najczęściej występuje wysoki kontrast ujemny, co w głównej mierze zależy od typu oświetlenia – najwięcej przejść dla pieszych oświetlonych jest jedynie za pomocą oświetlenia ulicznego. Badania rozkładu wykazały, że kontrast sylwetki pieszego dla wybranej grupy przejść dla pieszych można opisać rozkładem normalnym. Również histogram opracowany na podstawie otrzymanych wyników (rys. 4.39) przedstawia rozkład zbliżony do rozkładu normalnego.

Rozkład częstości występowania kontrastu sylwetki pieszego w poszczególnych przedziałach, w zależności od rodzaju zastosowanego oświetlenia przedstawiono na rysunku 4.30.



Rys. 4.30. Rozkład częstości występowania kontrastu sylwetki pieszego w poszczególnych przedziałach w zależności od rodzaju zastosowanego oświetlenia

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie rysunku 4.30 można stwierdzić, że najwyższy kontrast luminancji sylwetki pieszego z tłem można uzyskać stosując rozwiązania dedykowane. Na przejściach dla pieszych oświetlonych oprawami ulicznymi występuje kontrast ujemny. W przypadku przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw dodatkowych na wysięgniku możliwe jest osiągnięcie zarówno kontrastu dodatniego jak i ujemnego. Otrzymana sytuacja w dużej mierze zależy od istniejących warunków panujących na drodze oraz w jej otoczeniu. Porównując kontrast sylwetki pieszego dla poszczególnych przypadków można stwierdzić, że najlepsze warunki oświetleniowe występują na przejściach oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych.

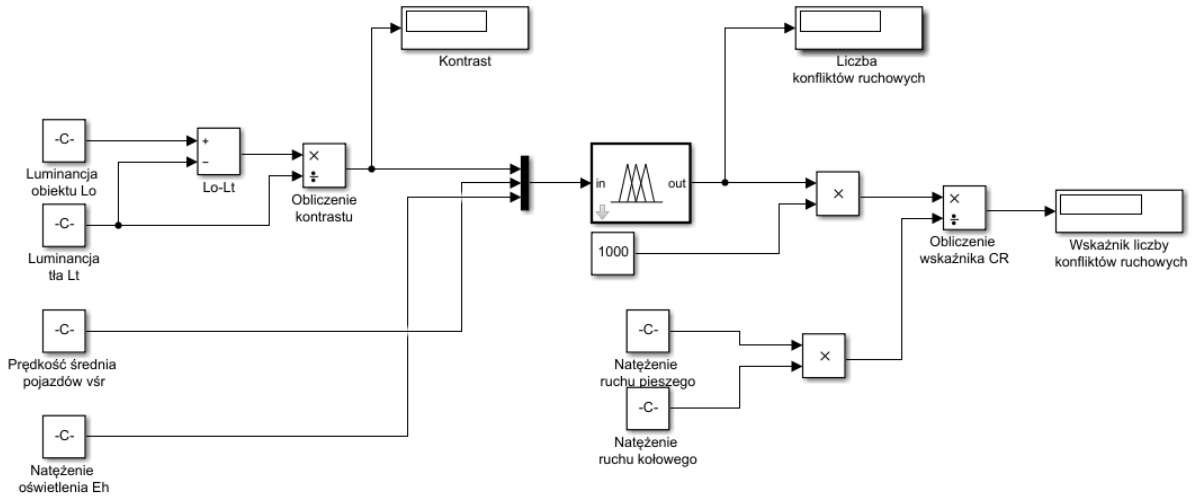
Dane uzyskane od Zarządu Dróg Miejskich oraz przeprowadzone obliczenia umożliwiają porównanie rozkładów kontrastu dla poszczególnych rodzajów oświetlenia. Uzyskane wyniki pozwalają na analizę, na których ulicach w pierwszej kolejności wymagana jest interwencja w postaci instalacji dodatkowych opraw dedykowanych. Należy jednak pamiętać, że zastosowana w powyższym rozdziale metoda wyznaczenia kontrastu jest metodą uproszczoną. W celu szczegółowej oceny widzialności pieszego za pomocą kontrastu należy wykonać pomiary luminancji jezdni oraz obiektu testowego (sylwetki pieszego o przyjętych cechach odbiciowych) w docelowej lokalizacji. Przyjęcie natężenia oświetlenia w płaszczyźnie poziomej dla danego ciągu ulicznego do obliczenia luminancji jezdni jest uproszczeniem metody omówionej w rozdziale 4.2.1. Dla potrzeb pracy posłużono się tym uproszczeniem, w celu opracowania przybliżonych rozkładów kontrastu luminancji dla danego typu oświetlenia stosowanego na przejściu dla pieszych. Uzyskane wyniki, w dalszej części pracy, zostały wykorzystane do opracowania przedziałów zmienności.

5. SFORMUŁOWANIE METODY OCENY SKUTECZNOŚCI DEDYKOWANYCH ROZWIĄZAŃ OŚWIETLENIOWYCH STOSOWANYCH NA PRZEJŚCIACH DLA PIESZYCH

5.1. Opis metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych

Przeprowadzona analiza literatury wykazała ograniczoną liczbę prac poświęconych badaniom zależności między oświetleniem ulicznym, a podstawowymi parametrami ruchu w kontekście bezpieczeństwa ruchu drogowego na przejściach dla pieszych. Autorka pracy proponuje przeprowadzenie oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych na podstawie danych o jakości oświetlenia oraz zachowań uczestników ruchu drogowego. Z uwagi na liczbę oraz nieliniowy charakter zmiennych wejściowych, a w efekcie brak możliwości dokonania jednoznacznej oceny zdecydowano się na wykorzystanie metod heurystycznych, a dokładniej reguł logiki rozmytej [81, 88, 97, 99].

W celu zautomatyzowania metody, z wykorzystaniem programu Matlab – Simulink, zaprojektowano model pozwalający na wprowadzenie danych wejściowych oraz wyświetlenie danej wyjściowej, tj. wskaźnika liczby konfliktów ruchowych, dla analizowanego przejścia dla pieszych. Na rysunku 5.1. przedstawiono schematycznie model oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych.



Rys. 5.1. Schemat modelu oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych zrealizowany w programie Matlab – Simulink

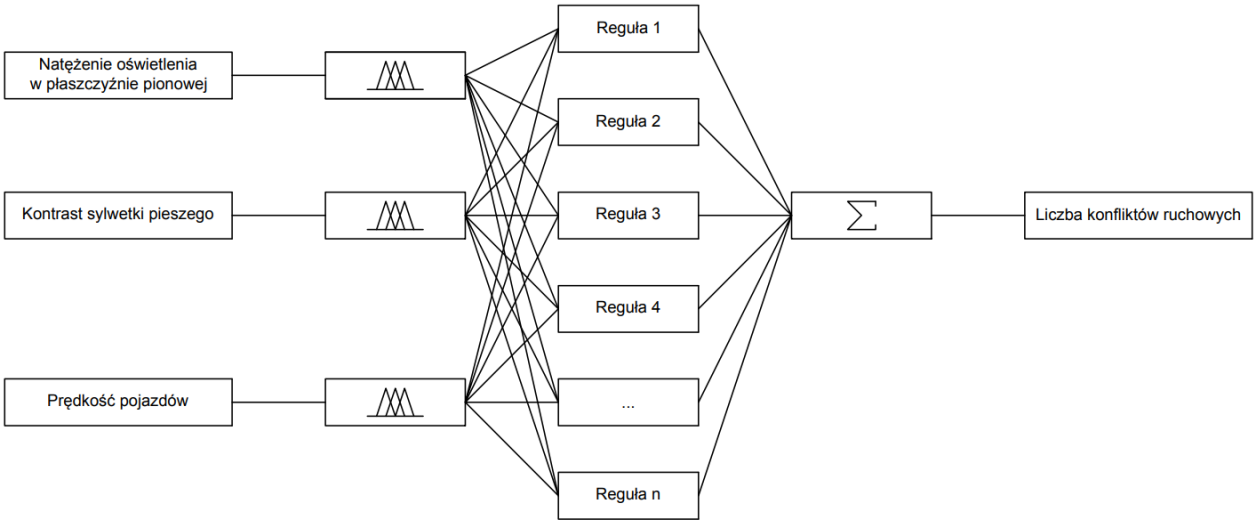
Źródło: opracowanie własne

Dane wejściowe do modelu, tj. luminancja obiektu (pieszego), luminancja tła (jezdni), natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej, prędkość pojazdu, natężenie ruchu kołowego i pieszego, należy pozyskać w badaniach terenowych lub symulacyjnych. Na podstawie wprowadzonych danych program oblicza wartość kontrastu, a następnie za pomocą bloku „Fuzzy Logic" określa liczę konfliktów ruchowych. Szczegóły zastosowania modelowania rozmytego do oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych zostały opisane w kolejnym rozdziale.

5.2. Modelowanie rozmyte w zastosowaniu do oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych

Wnioskowanie rozmyte polega na przekształceniu danych wejściowych na dane wyjściowe z wykorzystaniem logiki rozmytej, tj. na podstawie określonych funkcji przynależności danych wejściowych, zdefiniowanych reguł oraz zastosowanych operacji logicznych.

W dysertacji zaproponowano wykorzystanie wnioskowania rozmytego do określenia liczby konfliktów ruchowych na podstawie trzech danych wejściowych: wartości natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej, wartości kontrastu sylwetki pieszego, wartości prędkości średniej pojazdów. Na rysunku 5.2. przedstawiono schemat modelu określenia liczby konfliktów ruchowych za pomocą logiki rozmytej.

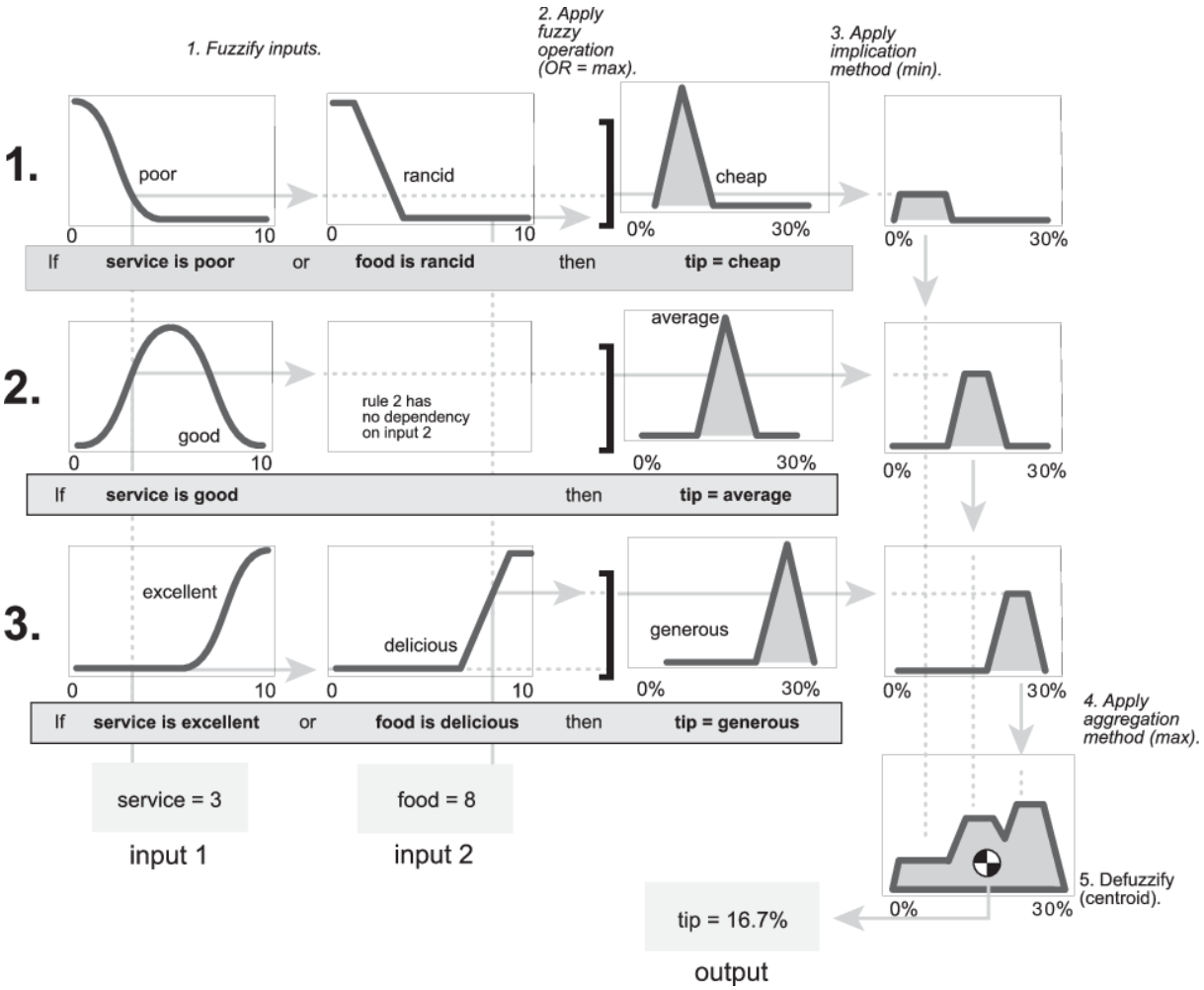


Rys. 5.2. Schemat zasad określenia liczby konfliktów ruchowych za pomocą logiki rozmytej
Źródło: opracowanie własne

Do określenia liczby konfliktów ruchowych wykorzystano nakładkę „Fuzzy Logic Toolbox” w programie Matlab [44]. Oprogramowanie to umożliwia zastosowanie dwóch typów systemów wnioskowania rozmytego: Mamdaniego lub Sugeno. Z uwagi na możliwość dostosowania systemu do wykorzystania wiedzy eksperckiej w pracy zastosowano model Mamdaniego, w którym do określenia zależności pomiędzy zmiennymi używa się reguł. Proces wnioskowania rozmytego wg modelu Mamdaniego działa wg następującej procedury [44]:

1. Fuzyfikacja (rozmywanie) danych wejściowych.
2. Określenie reguł wnioskowania rozmytego.
3. Implikacja logiczna.
4. Agregacja następników reguł.
5. Defuzyfikacja.

W uproszczony sposób działanie modelu Mamdaniego zostało przedstawione na rysunku 5.3.



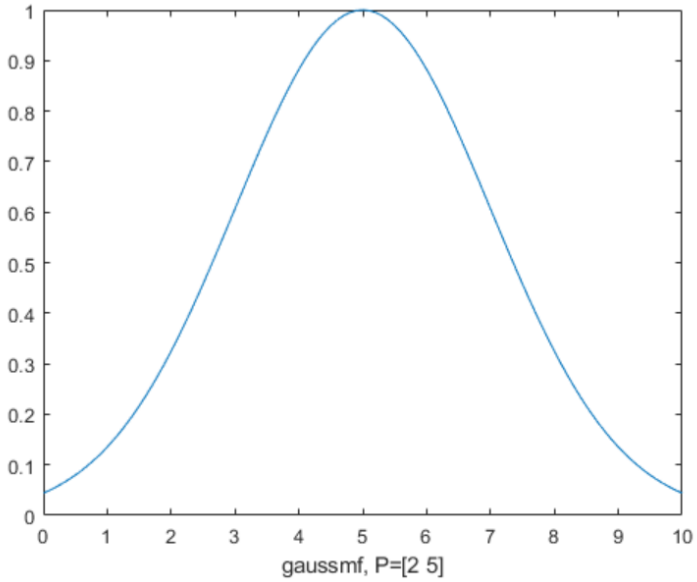
Rys. 5.3. Proces wnioskowania rozmytego wg modelu Mamdaniego

Źródło: opracowano na podstawie [44]

5.2.1. Fuzyfikacja danych wejściowych

Fuzyfikacja, tzn. rozmywanie danych wejściowych, polega na określeniu stopnia przynależności danych wejściowych do poszczególnych zbiorów rozmytych. Etap ten wymaga zdefiniowania kształtu funkcji przynależności oraz przedziałów zmienności danych wejściowych [97].

