



Imię i nazwisko autora rozprawy: Anna Gobis

Dyscyplina naukowa: Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Metoda szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej

Tytuł rozprawy w języku angielskim: The life cycle costs estimation method of selected road infrastructure elements

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

Gdańsk, rok 2025

OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: Anna Gobis

Ja, niżej podpisany(a), oświadczam, iż jestem świadomy(a), że zgodnie z przepisem art. 27 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2021 poz. 1062), uczelnia może korzystać z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej: „Metoda szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej” do prowadzenia badań naukowych lub w celach dydaktycznych.¹

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

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem dr hab. inż. Kazimierz Jamroz.

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

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

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

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

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

**niepotrzebne usunąć*

¹ Art. 27. 1. Instytucje oświatowe oraz podmioty, o których mowa w art. 7 ust. 1 pkt 1, 2 i 4–8 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, mogą na potrzeby zilustrowania treści przekazywanych w celach dydaktycznych lub w celu prowadzenia działalności naukowej korzystać z rozpowszechnionych utworów w oryginale i w tłumaczeniu oraz zwielokrotniać w tym celu rozpowszechnione drobne utwory lub fragmenty większych utworów.

2. W przypadku publicznego udostępniania utworów w taki sposób, aby każdy mógł mieć do nich dostęp w miejscu i czasie przez siebie wybranym korzystanie, o którym mowa w ust. 1, jest dozwolone wyłącznie dla ograniczonego kręgu osób uczących się, nauczających lub prowadzących badania naukowe, zidentyfikowanych przez podmioty wymienione w ust. 1.

OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy doktorskiej: Anna Gobis

Tytuł rozprawy doktorskiej w języku polskim: Metoda szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej.

Tytuł rozprawy w języku angielskim: The life cycle costs estimation method of selected road infrastructure elements.

Język rozprawy doktorskiej: polski

Promotor rozprawy doktorskiej: Kazimierz Jamroz

~~**Drugi promotor rozprawy doktorskiej*:**~~

~~**Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej*:**~~

~~**Kopromotor rozprawy doktorskiej*:**~~

Data obrony:

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku polskim: szacowanie kosztów, cykl życia, koszty cyklu życia, metody szacowania kosztów, wariantowanie tras drogowych, bariery drogowe, drogi dla pieszych i rowerów, straty użytkowników dróg, modele matematyczne

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku angielskim: cost estimation, life cycle, life cycle costs (LCC), cost estimation methods, road alignment alternatives, road safety barriers, pedestrian and bicycle paths, road user costs, mathematical models

Streszczenie rozprawy w języku polskim:

Metody szacowania kosztów cyklu życia (LCC) rozwijane w ramach koncepcji myślenia w cyklu życia stanowią kluczowy element zrównoważonego rozwoju infrastruktury drogowej. Jednak w Polsce, poza obiektami mostowymi brakuje odpowiednich narzędzi i metod LCC umożliwiających ocenę infrastruktury drogowej.

Celem pracy doktorskiej było opracowanie metody szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury dróg krajowych i wojewódzkich, która może być stosowana w zarządzaniu infrastrukturą drogową w Polsce.

Na podstawie studiów literatury i badań wstępnych zidentyfikowano problemy, luki badawcze oraz sformułowano cele i metodykę realizacji pracy. Korzystając z wyników przeprowadzonych badań terenowych, symulacyjnych oraz dokumentacyjnych zidentyfikowano czynniki wpływające na koszty wybranych elementów infrastruktury drogowej. Dane te umożliwiły opracowanie modeli matematycznych kosztów stałych, utrzymania, użytkowników dróg oraz przeprowadzenie analizy wpływu istotnych czynników na ich zmienność.

Uzyskane wyniki prac studialnych i analitycznych umożliwiły opracowanie propozycji metod LCC:

- tras drogowych na drogach krajowych,
- drogowych barier ochronnych na drogach krajowych,
- urządzeń dla pieszych i rowerzystów na drogach wojewódzkich.

W podsumowaniu przedstawiono rekomendacje ich stosowania na różnych poziomach szczegółowości oraz wskazano kierunki dalszych prac.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim:

Life cycle cost (LCC) estimation methods developed within the concept of life cycle thinking are a key element of sustainable road infrastructure development. However, apart from bridge structures in Poland, there is a lack of appropriate LCC tools and methods for assessing road infrastructure.

The doctoral thesis aimed to develop a method for estimating the life cycle costs of selected elements of national and provincial road infrastructure that can be used in road infrastructure management in Poland.

Based on literature studies and preliminary research, problems and research gaps were identified, and the objectives and methodology for the thesis were formulated. Conducting field, simulation and documentary research identified factors influencing the costs of selected road infrastructure elements. These data enabled the development of mathematical models of fixed, maintenance, and road user costs, as well as an analysis of the impact of relevant factors on their variability.

The results of the study and analytical work enabled the development of proposals for LCC methods:

- Road alignment alternatives,
- Road safety barrier on national roads,
- Pedestrian and bicycle paths on provincial roads.

The summary presents recommendations for their application at various levels of detail and indicates directions for further work.

Streszczenie rozprawy w języku, w którym została napisana:** <streszczenie, maksymalnie 1400 znaków ze spacjami>

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku, w którym została napisana:** <słowa kluczowe>

** niepotrzebne skreślić*

*** dotyczy rozpraw doktorskich napisanych w innych językach, niż polski lub angielski*

Spis treści

1.	WPROWADZENIE	1
1.1.	Charakterystyka problemu	1
1.2.	Geneza pracy	2
1.3.	Cel główny i zakres pracy	2
2.	SYNTEZA STUDIÓW LITERATURY	4
2.1.	Infrastruktura drogowa	4
2.1.1.	System transportu drogowego	4
2.1.2.	Infrastruktura drogowa	5
2.2.	Ocena funkcjonowania infrastruktury drogowej	9
2.2.1.	Podstawy teoretyczne metod oceny funkcjonowania infrastruktury drogowej	9
2.2.2.	Planowanie i zarządzanie infrastrukturą w cyklu życia	16
2.2.3.	Metody analizy, oceny wyboru projektów infrastruktury drogowej	18
2.3.	Metody szacowania kosztów cyklu życia	23
2.3.1.	Definicje metody szacowania kosztów cyklu życia (LCC)	23
2.3.2.	Metody szacowania kosztów cyklu życia elementów infrastruktury drogowej	24
2.3.3.	Regulacje prawne w zakresie stosowania metod szacowania kosztów cyklu życia	27
2.3.4.	Metodyka opracowania metody szacowania kosztów cyklu życia	28
2.4.	Modele składowych kosztów cyklu życia infrastruktury drogowej	34
2.4.1.	Wprowadzenie	34
2.4.2.	Modele kosztów inwestycyjnych	35
2.4.3.	Modele trwałości	36
2.4.4.	Modele częstości i liczby zdarzeń drogowych	38
2.4.5.	Modele kosztów użytkowników dróg	41
2.4.6.	Modele kosztów środowiskowych	45
2.4.7.	Czynniki wpływające na koszty cyklu życia elementów infrastruktury drogowej	46
2.5.	Podsumowanie syntezy studiów literatury	49
3.	CELE I METODYKA PRACY	52
3.1.	Cele pracy	52
3.2.	Metodyka i zakres pracy	53
4.	KONCEPCJA METODY SZACOWANIA KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA	55
4.1.	Wprowadzenie	55
4.2.	Założenia	56
4.2.1.	Elementy infrastruktury drogowej	56
4.2.2.	Czas cyklu życia	57

4.2.3.	Składowe kosztów w cyklu życia drogi	58
4.3.	Metodyka szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej	59
4.4.	Opis matematyczny składowych kosztów	61
4.4.1.	Koszty inwestycyjne.....	63
4.4.2.	Koszty utrzymania	64
4.4.3.	Koszty użytkowników	65
4.4.4.	Koszty środowiskowe	65
4.4.5.	Koszty pozostałe.....	65
5.	METODYKA PROWADZENIA BADAŃ	66
5.1.	Metody badań	66
5.2.	Badania terenowe	67
5.2.1.	Wprowadzenie	67
5.2.2.	Poligony badawcze na drogach krajowych i drogach wojewódzkich	67
5.2.3.	Metody zbierania i strukturyzacji danych	69
5.2.4.	Bazy danych dróg krajowych.....	70
5.2.5.	Bazy danych dróg wojewódzkich.....	75
5.3.	Badania symulacyjne.....	78
5.4.	Badania dokumentacyjne	79
6.	ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ	81
6.1.	Wprowadzenie	81
6.2.	Charakterystyka badanych odcinków dróg krajowych.....	82
6.2.1.	Geometria dróg	82
6.2.2.	Ruch drogowy	83
6.2.3.	Bezpieczeństwo ruchu na sieci dróg krajowych	84
6.2.4.	Charakterystyka i analiza stosowanych barier na odcinkach dróg	86
6.3.	Charakterystyka badanych odcinków dróg wojewódzkich	91
6.3.1.	Geometria dróg	91
6.3.2.	Natężenie ruchu pojazdów i pieszych	93
6.3.3.	Bezpieczeństwo ruchu na sieci dróg	95
6.3.4.	Infrastruktura dla niechronionych uczestników ruchu.....	96
6.4.	Analiza wyników badań symulacyjnych.....	97
6.5.	Analiza danych kosztowo-ekonomicznych	99
6.5.1.	Koszty wariantowania tras	99
6.5.2.	Koszty barier ochronnych	101
6.5.3.	Koszty infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu drogowego	108
7.	MODELOWANIE SKŁADOWYCH KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA WYBRANYCH ELEMENTÓW INFRASTRUKTURY DROGOWEJ	110

7.1.	Wprowadzenie	110
7.2.	Metodyka budowy modeli składowych kosztów cyklu życia	111
7.2.1.	Definiowanie celu	111
7.2.2.	Dobór zmiennych niezależnych	111
7.2.3.	Dobór kształtu funkcji aproksymującej	112
7.2.4.	Walidacja i weryfikacja modeli	113
7.3.	Modelowanie kosztów wariantów lokalizacyjnych trasy drogowej	115
7.3.1.	Wprowadzenie	115
7.3.2.	Prace wstępne	115
7.3.3.	Modele kosztów inwestycyjnych	117
7.3.4.	Podsumowanie i dyskusja wyników	120
7.4.	Modelowanie kosztów barier drogowych	121
7.4.1.	Wprowadzenie	121
7.4.2.	Modelowanie kosztów budowy	122
7.4.3.	Modelowanie kosztów napraw	132
7.4.4.	Modelowanie kosztów użytkowników	137
7.4.5.	Podsumowanie i dyskusja wyników	154
7.5.	Modelowanie kosztów infrastruktury niechronionych użytkowników dróg	156
7.5.1.	Wprowadzenie	156
7.5.2.	Modelowanie kosztów budowy i naprawy	156
7.5.3.	Modelowanie kosztów użytkowników dróg	157
7.5.4.	Podsumowanie i dyskusja wniosków	172
7.6.	Podsumowanie	173
8.	BADANIA WPŁYWU WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA ZMIANY KOSZTÓW	175
8.1.	Metodyka badań wpływu czynników	175
8.2.	Analiza wpływu wybranych czynników na koszty wariantowania tras dróg	176
8.3.	Analiza wpływu wybranych czynników na składowe koszty barier ochronnych	177
8.3.1.	Koszty budowy barier	177
8.3.2.	Koszty naprawy barier	178
8.3.3.	Koszty zdarzeń barier	179
8.4.	Analiza wpływu wybranych czynników na składowe koszty infrastruktury niechronionych użytkowników drogi	182
8.4.1.	Koszty dróg dla pieszych	182
8.4.2.	Koszty dróg dla pieszych i rowerów	187
9.	METODY SZACOWANIA KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA	191
9.1.	Wprowadzenie	191
9.1.1.	Wstęp	191