Funkcja przynależności określa w jakim zakresie dana zmienna należy do zbioru. W celu określenia funkcji przynależności wykorzystano wyniki badań terenowych oraz narzędzie *Dopasowanie rozkładu* w programie Statistica. Przeprowadzona analiza danych wykazała, że w przypadku zastosowanych zmiennych wejściowych najlepiej dopasowanym rozkładem jest rozkład Gaussa. Na rysunku 5.4. przedstawiono podstawowy kształt przyjętej funkcji przynależności dla danych wejściowych.



Rys. 5.4. Kształt przyjętej funkcji przynależności dla danych wejściowych
Źródło: opracowano na podstawie [44]

Funkcja opisana jest za pomocą następującego równania [44]:

$$f(x, \delta, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\delta^2}} \tag{5.1}$$

gdzie:

δ – odchylenie standardowe,

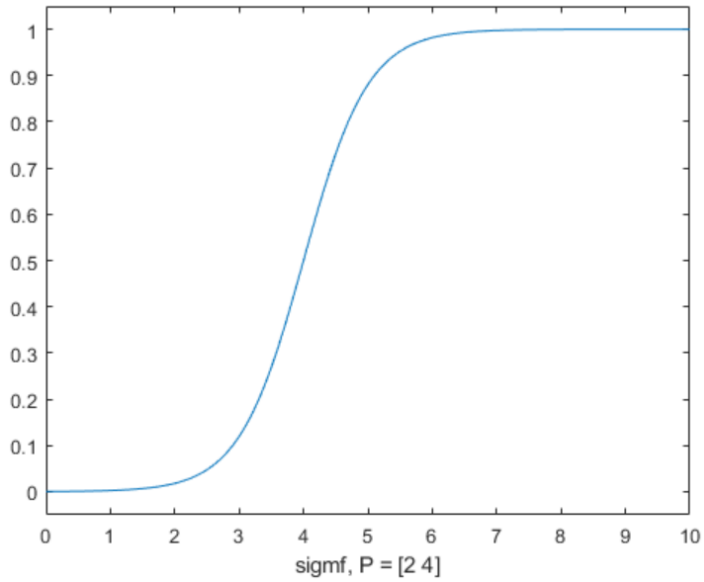
c – wartość średnia,

x – zmienna losowa.

W celu opisania skrajnych przedziałów zastosowano funkcję jednostronnie otwartą typu sigmoidalnego. Funkcja ta jest opisana następującym równaniem [44]:

$$f(x, a, c) = \frac{1}{1+e^{-a(x-c)}} \tag{5.2}$$

Kształt funkcji przynależności przedstawiono na rysunku 5.5.



Rys. 5.5. Kształt przyjętej funkcji przynależności dla danych wejściowych
Źródło: opracowano na podstawie [44]

Parametry funkcji przynależności wyznaczone zostały na podstawie wyników przeprowadzonych badań terenowych oraz na podstawie przeglądu literatury.

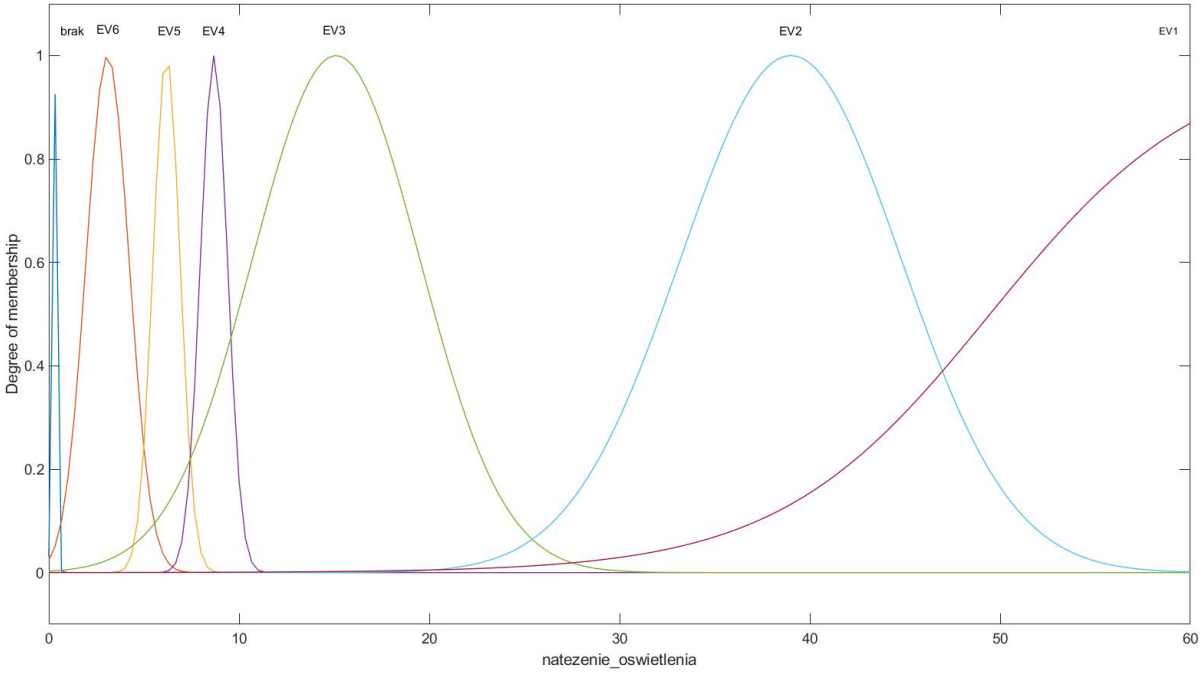
W przypadku natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej, w celu wyznaczenia przedziałów zmienności wykorzystano zalecenia normalizacyjne [86]. Do określenia parametrów funkcji przynależności wykorzystano wyniki badań terenowych. Przyjęte zakresy zmienności i parametry funkcji przynależności przedstawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Przyjęte zakresy zmienności i parametry funkcji przynależności zmiennej lingwistycznej natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej E_v

Oznaczenie na rys. 5.6.	Opis funkcji	Przedział zmienności	c [%]	δ [%]
brak	nieakceptowalne	$E_v < 0,5$	0,30	0,11
EV6	minimalne	$0,5 \leq E_v < 5$	3,09	1,13
EV5	dopuszczalne	$5 \leq E_v < 7,5$	6,20	0,71
EV4	niskie	$7,5 \leq E_v < 10$	8,68	0,71
EV3	dostateczne	$10 \leq E_v < 30$	15,11	4,41
EV2	dobre	$30 \leq E_v < 50$	39,32	5,82
EV1	bardzo dobre	$E_v \geq 50$	69,51	17,01

Źródło: opracowano na podstawie [86]

Na rysunku 5.6. przedstawiono przedziały zmienności danych wejściowych parametru natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej E_v.



Rys. 5.6. Przedziały zmienności danych wejściowych parametru natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej E_v

Źródło: opracowanie własne

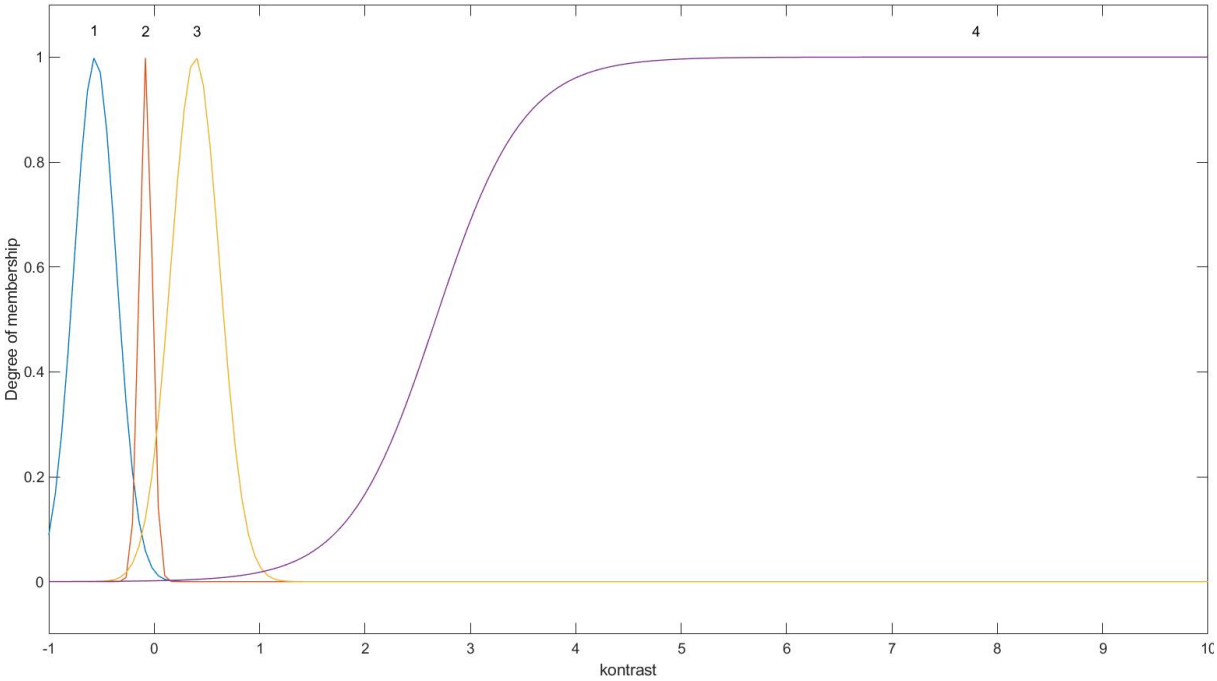
Do określenia przedziałów zmienności parametru kontrastu C oraz parametrów funkcji przynależności wykorzystano wyniki analiz przeprowadzonych na podstawie audytu bezpieczeństwa ruchu drogowego opisanych w rozdziale 4. Na podstawie obliczonych wartości

kontrastu, określonych klas oświetlenia M oraz ocen subiektywnych określono zakresy zmienności przedstawione w tabeli 5.2. Na rysunku 5.7. przedstawiono przedziały zmienności danych wejściowych parametru kontrastu C.

Tabela 5.2. Przyjęte zakresy zmienności i parametry funkcji przynależności zmiennej lingwistycznej kontrast C

Oznaczenie na rys. 5.7.	Opis funkcji	Przedział zmienności	c [%]	δ [%]
1	akceptowalny	-1 < C < -0,05	-0,56	0,2
2	nieakceptowalny	-0,1 < C < 0,1	-0,08	0,06
3	dobry	0,05 < C < 1,5	0,39	0,23
4	bardzo dobry	C > 1	2,67	2,4

Źródło: opracowano na podstawie [86]



Rys. 5.7. Przedziały zmienności danych wejściowych parametru kontrast C

Źródło: opracowanie własne

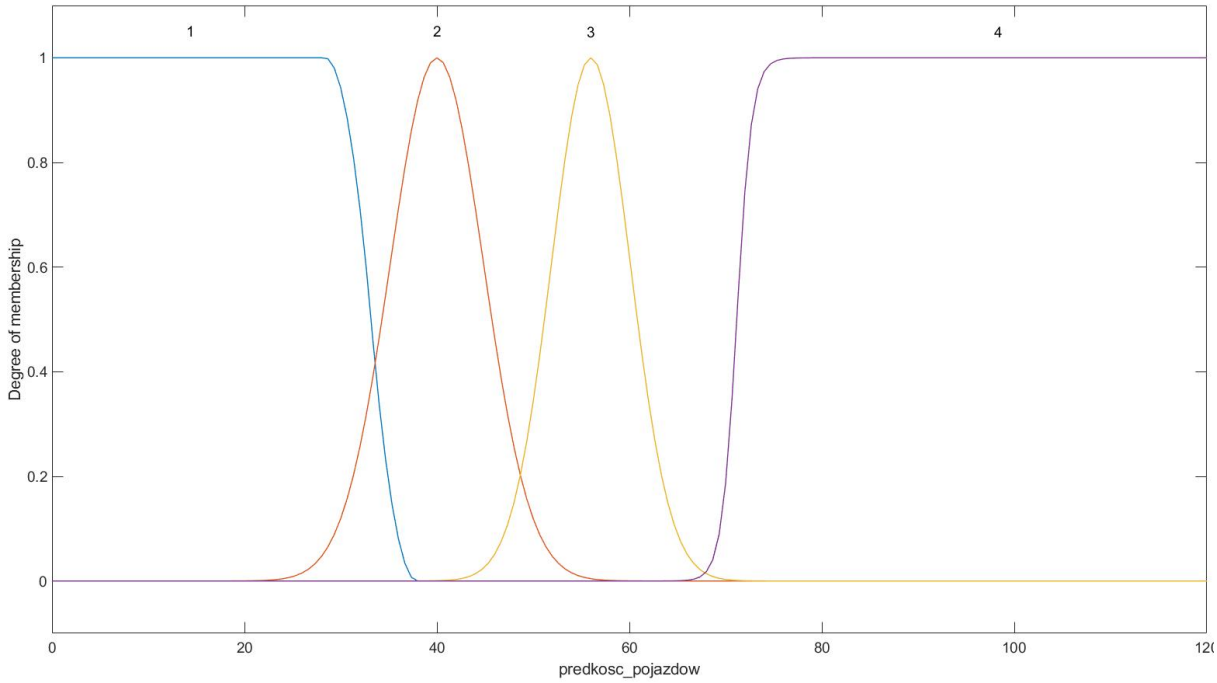
Przedziały zmienności dla parametru prędkości średniej $v_{śr}$ określono na podstawie literatury. W tym celu wykorzystano klasyfikację prędkości zaproponowaną przez ekspertów w dziedzinie inżynierii ruchu drogowego w *Podręczniku dla organizatorów ruchu pieszego* [62]. W celu określenia parametrów funkcji przynależności wykorzystano wyniki badań terenowych. W tabeli 5.3. przedstawiono zakresy zmienności prędkości średniej pojazdów,

natomiast na rysunku 5.8. przedstawiono przedziały zmienności danych wejściowych parametru prędkości średniej pojazdów $v_{śr}$.

Tabela 5.3. Przyjęte zakresy zmienności i parametry funkcji przynależności zmiennej lingwistycznej prędkość średnia pojazdów $v_{śr}$

Oznaczenie na rys. 5.8.	Opis funkcji	Przedział zmienności	c [%]	δ [%]
1	bezpieczna	$0 < v_{śr} < 35$	27	1,65
2	umiarkowanie bezpieczna	$30 < v_{śr} < 55$	40	4,85
3	niebezpieczna	$50 < v_{śr} < 75$	56	4,1
4	krytyczna	$v_{śr} > 70$	74	2,41

Źródło: opracowano na podstawie [62]



Rys. 5.8. Przedziały zmienności danych wejściowych parametru prędkość średnia pojazdów $v_{śr}$

Źródło: opracowanie własne

5.2.2. Zdefiniowanie reguł oceny

Kolejnym etapem wnioskowania rozmytego jest opracowanie reguł wnioskowania przy użyciu podstawowych operatorów logiki rozmytej AND lub OR oraz operatora implikacji OR.

Zdefiniowanie zasad oceny w bloku reguł wymaga wykorzystania wiedzy eksperckiej o zależnościach pomiędzy poszczególnymi danymi wejściowymi oraz wyjściowymi. Reguły wnioskowania rozmytego dla modelu o trzech wejściach i jednym wyjściu można opisać w następujący sposób:

$$IF\ (E_v\ jest\ A_1)\ AND/OR\ (C\ jest\ B_1)\ AND/OR\ (v_{śr}\ jest\ C_1)\ THEN\ (LC\ jest\ D_1) \qquad (5.3)$$

gdzie:

E_v, C, $v_{śr}$ – są danymi wejściowymi,

A_1, B_1, C_1, D_1 – są zbiorami rozmytymi,

LC – jest zmienną wyjściową modelu lingwistycznego.

Liczba możliwych reguł uzależniona jest od liczby zbiorów rozmytych dla każdego z parametrów oceny. W niniejszej pracy zaprojektowano 112 reguł wnioskujących. Przy realizacji modelu przyjęto, że stworzona baza reguł jest niesprzeczna.

Do zdefiniowania reguł wykorzystano zależności występujące pomiędzy poszczególnymi parametrami oraz wiedzę ekspercką. Zależności te zostały zdefiniowane na podstawie danych pochodzących z badań terenowych i omówione w rozdziale 4. Na rysunku 5.9. przedstawiono przykładowe reguły zdefiniowane w programie Fuzzy Logic Toolbox.

1. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 1) and (natezenie_oswietlenia is brak) then (liczba_konfliktów is 5) (1)
2. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 1) and (natezenie_oswietlenia is EV6) then (liczba_konfliktów is 4) (1)
3. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 1) and (natezenie_oswietlenia is EV5) then (liczba_konfliktów is 4) (1)
4. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 1) and (natezenie_oswietlenia is EV4) then (liczba_konfliktów is 4) (1)
5. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 1) and (natezenie_oswietlenia is EV3) then (liczba_konfliktów is 3) (1)
6. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 1) and (natezenie_oswietlenia is EV2) then (liczba_konfliktów is 2) (1)
7. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 1) and (natezenie_oswietlenia is EV1) then (liczba_konfliktów is 2) (1)
8. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 2) and (natezenie_oswietlenia is brak) then (liczba_konfliktów is 5) (1)
9. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 2) and (natezenie_oswietlenia is EV6) then (liczba_konfliktów is 5) (1)
10. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 2) and (natezenie_oswietlenia is EV5) then (liczba_konfliktów is 5) (1)
11. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 2) and (natezenie_oswietlenia is EV4) then (liczba_konfliktów is 4) (1)
12. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 2) and (natezenie_oswietlenia is EV3) then (liczba_konfliktów is 4) (1)
13. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 2) and (natezenie_oswietlenia is EV2) then (liczba_konfliktów is 3) (1)
14. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 2) and (natezenie_oswietlenia is EV1) then (liczba_konfliktów is 2) (1)
15. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 3) and (natezenie_oswietlenia is brak) then (liczba_konfliktów is 5) (1)
16. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 3) and (natezenie_oswietlenia is EV6) then (liczba_konfliktów is 5) (1)
17. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 3) and (natezenie_oswietlenia is EV5) then (liczba_konfliktów is 5) (1)
18. If (kontrast is 1) and (predkosc_pojazdow is 3) and (natezenie_oswietlenia is EV4) then (liczba_konfliktów is 4) (1)

Rys. 5.9. Przykładowe reguły zdefiniowane w programie Fuzzy Logic Toolbox
Źródło: opracowanie własne

5.2.3. Agregacja następników reguł

Agregacja danych polega na wygenerowaniu jednej odpowiedzi, w procesie wnioskowania rozmytego na podstawie kombinacji wszystkich dostępnych wyników. Agregację można więc określić jako sumowanie reguł, w celu wyznaczenia jednej odpowiedzi i zapisać jako [44]:

$$R = \sum_{i=1}^{m} R_i \tag{5.4}$$

gdzie:

R_i – i-ta reguła wnioskowania rozmytego

m – liczba reguł wnioskowania rozmytego.

W programie Matlab Fuzzy Logic Toolbox agregację można przeprowadzić za pomocą następujących metod [44]:

1. *max* – maksymalny z argumentów,
2. *probor* – probabilistyczna operacja *OR*,
3. *sum* – suma argumentów.

W niniejszej pracy wykorzystano metodę *max*.

5.2.4. Defuzyfikacja

Ostatnim etapem wnioskowania rozmytego jest defuzyfikacja, tj. wyostrzenie wyników. Zbiór rozmytych danych wyjściowych podlega defuzyfikacji, czego wynikiem jest konkretna liczba, będąca w opracowywanym układzie liczbą konfliktów ruchowych dla anlizowanego przejścia dla pieszych. W literaturze występuje wiele metod defuzyfikacji. Do najbardziej znanych, przy tym dostępnych w programie Matlab, należą metody [44]:

- środka ciężkości (centroid),
- środka sum (bisector),
- średniego maksimum (mom),
- ostatniego maksimum (lom),
- pierwszego maksimum (som).

Najczęściej stosowaną metodą w procesie defuzyfikacji jest metoda środka ciężkości. Polega ona na wyznaczeniu środka ciężkości obszaru pod krzywą funkcji przynależności poddanej agregacji. Wartość tą można wyznaczyć wg wzoru 5.5 [44].

$$y_c = \frac{\int y \cdot u_w(y)dy}{\int u_w(y)dy} \tag{5.5}$$

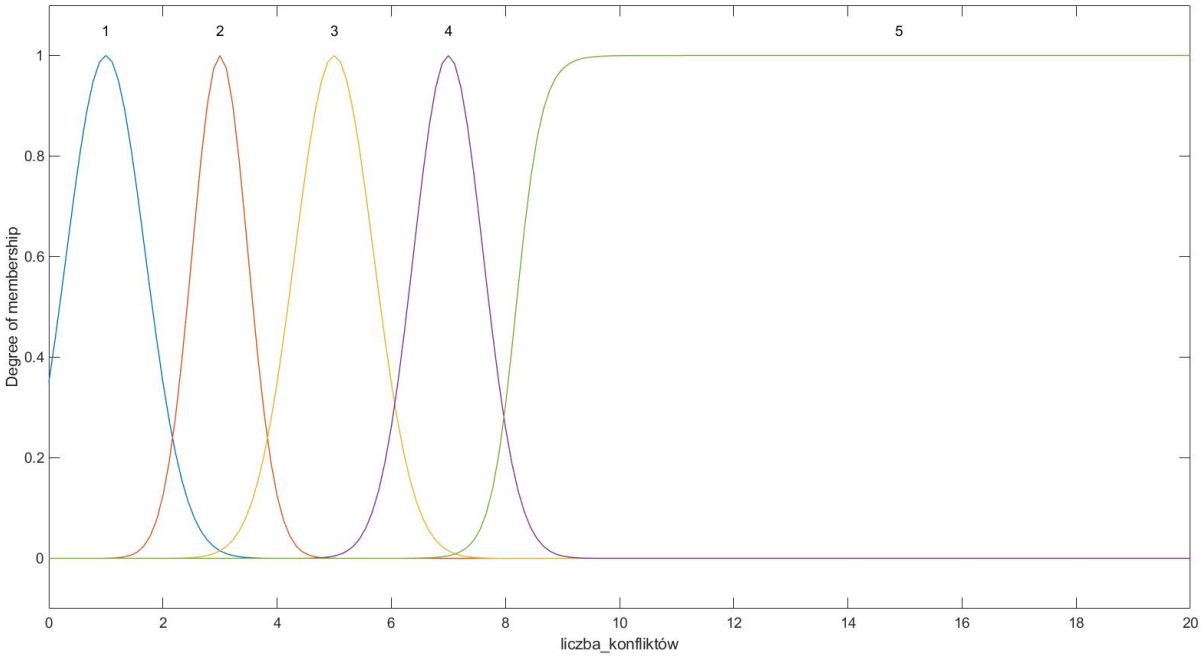
gdzie:

y_c – wartość wyjścia,

$u_w(y)$ – wynikowa funkcja przynależności,

y – wartości zmiennej wyjściowej.

Liczba konfliktów ruchowych (*LC*) określana jest na podstawie zdefiniowanych parametrów dla bloku danych wyjściowych. Funkcja przynależności dla liczby konfliktów ruchowych wybrana została na podstawie wiedzy eksperckiej, wyników przeprowadzonych analiz literatury oraz danych pozyskanych na podstawie analiz statystycznych wykonanych za pomocą narzędzia *Dopasowanie rozkładu* programu Statistica. Jako kształt funkcji przynależności dla następnika reguł zdecydowano się zastosować krzywą Gaussa oraz krzywą sigmoidalną dla skrajnych zbiorów. Na podstawie przeprowadzonych badań terenowych określono przedziały zmienności. Wyniki badań analizowano pod kątem zmian liczby konfliktów ruchowych w zależności od prędkości pojazdów, a prawdopodobnymi skutkami wystąpienia wypadku drogowego. Na rysunku 5.10. przedstawiono graficznie opracowane funkcje przynależności, natomiast w tabeli 5.4. przedstawiono zakresy zmienności liczby konfliktów ruchowych.



Rys. 5.10. Przedziały zmienności danych wyjściowych parametru liczba konfliktów ruchowych LC

Źródło: opracowanie własne

Tabela 5.4. Przyjęte zakresy zmienności i parametry funkcji przynależności danych wyjściowych liczby konfliktów ruchowych LC

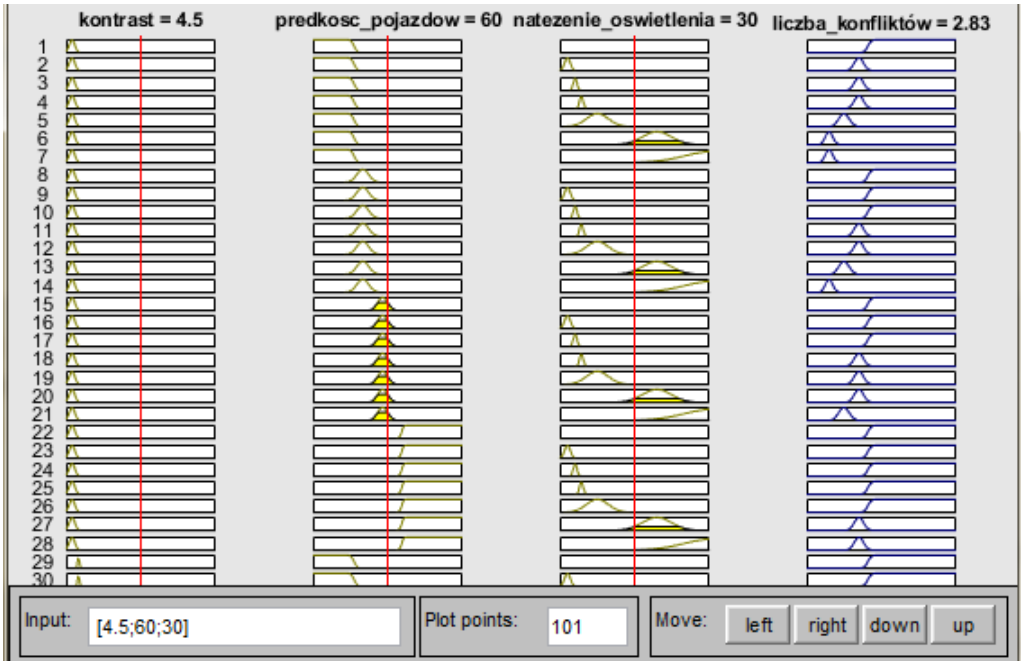
Oznaczenie na rys. 5.10	Opis funkcji	Przedział zmienności	c [%]	δ [%]
1	bardzo mało	0 < LC < 2	1	0,67
2	mało	2 < LC < 4	3	0,49
3	średnio	4 < LC < 6	5	0,69
4	dużo	6 < LC > 8	7	0,61
5	bardzo dużo	LC > 8	9	0,69

Źródło: opracowanie własne na podstawi [62]

5.2.5. Wyniki układu wnioskującego

Na podstawie określonych funkcji przynależności danych wejściowych, zdefiniowanych reguł oraz zastosowanych operacji logicznych, zaprojektowany układ wnioskujący generuje zbiór wyników dla wszystkich możliwych kombinacji.

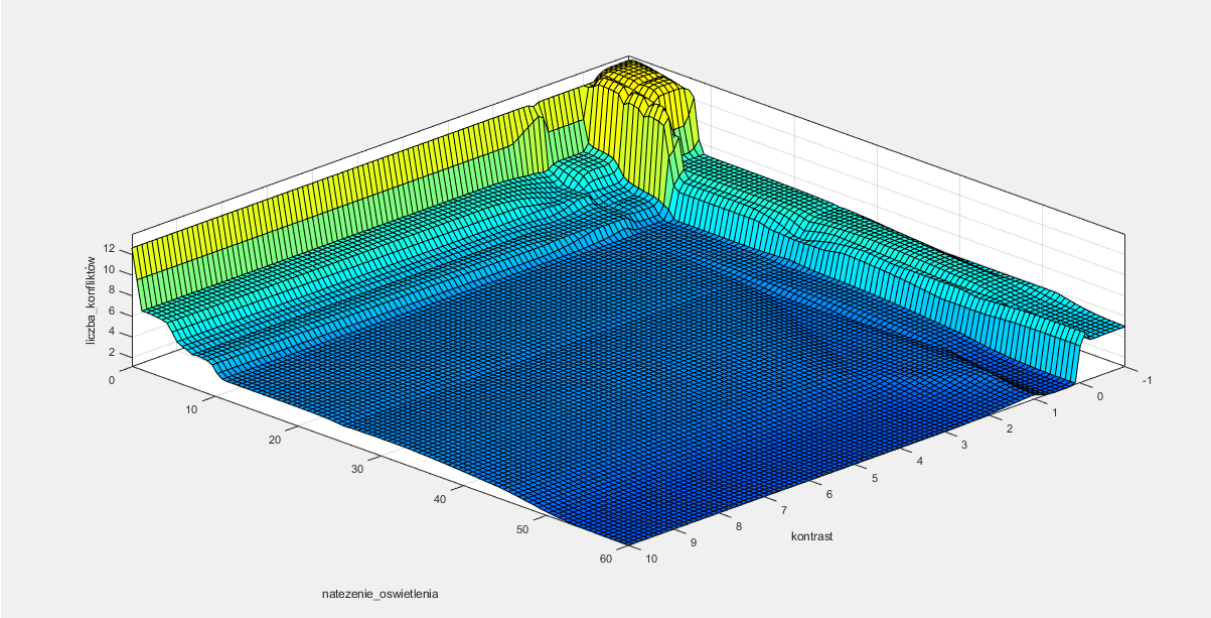
Pracę układu wnioskowania rozmytego można obserwować za pomocą okna dialogowego „Rule Viewer". Okno to umożliwia wprowadzenie danych wejściowych a następnie obserwację działania mechanizmu rozmywania dla każdej z reguł oraz prezentuje „wyostrzony" wynik. Na rysunku 5.11. przedstawiono widok działania reguł za pomocą okna dialogowego „Rule Viewer" w programie Matlab.



Rys. 5.11. Widok działania reguł za pomocą okna dialogowego „Rule Viewer" w programie Matlab

Źródło: opracowanie własne

Innym sposobem na wizualizację oraz ocenę wyników układu wnioskującego jest wykorzystanie funkcji „Surface Viewer”. Funkcja ta pozwala na wyświetlenie powierzchni wynikowej wybranych danych wejściowych oraz wyjściowych. Utworzona powierzchnia przedstawia zbiór danych wyjściowych w trójwymiarowym układzie przestrzennym. Na rysunku 5.12. przedstawiono powierzchnię wynikową zaprojektowanego układu w programie Matlab.

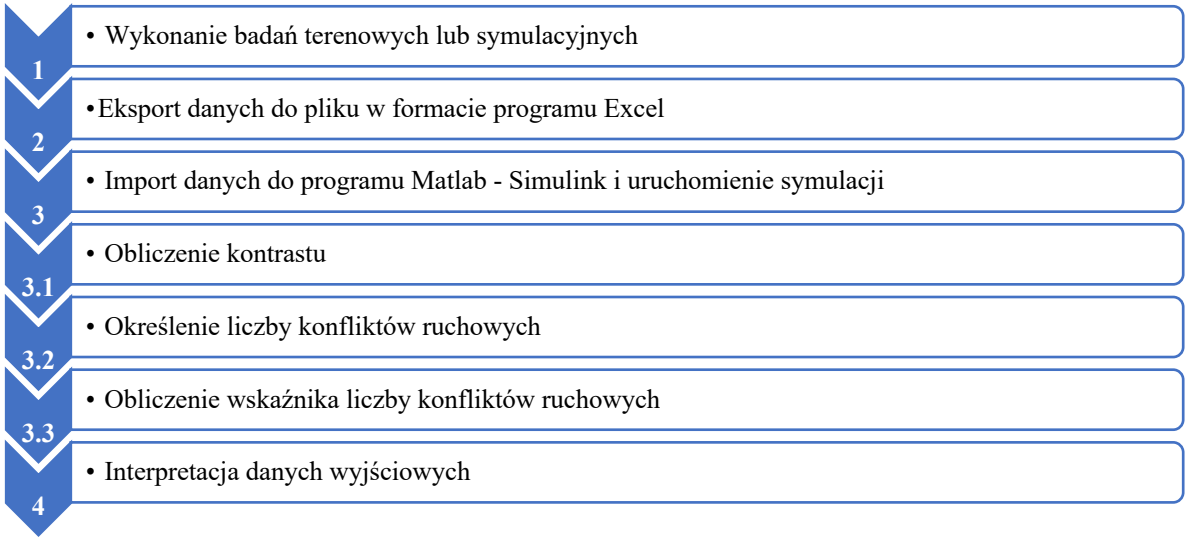


Rys. 5.12. Powierzchnia wynikowa zaprojektowanego układu w programie Matlab
Źródło: opracowanie własne

5.3. Ocena skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych

Podstawą zaproponowanej metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych jest wskaźnik liczby konfliktów ruchowych otrzymany na podstawie danych o liczbie konfliktów ruchowych oraz natężeniu ruchu kołowego i pieszego (wg wzoru 4.1). Otrzymany wynik decyduje o skuteczności danego rozwiązania w analizowanej lokalizacji.