9.1.2.	Metodyka prowadzenia analiz	191
9.1.3.	Podstawowy model obliczeniowy kosztów cyklu życia.....	192
9.2.	Metoda szacowania kosztów wariantów lokalizacyjnych trasy drogowej.....	194
9.2.1.	Wprowadzenie	194
9.2.2.	Struktura metody	195
9.2.3.	Metoda uproszczona szacowania kosztów trasy drogowej na etapie wstępnego wyboru wariantów.....	195
9.3.	Metoda uproszczona szacowania kosztów cyklu życia drogowych barier ochronnych na etapie wczesnego wyboru.....	195
9.4.	Metoda podstawowa szacowania kosztów cyklu życia drogowych barier ochronnych na trasie drogowej.....	197
9.4.1.	Założenia i niezbędne dane.....	197
9.4.2.	Procedura szacowania kosztów	198
9.4.3.	Identyfikacja obiektu i przygotowanie danych	200
9.4.4.	Dobór wariantu modelu szacowania kosztów.	200
9.4.5.	Szacowanie kosztów stałych	203
9.4.6.	Szacowanie kosztów zmiennych	206
9.5.	Metoda szacowania kosztów cyklu życia infrastruktury dla niechronionych użytkowników dróg wojewódzkich	222
9.5.1.	Założenia i dane	222
9.5.2.	Procedura szacowania kosztów	222
9.5.3.	Identyfikacja obiektu i przygotowanie danych	222
9.5.4.	Struktura metody	223
9.5.5.	Szacowanie kosztów stałych	223
9.5.6.	Szacowanie kosztów zmiennych	224
10.	PODSUMOWANIE PRACY	230
10.1.	Wnioski	230
10.2.	Propozycje wykorzystania wyników badań	233
10.3.	Kierunki dalszych prac.....	234
	BIBLIOGRAFIA.....	235
	SPIS RYSUNKÓW	248
	SPIS TABEL	251
	WYKAZ PODSTAWOWYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ	253

1. WPROWADZENIE

1.1. Charakterystyka problemu

Transport drogowy umożliwia realizację większości podróży osób oraz przewozu towarów i tym samym odgrywa szczególną rolę w rozwoju gospodarczym państw oraz wpływa na jakość życia społeczeństw. Podstawowym elementem systemu transportowego drogowego umożliwiającym przemieszczanie się środków transportu jest infrastruktura drogowa, której stawia się wiele wymagań związanych z niezawodnością, bezpieczeństwem, ekologią i efektywnością ekonomiczną. Spełnienie stawianych wymagań zmusza zarządzających drogami do trafnej oceny stanu oraz skutecznego i racjonalnego zarządzania infrastrukturą drogową oraz jej elementami zgodnie z ideą zrównoważonego rozwoju. Komponent ekonomiczny obok wpływu inwestycji drogowej na środowisko przyrodnicze oraz na otoczenie społeczne stanowi podstawowy filar idei zrównoważonego rozwoju [230].

Obecnie na etapie planowania i projektowania inwestycji drogowych i ich elementów stosuje się podejście tradycyjne, które bierze pod uwagę tylko koszty początkowe (tj. koszty budowy drogi) a nie uwzględnia wymagań i kosztów związanych z późniejszym utrzymaniem infrastruktury drogowej i jej elementów. Ponadto chroniczne niedofinansowanie, brak narzędzi ułatwiających zarządzanie i utrzymanie infrastruktury drogowej mogą bardzo szybko zaprzepaścić duży kapitał zgromadzony w infrastrukturze, która była budowana w ciągu ostatnich dziesięcioleci. Utrzymujące się na przestrzeni kilkudziesięciu lat niedoinwestowanie w infrastrukturę doprowadziło do powstania ogromnych zaległości wymagających uruchomienia na całym świecie funduszu naprawczego [84]. W związku z tymi wyzwaniami istotne staje się uwzględnianie kosztów cyklu życia projektowanej trasy drogowej przy wyborze optymalnego wariantu lokalizacyjnego na etapie planowania drogi oraz stosowanie planów zarządzania infrastrukturą drogową, które uwzględniają koszty cyklu życia obiektów drogowych. Uwzględnianie pełnego cyklu życia, od planowania przez budowę, eksploatację, aż po likwidację obiektów, jest zalecanym podejściem, które może prowadzić do znacznych oszczędności [18].

W obliczu rosnącej potrzeby oszczędności oraz zwiększenia efektywności, poszukuje się narzędzi, metod szacowania kosztów pozwalających na bardziej kompleksowe podejście do planowania i zarządzania infrastrukturą drogową. Analizowanie kosztów infrastruktury drogowej w kontekście cyklu życia umożliwia identyfikację składowych kosztów cyklu życia na wszystkich jej etapach funkcjonowania i może prowadzić do bardziej optymalnego zarządzania zasobami finansowymi. Wyniki podjętych decyzji na poziomie strategicznym i taktycznym istotnie wpływają na funkcjonalność, skuteczność oraz koszty elementów infrastruktury drogowej. Niestety, w praktyce decyzje takie są podejmowane przy ograniczonym dostępie do informacji oraz przy braku odpowiednich metod i narzędzi wspierających proces podejmowania decyzji optymalizujących koszty i minimalizujących ryzyko [85], [204].

Jednym z kluczowych narzędzi w ramach nowoczesnych metod zarządzania wartością jest metoda szacowania kosztów życia obiektu (LCC, Life Cycle Cost) umożliwiająca szacowanie kosztów związanych z: planowaniem, projektowaniem, budową, eksploatacją (użytkowaniem i utrzymaniem) oraz likwidacją drogi lub jej elementów. W podejściu tym uwzględnić można nie tylko koszty ponoszone przez zarządcę drogi, lecz także straty, jakie mogą ponieść użytkownicy np. z powodu utrudnień w ruchu, wydłużenia czasu podróży czy zwiększonego ryzyka wypadków, a także koszty wpływów środowiskowych.

1.2. Geneza pracy

Zainteresowanie tematyką szacowania kosztów cyklu życia infrastruktury drogowej rozpoczęło się od mojego udziału w projektach badawczych dotyczących funkcjonalności urządzeń brd – RID 3A RoSE [199] i RID 3B LifeRoSE [198]. W odpowiedzi na potrzebę poprawy skuteczności i efektywności zarządzania urządzeniami bezpieczeństwa ruchu drogowego, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) oraz Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) zainicjowały w 2016 roku wspólne przedsięwzięcie badawcze pod nazwą „Rozwój Innowacji Drogowych”, które zakończono w 2019 roku. W jego ramach zrealizowano dwa projekty badawcze: RID 3A pt. „Urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego (RoSE)” [199] oraz RID 3B pt. „Wpływ czasu i warunków eksploatacyjnych na trwałość i funkcjonalność urządzeń brd (LifeRoSE)” [198]. Celem projektów było opracowanie kompleksowych metod, zaleceń oraz wytycznych związanych z doбором urządzeń brd oraz zarządzaniem infrastrukturą brd z uwzględnieniem ich cyklu życia. Jednym z opracowanych wówczas narzędzi była metoda szacowania kosztów cyklu życia barier drogowych, w której opracowaniu uczestniczyłam.

Po zakończeniu tych projektów brałam udział w dyskusjach na temat potrzeb wdrażania nowych narzędzi do zarządzania aktywami drogowymi. Ponadto udział w konferencjach naukowych, staż badawczy w ZDW w Olsztynie oraz przeprowadzone rozmowy z zarządcami dróg umożliwiły identyfikację wyzwań związanych z planowaniem i utrzymaniem aktywów drogowych. Do głównych problemów wskazywanych przez zarządców dróg należą: ograniczone zasoby finansowe i kadrowe, rosnące wymagania stawiane infrastrukturze drogowej oraz brak narzędzi ułatwiających podejmowanie decyzji związanych z racjonalnym i efektywnym planowaniem, projektowaniem oraz utrzymaniem infrastruktury drogowej.

Ponadto wdrażanie zaleceń ONZ dotyczących wdrażania celów zrównoważonego rozwoju oraz Dyrektywy 2014/24/UE, która umożliwia stosowanie rachunku kosztów cyklu życia (LCC) jako podstawy oceny ofert w zamówieniach publicznych oraz udział w projekcie badawczym RIDII 2C INROAD-WAP [197] pozwoliły na kontynuację badań rozpoczętych w poprzednich projektach badawczych. Celem realizowanego w latach 2023–2025 projektu RIDII 2C pt.: „Wzorcowe metody oceny inwestycji drogowej na etapie STEŚ uwzględniające zasady zrównoważonego rozwoju w całym cyklu życia drogi” [197] było opracowanie metodyki wyboru wariantów inwestycyjnych i ich elementów z uwzględnieniem cyklu życia oraz usystematyzowanie przeprowadzania wielokryterialnej analizy porównawczej. Wybrane elementy moich badań aplikowano w zaproponowanych metodach oceny wariantów projektowanych tras drogowych.

Zgromadzone doświadczenia, w tym udział w projektach badawczych RoSE i LifeROSE stanowiły podstawę do rozpoczęcia prac nad niniejszą dysertacją, a udział w projekcie INROAD-WAP na wdrożenie wybranych wyników tych prac.

1.3. Cel główny i zakres pracy

Podstawowym celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest opracowanie metody szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej z uwzględnieniem specyfiki dróg krajowych oraz wojewódzkich, a także opracowanie niezbędnymi matematycznych modeli opisujących główne składowe tych kosztów. Realizację tych celów umożliwiły następujące analizy oraz badania:

1. Przegląd i synteza studiów literatury w zakresie wymagań stawianych infrastrukturze drogowej, w tym podstaw teoretycznych oraz metod analizy oraz ceny funkcjonowania infrastruktury drogowej. Analiza ta została wzbogacona o analizę stosowanych metod szacowania kosztów cyklu życia oraz regulacji prawnych związanych z jej stosowaniem. Badania te umożliwiły opracowanie bazy wiedzy oraz wskazanie luk badawczych.
2. Badania terenowe związane ze zbieraniem oraz obróbką danych dotyczących funkcjonowania wybranych elementów infrastruktury drogowej na wybranych drogach krajowych oraz wojewódzkich w celu identyfikacji czynników wpływających na składowe koszty cyklu życia.
3. Analiza wyników badań symulacyjnych umożliwiających identyfikację czynników wpływających na koszty zdarzeń z drogowymi barierami ochronnymi.
4. Badania dokumentacyjne polegających na analizie dokumentacji projektowych, pozyskiwaniu informacji kosztowych od producentów oraz z baz cenowych dotyczących kosztów wybranych elementów infrastruktury drogowej.

Efektem przeprowadzonych prac była identyfikacja czynników wpływających na koszty cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej. Krok ten pozwolił na opracowanie matematycznych modeli składowych kosztów: wariantów tras, barier ochronnych oraz infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu drogowego, na podstawie których opracowano metodę szacowania kosztów cyklu życia.

Struktura opracowanej rozprawy doktorskiej obejmuje 10 rozdziałów:

- rozdział 1 – zawiera wprowadzenie do pracy, w tym charakterystykę problemu, genezę powstania rozprawy, jej cel główny oraz zakres prowadzonych prac,
- rozdział 2 – przedstawia przegląd i analizę literatury, które umożliwiły pogłębienie wiedzy w zakresie podjętej tematyki oraz identyfikacji luki badawczej,
- rozdział 3 – obejmuje sformułowanie celów naukowych oraz praktycznych pracy, a także opis zastosowanej metodyki i jej zakresu,
- rozdział 4 – zawiera ogólną koncepcję metody szacowania kosztów cyklu życia infrastruktury drogowej, w której przedstawiono przyjęte założenia oraz opis jej składowych kosztów,
- rozdział 5 – przedstawia metodykę prowadzenia badań, w tym opis wykonanych badań terenowych, symulacyjnych oraz dokumentacyjnych,
- rozdział 6 – przedstawia wyniki analiz prowadzonych badań w tym charakterystykę badanych odcinków dróg krajowych, wojewódzkich oraz wyniki badań symulacyjnych, a także analizę danych kosztowo-ekonomicznych,
- rozdział 7 – zawiera opracowane modele kosztów: wariantów lokalizacyjnych tras, barier drogowych, infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu drogowego,
- rozdział 8 – przedstawia wyniki badań wpływu wybranych czynników modeli składowych kosztów opracowanych w rozdziale 7,
- rozdział 9 – ukazuje opracowane metody szacowania kosztów cyklu życia z uwzględnieniem wyników uzyskanych w poprzednich etapach pracy,
- rozdział 10 – zawiera wnioski końcowe i rekomendacje związane z prowadzeniem badań oraz kierunki dalszych prac.

2. SYNTEZA STUDIÓW LITERATURY

2.1. Infrastruktura drogowa

2.1.1. System transportu drogowego

Transport drogowy pełni znaczącą rolę w zaspokajaniu potrzeb transportowych mieszkańców oraz w rozwoju gospodarczym obszarów (państwa, regionu, miasta). Spośród wszystkich gałęzi transportu charakteryzuje się on największą dostępnością, elastycznością i zasięgiem. Dzięki swojej elastyczności umożliwia on swobodny wybór tras oraz czas przejazdu dostosowanych do indywidualnych wymagań uczestników ruchu. Dodatkowo w porównaniu z innymi rodzajami transportu np. transportem szynowym, wymaga on znacznie mniejszych nakładów inwestycyjnych. Przykładowo koszt budowy dwupasowej jezdni drogi jest tańszy niż wybudowanie drogi kolejowej o takiej samej długości [2].

Niskie koszty związane z transportem samochodowym, duża dostępność usług oraz ich elastyczność sprawia, że jest on najczęściej wybieranym rodzajem transportu. O czym świadczyć może fakt, że w Unii Europejskiej w roku 2018 przetransportowano ok 3,3 biliona tkm ładunków, w tym 51% z nich za pomocą transportu drogowego. Natomiast przewozy pasażerskie w 2018 roku w Unii Europejskiej oszacowano na ok. 6 bilionów pkm, przy czym 71,7% z nich stanowiły przewozy samochodowe [62]. W Polsce popyt na usługi transportu drogowego jest wysoki, w roku 2019 ok. 86,5% przewozów ładunkowych i ok. 47,4% przewozów pasażerskich zostało wykonanych za pomocą transportu samochodowego [96].

Wysokie zapotrzebowanie na transport drogowy sprawia, iż jest to gałąź transportu, która zużywa najwięcej energii (ok. 30%) i emituje znaczącą część (ok. 30%) zanieczyszczeń powietrza. Dodatkowo jest tą gałęzią transportu, którą uznaje się za najmniej bezpieczną z powodu występowania dużego prawdopodobieństwa wystąpienia niebezpiecznych zdarzeń drogowych (wypadków lub kolizji). Transport samochodowy generuje znaczne koszty zewnętrzne, do których zalicza się koszty związane m.in. z zanieczyszczeniem powietrza, emisją hałasu [81], niebezpiecznymi zdarzeniami drogowymi, zajęciem terenu oraz stratami czasu użytkowników dróg [239]. Szacuje się, że koszty związane z zatorami drogowymi, czyli stratami czasu użytkowników dróg stanowią ponad 1% całego PKB Unii Europejskiej [68].

System transportu drogowego obejmuje szeroko pojęte procesy związane z przemieszczaniem się osób, ładunków, informacji i energii, za pomocą niezbędnych kapitałów, środków transportu oraz infrastruktury drogowej. Obejmują one wszystkie dziedziny związane bezpośrednio z funkcjonowaniem gospodarki, a także aspekty społeczne, organizację pracy, bezpieczeństwo i ochronę środowiska [12]. System transportowy można przedstawić jako zbiór elementów powiązanych między sobą i otoczeniem w sposób umożliwiający przemieszczanie osób oraz ładunków [125]. W systemie transportu drogowego wyróżnia się trzy podstawowe elementy [109]:

- infrastrukturę drogową (obiekty stałe), po której odbywa się przewóz osób i ładunków,
- pojazdy korzystające z infrastruktury,
- system organizacyjny umożliwiający prawidłową pracę systemu transportowego.

Zgodnie z ujęciem systemowym [15], każdy komponent systemu transportowego (infrastruktura, pojazdy, zarządzanie ruchem) jest równie istotny, a ich wzajemne oddziaływanie decyduje

o efektywności i bezpieczeństwie funkcjonowania całości. Badania wykazują, że nieprawidłowości w projektowaniu infrastruktury drogowej, takie jak np. nieprzewidywalna geometria drogi, brak oznakowania, niewłaściwe odwodnienie mogą prowadzić do wzrostu ryzyka zdarzeń drogowych [111].

Wypadki związane z infrastrukturą drogową tj. z wypadnięciem pojazdu z drogi, w tym najechanie na drzewo, słup, znak czy barierę ochronną, stanowią ok. 10% wszystkich wypadków w Polsce, w wyniku, których ginie ponad 18% uczestników, co w efekcie generuje znaczące koszty. Infrastruktura drogowa musi być tak zaprojektowana, aby można było realizować potrzeby transportowe wszystkich grup społecznych, przy jak najmniejszym obciążeniu środowiska naturalnego i generowaniu jak najmniejszych kosztów.

Przy projektowaniu infrastruktury drogowej należy również wziąć pod uwagę jej wpływ na koszty eksploatacyjne (m.in. zużycie paliwa, opon) związane z pojazdami poruszającymi się po niej. W przypadku dróg największy wpływ na koszty eksploatacyjne pojazdów ma: profil drogi i jej krętość oraz nawierzchnia drogowa [174].

Potrzeby zarządców infrastruktury drogowej obejmują obecnie nie tylko zapewnienie przepustowości, ale także minimalizację kosztów utrzymania, poprawę bezpieczeństwa i redukcję emisji [85], co wymaga stosowania kompleksowych metod oceny ex ante projektów drogowych [179] oraz opracowania niezbędnych narzędzi umożliwiających ocenę funkcjonalną infrastruktury drogowej [85].

2.1.2. Infrastruktura drogowa

2.1.2.1. Rola infrastruktury drogowej

Termin „infrastruktura” jest pojęciem stosunkowo nowym. Po raz pierwszy pojawił się pod koniec XIX wieku we Francji w kontekście budowy kolei. Następnie słowo to w roku 1927 pojawiło się w słowniku Oxford English Dictionary gdzie określało koleje, drogi, mosty i ogół podobnych robót publicznych wykonywanych w celu rozwoju gospodarki przemysłowej [162].

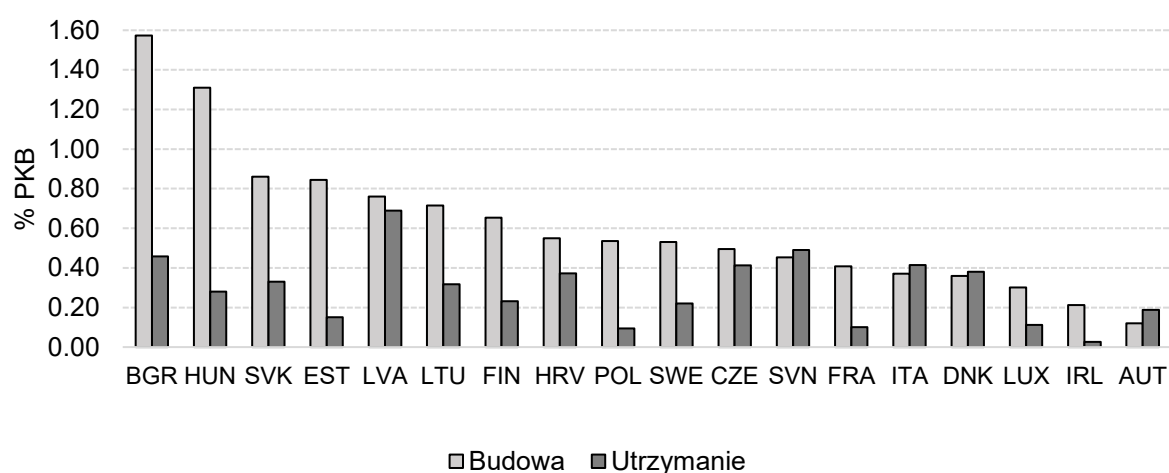
Infrastruktura drogowa wpływa na kształtowanie się rozwoju gospodarczego państwa i społeczeństwa [178] dlatego też stanowi przedmiot rozważań dotyczących rozwoju związanego z poprawą życia ogółu społeczeństwa oraz warunków gospodarczych. W związku z tym stawia się jej wiele wymagań i oczekiwań związanych z poprawą przyszłych sytuacji, które stanowią bodziec dla jej rozwoju a tym samym rozwoju społeczno-ekonomicznego. Obserwacja ta dowodzi na występowanie ścisłej zależności pomiędzy rozwojem infrastruktury drogowej, a rozwojem cywilizacyjnym i gospodarczym, co oznacza, że stanowi ona fundament w rozwoju cywilizacyjnym [162]. W konsekwencji państwa przeznaczają znaczne środki finansowe na budowę, rozwój oraz utrzymanie infrastruktury drogowej [204].

Z punktu widzenia zarządców dróg, kluczowe jest planowanie inwestycji z uwzględnieniem nie tylko kosztów budowy, ale także cyklu życia infrastruktury, kosztów eksploatacyjnych pojazdów i kosztów społecznych. Prognozy wskazują, że zapotrzebowanie na nakłady inwestycyjne na światie w sektorze drogowym jest o ok. 31% wyższe niż obecne nakłady inwestycyjne [184]. Mimo znacznego dofinansowania w infrastrukturę drogową w Europie szacuje się, że będzie ono ok. 20% niższe niż szacowane zapotrzebowanie na inwestycje drogowe [184].

W Unii Europejskiej w 2018 roku przeznaczono średnio na inwestycje związane z infrastrukturą drogową 0,61% PKB. Przy tym w Polsce na inwestycje drogowe w roku 2018 przeznaczono prawie

2,7 bln euro co stanowi ok. 0,54% PKB (rys. 2.1). Utrzymanie infrastruktury drogowej jest ważnym etapem w jej zarządzaniu. Zabiegi konserwacyjne zmniejszają tempo niszczenia się elementów infrastruktury drogowej, obniżają tym samym koszty eksploatacyjne pojazdów oraz poprawiają bezpieczeństwo drogowe [204]. W UE w roku 2018 na utrzymanie infrastruktury drogowej wydano łącznie ok 14,4 bln euro. Średnie wydatki w państwach UE wyniosły ok 0,9 mld euro (0,27% PKB). Krajem, który wydał najwięcej w roku 2018 na utrzymanie infrastruktury drogowej były Włochy. W Polsce wydatki na utrzymanie dróg stanowiły 0,09% PKB.