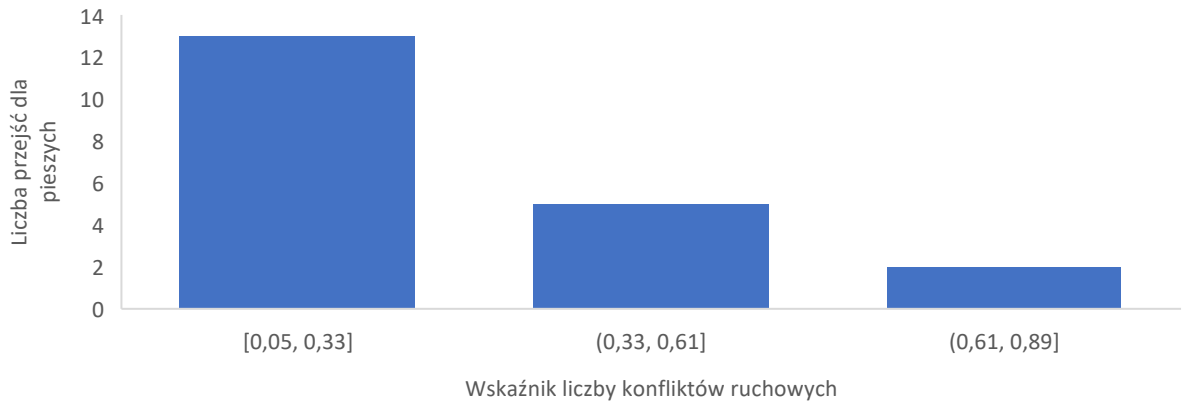
Ocena skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych wymaga zrealizowania 4 etapów opisanych wg rysunku 5.13.



Rys. 5.13. Etapy postępowania przy ocenie skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych z wykorzystaniem zaproponowanej metody

Źródło: opracowanie własne

Interpretacji otrzymanego wyniku należy dokonać na podstawie tabeli 5.5. Ocena polega na przypisaniu otrzymanej wartości wskaźnika liczby konfliktów ruchowych do konkretnego przedziału określającego, w formie opisowej, ryzyko wystąpienie wypadku drogowego w przedmiotowej lokalizacji. Zaproponowane przedziały zostały określone na podstawie analizy wyników badań terenowych przedstawionych w rozdziale 4 dla rozwiązań dedykowanych. Dla otrzymanego wskaźnika liczby konfliktów ruchowych opracowano histogram przedstawiający częstość wstępowania w danych przedziałach. Na rysunku 5.14. przedstawiono rozkład częstości występowania wskaźnika liczby konfliktów ruchowych w określonych przedziałach.



Rys. 5.14. Rozkład częstości występowania wskaźnika liczby konfliktów ruchowych w określonych przedziałach

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie powyższego wykresu opracowano przedstawione w tabeli 5.5. przedziały oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych z wykorzystaniem obliczonego wskaźnika liczby konfliktów ruchowych.

Tabela 5.5. Interpretacja danych wyjściowych w kontekście oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych

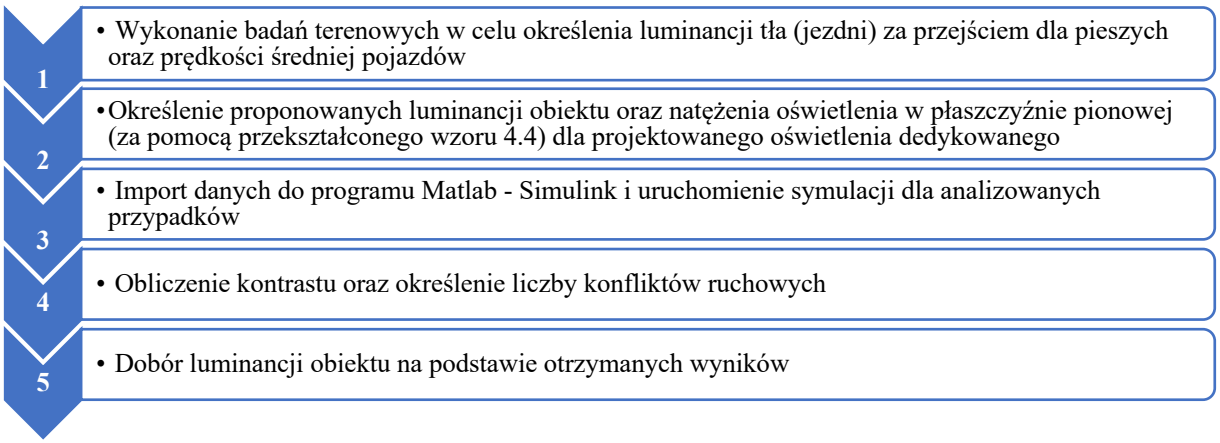
Wskaźnik liczby konfliktów ruchowych	**Ocena**
CR < 0,33	ryzyko niskie
0,33 < CR ≤ 0,61	ryzyko średnie
CR > 0,61	ryzyko wysokie

Źródło: opracowanie własne

5.4. Szacowanie liczby konfliktów ruchowych

Dużą rolę w doborze oświetlenia dedykowanego odgrywa istniejące oświetlenie uliczne. W celu prawidłowego doboru parametrów dodatkowego oświetlenia ważna jest znajomość parametrów oświetleniowych w stanie istniejącym. Znajomość luminancji jezdni (utożsamianej z luminancją tła), na której zlokalizowane jest przejście dla pieszych pozwala na dobór odpowiednich poziomów oświetlenia sylwetki pieszego, a w efekcie otrzymanie pożądanego kontrastu luminancji.

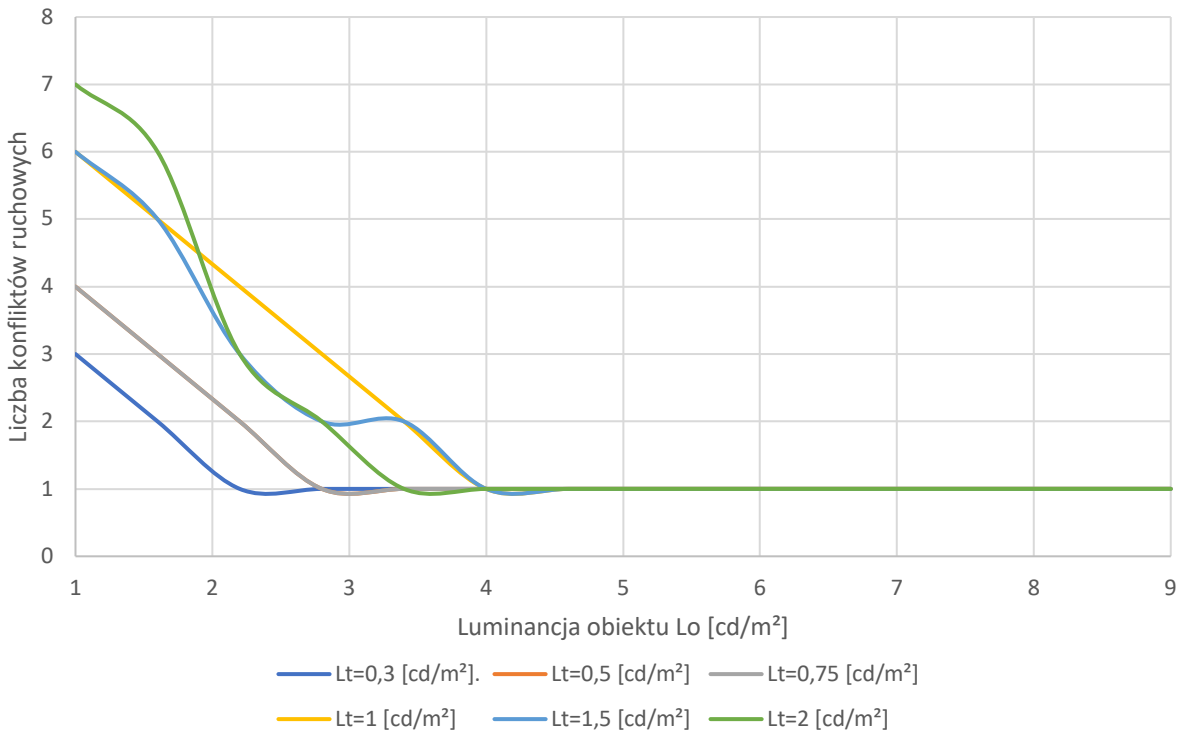
Utylitarny charakter zaproponowanej metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych pozwala na dobór parametrów oświetlenia dedykowanego na podstawie pożądanej liczby konfliktów ruchowych. Na rysunku 5.15. przedstawiono procedurę wyznaczania luminancji obiektu na podstawie liczby konfliktów w ruchu drogowym dla wybranych luminancji tła oraz prędkości pojazdów.



Rys. 5.15. Procedura doboru luminancji obiektu na podstawie liczby konfliktów ruchowych z wykorzystaniem zaproponowanej metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych

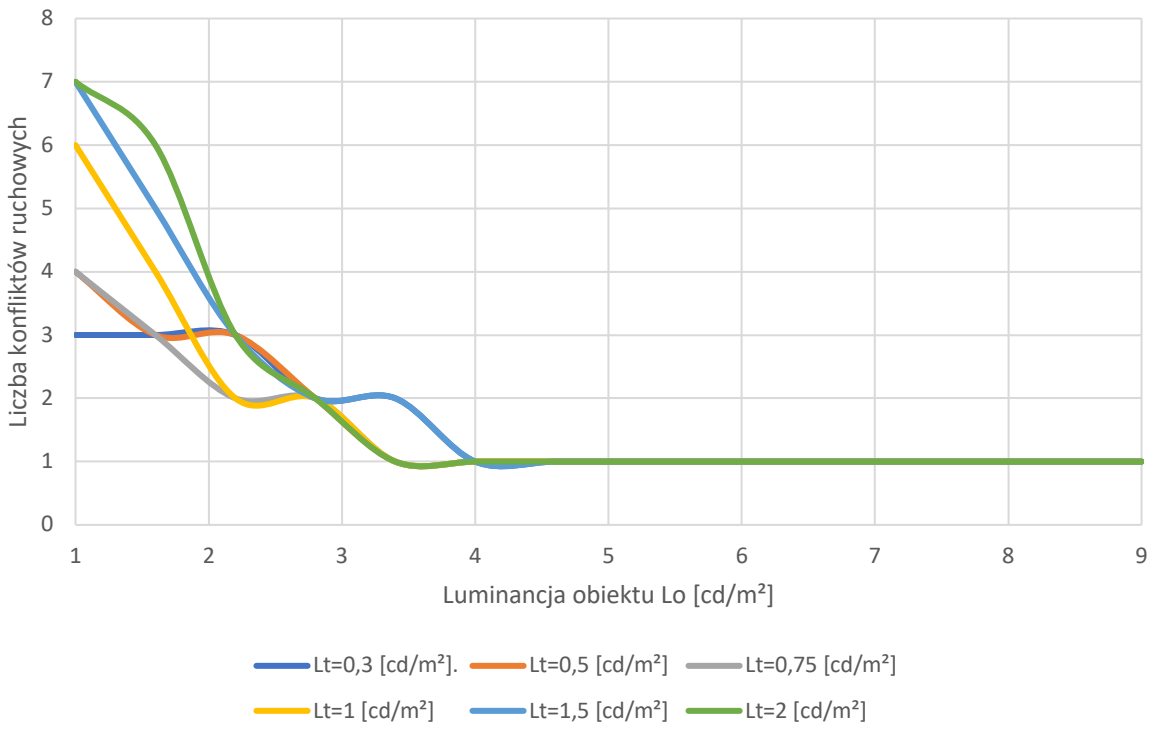
Źródło: opracowanie własne

Poniżej przedstawiono zastosowanie wyżej opisanej metody. W celu określenia luminancji obiektu przeprowadzono symulację w programie Matlab-Simulink dla wybranych luminancji tła oraz prędkości średnich pojazdów. Luminancję jezdni (tła) przyjęto jako minimalną wartość luminancji dla każdej klasy oświetleniowej M (wg tabeli 4.7). Wartość prędkości średniej przyjęto na podstawie badań [62], tj. 30 km/h, 50 km/h oraz 70 km/h. Zakres zmian luminancji obiektu dobrano na podstawie pomiarów oświetlenia przeprowadzonych przez Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie [132] i opisanych w rozdziale 4.3. Minimalna wartość luminancji pieszego wyniosła 1,21 cd/m^2, natomiast maksymalna – 8,84 cd/m^2. Z wykorzystaniem podstawowych metod statystycznych wyznaczono zakres zmienności badanego parametru, a następnie optymalną szerokość przedziałów klasowych, która wyniosła 0,59 cd/m^2. W związku z powyższym luminancję obiektu zmieniano w zakresie od 1 do 9 cd/m^2, zmieniając jej wartość o 0,6 cd/m^2. Na rysunkach 5.16. – 5.18. przedstawiono wpływ luminancji obiektu na liczbę konfliktów ruchowych w zależności od przyjętej luminancji tła oraz prędkości pojazdów.



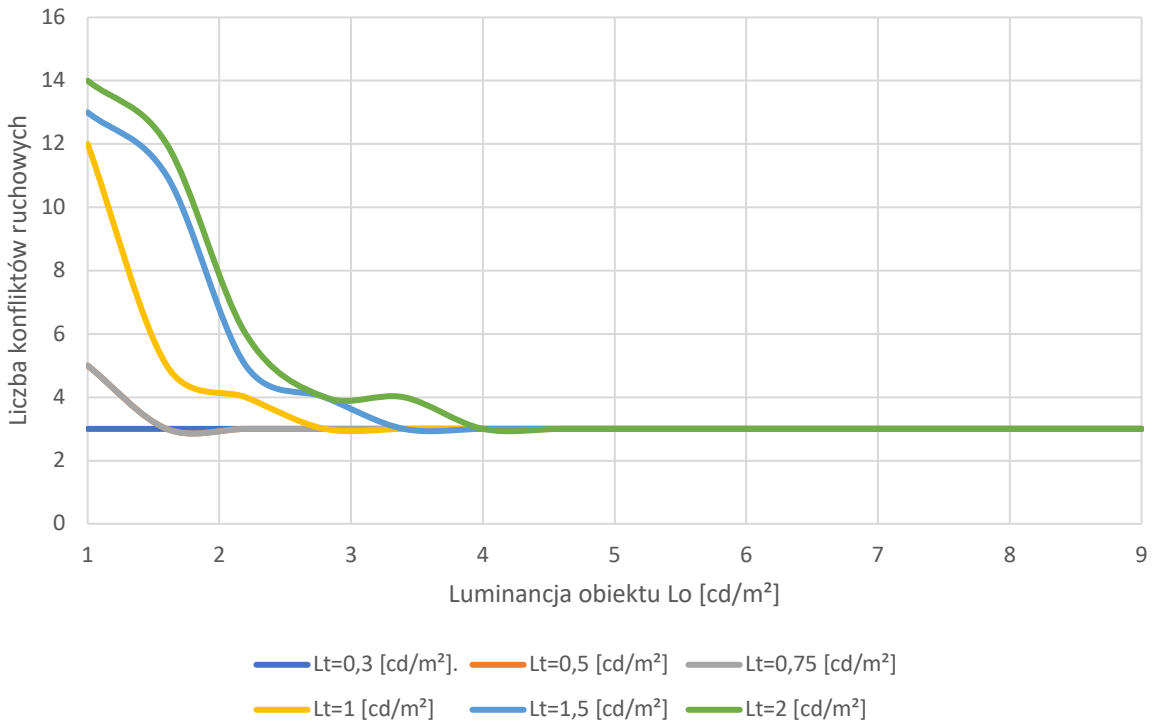
Rys. 5.16. Wpływ luminancji obiektu na liczbę konfliktów ruchowych dla prędkości średniej pojazdów $v_{śr}$=30 [km/h]

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5.17. Wpływ luminancji obiektu na liczbę konfliktów ruchowych dla prędkości średniej pojazdów $v_{śr}$=50 km/h

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5.18. Wpływ luminancji obiektu na liczbę konfliktów ruchowych dla prędkości średniej pojazdów $v_{śr}$=70 km/h

Źródło: opracowanie własne

Jak wynika z powyższych wykresów, w celu redukcji liczby konfliktów w ruchu drogowym, wraz ze wzrostem luminancji tła należy stosować wyższe poziomy luminancji obiektu. Wiąże się to ze wzrostem poziomu natężenia oświetlenia na płaszczyźnie pionowej i prowadzi do zwiększenia poziomu kontrastu luminancji sylwetki pieszego z tłem jezdni.