Istotnym problemem w zarządzaniu infrastrukturą drogową jest ograniczony budżet finansowy. Brak stosowania w Polsce metod i narzędzi zarządzania cyklem życia infrastruktury drogowej, a także niewystarczające środki finansowe na utrzymanie infrastruktury drogowej wpływają negatywnie na stan techniczny dróg i jej elementów. W konsekwencji Polska pod względem jakości sieci drogowej zajmuje dopiero 64. miejsce na 140 analizowanych państw w rankingu opublikowanym przez Światowe Forum Ekonomiczne (World Economic Forum) [241].



Rys. 2.1 Wydatki inwestycyjne i utrzymaniowe na infrastrukturę drogową (udział PKB) w wybranych państwach UE w 2018 r.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie baz OECD [180] i Eurostat [70]

Zabiegi konserwacyjne i naprawcze związane z infrastrukturą drogową mogą paradoksalnie przyczynić się do zwiększania prędkości pojazdów a tym samym skutkować zwiększoną liczbą i ciężkością wypadków drogowych. W porównaniu z budową problem zarządzania i utrzymania dróg okazuje się szczególnie trudnym zagadnieniem [204]. Zwiększenie wydatków na utrzymanie infrastruktury drogowej może przynosić duże korzyści ekonomiczne, szczególnie w kontekście kosztów użytkowników takich jak koszty oszczędności czasu [98].

Każdy element infrastruktury drogowej nie tylko generuje koszty związane z budową i utrzymaniem ale ma też wartość majątkową, która wnosi istotny wkład w produkt krajowy brutto (PKB) [204]. Infrastrukturę drogową można określić mianem aktywów. Poprzez aktywa rozumie się „przedmiot, rzecz lub obiekt, który posiada potencjalną lub rzeczywistą wartość (materialną lub niematerialną, finansową lub niefinansową) dla organizacji i ich interesariuszy”. [195]. Ważnym elementem w ocenie ich wartości jest sposób ich klasyfikacji, grupowania oraz uszczegółowienia, który zależy od potrzeb wykonywania analiz. Wyróżnić można od jednego [203] do trzech poziomów [67], [104], [37] klasyfikacji elementów infrastruktury drogowej. Ogólny poziom klasyfikacji uwzględnia funkcję oraz typ aktywów drogowego, np.: drogi kołowe, drogi dla rowerów i pieszych, wyposażenie dróg, system zarządzania ruchem [67], [203],

[37]. Drugi poziom uszczegółowienia aktywów umożliwia odróżnienie od siebie aktywów o podobnych cechach [67] [37]. Podział aktywów na trzeci poziom umożliwia rozróżnienie elementów aktywów, które wymagają indywidualnego podejścia z uwagi na ich zróżnicowane cechy, takie jak np. na okres użytkowania czy długość życia obiektu [37].

2.1.2.2. *Cechy infrastruktury drogowej*

Cechą charakterystyczną infrastruktury drogowej oprócz znacznej wartości jest jej długi okres żywotności [125]. Z uwagi na to, iż okres żywotności niektórych elementów infrastruktury drogowej może osiągać nawet 150 lat [73] (obiekty mostowe betonowe, przepusty betonowe) konieczna jest wnikliwa analiza przyszłych potrzeb użytkowników dróg i ich możliwości zaspokojenia poprzez określone rozwiązania techniczne [239]. W praktyce zarządzania infrastrukturą drogową, długość życia obiektu nie zawsze pokrywa się z jego użytecznością funkcjonalną. Dlatego też czas trwania cyklu życia przyjmowany w analizach i ocenach wpływu infrastruktury drogowej waha się od 10 do 150 lat, przy czym przeważa okres od 20 do 50 lat [73], [105]. Natomiast w przypadku obiektów mostowych okres ten waha się od 50–150, przy czym bardzo często przyjmuje się 100 lat [220].

Wytyczne AASHTO [3] stosowane w USA zalecają przyjmować w ocenie obiektów drogowych czas trwania cyklu wynoszący 30–50 lat dla dróg miejskich o dużym natężeniu ruchu, a w przypadku dróg o małym natężeniu ruchu 20 lat. Najczęściej jednak w przypadku nawierzchni drogowych przyjmuje się okres 20–40 lat [224], [225], [228], [86]. W kontekście analiz dróg dla pieszych i rowerów horyzont czasowy przyjmowany jest w zakresie 20–80 lat [175], [5].

Komisja Europejska zaleca w przypadku analizy kosztów i korzyści przyjmować okres analizy równy 30 lat. W przypadku barier drogowych w Anglii przyjmuje się 50 lat dla barier betonowych i 25 lat dla barier stalowych [238], w Szwecji 30 lat [127], a w USA 15 lat [45].

Kolejną istotną cechą infrastruktury drogowej jest jej niepodzielność ekonomiczna, co warunkuje niektóre cechy techniczne obiektów drogowych, np. minimalną długość odcinka barier linowych. Dodatkowo niepodzielność techniczna wpływa na minimalną wielkość inwestycji, która determinuje funkcjonalność infrastruktury drogowej. Konsekwencją realizacji częściowej inwestycji drogowych jest jej nieopłacalność ekonomiczna oraz mała użyteczność [239].

Kolejną cechą infrastruktury drogowej jest jej długi okres powstawania [125]. Okres ten najczęściej jest dłuższy niż długość cyklu inwestycyjnego. Konsekwencją długiego okresu projektowania i realizowania inwestycji drogowych są znaczne koszty inwestycyjne oraz długi okres zamrożenia poniesionych nakładów finansowych [239].

Przedstawione cechy techniczne infrastruktury drogowej oraz zróżnicowany cykl życia obiektów drogowych warunkują konieczność myślenia perspektywicznego, długoterminowego oraz tworzenie strategii zarządzania infrastrukturą drogową, które obejmują ich cały cykl życia.

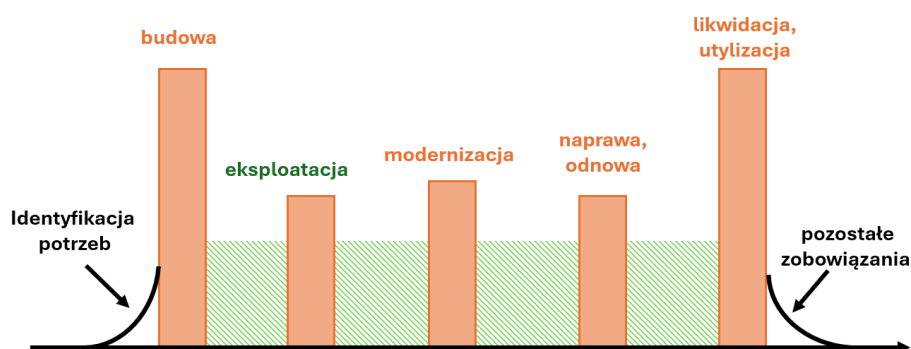
2.1.2.3. *Cykl życia infrastruktury drogowej*

Etapy cyklu życia obiektu różnią się w zależności od potrzeb wykonywanych analiz i obiektów, których ona dotyczy [192]. Zgodnie z PN-EN 60300-3-3 [192] wyróżnia się sześć ogólnych faz cyklu życia każdego obiektu: koncepcja i definiowanie, projektowanie i rozwój, produkcja, instalacja, użytkowanie i obsługa, likwidacja. W zależności od potrzeb analizy fazy te mogą być łączone lub pomijane. Podobne podejście do cyklu życia ujęte jest normach PN-EN ISO 14040/14044 [193], [194]

gdzie wskazuje się, że ocena wpływu inwestycji na środowisko może być prowadzona w czterech granicach: budowie („cradle to gate”), budowie i okresie eksploatacji („cradle to gate”), okresie eksploatacji („gate to gate”) w całym cyklu życia (cradle to grave).

Podobny podział cyklu życia jak w PN-EN 60300-3-3 [192] stosuje Blanchard [18] w analizie produktu, gdzie wyróżnia następujące etapy: projekt koncepcyjny, wstępny, wykonawczy, produkcja, użytkowanie oraz utylizacja. Natomiast w normie ISO 15686-5 [108] wyróżnia się etapy cyklu życia związane z kosztami: budowy, eksploatacji, konserwacji i likwidacji.

W przypadku cyklu życia infrastruktury drogowej i jej elementów wyróżnia się pięć zasadniczych etapów cyklu życia infrastruktury drogowej przy analizach kosztowych: planowanie, projektowanie, budowa, eksploatacja i likwidacja [117]. Każdy element infrastruktury drogowej przechodzi przez wiele faz w trakcie swojego cyklu życia, podczas których generowane są koszty związane z utrzymaniem elementów infrastruktury drogowej na odpowiednim poziomie (rys. 2.2):

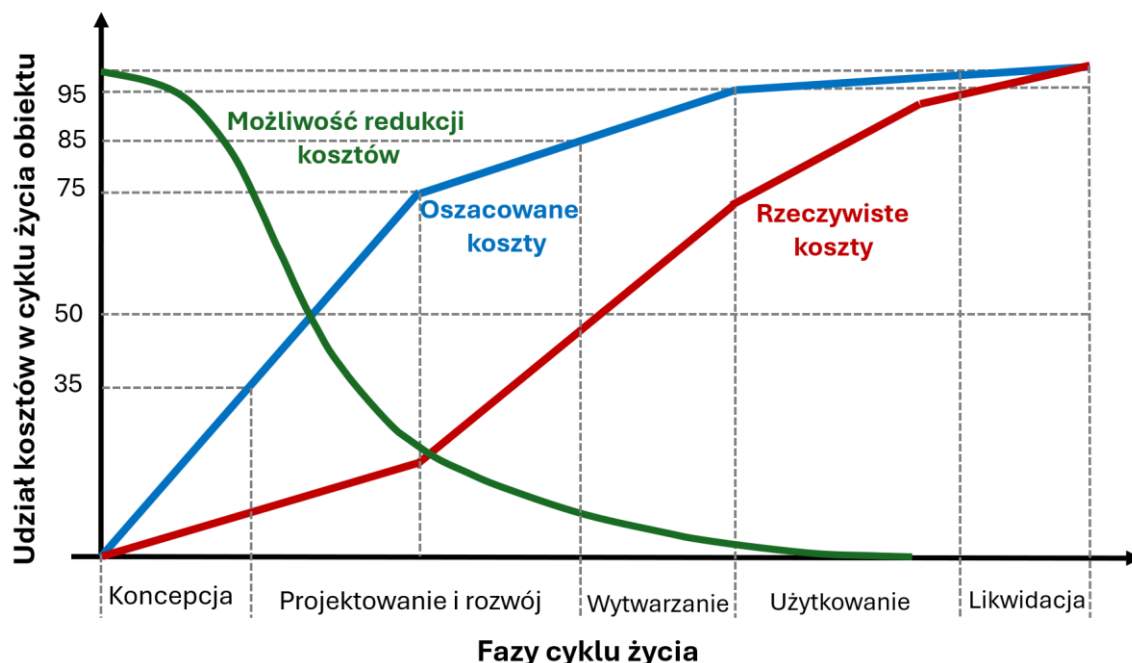


Rys. 2.2 Cykl życia infrastruktury drogowej

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [69]

Przedstawiony cykl życia może być analizowany w ujęciu tradycyjnym, gdzie etapy cyklu życia następują kolejno po sobie lub z uwzględnieniem koncepcji obiegu zamkniętego, gdzie materiały z recyklingu są ponownie wykorzystywane [219]. Określanie kosztów może odnosić się do całego cyklu życia elementów infrastruktury drogowej, pojedynczej fazy lub kombinacji różnych faz. Znaczna część kosztów cyklu życia stanowi skutek decyzji podejmowanych we wczesnych fazach kształtowania obiektu (rys. 2.3) [242].