Należy jednak zwrócić uwagę na wyniki otrzymane dla prędkości średniej pojazdów równej 70 km/h. Pomimo spadku liczby konfliktów ruchowych wraz ze wzrostem luminancji obiektu, liczba ta pozostała na wysokim poziomie. W związku z powyższym na przejściach, gdzie prędkość pojazdów może wynosić ok 70 km/h obok oświetlenia dedykowanego należy zastosować elementy uspokojenia ruchu. Uzyskane zależności dotyczą ograniczonej liczby przejść dla pieszych i należy bezwzględnie kontynuować badania w celu doprecyzowania powyższych zależności.

5.5. Weryfikacja zaproponowanej metody

Przeprowadzony i omówiony w rozdziale pierwszym przegląd literatury wskazał na brak metod oceny skuteczności stosowanych rozwiązań oświetleniowych na przejściach dla pieszych. Jak wykazano, stosowane badania wpływu oświetlenia na bezpieczeństwo ruchu drogowego nie dają informacji o wpływie warunków oświetleniowych na wybrane miary oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego na przejściach dla pieszych. Zagadnienia związane z oddziaływaniem parametrów oświetleniowych na zachowania uczestników ruchu drogowego w porze nocnej nie były rozpoznane.

Z uwagi na brak możliwości porównania otrzymanych wyników do innego modelu, a także z uwagi na zastosowanie do zaproponowanej oceny metod heurystycznych, wykorzystujących wiedzę ekspercką pozyskaną z badań własnych oraz literatury, w celu weryfikacji zaproponowanej metody przeprowadzono symulację w programie Matlab-Simulink przy wprowadzeniu losowych danych wejściowych. Wprowadzane parametry wejściowe zostały dobrane w taki sposób, aby odpowiadały warunkom panującym na przejściach dla pieszych oświetlonych oprawami dedykowanymi. W tabeli 5.6. przedstawiono wyniki przeprowadzonych symulacji.

Analizując wyniki badań należy zauważyć, że zgodnie z założeniami metody, symulację przeprowadzono tylko dla przykładów z kontrastem dodatnim. Analiza danych zawartych w tabeli 5.6 wskazuje, że na przejściach oświetlonych w kontraście dodatnim odnotowuje się małą liczbę konfliktów ruchowych. Wraz ze wzrostem kontrastu spada liczba konfliktów. Najniższą ocenę, równoznaczną wysokiemu ryzyku wystąpienia wypadku, odnotowano dla obiektu, dla którego wprowadzono najniższą wartość kontrastu. Warto zauważyć, że dla przejść dla pieszych oświetlonych w kontraście dodatnim dominuje niski stopień ryzyka oraz liczba konfliktów ruchowych równa 1.

Dla otrzymanych wyników badań symulacyjnych obliczono współczynnik korelacji pomiędzy kontrastem sylwetki pieszego a liczbą konfliktów ruchowych. Otrzymana wartość to -0,65, co oznacza silną korelację ujemną. Otrzymany wynik jest porównywalny z wynikiem badań terenowych – wraz ze wzrostem kontrastu obserwuje się spadek liczby konfliktów ruchowych.

Tabela 5.6. Wyniki oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych otrzymane na podstawie danych symulacyjnych w wyniku weryfikacji zaproponowanej

	Dane wejściowe						**Dane wyjściowe**			
Obiekt [nr]	**Natężenie oświetlenia E_v [lx]**	**Luminancja obiektu [cd/m^2]**	**Luminancja tła [cd/m^2]**	**Prędkość średnia pojazdów [m/s]**	**Natężenie ruchu kołowego [poj/h]**	**Natężenie ruchu pieszego [P/h]**	**Kontrast sylwetki pieszego [-]**	**Liczba konfliktów ruchowych [-]**	**Wskaźnik liczby konfliktów ruchowych [-]**	**Interpretacja wyniku – ryzyko:**
1	85	3,37	2,96	56	163	21	0,14	4	1,17	wysokie
2	77	1,21	1,06	34	263	83	0,15	3	0,14	niskie
3	77	2,86	2,47	58	221	67	0,16	4	0,27	niskie
4	113	2,69	2,28	41	345	70	0,18	3	0,12	niskie
5	99	1,59	1,34	46	283	84	0,18	3	0,13	niskie
6	59	1,66	1,34	48	161	30	0,23	3	0,62	wysokie
7	91	2,03	1,57	54	237	93	0,29	3	0,14	niskie
8	115	3,46	2,66	59	222	68	0,30	3	0,20	niskie
9	77	2,59	1,83	58	197	61	0,42	3	0,25	niskie
10	110	3,52	2,47	47	204	48	0,43	3	0,31	niskie
11	127	2,29	1,60	40	370	83	0,43	2	0,07	niskie
12	71	2,30	1,57	57	170	77	0,47	3	0,23	niskie
13	68	2,95	2,00	39	177	33	0,48	2	0,34	średnie
14	108	3,23	2,16	55	202	47	0,49	2	0,21	niskie
15	75	2,83	1,87	58	177	86	0,51	2	0,13	niskie
16	110	2,42	1,57	49	428	27	0,54	2	0,17	niskie
17	102	2,10	1,34	34	265	29	0,57	2	0,26	niskie
18	59	3,50	2,16	53	271	44	0,62	2	0,17	niskie
19	75	3,19	1,83	31	296	74	0,75	2	0,09	niskie
20	71	4,79	2,66	58	388	90	0,80	2	0,06	niskie
21	79	4,80	2,66	50	203	31	0,80	2	0,32	niskie
22	81	2,65	1,47	31	223	56	0,81	2	0,16	niskie
23	58	4,95	2,66	35	372	92	0,86	2	0,06	niskie
24	126	4,96	2,66	45	221	74	0,86	2	0,12	niskie
25	60	4,97	2,66	59	420	23	0,87	2	0,21	niskie
26	89	3,46	1,83	42	316	87	0,89	2	0,07	niskie
27	61	3,48	1,83	40	382	95	0,91	1	0,03	niskie
28	74	2,56	1,34	54	246	81	0,91	1	0,05	niskie

	Dane wejściowe						Dane wyjściowe			
Obiekt [nr]	**Natężenie oświetlenia E_v [lx]**	**Luminancja obiektu [cd/m^2]**	**Luminancja tła [cd/m^2]**	**Prędkość średnia pojazdów [m/s]**	**Natężenie ruchu kołowego [poj/h]**	**Natężenie ruchu pieszego [P/h]**	**Kontrast sylwetki pieszego [-]**	**Liczba konfliktów ruchowych [-]**	**Wskaźnik liczby konfliktów ruchowych [-]**	**Interpretacja wyniku – ryzyko:**
29	104	3,08	1,54	57	363	73	1,01	1	0,04	niskie
30	93	2,76	1,37	46	391	81	1,01	2	0,06	niskie
31	91	5,01	2,47	36	357	56	1,03	2	0,10	niskie
32	118	5,83	2,83	44	172	30	1,06	2	0,39	średnie
33	73	3,77	1,83	56	221	50	1,07	2	0,18	niskie
34	92	4,28	2,03	59	409	87	1,11	2	0,06	niskie
35	110	3,54	1,66	33	402	86	1,12	2	0,06	niskie
36	57	2,15	1,01	36	193	58	1,14	2	0,18	niskie
37	118	6,06	2,83	41	304	65	1,14	2	0,10	niskie
38	122	5,75	2,66	53	191	61	1,16	2	0,17	niskie
39	57	3,00	1,37	37	404	29	1,19	2	0,17	niskie
40	77	2,97	1,34	38	235	76	1,21	2	0,11	niskie
41	127	4,09	1,83	30	412	52	1,24	1	0,05	niskie
42	114	2,96	1,30	52	326	82	1,28	1	0,04	niskie
43	96	3,31	1,44	40	251	26	1,29	2	0,31	niskie
44	67	2,34	1,02	47	389	75	1,29	1	0,03	niskie
45	128	6,57	2,83	38	385	32	1,32	1	0,08	niskie
46	108	4,26	1,83	60	349	43	1,33	1	0,07	niskie
47	89	2,35	1,01	32	289	83	1,33	1	0,04	niskie
48	107	3,23	1,37	37	321	52	1,36	1	0,06	niskie
49	90	2,38	1,01	43	431	86	1,36	1	0,03	niskie
50	87	2,43	1,02	49	209	30	1,38	1	0,16	niskie
51	97	6,78	2,83	43	173	73	1,39	1	0,08	niskie
52	59	3,45	1,44	59	280	68	1,40	2	0,11	niskie
53	80	3,31	1,37	60	181	48	1,41	1	0,12	niskie
54	101	3,34	1,37	54	280	51	1,44	1	0,07	niskie
55	112	2,49	1,01	48	302	57	1,47	1	0,06	niskie
56	92	7,03	2,83	36	247	21	1,48	1	0,19	niskie
57	71	4,57	1,83	39	255	46	1,50	1	0,09	niskie
58	115	4,58	1,83	45	337	29	1,51	1	0,10	niskie
59	114	4,63	1,83	58	319	51	1,53	1	0,06	niskie

	Dane wejściowe						Dane wyjściowe			
Obiekt [nr]	**Natężenie oświetlenia E_v [lx]**	**Luminancja obiektu [cd/m^2]**	**Luminancja tła [cd/m^2]**	**Prędkość średnia pojazdów [m/s]**	**Natężenie ruchu kołowego [poj/h]**	**Natężenie ruchu pieszego [P/h]**	**Kontrast sylwetki pieszego [-]**	**Liczba konfliktów ruchowych [-]**	**Wskaźnik liczby konfliktów ruchowych [-]**	**Interpretacja wyniku – ryzyko:**
60	83	3,49	1,37	59	411	59	1,54	1	0,04	niskie
61	58	3,53	1,37	49	232	44	1,57	1	0,10	niskie
62	97	3,71	1,44	53	418	45	1,58	1	0,05	niskie
63	116	2,61	1,01	54	255	26	1,59	1	0,15	niskie
64	75	4,03	1,54	59	421	92	1,62	1	0,03	niskie
65	84	4,03	1,54	58	187	34	1,62	1	0,16	niskie
66	93	6,14	2,32	51	376	74	1,65	1	0,04	niskie
67	121	7,51	2,83	57	331	30	1,65	1	0,10	niskie
68	80	3,86	1,44	34	395	35	1,68	1	0,07	niskie
69	50	3,70	1,37	48	244	53	1,70	2	0,15	niskie
70	92	3,31	1,21	34	281	80	1,74	1	0,04	niskie
71	61	4,51	1,64	34	372	62	1,75	1	0,04	niskie
72	63	4,02	1,46	33	285	81	1,76	1	0,04	niskie
73	110	4,26	1,54	56	421	36	1,77	1	0,07	niskie
74	70	3,14	1,13	54	332	65	1,78	1	0,05	niskie
75	51	4,69	1,68	50	257	52	1,79	2	0,15	niskie
76	121	3,83	1,37	31	209	91	1,79	1	0,05	niskie
77	90	3,15	1,12	34	255	90	1,81	1	0,04	niskie
78	119	4,31	1,54	36	419	35	1,81	1	0,07	niskie
79	92	4,39	1,54	35	182	24	1,86	1	0,23	niskie
80	94	4,41	1,54	46	172	51	1,87	1	0,11	niskie
81	53	5,12	1,78	57	270	51	1,88	2	0,15	niskie
82	82	4,75	1,64	41	208	45	1,89	1	0,11	niskie
83	112	5,31	1,83	37	312	71	1,91	1	0,05	niskie
84	121	4,84	1,64	48	192	75	1,95	1	0,07	niskie
85	115	4,08	1,37	44	240	32	1,98	1	0,13	niskie
86	96	3,42	1,14	59	254	92	2,00	1	0,04	niskie
87	101	4,39	1,44	49	419	28	2,05	1	0,09	niskie
88	59	3,49	1,14	33	410	49	2,06	1	0,05	niskie
89	89	3,26	1,06	39	220	55	2,08	1	0,08	niskie
90	113	8,84	2,83	38	180	38	2,12	1	0,15	niskie

	Dane wejściowe						Dane wyjściowe			
Obiekt [nr]	**Natężenie oświetlenia E_v [lx]**	**Luminancja obiektu [cd/m^2]**	**Luminancja tła [cd/m^2]**	**Prędkość średnia pojazdów [m/s]**	**Natężenie ruchu kołowego [poj/h]**	**Natężenie ruchu pieszego [P/h]**	**Kontrast sylwetki pieszego [-]**	**Liczba konfliktów ruchowych [-]**	**Wskaźnik liczby konfliktów ruchowych [-]**	**Interpretacja wyniku – ryzyko:**
91	121	5,25	1,68	30	266	40	2,12	1	0,09	niskie
92	67	3,51	1,12	39	434	45	2,12	1	0,05	niskie
93	65	3,78	1,21	33	415	65	2,13	1	0,04	niskie
94	89	5,02	1,54	32	369	36	2,27	1	0,08	niskie
95	106	3,81	1,13	57	172	76	2,38	1	0,08	niskie
96	94	4,97	1,44	57	302	23	2,46	1	0,14	niskie
97	91	4,29	1,14	31	201	67	2,76	1	0,07	niskie
98	68	5,69	1,46	41	196	39	2,90	1	0,13	niskie
99	89	5,33	1,34	59	327	72	2,97	1	0,04	niskie
100	68	4,30	1,06	34	298	31	3,07	1	0,11	niskie

Źródło: opracowanie własne

5.6. Walidacja zaproponowanej metody

Walidacja zaproponowanej metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych została przeprowadzona na podstawie danych pochodzących z badań terenowych. Szczegółowe wyniki badań terenowych zaprezentowano w rozdziale 4. Do walidacji metody wykorzystano wyniki badań przeprowadzonych na przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych.

Zgodnie ze schematem postępowania przedstawionym na rysunku 5.13. uzyskane dane zaimportowano do programu Matlab – Simulink. Na ich podstawie przeprowadzono symulację i otrzymano obliczony kontrast luminancji sylwetki pieszego, liczbę konfliktów ruchowych oraz wskaźnik liczby konfliktów ruchowych. Otrzymane wyniki poddane zostały analizie pod kątem wzajemnych zależności między danymi wejściowymi a danymi wyjściowymi. W tabeli 5.7. przedstawiono wartości współczynnika korelacji dla ww. relacji. W tabeli 5.8. przedstawiono zbiorcze wyniki przeprowadzonej symulacji.

Tabela 5.7. Zestawienie wartości współczynnika korelacji dla danych relacji wraz z ich interpretacją

Lp.	Opis analizowanej zależności	Wartość współczynnika korelacji r Pearsona	Uproszczona interpretacja wyników
1.	natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej - liczba konfliktów ruchowych	-0,85	korelacja bardzo silna
2.	kontrast sylwetki pieszego na tle jezdni – liczba konfliktów ruchowych	-0,81	korelacja bardzo silna
3.	prędkość średnia pojazdów - liczba konfliktów ruchowych	-0,54	korelacja silna

Źródło: opracowanie własne

Dla każdego z przypadków otrzymano silną lub bardzo silną korelację ujemną. Oznacza to, że wzrost danego czynnika wpływa na zmniejszenie liczby konfliktów ruchowych. W przypadku parametrów oświetleniowych jest to wynik oczekiwany i pozwala na potwierdzenie tezy. **Zastosowanie kontrastu dodatniego wpływa na ograniczenie liczby konfliktów ruchowych**. W związku z powyższym zaproponowana metoda została poprawnie zwalidowana.