Zaprezentowane na rys. 2.3 koszty cyklu życia obiektu: rzeczywiste, szacowane, możliwe do obniżenia mają również zastosowanie w infrastrukturze drogowej. W fazach planowania, projektowania i budowy infrastruktury drogowej można zredukować znaczą część jej kosztów ponoszonych w całym cyklu życia. Szacuje się, że etapy te mogą przesądzać nawet o 85% całkowitych kosztów obiektu [18]. W przypadku infrastruktury drogowej znaczenie ma również faza utrzymania, w której wielkość ponoszonych kosztów zależy m.in. od przyjętej strategii zarządzania. Według Ammara [4] w przypadku aktywów infrastrukturalnych, takich jak drogi, znaczna część całkowitych kosztów jest ponoszona po zakończeniu budowy, tj. w fazie eksploatacji i utrzymania. Podejście uwzględniające koszty całego cyklu życia może zwiększyć skuteczność ostatecznych decyzji [4]. W związku z tym wszelkie działania związane z zarządzaniem infrastrukturą drogową powinny być poprzedzone analizą kosztów cyklu życia, która uzasadnia potrzebę stosowania wybranych rozwiązań oraz wybór kolejności prac i działań.



Rys. 2.3 Koszty poniesione i prognozowane w kolejnych fazach cyklu obiektu

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [55]

Według Lincolna [152] można wyróżnić dwa odrębne cele prowadzenia rachunków kosztów cyklu życia. We wcześniejszych fazach nacisk kładziony jest na oszacowanie oczekiwanych kosztów w cyklu życia. W późniejszych fazach uwaga skupia się na monitorowaniu kosztów, które wystąpiły w trakcie realizacji poszczególnych faz cyklu życia infrastruktury drogowej.

2.2. Ocena funkcjonowania infrastruktury drogowej

2.2.1. Podstawy teoretyczne metod oceny funkcjonowania infrastruktury drogowej

2.2.1.1. Wprowadzenie

Infrastruktura drogowa jest jednym z komponentów systemu transportu drogowego, który pełni znaczącą rolę w rozwoju gospodarczym oraz wpływa na jakość życia społeczeństwa. Liczne wymagania jakie stawiane są infrastrukturze drogowej oraz jej specyficzne cechy jak np. zróżnicowana długość życia sprawia, że konieczna staje się jej ocena pod względem aspektów technicznych, ekonomicznych, społecznych oraz środowiskowych. Tak szeroki zakres oceny funkcjonowania infrastruktury drogowej sprawia, że ma ona charakter interdyscyplinarny łączący w sobie różne teorie, koncepcje, metody pochodzące z różnych dziedzin nauki, a w szczególności w przypadku infrastruktury drogowej wyróżnić można:

- teorie w ekonomii dobrobytu,
- koncepcję zrównoważonego rozwoju,
- teorie zarządzania organizacją i infrastrukturą drogową,
- teorię systemów,
- koncepcję zarządzanie wartością,
- koncepcję myślenia w cyklu życia,
- inżynierię systemów.

2.2.1.2. Teorie w ekonomii dobrobytu

Pojęcie dobrobytu zmieniało się na przestrzeni lat, w ujęciu klasycznym było utożsamiane z bogactwem. Natomiast obecnie rozumiane jest jako połączenie efektywności oraz sprawiedliwości w podziale korzyści i zasobów. Celem ekonomii dobrobytu jest maksymalizacja efektów związanych z dobrobytem społecznym. Ważną rolę w rozwoju ekonomii dobrobytu pełnią twierdzenia fundamentalne [19]. Pierwsze twierdzenie zakłada, że w warunkach doskonałej konkurencyjności każda równowaga rynkowa jest optymalna w sensie Pareto, przy założeniu braku zakłóceń takich jak efekty zewnętrzne. Natomiast z drugiego twierdzenia wynika, że można osiągnąć optymalny podział zasobów w sensie Pareto jako wynik działania rynku, przy założeniu odpowiedniego rozdziału zasobów początkowych. W kontekście infrastruktury drogowej oznacza to, że w idealnych warunkach i przy pełnym uwzględnieniu kosztów i korzyści wybór wariantów tras drogowych przez użytkowników mógłby prowadzić do rozwiązań optymalnych (optimum Pareta). W praktyce jednak występowanie efektów zewnętrznych sprawia, że konieczne staje się uwzględnienie innych kryteriów oceny takich jak np. kryterium efektywności Pareto, kryterium kompensacji Kaldora-Hicksa, teorię efektów zewnętrznych Pigou [77].

Zgodnie z zasadą optymalności Pareto istnieje taka alokacja zasobów, która sprawia, że nie można poprawić sytuacji jednej grupy użytkowników bez pogorszenia sytuacji innych [131]. W kontekście infrastruktury drogowej optymalność Pareto jest podejściem teoretycznym, często nieosiągalnym. Przykład tego może stanowić budowa nowej drogi, która z jednej strony wpłynie na poprawę warunków ruchowych, a z drugiej zwiększy emisję zanieczyszczeń środowiska.

W związku, z tym w ekonomii dobrobytu popularność zyskało kryterium Kaldora-Hicksa stanowiące rozszerzenie optimum Pareta. Kryterium to dopuszcza możliwość występowania negatywnego wpływu inwestycji na jeden obszar lub grupę, przy założeniu osiągnięcia na tyle dużych zysków, które mogłyby zrekompensować poniesione straty. W podejściu tym efekty zewnętrzne takie jak np. straty czasu, emisje spalin są wliczane do kosztów i korzyści, a ich całkowite wyeliminowanie nie jest konieczne. W związku z tym pokrycie szkód nie musi występować w sposób fizyczny, wystarczające jest jedynie teoretycznie wykazanie, że dana inwestycja przynosi zyski. Kryterium kompensacji Kaldora-Hicksa znajduje zastosowanie w ocenach opłacalności inwestycji drogowych, analizach kosztów i korzyści oraz w wycenach środowiskowych, których celem jest poszukiwanie racjonalnych rozwiązań pomiędzy oszczędnościami ekonomicznymi a stratami użytkowników, społeczeństwa [22].

Odmienne podejście do kosztów zewnętrznych zaprezentował Pigou [77]. Postulował on o konieczności internalizacji efektów zewnętrznych, czyli włączenia ich do rachunku kosztów poprzez odpowiednie regulacje ekonomiczne takie jak podatek Pigou (np. opłaty środowiskowe od emisji spalin). Działania te w przypadku infrastruktury drogowej miały na celu ograniczenie negatywnych oddziaływań inwestycji na środowisko oraz zwiększenie pozytywnych efektów.

Ekonomia dobrobytu oraz jej teorie stanowiły podstawę w kształtowaniu się koncepcji zrównoważonego rozwoju. W odróżnieniu od klasycznej ekonomii dobrobytu zrównoważony rozwój łączy efektywność ekonomiczną, sprawiedliwość społeczną oraz ochronę środowiska w aspekcie długofalowym.

2.2.1.3. *Koncepcja zrównoważonego rozwoju*

Koncepcja zrównoważonego rozwoju nadała nowy wymiar ocenie inwestycji drogowych. Początkowo pojęcie zrównoważonego rozwoju (sustainable development) było utożsamiane z rozwojem ekonomicznym [164]. Z biegiem lat przyjęto, że zrównoważony rozwój może być osiągany poprzez integrację trzech elementów: równości społecznej, zdolności ekonomicznej oraz poprzez ochronę środowiska [230]. Owocem tych działań było przyjęcie przez Organizację Narodów Zjednoczonych (ONZ) Agendy 2030, czyli globalnego programu działań dotyczących rozwoju społeczno-gospodarczego obejmującego ochronę środowiska. Agenda ta stanowi inspirację dla dokumentów Unii Europejskiej, OECD czy prawa poszczególnych krajów. W 2015 r. 193 państwa członkowskie ONZ przyjęły 17 celów, które mają „wyeliminować ubóstwo, chronić planetę i zapewnić wszystkim dobrobyt w ramach nowego programu zrównoważonego rozwoju” do roku 2030 [231]. Infrastruktura i transport wpisane są w szczególności w realizację czterech celów: cel 3.6 – znaczne zmniejszenie liczby wszystkich rannych i ofiar śmiertelnych w wypadkach drogowych na świecie, cel 9.1 – rozwijanie niezawodnej, zrównoważonej i odpornej infrastruktury dobrej jakości, wraz z zapewnieniem wszystkim ludziom równego dostępu do infrastruktury po przystępnej cenie, cel 11.2 – zapewnienie wszystkim ludziom dostępu do bezpiecznych, przystępnych cenowo i trwałych systemów transportu oraz cel 13.2 – włączyć działania na rzecz przeciwdziałania zmianom klimatycznym do krajowych polityk, strategii i planów [231].

Podjęcie działań związanych z realizacją celów zrównoważonego rozwoju, przyjętych w Agendzie 2030 stało się impulsem do zmiany stosowanego podejścia w badaniach nad inwestycjami infrastrukturalnymi, kierując uwagę na ich jakościowe aspekty. Ponadto ukazano potrzebę odejścia od prostego zwiększania nakładów inwestycyjnych na rzecz rozwoju metod, narzędzi analizy i oceny, które umożliwią ich efektywniejsze stosowanie [162]. W tym celu opracowano i wdrożono wiele systemów oceny i certyfikacji projektów infrastruktury budowlanej np. system LEED [229], czy projektów infrastruktury drogowej np. system Greenroads [93]. Osiągnięcie celów zrównoważonego rozwoju wymaga zatem od planowanej infrastruktury nowych właściwości, pozwalających określić ją jako zrównoważoną infrastrukturę.

Koncepcja zrównoważonego rozwoju stanowi podstawę rozwoju i tworzenia polityk poszczególnych państw [101] o czym świadczyć może m.in. przyjęty przez Unię Europejską Piąty Program ochrony środowiska naturalnego zatytułowany „W stronę zrównoważonego rozwoju” oraz określenie w Białej Księdze zrównoważonego rozwoju fundamentem europejskiej gospodarki i społeczeństwa. Rozwój transportu i infrastruktury drogowej umożliwia wzrost gospodarczy i tworzenie miejsc pracy, a jego rozwój, w świetle stojących wyzwań, musi być zrównoważony [167]. W przypadku infrastruktury drogowej oznacza to konieczność przeprowadzania analiz uwzględniających efekty ekonomiczne, środowiskowe oraz społeczne w całym cyklu życia obiektu.

W każdym etapie cyklu życia infrastruktura drogowa powinna odpowiadać nie tylko wymaganiom technicznym, lecz również oczekiwaniom użytkowników, wyzwaniom społecznym oraz celom koncepcji zrównoważonego rozwoju. Oznacza to m.in. potrzebę dążenia do rozwiązań niezawodnych, bezpiecznych, niskoemisyjnych oraz dostosowanych do potrzeb człowieka. Jedną z inicjatyw podejmujących to wyzwanie był projekt badawczy opracowany przez Forum Europejskich Instytutów

Badawczych w Dziedzinie Dróg „New Road Construction Concepts (NR2C)”, który był realizowany w latach 2002–2007 w ramach 6. Programu Ramowego UE [78]. Celem projektu [78] było sformułowanie długofalowej wizji rozwoju europejskiej infrastruktury drogowej do 2040 roku, uwzględniającej jednocześnie przyszłe potrzeby transportowe, oczekiwania użytkowników, wymogi społeczne oraz kluczowe założenia zrównoważonego rozwoju.

W NR2C wyróżnia się cztery główne paradygmaty reprezentujące dominujące grupy oczekiwań społecznych w stosunku do infrastruktury drogowej: niezawodność, zielona infrastruktura, przyjazna człowiekowi oraz bezpieczna i inteligentna [78].