Niepokojący jest wynik wskazujący na spadek liczby konfliktów ruchowych przy wzroście prędkości średniej pojazdów. Jak wynika z analizy danych zawartych w rozdziale 4 jest to efektem wzrostu prędkości przy poprawie warunków oświetleniowych. Z uwagi na poważne skutki wypadków drogowych przy dużych prędkościach pojazdów w przyszłości

należy rozszerzyć metodę o szczegółowe pomiary prędkości z uwzględnieniem badań okulograficznych. Dzięki temu możliwe będzie otrzymanie informacji w jakiej odległości od przejścia kierowcy dostrzegają pieszych zbliżającego się do przejść dla pieszych i jaki to ma wpływ na zmiany prędkości pojazdów i zachowania uczestników ruchu.

Tabela 5.8. Wyniki oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych otrzymane na podstawie danych symulacyjnych w wyniku walidacji metody

	Dane wejściowe						**Dane wyjściowe**			
Obiekt [nr]	**Natężenie oświetlenia E_v [lx]**	**Luminancja obiektu [cd/m^2]**	**Luminancja tła [cd/m^2]**	**Prędkość średnia pojazdów [m/s]**	**Natężenie ruchu kołowego [poj/h]**	**Natężenie ruchu pieszego [P/h]**	**Kontrast sylwetki pieszego [-]**	**Liczba konfliktów ruchowych [-]**	**Wskaźnik liczby konfliktów ruchowych [-]**	**Interpretacja wyniku – ryzyko:**
C1	77,7	3,42	1,07	45	201	33	2,19	1	0,18	niskie
C2	49,3	2,01	0,53	52,9	275	86	2,79	2	0,07	niskie
C3	45,8	2,2	0,6	40,4	288	58	2,67	1	0,07	niskie
C4	61,7	1,73	0,55	59,3	307	46	2,15	1	0,09	niskie
C5	45,6	1,96	0,72	56,8	360	75	1,72	2	0,07	niskie
C6	42,1	2,47	0,79	48	435	69	2,13	2	0,06	niskie
C7	39,8	2,39	0,86	56,1	170	32	1,78	2	0,38	niskie
C8	55,5	3,6	1,35	57,1	296	59	1,67	2	0,09	niskie
C9	51,1	3,26	1,17	56,1	273	30	1,79	2	0,25	niskie
C10	34,8	3,71	1,16	44,3	348	58	2,2	1	0,06	niskie
C11	41,5	2,64	0,71	62,6	185	62	2,72	2	0,19	niskie
C12	47,3	3,01	0,98	42,8	161	16	2,07	1	0,5	średnie
C13	39	2,48	0,89	62,4	220	37	1,79	2	0,25	niskie
C14	50,7	2,43	0,82	61,4	245	31	1,96	2	0,26	niskie
C15	55	3,5	1,12	58,7	330	66	2,13	1	0,06	niskie
C16	54,5	2,83	1,04	51,8	272	91	1,72	2	0,07	niskie
C17	46,4	2,95	0,95	50,6	166	28	2,11	2	0,43	średnie
C18	55,4	3,53	1,27	62,1	170	34	1,78	2	0,26	niskie
C19	58,1	3,7	1,37	43,1	225	32	1,7	1	0,19	niskie
C20	54,8	3,49	1,17	53,8	334	84	1,98	1	0,05	niskie

Źródło: opracowanie własne

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Niski poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz wysoki wskaźnik wypadkowości wymuszają na zarządcach dróg oraz organach zarządzających ruchem stosowanie różnego rodzaju środków mających na celu poprawę bezpieczeństwa na drogach. Producenci dostarczają nowych rozwiązań, które znajdują uznanie zarówno wśród użytkowników dróg jak i ich administratorów. Często jednak brakuje szczegółowych informacji na temat wpływu danego elementu infrastruktury drogowej na bezpieczeństwo ruchu drogowego, a co za tym idzie o jego skuteczności.

Z uwagi na duże zagrożenie pieszych uczestników ruchu drogowego na przejściach dla pieszych w porze nocnej coraz więcej zarządców dróg decyduje się na stosowanie tzw. opraw dedykowanych, charakteryzujących się asymetrycznym rozsyłem wiązki świetlnej. Pozwalają one na uzyskanie dodatniego kontrastu luminancji sylwetki pieszego z tłem jezdni. Oznacza to, że pieszy wchodząc na jezdnię, postrzegany jest przez kierowców jako jasny obiekt na ciemnym tle jezdni. Z uwagi na doświetlanie sylwetki pieszego przez nadjeżdżające pojazdy teoretycznie jest to efekt pożądany, gdyż wzmacnia kontrast luminancji wytworzony światłem reflektorów lub reflektorów zainstalowanych na pojeździe i zmienia kontrast obserwacji obiektu z ujemnego na dodatni w stosunku do typowej sytuacji oświetlenia drogowego Powszechnie uważa się, że rozwiązanie to poprawia bezpieczeństwo pieszych w porze nocnej. Jednocześnie w literaturze brakuje badań potwierdzających wpływ rzeczywistych warunków oświetleniowych na bezpieczeństwo ruchu drogowego.

Celem podstawowym pracy było opracowanie metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych stosowanych na przejściach dla pieszych. Autorka pracy zaproponowała metodę opartą na analizie wpływu warunków oświetleniowych na liczbę konfliktów ruchowych, uwzględniając przy tym prędkość średnią pojazdów. Do analizy zależności między powyższymi czynnikami wykorzystano metody heurystyczne. Przeprowadzone weryfikacja i walidacja metody pozwoliły na jej subiektywną ocenę przez autorkę pracy.

Wśród zalet zaproponowanej metody należy wymienić:

- uwzględnienie zależności między warunkami oświetleniowymi a miarą oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego – liczbą konfliktów ruchowych,
- możliwość przeprowadzenia oceny zarówno na etapie projektowym, wprowadzając dane symulacyjne, jak i dla rzeczywistych warunków oświetleniowych,

- możliwość wykorzystania metody, w celu ustalenia wartości kontrastu dla projektowanego rozwiązania oświetleniowego na podstawie oczekiwanej liczby konfliktów ruchowych (rys. 5.16 – 5.18),
- intuicyjny w obsłudze model w programie Matlab-Simulink umożliwiający zautomatyzowanie obliczeń,
- krótki czas wykonania pełnej oceny (od przeprowadzenia badań terenowych/symulacyjnych do otrzymania wyniku),
- jednoznaczny i prosty w interpretacji wynik oceny,
- możliwość sprawnego dostosowania metody do zmian w wymaganiach formalno – prawnych lub aktualnych badań naukowych (zwiększających wiedzę ekspercką w danym zakresie) poprzez modyfikację bloku wnioskowania rozmytego (np. zmiana zakresów zmienności, parametrów funkcji przynależności itp.),
- możliwość rozbudowy metody o dodatkowe miary oceny zarówno oświetlenia jak i bezpieczeństwa ruchu drogowego,
- możliwość wykorzystania metody w kompleksowych badaniach bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Główne ograniczenia opracowanej metody to:

- badania skuteczności tylko jednego rodzaju oświetlenia na przejściach dla pieszych – brak uwzględnienia przejść oświetlonych w kontraście ujemnym np. oświetlonych tylko oświetleniem drogowym jednostronnym,
- badania jednego, sprecyzowanego przekroju drogi, na którym zlokalizowane były przejścia dla pieszych,
- brak uwzględnienia oddziaływania oświetlenia pojazdów samochodowych na luminancję sylwetki pieszego,
- brak powiązania między warunkami oświetleniowymi, a elementami uspokojenia ruchu na drodze,
- brak uwzględnienia wpływu wzrostu prędkości średniej pojazdów przy poprawiających się warunkach oświetleniowych w końcowej ocenie skuteczności danego rozwiązania,
- brak badań na dużej liczbie jednorodnych obiektów.

Dodatkowym celem rozprawy było określenie wpływu poziomu kontrastu na zachowania uczestników ruchu drogowego. Cel ten został zrealizowany poprzez wykonanie badań

terenowych, których wyniki zostały poddane analizie statystycznej. W pracy wykazano silną zależność między tymi parametrami. Wzrost kontrastu sylwetki pieszego wpływa na zmniejszenie się liczby konfliktów ruchowych. Dla przebadanych przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych zaobserwowano średnio o 3 konflikty ruchowe mniej w ciągu mierzonej godziny w stosunku do przejść oświetlonych wyłącznie za pomocą opraw ulicznych.

Autorka pracy podjęła się również oceny zasadności stosowania odpowiednich poziomów oświetlenia na przejściach dla pieszych, na których zastosowano oprawy dedykowane. Cel ten został zrealizowany poprzez ustalenie zależności pomiędzy poziomami kontrastu, wartościami natężenia oświetlenia oraz liczbą konfliktów ruchowych. Dodatkowo opracowana metoda pozwala na określenie wymaganych poziomów parametrów oświetleniowych na podstawie oczekiwanej liczby konfliktów.

Zaproponowana w pracy metoda ma charakter utylitarny i może zostać wykorzystana przez zarządców infrastruktury do oceny zasadności stosowania rozwiązań dedykowanych oraz przy doborze prawidłowych parametrów oświetleniowych opraw, uwzględniając jednocześnie bezpieczeństwo ruchu drogowego.

W związku z powyższym należy stwierdzić, że praca zakończyła się zrealizowaniem wszystkich postawionych przez autorkę celów.

W rozprawie udowodniono zaproponowaną tezę: dodatni poziom kontrastu luminancji sylwetki pieszego z tłem jezdni wpływa na ograniczenie konfliktów w ruchu drogowym.

Dowód tezy został oparty na wynikach analiz teoretycznych i badaniach przedstawionych w dysertacji (rozdziały 4 i 5, w szczególności 4.2.2, 5.4 oraz 5.5). Zarówno dla wyników badań terenowych oraz badań symulacyjnych wykazano silną zależność między kontrastem a liczbą konfliktów ruchowych. Przeprowadzone badania jednoznacznie wskazały na mniejszą liczbę konfliktów na przejściach dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych.

W świetle uzyskanych wyników można stwierdzić, że teza pracy została w pełni potwierdzona.

Do głównych osiągnięć zrealizowanych w ramach rozprawy autorka zalicza:

- wykonanie szczegółowego przeglądu metod oceny oświetlenia w aspekcie bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz metod oceny skuteczności stosowanych elementów infrastruktury drogowej, a w szczególności przejść dla pieszych,

- opracowanie zależności pomiędzy warunkami oświetleniowymi, a podstawowymi miarami bezpieczeństwa ruchu drogowego,
- opracowanie i analiza zmian kontrastu luminancji w zależności od zastosowanego rozwiązania oświetleniowego,
- opracowanie, w oparciu o wiedzę ekspercką oraz badania własne, modelu wnioskowania rozmytego do określenia liczby konfliktów ruchowych na podstawie danych szczegółowych o oświetleniu przejść dla pieszych,
- opracowanie i zweryfikowanie autorskiej metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych stosowanych na przejściach dla pieszych.

Przedstawione w pracy badania i ich analizy, a także opracowana metoda oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych nie wyczerpują zagadnień bezpieczeństwa ruchu drogowego na przejściach dla pieszych w porze nocnej. Wprowadzone w czasie realizacji pracy doktorskiej zmiany w obowiązujących przepisach oraz ograniczenia wynikające z trwającej pandemii COVID-19 znacząco wpłynęły na zachowania uczestników ruchu drogowego [67, 74, 122]. W związku z powyższym badania przedstawione w pracy należy kontynuować, uwzględniając:

- przeprowadzenie badań terenowych na dużej próbie statystycznej po ustabilizowaniu się ruchu (obecnie obserwuje się duże zmiany w ruchu oraz w zachowaniach użytkowników dróg spowodowane nowelizacją przepisów Prawa o ruchu drogowym),
- obserwację zmian prędkości średniej pojazdów przy różnych warunkach oświetleniowych,
- przeprowadzenie badań okulograficznych na reprezentatywnej grupie kierowców, w celu ustalenia z jakiej odległości zauważany jest pieszy ubrany w różne materiały i w różnych warunkach oświetleniowych,
- rozszerzenie badań na przejścia dla pieszych oświetlone w kontraście ujemnym oraz zlokalizowane na różnych typach dróg, także poza terenem zabudowanym,
- uwzględnienie w ocenie innych czynników związanych z oceną bezpieczeństwa ruchu drogowego (np. zastosowanie elementów uspokojenia ruchu),
- przeprowadzenie badań w warunkach symulatorowych.

BIBLIOGRAFIA

[1] Abouelhamd A., Saraiji R., A Contrast Based Calculation Method for Roadway Lighting, Leukos, 14.3: 193-211, 2018.

[2] Adrian W., Visibility of Targets, Lighting Research & Technology, 21.4: 181-188, 1989.

[3] Agerholm N., Tønning C., Madsen TKO., Bahnsen CH., Moeslund TB., Lahrmann HS., Road user behaviour analyses based on video detections: Status and best practice examples from the RUBA software, 24th ITS World Congress Montreal 2017, ITS World, p. 1-10, 2017.

[4] American National Standard RP-8-00: Recommended Practice Roadway Lighting, Illuminating Engineering Society of North America, USA, New York, IESNA, 2000.

[5] ANSI/IESNA RP-8-90 Draft: American National Standard Practice for Roadway Lighting, 1990.

[6] ANSI-IESNA RP-8-00 (R2005) Roadway Lighting, USA: 2005.

[7] Audyt BRD przejść dla pieszych bez sygnalizacji świetlnej na drogach zarządzanych przez ZDM w dzielnicach Śródmieście, Ochota, Praga Południe pod kątem skuteczności oświetlenia tych przejść i zastosowanej organizacji ruchu, Zarząd Dróg Miejskich, 2016

[8] Baleja R., Bos P., Novak T., Sokansky K., Hanusek T., Increasing of visibility on the pedestrian crossing by the additional lighting systems, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2017.

[9] Baleja R., Helstynova B., Sokansky K., Novak T., Measurement of luminance ratios at pedestrian crossings, IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), p. 1306-1310, 2015.

[10] Bassani M., Mutani G., Effects of environmental lighting conditions on operating speeds on Urban Arterials. Transportation research record 2298.1, p.78-87, 2012.

[11] Beckmann J., De Croo H., Bandmann M., Mackay G.M., van Vollenhoven P., Road accident data in the enlarged european union, The European Transport Safety Council, Bruksela, 2006.

[12] Bláha, Z., Sokanský, K., & Novák, T., Solution of lighting for pedestrian crossing to increase their visibility, Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), IEEE, 2014.

[13] Boyce P. R., Lighting for driving: roads, vehicles, signs, and signals, CRC Press, 2008.

[14] Brzeziński A., Dąbkowski P., Dybicz P., Olszewski P., Analiza bezpieczeństwa ruchu na tzw. Aktywnych Przejściach dla Pieszych, Warszawa, 2017.

[15] BS EN 13201-2 2003: Road Lighting Part 2: Performance Requirements, British Standards Institution, London, 2003.

[16] Budzyński M., Gaca S., Jamroz K., Michalski L., Instrukcja kontroli stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego Etap II, 2013.

[17] Budzyński M., Koncepcja metody oceny zagrożeń w ruchu drogowym, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska 59, nr 3/IV (2012): 167-174.

[18] Budzyński M., Kustra W., Analiza zagrożeń na jednorodnych odcinkach dróg, Drogownictwo 4, p. 112–5, 2012.

[19] Budzyński M., Kustra W., Inspekcje bezpieczeństwa ruchu drogowego. Drogownictwo, 2010.

[20] Buyukkinaci B., Onaygil S., Guler O., Yurtseven M., Determining minimum visibility levels in different road lighting scenarios. Lighting Research & Technology, 50.7: 1045-1056, 2018.

[21] Cafiso S., D'Agostino C., Bąk R., Kieć M., The assessment of road safety for passing relief lanes using microsimulation and traffic conflict analysis, Advances I Transportation Studies, 2016.