1. Niezawodna infrastruktura, to taka, która uwzględnia takie oczekiwania jak: dostępność, trwałość i niezawodność poprzez optymalizację zarządzania z zastosowaniem narzędzi do zarządzania kapitałem, uwzględnianie cyklu życia obiektu w analizach kosztów, bilansowaniu popytu i podaży, zapewnieniu odpowiedniej prędkości przemieszczania.
2. Infrastruktura przyjazna środowisku (zielona infrastruktura), czyli uwzględniająca takie oczekiwania jak: energooszczędność, zrównoważenie, przyjazne otoczenie. Ma ona na celu ograniczenie ujemnego wpływu ruchu i infrastruktury na środowisko naturalne poprzez oszczędzanie zasobów naturalnych i kontrole emisji (spalin, hałasu), a także działania na rzecz budowy zrównoważonego społeczeństwa.
3. Infrastruktura przyjazna człowiekowi uwzględniająca takie oczekiwania jak: wielofunkcyjność, szeroka użyteczność i bezpieczeństwo publiczne, poprzez zharmonizowanie infrastruktury drogowej z możliwościami i ograniczeniami człowieka.
4. Bezpieczna i inteligentna infrastruktura uwzględniająca takie oczekiwania jak: dostępność, inteligencja, bezpieczeństwo. Ma ona na celu optymalizację przepływów ruchu wszystkich kategorii użytkowników dróg i bezpieczeństwa pracy robót drogowych, poprzez zastosowanie bezpiecznych i inteligentnych urządzeń umożliwiających monitoring, komunikowanie się z użytkownikami.

Infrastruktura drogowa, która spełnia wszystkie wyżej wymienione oczekiwania jest określona mianem infrastruktury użytecznej. Poprzez użyteczność rozumie się zdolność elementów infrastruktury drogowej do działania przez 24 godziny na dobę i 365 dni w roku. Ciągłość działania tych elementów jest cechą, która polega na stałym zapewnieniu użytkownikom drogi odpowiednich parametrów jakości przekazywania i odbioru informacji, prowadzenia pojazdu, bezpieczeństwa itp. [28]. Infrastruktura użyteczna powinna spełniać podstawowe funkcje jakimi są:

- bezpieczeństwo – nieustający proces dążenia do osiągnięcia / utrzymania stanu niezagrożenia, spokoju, pewności [71],
- niezawodność – zdolność obiektu do spełnienia stawianych mu wymagań [156],
- wydajność – miara efektywności danego elementu,
- sprawność – zdolność obiektu do pełnienia i wykonywania określonych funkcji i czynności nawet pomimo doznanych defektów,
- zdolność do odtwarzania,
- „pozytywny” wpływ na środowisko,
- efektywność ekonomiczną – działanie pozbawione marnotrawstwa oraz nastawione na osiągnięcie najlepszego rezultatu w ramach dostępnych zasobów i technologii [221].

Rozwój infrastruktury drogowej zależy od inwestycji (budowy nowych sieci dróg), rewitalizacji sieci dróg, jej modernizacji czy też wprowadzania postępów technicznych. Ostatnia funkcja, czyli efektywność ekonomiczna umożliwia połączenie wszystkich cech infrastruktury użytecznej poprzez zaprezentowanie ich w postaci nakładów finansowych na infrastrukturę drogową oraz ocenę wybranych rozwiązań.

Jednak wszelkie te działania powinny być poprzedzone analizą, która uzasadnia potrzebę stosowania wybranych rozwiązań, wyboru kolejności działań w procesie zarządzania oraz uwzględnia cykl życia elementów infrastruktury drogowej.

2.2.1.4. Koncepcje zarządzania infrastrukturą drogową

Spełnianie oczekiwań społeczeństwa związanych z infrastrukturą drogową wiąże się z prowadzeniem systematycznych działań związanych z utrzymywaniem, modernizacją i eksploatacją jej elementów (aktywów drogowych). Proces ten określany mianem zarządzania powinien prowadzić do ułatwienia podejmowania decyzji dotyczących infrastruktury drogowej poprzez stosowanie narzędzi optymalizacyjnych łączących zasady inżynierii z dobrymi praktykami biznesowymi i racjonalnymi przesłankami ekonomicznymi, czyli uwzględniać koncepcję zrównoważonego rozwoju [69]. Celem zarządzania jest zapewnienie sprawności, skuteczności i efektywności funkcjonowania systemu przy jednoczesnej maksymalizacji zysków i minimalizacji ryzyka.

W przypadku zarządzania organizacjami wyróżnia się trzy podstawowe teorie: klasyczną, behawioralną, ilościową oraz dwa podejścia integrujące: systemowe oraz sytuacyjne [94]. Teorie te mogą być zaadoptowane do zarządzania infrastrukturą drogową.

Klasyczne zarządzanie w kontekście infrastruktury drogowej skupia się na usprawnieniu systemu poprzez eliminację lokalnych zagrożeń [112]. Spojrzenie behawioralne kładzie nacisk na indywidualne postawy i zachowania oraz na procesy grupowe. W zarządzaniu infrastrukturą drogową podejście behawioralne jest stosowane w kontekście zarządzania bezpieczeństwem ruchu drogowego [112]. W podejściu ilościowym stosuje się modele matematyczne w celu podejmowania decyzji oraz rozwiązania problemów. W przypadku infrastruktury drogowej, ważne jest wykorzystanie danych statystycznych i modeli analitycznych do oceny efektywności różnych rozwiązań oraz do przewidywania skutków wprowadzanych zmian.

2.2.1.5. Teoria systemowa

Integracja założeń klasycznych, behawioralnych i ilościowych w podejściu systemowym jest kluczowa dla efektywnego zarządzania infrastrukturą drogową. Główną zasadą teorii systemów jest całościowe traktowanie rzeczywistości. Ogólna teoria systemów jest to nauka badająca ogólne prawa rządzące dowolnymi złożonymi układami stanowiącymi funkcjonalne całości. Natomiast klasyczna teoria systemów wykorzystuje matematyczne modele (równania), w celu określenia i uzasadnienia zasad odnoszących się do systemów i ich podklas [15]. To czy dany system zostanie opisany za pomocą równania liniowego lub nieliniowego zależy od złożoności systemu. Teoria systemowa integruje dwie kluczowe idee: regulowania funkcjonowania systemu oraz hierarchizacji i analizy zachowań. W kontekście infrastruktury drogowej, oznacza to modernizację i zarządzanie elementami drogowymi w ujęciu całego systemu, który obejmuje interakcje między człowiekiem, pojazdem a drogą. Takie podejście pozwala na lepsze zrozumienie złożoności systemu drogowego i efektywniejsze

podejmowanie decyzji [112]. Współzależność elementów systemu transportu drogowego sprawia, że niezbędne jest stosowanie podejścia holistycznego [150] przy zarządzaniu infrastrukturą drogową od momentu jej planowania, wytworzenia poprzez likwidację (cradle-to-grave) uwzględniające koncepcję myślenia w cyklu życia.

2.2.1.6. *Koncepcje zarządzania wartością*

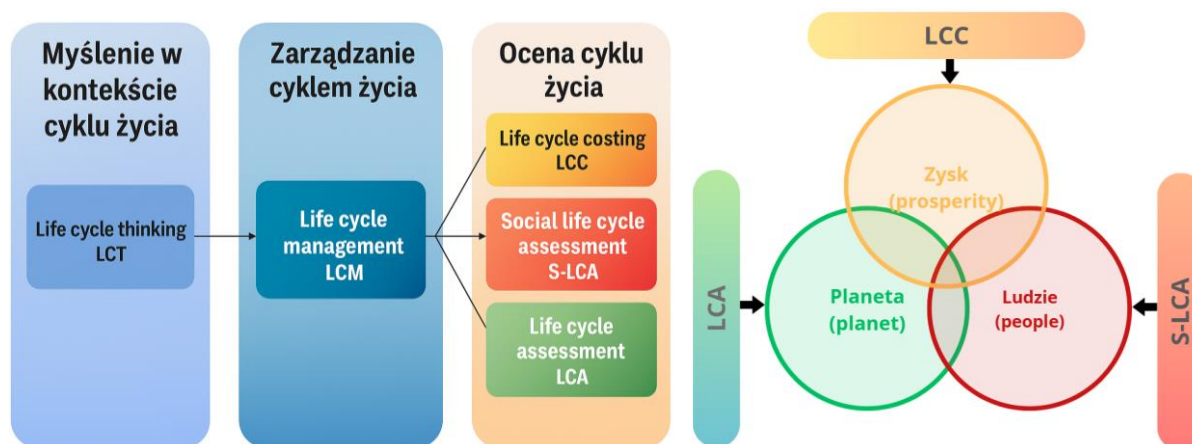
W kontekście zarządzania infrastrukturą drogową coraz większe znaczenie zyskuje zarządzanie wartością (VM – value management), stanowiące narzędzie wspierające podejmowanie decyzji dotyczących infrastruktury drogowej. Proces ten polega na optymalizacji kosztów obiektu poprzez jego analizę w całym cyklu życia oraz na eliminacji zbędnych kosztów bez pogorszenia jego jakości, funkcjonalności oraz wartości [148]. Składa się on z czterech elementów: analizy wartości (Value Analysis – VA), planowania wartości (Value Planning – VP), które odbywa się w fazie koncepcyjnej, inżynierii wartości (VE), która stosowana jest głównie w fazie projektowej oraz kontrolę wartości (Value Reviewing – VR), która może być prowadzona na każdym etapie cyklu życia inwestycji. Korzyści z zastosowania metod zarządzania wartością są największe we wczesnych fazach realizacji obiektu tj. na etapie prac przygotowawczych oraz wykonywania prac projektowych, a maleją wraz ze stopniem zaawansowania procesu inwestycyjnego. Inżynieria wartości umożliwia poszukiwanie balansu pomiędzy kosztem, jakością oraz wymaganiami projektu. Jednak, aby skutecznie zastosować koncepcję zarządzania wartością w procesie projektowym inwestycji drogowych konieczne jest uwzględnienie ich cech takich jak zróżnicowana długość życia elementów drogowych.

2.2.1.7. *Koncepcja myślenia w cyklu życia*

Jednym z nowoczesnych podejść do zarządzania infrastrukturą drogową ściśle powiązanych z ideą zrównoważonego rozwoju poprzez uwzględnienie aspektów środowiskowych, ekonomicznych i społecznych na każdym jej etapie funkcjonowania jest koncepcja myślenia w cyklu życia LCT (Life Cycle Thinking) [223]. Koncepcja ta wykracza poza tradycyjne myślenie, które skupia się na początkowym etapie życia infrastruktury drogowej, obejmując pełen jej cykl życia.

Myślenie w kontekście cyklu życia obejmuje dwa kluczowe obszary: zarządzanie cyklem życia infrastruktury drogowej, które koncentruje się na długoterminowym planowaniu oraz analizie cyklu życia poprzez zastosowanie narzędzi oceniających wpływ cyklu życia na środowisko, społeczeństwo oraz koszty. Zastosowanie LCT w drogownictwie umożliwia podejmowanie lepszych decyzji inwestycyjnych, przyczyniając się do oszczędniejszego gospodarowania zasobami, mniejszego negatywnego wpływu na środowisko oraz większej trwałości i funkcjonalności infrastruktury. Coraz częściej strategie zrównoważonego rozwoju uwzględniające podejście oparte na myśleniu w cyklu życia stosowane są w politykach międzynarodowych poprzez przyjęcie 3P („People, Planet, Prosperity”) jako ram oceny projektów infrastrukturalnych (rys. 2.4b). Z punktu widzenia zarządców dróg stosowanie koncepcji LCT umożliwia bardziej efektywne planowanie inwestycji oraz ograniczenie kosztów utrzymaniowych. Natomiast w przypadku użytkowników dróg stosowanie LCT może prowadzić do poprawy bezpieczeństwa, zwiększenia komfortu podróży oraz redukcji negatywnego wpływu infrastruktury na środowisko. Myślenie w kontekście cyklu życia uwzględniane jest w drogownictwie m.in. w analizach wyboru: przebiegu dróg [23], [244], konstrukcji mostowych [220], [208], [218], [182], konstrukcji nawierzchni [176], [222], [64], [11] barier drogowych [141], [45], [238], [177] oznakowania drogowego

[187], [247]. Obejmuje ono dwie główne grupy działań (rys. 2.4a): zarządzanie cyklem życia oraz ocenę cyklu życia na którą składa się: ocena wpływu cyklu życia na środowisko (LCA – life cycle assesment), ocena wpływu cyklu życia na społeczeństwo (S-LCA – social life cycle assessment) oraz ocena kosztów cyklu życia (LCC – life cycle costing).