[22] Cafiso S., Di Graziano A., Pappalardo G., In-vehicle stereo vision system for identification of traffic conflicts between bus and pedestrian, Journal of traffic and transportation engineering (English edition), 4.1: 3-13, 2017.

[23] CIE Pub. No. 132: Design methods for lighting of road, 1999.

[24] CIE Pub.No.19/2: An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance, 1979.

[25] CIE, Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic, Technical Report, Publication No. 115-2010, Viena, 2010.

[26] Cuerden R., Richards D., Hill J., Pedestrians and Their Survivability At Different Impact Speeds, Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Lyon, France, Paper. 2007.

[27] Czajewski W., Dąbkowski P., Kraśkiewicz C., Problemy oceny bezpieczeństwa pieszych przy pomocy analizy obrazu wideo, 2015.

[28] Czerepicki A., Tomczuk P., Wytrykowska A., Projektowanie systemu informatycznego do oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego na przejściu dla pieszych, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, 113: 89-95, 2016.

[29] d'Italia, Automobile Club, Linee guida per la progettazione degli attraversamenti pedonali, Technical Report, Italia, 2011.

[30] Dane statystyczne Europejskiego Urzędu Statystycznego, https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/tran_sf_roadus (dostęp: 21.04.2020).

[31] Dane statystyczne Europejskiej Komisji ds.. Transportu: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/statistics_enCARE database (dostęp: 20.05.2020 r.).

[32] Dane statystyczne Komendy Głównej Policji, Wypadki Drogowe - Raporty Roczne, https://statystyka.policja.pl/st/ruch-drogowy/76562,Wypadki-drogowe-raporty-roczne.html (dostęp: 20.01.2022).

[33] de Bellis E., Schulte-Mecklenbeck M., Brucks W., Herrmann A., Hertwig R., Blind haste: As light decreases, speeding increases, PLoS One, vol. 13, 2018.

[34] De Oña J., Mujalli RO., Calvo FJ., Analysis of traffic accident injury severity on Spanish rural highways using Bayesian networks. Accident Analysis & Prevention 43.1 (2011): 402-411.

[35] Dimitriou L., Vlahogianni EI., Fuzzy modeling of freeway accident duration with rainfall and traffic flow interactions. Analytic Methods in Accident Research 5, p. 59-712015.

[36] Driss M., Banabdeli K., Saint-Gerand T., Hamadouche MA., Traffic safety prediction model for identifying spatial degrees of exposure to the risk of road accidents based on fuzzy logic approach. Geocarto international, 30.3, p. 243-257, 2015.

[37] Edwards C., Gibbons R., Relationship of Vertical Illuminance to Pedestrian Visibility in Crosswalks, Transportation Research Record, 2056.1: 9-16, 2008.

[38] Eenink R., Reurings M., Elvik R., Cardoso J., Wichert S., Stefan C., Accident Prediction Models and Road Safety Impact Assessment: recommendations for using these tools, Institute for Road Safety Research, Leidschendam, 2008.

[39] Elvik R., Erke A., Christensen P., Elementary units of exposure, Transportation research record, 2103.1: 25-31, 2009.

[40] Elvik R., State-of-the-art approaches to road accident black spot management and safety analysis of road networks, Transportøkonomisk institutt, Oslo, 2007.

[41] Elvik R., Truls V., Hoye A., Michael S.. The Handbook of Road Safety Measures: Second Edition, Emerald Group Publishing, 2009.

[42] European Commission DG Energy and Transport High Level Group Road Safety Road Infrastructure Safety Management Report of the Working Group on Infrastructure Safety Status : Public Version of 19 December 2003.

[43] EuroRAP: Risk Mapping, https://www.eurorap.org/ (dostęp: 22.04.2020 r.).

[44] Fuzy logic toolbox, User Guide, https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html (dostęp: 20.01.2022 r.).

[45] Gaca S., Badania prędkości pojazdów i jej wpływu na bezpieczeństwo ruchu drogowego, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, 75, 2002.

[46] Gaca S., Jamroz K., Kustra W., Strategia zmniejszania liczby i skutków wypadków związanych z nadmierną prędkością, Drogownictwo 4-6, 2009.

[47] Gaca S., Kieć M., Quantification of impacts of road accessibility and selected factors of road surroundings development on road traffic safety, 1st International Conference on Access ManagementHellenic Association of Rural and Surveying EngineersTransportation Research BoardTechnical Chamber of GreeceNational Technical University of AthensGreek Ministry of Infrastructure, Transport and Networks, 2011.

[48] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., Inżynieria ruchu drogowego: Teoria i praktyka, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2014.

[49] Gaca S., Zielinkiewicz A., Identyfikacja determinant zwiększonego zagrożenia bezpieczeństwa ruchu w nocy, Logistyka 3 p. 1854-1863, 2014.

[50] Gibbons R., Hankey J., Influence of Vertical Illuminance on Pedestrian Visibility in Crosswalks, Transportation research record, 1973.1: 105-112, 2006.

[51] Główny Urząd Miar - Mapy godzin wschodu i zachodu słońca, https://gum.gov.pl/pl/transfer-wiedzy/inne/mapy-godzin-wschodu-i-z/2652,Mapy-godzin-wschodu-i-zachodu-slonca-w-Polsce.html (dostęp: 27.04.2020).

[52] Gonzalo-Orden H., Rojo M., Pérez-Acebo H., Linares A., Traffic Calming Measures and their Effect on the Variation of Speed, Transportation research procedia, 18: 349-356, 2016.

[53] Hasson P., i inni, Field test for lighting to improve safety at pedestrian crosswalks, 16th Biennial Symposium on Visibility and SimulationTransportation Research Board, University of Iowa, Center for Computer Aided Design, Operator Performance Laboratory, 2002.

[54] Hauer E., Observational Before/After Studies in Road Safety. Estimating the Effect of Highway and Traffic Engineering Measures on Road Safety, Emerald Group Publishing Limited, 1997.

[55] Hydén C., Amundsen F. H., Proceedings from the first Workshop on Traffic Conflicts, Oslo 77, 1977.

[56] Imprialou M-IM., Quddus M., Pitfield DE., High accuracy crash mapping using fuzzy logic. Transportation research part C: emerging technologies 42, p.107-120, 2014.

[57] Internetowy Podręcznik Statystyki, https://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html (dostęp: 22.04.2020 r.).

[58] Jackett M., Frith W., Quantifying the impact of road lighting on road safety - A New Zealand Study. IATSS Res 2013;36:139–45.

[59] Jackett, M., W. Frith., How does the level of road lighting affect crashes in New Zealand-A pilot study, Opus International Consultants Central Laboratories: Lower Hutt, New Zealand, 2012.

[60] Jägerbrand AK., Sjöbergh J., Effects of weather conditions, light conditions, and road lighting on vehicle speed, SpringerPlus 5.1: 1-17, 2016.

[61] Jamroz K., Budzyński M., Jeliński Ł., Gobis A., Metodologia systematycznych badań zachowań pieszych i relacji pieszy - kierowca wraz z przeprowadzeniem badań pilotażowych, Krajowa Rada Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego, 2015.

[62] Jamroz K., Gaca S., Michalski L., Kieć M., Budzyński M., Gumińska L., i inni, Ochrona Pieszych, 2014.

[63] Jamroz K., Kustra W., Gobis A., Metody identyfikacji miejsc niebezpiecznych na sieci dróg, Drogownictwo, 4–5:155–63, 2015.

[64] Jamroz K., Metoda zarządzania ryzykiem w inżynierii drogowej, Politechnika Gdańska, 2011.

[65] Jamroz K., Tomczuk P., Mackun T., Chrzanowicz M., i inni, Wytyczne prawidłowego oświetlenia przejść dla pieszych – Raport z przeprowadzonych studiów i analiz, Gdańsk, Warszawa, 2017.

[66] Jamroz K., Tomczuk P., Mackun T., Chrznanowicz M., Wytyczne prawidłowego oświetlenia przejść dla pieszych, Ministerstwo Infrastruktury, Krajowa Rada Bezpieczestwa Ruchu Drogowego, Warszawa, 2017.

[67] Jamroz K., Żukowska J., Problemy i wyzwania w zakresie bezpieczeństwa ruchu drogowego w Nowej Dekadzie, Transport Miejski i Regionalny, 2020.

[68] Jensen MB., Bahnsen CH., Lahrmann HS., Madsen TKO., Moeslund TB., Collecting Traffic Video Data Using Portable Poles: Survey, Proposal, and Analysis, Journal of Transportation Technologies, 8.4: 88175, 2018.

[69] Juhász M., Koren C., Getting an Insight into the Effects of Traffic Calming Measures on Road Safety, Transportation research procedia, 14: 3811-3820, 2016.

[70] Kocourek J., Padělek T., Application of the traffic conflict technique in the Czech Republic. 2016 Smart Cities Symposium Prague (SCSP), IEEE, p. 1-4, 2016.

[71] Koornstra M., Lynam D., Nilsson G., Noordzij P., Pettersson H., Wegman F., i inni, SUNflower: a comparative study of the developments of road safety in Sweden, the United Kingdom, and the Netherlands, Leidschendam: SWOV Institute for Road Safety Research, 2002.

[72] Krav for Vägars och gators utformning - Requirements for road and street design, Sweden, 2012.

[73] Krystek R., Jamroz K., Michalski L., Paczul P., Technika konfliktów ruchowych. 1991.

[74] Kurek A., Macioszek E., Analysis of the impact of the COVID-19 pandemic on road traffic on selected street routes in the city 2021.

[75] Kustra W., Jamroz K., Gobis A., Wachnicka J., Berkowski M., Klasyfikacja ryzyka dla wybranych rodzajów wypadków drogowych na drogach wojewódzkich oraz dla obszarów województw i powiatów w latach 2015 - 2017 wraz przedstawieniem wyników na mapach, 2018.

[76] Ma Z., Shao C., Wang Y., Ma S., Research on regional road safety evaluation based on fuzzy theory, 2nd Int Conf Intell Comput Technol Autom ICICTA 2009.

[77] Mackun T., Ryś A., Tomczuk P., Risk assessment methodologies for pedestrian crossings without traffic lights - Warsaw case study - Pedestrian safety assessment. MATEC Web of Conferences, vol. 122, 2017.

[78] Madsen TKO., Lahrmann H., Comparison of five bicycle facility designs in signalized intersections using traffic conflict studies. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 46: 438-450, 2017.

[79] Montella A., Guida C., Mosca J., Lee J., Abdel-Aty M., Systemic approach to improve safety of urban unsignalized intersections: Development and validation of a Safety Index, Accident Analysis & Prevention, 141: 105523, 2020.

[80] Montella A., Mauriello F., Pedestrian Crosswalks Safety Inspections: Safety Assessment Procedure, 4th International Symposium on Highway Geometric Design, TRB, 2010.

[81] Nałęcz M., Duch W., Sieci neuronowe, Tom 6, 2000.

[82] Nambisan SS., Pulugurtha SS., Vasudevan V., Dangeti MR., Virupaksha V., Effectiveness of Automatic Pedestrian Detection Device and Smart Lighting for Pedestrian Safety. Transportation research record, 2140.1: 27-34, 2009.

[83] Norma AS/NZS 1158.4:2009 Lighting for roads and public spaces. Part 4: Lighting of pedestrian crossings, Nowa Zelandia, Australia, 2009.

[84] Norma DIN 67523-2 1988-04 Beleuchtung von Fußgängerüberwegen (Zeichen 293 StVO) mit Zusatzbeleuchtung, Germany, 1988.

[85] Norma DIN 67523-2 2010-06 Beleuchtung von Fußgängerüberwegen (Zeichen 293 StVO) mit Zusatzbeleuchtung, Germany, 2010.

[86] Norma PN-EN 13201:2016, Oświetlenie dróg Część 1-5.

[87] Olszewski P., Czajewski W., Dąbkowski P., Szagała P., Badanie zachowań uczestników ruchu na przejściach dla pieszych na podstawie analizy obrazu. Budownictwo i architektura, 13.4: 177-184, 2014.

[88] Osowski S., Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym, Warszawa, 1996.

[89] Oya H., Ando K., Kanoshima H., A research on interrelation between illuminance at intersections and reduction in traffic accidents, Journal of Light & Visual Environment, 26.1: 1_29-1_34, 2002.

[90] Patella SM., Sportiello S., Carrese S., Bella F., Asdrubali F., The effect of a LED lighting crosswalk on pedestrian safety: Some experimental results, Safety, 6(2), 20, 2020.

[91] Pau M., Angius S., Do speed bumps really decrease traffic speed? An Italian experience. Accident Analysis & Prevention, 33.5: 585-597, 2001.

[92] Polders E., How to Analyse Accident Causation, A Handbook with Focus on Vulnerable Road Users, Hasselt University, Hasselt, Belgium, 2018.

[93] Raynham P., An examination of the fundamentals of road lighting for pedestrians and drivers, Lighting Research & Technology, vol 36, 2004.

[94] Rea M. S., Bullough J. D., Zhou Y., A method for assessing the visibility benefits of roadway lighting. Lighting Research & Technology, 2010.

[95] Reyad P., Sacchi E., Ibrahim S., Sayed T., Traffic Conflict–Based Before–After Study with Use of Comparison Groups and the Empirical Bayes Method. Transportation Research Record, 2659.1: 15-24, 2017.

[96] Road User Behaviour Analysis - RUBA, https://bitbucket.org/aauvap/ruba/wiki/Home (dostęp: 21.11.2020 r.).

[97] Ross TJ., Fuzzy logic with engineering applications, University, USA: Ltd, 2005.

[98] 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. 1999 nr 43 poz. 430 z późn. zm.

[99] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte, Warszawa, 1997.

[100] Saraiji R., Vertical illuminance based crosswalk illumination, Leukos 6.2: 153-167, 2009.

[101] Saranyadevi S., Murugeswari R., Bathrinath S., Road risk assessment using fuzzy Context-free Grammar based Association Rule Miner, Sādhanā, 2019.

[102] Sha D., Guo Y., Ding Y.. Pedestrian Safety Diagnosis at Signalized Crosswalks Using Traffic Conflict Techniques, CICTP 2016, p. 1811-1823, 2016.

[103] Siddiqui NA., Chu X., Guttenplan M., Crossing Locations, Light Conditions, and Pedestrian Injury Severity, Transportation research record 1982.1: 141-149, 2006.

[104] Singh G., Pal M., Yadav Y., Singla U., Deep neural network-based predictive modeling of road accidents, Neural Computing and Applications, 1-10, 2020.

[105] SLG Guideline (Schweizer Licht Gesellschaft) SLG 202-2016, Switzerland, 2016.

[106] Systemu Ewidencji Wypadków i Kolizji, http://sewik.pl/ (dostęp: 23.04.2020 r.).

[107] Tageldin A., Sayed T., Models to evaluate the severity of pedestrian-vehicle conflicts in five cities. Transportmetrica A: transport science, 15.2: 354-375, 2019.

[108] Technicke Kvalitativni podminky staveb pozamnich komunikaci, Kapitola 15.2: Osvetleni pozemnich komunikaci, Ministerstvo dopravy Odbor pozemních komunikací, Czechy, 2015.

[109] Tomczuk P. , Chrzanowicz M. , Mackun T., Methodology for assessing the lighting of pedestrian crossings based on light intensity parameters, MATEC Web of Conferences, 2017.

[110] Tomczuk P., Czerepicki A., Wytrykowska A., Przykład parametrycznej metody oceny przejść dla pieszych w aspekcie bezpieczeństwa ruchu drogowego, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej - seria Transport nr 92, 2016.

[111] Tomczuk P., Modelowanie, badania eksperymentalne i ocena jakości oświetlenia sylwetki pieszego na przejściu dla pieszych, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej - seria Transport nr 91, 2013.

[112] Tomczuk P., Ocena jakości oświetlenia sylwetki pieszego na przejściu dla pieszych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, 87:101–15, 2012.

[113] Tomczuk P., Ocena stanu oświetlenia wybranych przejść dla pieszych na podstawie parametrów natężenia oświetlenia, Przegląd Elektrotechniczny nr 90, 2014.

[114] Tomczuk P., Wytrykowska A., Analiza czynników wpływających na bezpieczeństwo pieszego na przejściu dla pieszych typu „zebra" niesterowanym sygnalizacją świetlną. Logistyka 4:1077–86, 2015.