Rys. 2.4 Zrównoważony rozwój a) elementy koncepcji myślenia w cyklu życia b) polityka „3P”

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [223]

Koncepcja zintegrowanej metoda zrównoważonego zarządzania cyklem życia produktu może być opisana równaniem 2.1 [8]:

$$LCSA = LCA + LCC + SLCA \quad (2.1)$$

gdzie:

LCSA – zrównoważony wpływ cyklu życia produktu,

LCA – wpływ cyklu życia produktu na środowisko,

LCC – wpływ cyklu życia produktu na koszty (ekonomia),

SLCA – wpływ cyklu życia produktu na społeczeństwo.

2.2.1.8. Inżynieria systemów

Jednym z narzędzi wspomagających proces zarządzania oraz realizujący koncepcję myślenia w cyklu życia jest inżynieria systemów. Inżynieria systemów wykorzystuje uporządkowany zasób wiedzy wynikający z ogólnej teorii systemów [25], [34] i umożliwia identyfikację oraz wdrażanie rozwiązań optymalnych w całym cyklu życia systemu.

W kontekście infrastruktury drogowej inżynieria systemów oferuje strukturalne podejście do projektowania, budowy oraz użytkowania elementów drogowych, integrując wymagania techniczne, ekonomiczne i środowiskowe. Ponadto uwzględnia ona również interesy różnych grup użytkowników i instytucji, co pozwala lepiej dopasować rozwiązania do realnych warunków eksploatacyjnych [186]. Podstawowym założeniem tego podejścia jest traktowanie infrastruktury drogowej nie jako odizolowanego elementu, ale jako części większego systemu (systemu transportowego), w którym funkcjonują użytkownicy, zarządcy dróg i służby utrzymaniowe. W takim ujęciu analiza funkcjonowania elementów drogowych musi obejmować nie tylko ocenę ich trwałości, funkcjonalności, ale również ocenę ich wpływu na otoczenie na społeczeństwo i środowisko [15]. Inżynieria systemów ułatwia proces

podejmowania decyzji, który pozwala przewidywać konsekwencje projektowe i eksploatacyjne już na wczesnych etapach planowania [34].

Inżynieria systemów oraz inne przedstawione teorie i koncepcje oceny funkcjonowania infrastruktury drogowej znajdują praktyczne zastosowanie w procesie planowania oraz zarządzania infrastrukturą drogową m.in. poprzez uwzględnianie potrzeb użytkowników dróg, stosowanie zasad zrównoważonego rozwoju oraz myślenie perspektywiczne.

2.2.2. Planowanie i zarządzanie infrastrukturą w cyklu życia

2.2.2.1. Etapy i poziomy zarządzania infrastrukturą drogową

Zarządzanie infrastrukturą drogową umożliwia zapewnienie sprawnego i wydajnego funkcjonowania infrastruktury drogowej i jej elementów. Obejmuje ono różne procesy planowania i podejmowania decyzji, które podzielić można na następujące etapy [204]: wstępne planowanie, planowanie i przygotowanie oraz eksploatacja, które swym zakresem obejmują trzy poziomy zarządzania [74]: strategiczne, taktyczne i operacyjne.

Na etapie wstępnego planowania systemu infrastruktury drogowej podejmowane są decyzje strategiczne związane z wyborem przebiegu trasy, lokalizacji inwestycji, obejmujące długoterminowe planowanie i rozwój sieci drogowej. Poziom ten wymaga stosowania metod szacowania kosztów cyklu życia w celu oceny i porównania ekonomicznej opłacalności różnych wariantów inwestycyjnych [204], [152]. Szacując koszty cyklu życia decydenci mogą ustalać priorytety inwestycji w oparciu o ich długoterminową wartość i opłacalność [74], [152].

Z kolei taktyczne zarządzanie infrastrukturą drogową obejmuje swym zakresem planowanie, przygotowanie i koordynację działań oraz strategii związanych z utrzymaniem i eksploatacją dróg [74]. Zadania na tym poziomie obejmują wybór strategii utrzymaniowych, ustalanie harmonogramów działań na średni horyzont czasowy [204]. Metody szacowania kosztów cyklu życia mają kluczowe znaczenie na tym poziomie, ponieważ pomagają zidentyfikować skuteczne działania i strategie związane z utrzymaniem i eksploatacją infrastruktury drogowej i umożliwić optymalne zarządzanie nią [152], [74].

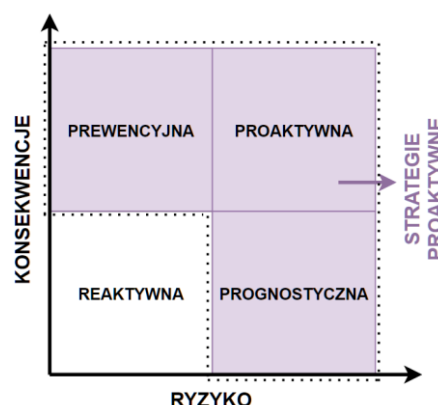
W fazie eksploatacji zarządzanie infrastrukturą drogową odbywa się głównie na poziomie operacyjnym i dotyczy bieżących działań operacyjnych i konserwacyjnych, w których kluczowe jest zapewnienie funkcjonalności infrastruktury [204]. Na tym etapie metoda LCC wspiera proces podejmowania decyzji technicznych i finansowych poprzez ocenę opłacalności alternatywnych wariantów napraw i modernizacji [176]. Przykłady działań operacyjnych obejmują m.in. naprawę ubytków, wymianę nawierzchni, czy też wymianę, naprawę uszkodzonych urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Zintegrowane podejście do zarządzania w cyklu życia może być skutecznie wspierane przez model PDCA (Plan Do Check Act), który odzwierciedla ideę ciągłego doskonalenia w każdym z trzech poziomów zarządzania. Model ten sprzyja integracji procesów planistycznych z realizacją i oceną skuteczności działań zarządczych [149], [47].

W praktyce zarządzanie aktywami umożliwia ocenę każdego aktywu drogowego w sposób krytyczny oraz umożliwia przejście od reaktywnego do proaktywnego zarządzania, zwiększając tym samym korzyści związane z inwestycjami drogowymi.

2.2.2.2. Strategie zarządzania infrastrukturą drogową

W kontekście zarządzania infrastrukturą drogową w cyklu życia, kluczową rolę odgrywają strategie utrzymaniowe, których dobór znacząco wpływa na funkcjonalność aktywów drogowych. W literaturze wyróżnić można dwie główne strategie zarządzania infrastrukturą drogową: reaktywną oraz proaktywną [209], [248], [69]. Strategie reaktywne są ukierunkowane na naprawy po wystąpieniu awarii, natomiast proaktywne działania mają na celu uniknięcie tych napraw i awarii [80]. Strategie te z uwagi na prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń niepożądanych i ich konsekwencji można podzielić na cztery strategie: reaktywną, prewencyjną, prognostyczną oraz proaktywną [248].



Rys. 2.5 Strategie utrzymania infrastruktury drogowej
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [248]

Strategia reaktywna zakłada podejmowanie działań dopiero w momencie zaistnienia awarii lub widocznego pogorszenia stanu technicznego infrastruktury. Charakteryzuje się ona brakiem zapobiegawczych interwencji, co czyni ją podejściem pasywnym [248]. W przypadku bezpieczeństwa podejście reaktywne zakłada reagowanie na zdarzenia, które już miały miejsce, poprzez przyjmowanie regulacji mających na celu zapobieganiu ich powtórzeniu [144]. Główną zaletą tej strategii w porównaniu z proaktywną są niskie koszty początkowe oraz mniejsze potrzeby kadrowe. Niemniej jednak strategia ta często prowadzi do generowanych wysokich kosztów utrzymania i zarządzania infrastrukturą drogową [69]. Dodatkowo zwiększa ona ryzyko powstawania nieplanowanych zdarzeń, które mogą powodować utratę funkcjonalności systemu oraz zwiększać czas jego naprawy [248]. W ujęciu kosztów cyklu życia, strategia reaktywna bazuje na danych historycznych i często nie pozwala na skuteczną optymalizację kosztów całkowitych w długim horyzoncie czasowym. Stąd jej stosowanie powinno być ograniczane do sytuacji, w których ryzyko awarii jest niskie, a konsekwencje akceptowalne (rys. 2.5).

Strategie proaktywne reprezentują nowoczesne podejście do zarządzania infrastrukturą, opierające się na systematycznym monitorowaniu stanu technicznego, analizie ryzyka oraz planowaniu działań utrzymaniowych z wyprzedzeniem. Podejście to przynosi korzyści w zakresie efektywności kosztowej, bezpieczeństwa drogowego oraz oddziaływania na środowisko [69]. Strategia ta może być stosowana między innymi do identyfikacji przyszłych kosztów, porównywania różnych wariantów oraz minimalizacji całkowitych kosztów cyklu życia obiektów. Wyróżnia się dwa typy strategii proaktywnej: prewencyjną oraz prognostyczną [248].

Strategie prewencyjne stanowią serię zaplanowanych działań mających na celu przedłużenie okresu eksploatacji elementów infrastruktury drogowej, poprzez wykonywanie regularnych, cyklicznych inspekcji, przeglądów i zabiegów naprawczych (utrzymanie okresowe) Strategie te są stosowane dla elementów charakteryzujących się niskim ryzykiem wystąpienia uszkodzenia przy potencjalnie wysokich konsekwencjach (rys. 2.5) np. obiekty mostowe [248].

Natomiast metody prognostyczne poprzedzone są inspekcjami i analizami skutków, które mają na celu zaprognozowanie czasu wystąpienia awarii systemu i ograniczenia jego konsekwencji finansowych. [248]. Metody te stosują modele predykcyjne wykorzystujące metody statystyczne do

prognozowania stanu technicznego elementów infrastruktury drogowej lub prognozowania np. liczby i skutków wypadków drogowych [144].

2.2.3. Metody analizy, oceny wyboru projektów infrastruktury drogowej

2.2.3.1. Metody oceny i wyboru projektów infrastruktury drogowej

Pierwszą analizą ekonomiczną stosowaną do oceny inwestycji drogowych była metoda minimalnych nakładów FA (Financial Analysis), która była stosowana w większości krajów do połowy lat 50. Umożliwiała ona wybór wariantu charakteryzującego się najniższymi kosztami inwestycyjnymi. W związku z tym metoda FA była przede wszystkim stosowana do wyboru różnych rodzajów technologii, materiałów, przy założeniu, że każdy z analizowanych wariantów spełniał minimalne wymagania związane z trwałością oraz niezawodnością [42]. Z punktu widzenia zarządcy drogi metoda ta może wspomagać proces tworzenia przetargów na projektowanie oraz budowę infrastruktury drogowej i jej elementów. Brak uwzględnienia rzeczywistych kosztów w analizie FA może wpłynąć na wybór rozwiązania, które w perspektywie czasu nie jest optymalne. Dlatego też zaleca się jej stosowanie na wstępnym etapie planowania inwestycji. Metoda minimalizacji nakładów finansowych jest tradycyjnym i prostym podejściem kosztowym w związku z czym zaczęła ustępować miejsca bardziej zaawansowanej metodzie, tj. analizie kosztów i korzyści CBA (Cost-Benefit Analysis), której pierwsze zastosowanie zostało opublikowane w 1951 roku [122].