[115] Tomczuk P., Wytrykowska A., Analiza zagrożeń w ruchu drogowym na przejściu dla pieszych, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, 205-20, 2016.

[116] Tomczuk P., Wytrykowska A., Jaskowski P., Jastrzębska A.. Ogólne zasady oświetlenia przejść dla pieszych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej - seria Transport nr 114, 2016.

[117] Tomczuk P., Wytrykowska A., Ocena stanu zagrożenia na przejściach dla pieszych, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, 108: 109-121, 2015.

[118] Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych, Dz.U. 1985 nr 14 poz. 60 z późn. zm.

[119] Vaaja M., Maksimainen M., Virtanen J-P., Kukko A., Lehtola V., Hyyppä J., Mobile mapping of night-time road environment lighting conditions, Photogrammetric journal of Finland, 26.1: 1-17, 2018.

[120] Vademecum voetgangersvoorzieningen, Ontwerprichtlijnen voor voetgangersvoorzieningen, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Flandria, 2002.

[121] vegvesen Vegdirektoratet, Statens. Veg-og gateutforming: normal [Håndbok N100], Norway, 2014.

[122] Wang D., He BY., Gao J., Chow JYJ., Ozbay K., Iyer S., Impact of COVID-19 behavioral inertia on reopening strategies for New York City transit, International Journal of Transportation Science and Technology, 10.2: 197-211, 2021.

[123] Wang H., Meng X., Zheng L., Traffic accidents prediction and prominent influencing factors analysis based on fuzzy logic, Journal of transportation systems engineering and information Technology, 2: 015, 2009.

[124] Wanvik PO., Effects of road lighting: An analysis based on Dutch accident statistics 1987-2006, Accident Analysis & Prevention 41.1: 123-128, 2009.

[125] Wytrykowska A., Procedura projektowania oświetlenia przejść dla pieszych, Drogownictwo 12, 2017.

[126] Wytrykowska A., Tomczuk P., Chrzanowicz M., Modelowanie systemu oświetlenia przejść dla pieszych, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, 118, 2017.

[127] Wytrykowska A., Tomczuk P., Chrzanowicz M., Procedura oceny stanu oświetlenia na przejściu dla pieszych, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej - seria Transport, nr 401, 2017.

[128] Wytrykowska A., Tomczuk P., Przegląd metod badań zachowań uczestników ruchu drogowego na przejściach dla pieszych, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, 121:431–9, 2018.

[129] Xu Y., Ye Z., Wang Y., Wang C., Sun C., Evaluating the influence of road lighting on traffic safety at accesses using an artificial neural network, Traffic injury prevention, 19.6: 601-606, 2018.

[130] Yannis G., Kondyli A., Mitzalis N., Effect of lighting on frequency and severity of road accidents, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport, Thomas Telford Ltd, p. 271-281, 2013.

[131] Zalesinska M., Wandachowicz K., On the quality of street lighting in pedestrian crossings. Energies, 14.21: 7349, 2021.

[132] Zarząd Dróg Miejskich, https://zdm.waw.pl (dostęp: 04.05.2020).

[133] Zielinkiewicz A., Wpływ nocnych ograniczeń widoczności na bezpieczeństwo i wybrane parametry ruchu drogowego, 2013.

[134] Ziółkowski R., Badania warstw receptorowych biosensorów zawierających oligonukleotydy, praca doktorska, Politechnika Warszawska, 2013.

[135] Ziółkowski R., Drivers' Speed Behaviour in the Vicinity of Additionally Illuminated Pedestrian Crossings. Transport Problems: an International Scientific Journal, 16.4, 2021.

[136] Ziółkowski R., Speed Profile as a Tool to Estimate Traffic Calming Measures Efficiency, Journal of Civil Engineering and Architecture, 8.12: 1585-1592, 2014.

[137] Żagan W., Podstawy techniki świetlnej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1. Kontrast luminancji sylwetki pieszego z tłem 14
Rys. 1.2. Symetryczna krzywa światłości oprawy oświetlenia ulicznego 15
Rys. 1.3. Przykłady oświetlenia przejść dla pieszych za pomocą opraw oświetlenia ulicznego 15
Rys. 1.4. Przykład oświetlenia przejścia dla pieszych wyłącznie za pomocą oświetlenia ulicznego z użyciem dodatkowej oprawy na wysięgniku typu Y 16
Rys. 1.5. Przykładowe asymetryczne krzywe światłości opraw dedykowanych do oświetlenia przejść dla pieszych (optyka lewa i prawa) 17
Rys. 1.6. Przykład oświetlenia przejścia dla pieszych za pomocą opraw dedykowanych 17
Rys. 1.7. Płaszczyzny pomiarowe natężenia oświetlenia 18
Rys. 1.8. Przykładowe siatki pomiarowe dla płaszczyzny poziomej i pionowej (rysunek po lewej stronie: płaszczyzna pionowa, po prawej stronie – płaszczyzna pozioma) 19
Rys. 1.9. Podstawowe wymiary oraz widok obiektu zastosowanego w badaniach 22
Rys. 1.10. Lokalizacja obiektów testowych na przejściu dla pieszych 23
Rys. 1.11. Geometria pomiaru luminancji 23
Rys. 1.12. Skala ocen poziomu widoczności w metodzie STV 24
Rys. 1.13. Koncentracja wypadków drogowych w miejscach szczególnie niebezpiecznych w Warszawie 26
Rys. 1.14. Przykład klasyfikacji odcinków pod kątem ryzyka na przykładzie Słowenii 26
Rys. 1.15. Klasyfikacja odcinków ze względu na koncentrację wypadków oraz bezpieczeństwo sieci dróg krajowych w Polsce 27
Rys. 1.16. Przykładowy schemat konfliktu ruchowego na przejściu dla pieszych 28
Rys. 1.17. Lokalizacja ponad ponad 4000 przejść dla pieszych objętych audytem BRD i oświetlenia w 2020 roku 33
Rys. 1.18. Lista czynników wpływających na bezpieczeństwo przejść dla pieszych i ich wagi punktowe wg Włoskiej procedury oceny BRD 34
Rys. 1.19. Metodologia przeprowadzania badań wpływu dodatkowego oświetlenia linii P-10 na zachowania kierowców zaproponowana przez Włoskich naukowców 38
Rys. 1.20. Liczba ofiar śmiertelnych wypadków drogowych w krajach Unii Europejskiej 39
Rys. 1.21. Liczba ofiar śmiertelnych wśród pieszych w krajach Unii Europejskiej w 2018 roku 40

Rys. 1.22. Liczba wypadków drogowych z udziałem pieszych w stosunku do ogólnej liczby wypadków w latach 2015 – 2020 41
Rys. 1.23. Liczba ofiar śmiertelnych wśród pieszych na przejściach dla pieszych w Polsce w latach 2015 – 2020 41
Rys. 1.24. Liczba ofiar śmiertelnych na przejściach dla pieszych w porze dziennej i w porze o ograniczonej widoczności w latach 2015 - 2020 42
Rys. 1.25. Przykładowa analiza godzin wschodu i zachodu słońca w ciągu roku dla m. st. Warszawa z uwzględnieniem orientacyjnych godzin szczytu porannego i popołudniowego 43
Rys. 1.26. Miesięczny rozkład liczby wypadków drogowych z uwzględnieniem pory doby w Warszawie w 2019 roku 43
Rys. 4.1. Wygląd interfejsu programu LMK 2000 56
Rys. 4.2. Wygląd interfejsu oprogramowania do analizy obrazu wideo RUBA 1.3.0 57
Rys. 4.3. Pomiar prędkości za pomocą radaru Sierzega - Vehicle Traffic Counter SR4 58
Rys. 4.4. Wygląd programu Sierzega 58
Rys. 4.5. Rozkład przejść dla pieszych przypisanych do poszczególnych klasa oświetleniowych (typ A). Wykres po lewej stronie – płaszczyzna pozioma – klasy C, po prawej stronie – płaszczyzna pionowa – klasy EV. 62
Rys. 4.6. Rozkład kontrastu w oparciu o przedziały przedstawione w tabeli 4.3. 62
Rys. 4.7. Rozkład prędkości w oparciu o przedziały przedstawione w tabeli 4.4. 64
Rys. 4.8. Rozkład natężenia oświetlenia w poszczególnych klasach oświetleniowych w płaszczyźnie poziomej oraz płaszczyźnie pionowej (typ B). 65
Rys. 4.9. Rozkład kontrastu w oparciu o przedziały przedstawione w tabeli 4.3. 66
Rys. 4.10. Rozkład prędkości w oparciu o przedziały przedstawione w tabeli 4.4. 67
Rys. 4.11. Rozkład prędkości w oparciu o przedziały przedstawione w tabeli 4.4. 68
Rys. 4.12. Wykres rozrzutu danych pomiędzy natężeniem oświetlenia w płaszczyźnie pionowej a kontrastem sylwetki pieszego 74
Rys. 4.13. Wykres rozrzutu danych pomiędzy natężeniem oświetlenia w płaszczyźnie pionowej a prędkością pojazdów 74
Rys. 4.14. Wykres rozrzutu danych pomiędzy natężeniem oświetlenia w płaszczyźnie pionowej a liczbą konfliktów ruchowych 75
Rys. 4.15. Wykres rozrzutu danych pomiędzy kontrastem sylwetki pieszego a prędkością pojazdów 75

Rys. 4.16. Wykres rozrzutu danych pomiędzy kontrastem sylwetki pieszego a prędkością pojazdów 76
Rys. 4.17. Wykres rozrzutu danych pomiędzy prędkością pojazdów a liczbą konfliktów ruchowych 76
Rys. 4.18. Liczba audytowanych przejść dla pieszych na drogach zarządzanych przez Zarząd Dróg Miejskich 78
Rys. 4.19. Procentowy udział liczby przejść dla pieszych w zależności od zastosowanego typu oświetlenia 79
Rys. 4.20. Średnie natężenie oświetlenia w płaszczyźnie poziomej w zależności zastosowanego rodzaju oświetlenia 80
Rys. 4.21. Procentowy rozkład liczby przejść dla pieszych w poszczególnych klasach oświetleniowych w zależności od zastosowanego oświetlenia 80
Rys. 4.22. Procentowy rozkład liczby przejść dla pieszych w zależności od równomierności rozkładu oświetlenia 81
Rys. 4.23. Średnie natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej w zależności zastosowanego rodzaju oświetlenia 82
Rys. 4.24. Procentowy rozkład liczby przejść dla pieszych w poszczególnych klasach oświetleniowych w zależności od zastosowanego typu oświetlenia 82
Rys. 4.25. Lokalizacja tła sylwetki pieszego względem płaszczyzny pionowej oraz poziomej na przejściu dla pieszych 84
Rys. 4.26. Rozkład luminancji jezdni na przejściach dla pieszych w Warszawie 85
Rys. 4.27. Rozkład luminancji jezdni na przejściach dla pieszych w Warszawie w poszczególnych klasach oświetlenia M 86
Rys. 4.28. Rozkład luminancji sylwetki pieszego na przejściach dla pieszych w Warszawie 87
Rys. 4.29. Rozkład kontrastu luminancji sylwetki pieszego na przejściach dla pieszych w Warszawie 88
Rys. 4.30. Rozkład częstości występowania kontrastu sylwetki pieszego w poszczególnych przedziałach w zależności od rodzaju zastosowanego oświetlenia 89
Rys. 5.1. Schemat modelu oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych zrealizowany w programie Matlab – Simulink 91
Rys. 5.2. Schemat zasad określenia liczby konfliktów ruchowych za pomocą logiki rozmytej 92
Rys. 5.3. Proces wnioskowania rozmytego wg modelu Mamdaniego 93
Rys. 5.4. Kształt przyjętej funkcji przynależności dla danych wejściowych 94

Rys. 5.5. Kształt przyjętej funkcji przynależności dla danych wejściowych 95
Rys. 5.6. Przedziały zmienności danych wejściowych parametru natężenia oświetlenia w płaszczyźnie pionowej E_v 96
Rys. 5.7. Przedziały zmienności danych wejściowych parametru kontrast C 97
Rys. 5.8. Przedziały zmienności danych wejściowych parametru prędkość średnia pojazdów $v_{śr}$ 98
Rys. 5.9. Przykładowe reguły zdefiniowane w programie Fuzzy Logic Toolbox 99
Rys. 5.10. Przedziały zmienności danych wyjściowych parametru liczba konfliktów ruchowych LC 101
Rys. 5.11. Widok działania reguł za pomocą okna dialogowego „Rule Viewer" w programie Matlab 102
Rys. 5.12. Powierzchnia wynikową zaprojektowanego układu w programie Matlab 103
Rys. 5.13. Etapy postępowania przy ocenie skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych z wykorzystaniem zaproponowanej metody 104
Rys. 5.14. Rozkład częstości występowania wskaźnika liczby konfliktów ruchowych w określonych przedziałach 104
Rys. 5.15. Procedura doboru luminancji obiektu na podstawie liczby konfliktów ruchowych z wykorzystaniem zaproponowanej metody oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych 105
Rys. 5.16. Wpływ luminancji obiektu na liczbę konfliktów ruchowych dla prędkości średniej pojazdów $v_{śr}$=30 km/h 106
Rys. 5.17. Wpływ luminancji obiektu na liczbę konfliktów ruchowych dla prędkości średniej pojazdów $v_{śr}$=50 km/h 107
Rys. 5.18. Wpływ luminancji obiektu na liczbę konfliktów ruchowych dla prędkości średniej pojazdów $v_{śr}$=70 km/h 107

SPIS TABEL

Tabela 1.1. Klasy oświetlenia w płaszczyźnie poziomej E_h na przejściu dla pieszych i ich wartości punktowe 20
Tabela 1.2. Klasy oświetlenia w płaszczyźnie pionowej E_v na przejściu dla pieszych i ich wartości punktowe 20
Tabela 4.1. Opis przejść dla pieszych wytypowanych do badań 52
Tabela 4.2. Zestawienie wyników badań dla przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw ulicznych (typ A) 60
Tabela 4.3. Przedziały występowania kontrastu sylwetki pieszego z tłem 62
Tabela 4.4. Klasyfikacja prędkości pojazdów ze względu na bezpieczeństwo pieszych 64
Tabela 4.5. Zestawienie wyników badań dla przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą dodatkowych opraw na wysięgniku (typ B) 69
Tabela 4.6. Zestawienie wyników badań dla przejść dla pieszych oświetlonych za pomocą opraw dedykowanych (typ C) 71
Tabela 4.7. Zestawienie wartości współczynnika korelacji dla danych relacji wraz z ich interpretacją 73
Tabela 4.8. Najczęściej występujące oceny w zależności od rodzaju przejścia dla pieszych.. 83
Tabela 4.9. Obliczenie współczynnika luminancji 84
Tabela 4.10. Minimalne wartości luminancji przy zastosowaniu klasy oświetleniowej M. 86
Tabela 4.11. Zestawienie podstawowych statystyk dla obliczonych wartości kontrastu sylwetki pieszego na tle jezdni dla różnych rodzajów zastosowanego oświetlenia 88
Tabela 5.1. Przyjęte zakresy zmienności i parametry funkcji przynależności zmiennej lingwistycznej natężenie oświetlenia w płaszczyźnie pionowej 96
Tabela 5.2. Przyjęte zakresy zmienności i parametry funkcji przynależności zmiennej lingwistycznej kontrast 97
Tabela 5.3. Przyjęte zakresy zmienności i parametry funkcji przynależności zmiennej lingwistycznej prędkość średnia pojazdów $v_{śr}$ 98
Tabela 5.4. Przyjęte zakresy zmienności i parametry funkcji przynależności danych wyjściowych liczby konfliktów ruchowych LC 102
Tabela 5.5. Interpretacja danych wyjściowych w kontekście oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych 105
Tabela 5.6. Wyniki oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych otrzymane na podstawie danych symulacyjnych w wyniku weryfikacji zaproponowanej 110

Tabela 5.7. Zestawienie wartości współczynnika korelacji dla danych relacji wraz z ich interpretacją 114
Tabela 5.8. Wyniki oceny skuteczności dedykowanych rozwiązań oświetleniowych otrzymane na podstawie danych symulacyjnych w wyniku walidacji metody 116