Metoda CBA jest w literaturze określana różnymi terminami, takimi jak analiza rentowności, rachunek rentowności inwestycji, rachunek opłacalności inwestycji, rachunek efektywności ekonomicznej nakładów inwestycyjnych. Główną różnicą między metodą FA a CBA jest poszerzony zakres przepływów pieniężnych występujący w metodzie CBA. Analiza kosztów i korzyści uwzględnia nie tylko nakłady finansowe a również korzyści, oszczędności wynikające z realizacji inwestycji. Istotnym elementem metody CBA jest możliwość oszacowania kosztów oraz korzyści w całym cyklu życia infrastruktury drogowej i jej elementów – od etapu planowania, przez projektowanie, budowę i eksploatację, aż po likwidację. Dzięki temu metoda ta jest stosowana jako narzędzie wspierające proces decyzyjny przez cały okres funkcjonowania infrastruktury drogowej oraz jej poszczególnych elementów. Istotnym czynnikiem w metodzie analizy kosztów i korzyści jest uwzględnienie korzyści użytkowników dróg. Głównym celem metody efektywności ekonomicznej CBA jest minimalizacja nakładów finansowych związanych z etapem planowania, projektowania, budowy oraz eksploatacji przy jednoczesnej maksymalizacji korzyści użytkowników, tj. obniżenie kosztów związanych z wypadkami, eksploatacją pojazdów i stratami czasu. Metody oceny takie jak minimalnych nakładów inwestycyjnych oraz analizy kosztów i korzyści charakteryzują się zawężonym zakresem analizy – oceniają one inwestycje, w których efekty da się określić w wartościach pieniężnych, dlatego też określane są mianem metod monokryterialnych [50]. Metody FA oraz CBA nie uwzględniają m.in. czynników społecznych i środowiskowych, które bardzo często są wycenione ilościowo lub których nie da przedstawić się za pomocą wartości pieniężnych. Z uwagi na to, że kryterium ekonomiczne mogło obejmować tylko część wpływów (skutków) inwestycji drogowej w metodach decyzyjnych zaczęto stosować analizy wielokryterialne (MCA – Multi Criteria Analysis). Jednak rozwój metod wielokryterialnych służących do oceny przedsięwzięć drogowych nie spowodował dyskryminacji czy też zaniechania stosowania wcześniejszych, prostych metod. Sprawił on natomiast, że każda z nich została włączona do wyższego

poziomu analiz jako jedna z części elementarnych stosowana w procesie decyzyjnym [42]. Kluczową przewagą metod MCA nad tradycyjnymi podejściami FA i CBA jest ich wszechstronność, wynikająca z możliwości uwzględnienia zarówno jakościowych, jak i ilościowych aspektów inwestycji [165]. Dynamiczny wzrost popularności metody MCA w ciągu ostatnich 50 lat sprawił, że zaczęto stosować coraz więcej narzędzi i technik oraz kryteriów decyzyjnych [82], [24]. Występowanie znacznej ilości metod, narzędzi i różnorodnych podejść, założeń do metody wielokryterialnej sprawia, że może ona być wykorzystywana w sposób subiektywny [50].

W wielu krajach (głównie w Stanach Zjednoczonych, Niemczech, Szwajcarii) opracowano systemy oceny, rankingowania i wyboru projektów drogowych uwzględniających zasady zrównoważonego rozwoju. W systemach tych wykorzystywane są metody analizy wielokryterialnej z uwzględnieniem cyklu życia drogi. Zidentyfikowano kilkanaście systemów oceny i certyfikacji projektów infrastrukturalnych pod względem stosowania zasad zrównoważonego rozwoju jak np.: NISTRA [29] (w Szwajcarii), BNB [99] (w Niemczech), Greenroads [93], INVEST [75], BE²ST [146], (w USA), GreenPave [159] (w Kanadzie).

Systemy ocen i certyfikacji projektów były na ogół opracowywane przez zaufane organizacje rządowe i prywatne współpracujące ze środowiskiem akademickim [107], [93]. Zespoły te opracowały podręczniki umożliwiające przeprowadzenie oceny samodzielnie, ale także analizują, oceniają i certyfikują zgłaszane przez inwestorów lub zarządy drogowe projekty. Projekt, który jest oceniany przy użyciu systemu certyfikacji powinien spełniać pewne minimalne, obowiązkowe wymagania wstępne lub osiągnąć minimalną liczbę punktów w ocenie. W każdym z systemów rankingowych samoocena odbywa się bez udziału strony trzeciej (osoby certyfikującej), a jej celem jest pomiar i monitorowanie zrównoważonego rozwoju w celu zdefiniowania przyszłych celów rozwoju oraz analizowania i komunikowania zrównoważonego rozwoju z korzyścią dla społeczeństwa.

W kontekście inwestycji drogowych kryteria oceny wariantów można podzielić na kilka podstawowych grup, które pozwalają na kompleksową analizę wpływu przedsięwzięcia. Do najważniejszych kategorii należą kryteria: funkcjonalno-techniczne, społeczne, środowiskowe i ekonomiczne.

2.2.3.2. Kryteria funkcjonalno-techniczne

Aspekty funkcjonalne stanowią istotną części analizy, oceny i wyboru projektów drogowych zarówno na etapie planistycznym jak i projektowym. Infrastrukturę drogową ocenia się korzystając z tzw. miar funkcjonowania. Miary te, wyrażone w sposób jakościowy lub ilościowy, ukazują funkcjonowanie drogi przy założonych warunkach drogowych, ruchowych. Umożliwiają one ocenę akceptowalności warunków w kontekście założonych kryteriów. Infrastrukturę drogową można ocenić z wielu perspektyw, m.in. [205], [227]: kategorii funkcjonalnych i klas technicznych drogi, bezpieczeństwa ruchu drogowego, sprawności drogi i warunków zapewnienia mobilności, warunków ruchu potoku pojazdów, niezawodności drogi. Ocena technicznych aspektów inwestycji drogowej obejmuje m.in. sprawdzenie wykonalności technicznej, zgodności z przepisami oraz porównanie jakości rozwiązań projektowych. Najczęściej w analizach wielokryterialnych inwestycji drogowych stosuje się następujące kryteria: długość drogi, krętość drogi, natężenie ruchu, zajętość terenu zabudowanego oraz dostępność [83]. Jednak zakres rozpatrywanych kryteriów różni się w zależności od rodzaju badanego elementu

infrastruktury. W przypadku np. obiektów mostowych na proces decyzyjny wpływ będą mieć kryteria dotyczące trwałości obiektów, łatwości utrzymania i łatwości demontażu [99].

2.2.3.3. Kryteria społeczne

Analiza wpływu inwestycji drogowych na społeczeństwo jest ważnym filarem w metodzie wielokryterialnej. Ocena ta może być wykonana za pomocą metody S-LCA, która skupia się na ocenie oddziaływań inwestycji na różne grupy interesariuszy, takie jak np. lokalna społeczność, dzieci, pracownicy czy ogół społeczeństwa [92]. W ramach metody S-LCA uwzględnia się szeroką gamę kryteriów, obejmujących bezpieczeństwo, hałas, jakość powietrza, zatrudnienie, zdrowie społeczne, zajętość przestrzeni publicznej czy bezpieczeństwo pracowników. Do oceny jakości powietrza można na przykład wykorzystać wskaźniki emisji NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ czy SO_2 . Natomiast przestrzeń publiczną mierzy się m.in. poprzez ilość terenów zielonych w przeliczeniu na mieszkańca [92]. W analizach wielokryterialnych stosuje się również kryteria związane z akceptacją społeczną mierzoną za pomocą ankiet, opinii interesariuszy, konsultacji społecznych oraz wpływu na jakość życia takie jak: dostęp do usług, komfort podróży [106] oraz potencjalne przesiedlenia [48] liczone jako liczbę budynków mieszkalnych i gospodarczych do wyburzenia [83].

Ocena społecznego wpływu może być prowadzona dwoma podejściami: typ I, oparty na skali referencyjnej, wykorzystujący punkty odniesienia (PRP – performance reference points) oparte na standardach i przepisach oraz systemach ważenia i kodowania kolorami, a także typ II, który analizuje łańcuchy przyczynowo-skutkowe, pozwalając na identyfikację długoterminowych skutków społecznych poprzez zastosowanie wskaźników punktów środkowych i końcowych [92].

2.2.3.4. Kryteria środowiskowe

W analizie wielokryterialnej ważna jest również ocena oddziaływania inwestycji drogowej na środowisko naturalne. W analizie środowiskowej stosuje się różnorodne metody, techniki oraz narzędzia, które można podzielić na trzy główne grupy: metody jakościowe, półilościowe oraz ilościowe. Wybór odpowiedniej metody zależy od zakresu oraz szczegółowości analizy. Metody jakościowe, takie jak karty kontrolne oraz macierz MET (Material, Energy, Toxicity – zużycie materiałów, zapotrzebowanie na energię, emisje substancji toksycznych) pozwalają szybko zidentyfikować obszary wymagające poprawy oraz ocenić kryteria takie jak emisje zanieczyszczeń powietrza, zużycie materiałów i energii na poszczególnych etapach cyklu życia inwestycji [13]. Metody półilościowe umożliwiają dokładniejszą ocenę wpływu inwestycji na środowisko, uwzględniając kryteria takie jak generacja odpadów stałych i ciekłych, emisje gazowe, zajętość nowego terenu, a także kolizje z obszarami chronionymi i korytarzami migracji zwierząt [13]. Metody ilościowe, takie jak np. analiza cyklu życia LCA, dostarczają kompleksowej oceny oddziaływania inwestycji na środowisko przez cały okres jej funkcjonowania, poprzez ocenę wpływu m.in. na zdrowie ludzkie (np. efekt cieplarniany), jakość ekosystemu (np. zużycie terenu) oraz zużycie zasobów [143]. Wyniki analizy LCA są następnie przeliczane na ekopunkty, które umożliwiają porównanie wariantów inwestycyjnych pod kątem ich wpływu środowiskowego [143]. Ocena strat środowiskowych może być również przedstawiona w postaci monetarnej. W celu oszacowania wartości ekonomicznej strat środowiskowych stosuje się różne metody bezpośrednie [22] (np. wyceny warunkowej WTP – willingness to pay, WTA – willingness to accept), pośrednie wykorzystujące rynki konwencjonalne (np. metoda kompensacyjna, metoda wskaźnikowa) lub rynki

zastępcze (np. metoda kosztu podróży). Każda z dostępnych w literaturze metod ma jednak ograniczone możliwości zastosowania, głównie ze względu na zakres niezbędnych danych. Ponadto, wycena wiąże się z przeprowadzeniem długotrwałej i kosztownej analizy, a jej wyniki mogą zostać uznane za subiektywne.

2.2.3.5. Kryteria ekonomiczne

W analizach wielokryterialnych stosuje się również kryteria ekonomiczne, które umożliwiają ocenę efektywności ekonomicznej, czyli wskazania relacji pomiędzy uzyskanymi korzyściami z użytkowania infrastruktury a poniesionymi nakładami finansowymi. W praktyce stosuje się dwie grupy metod oceny efektywności ekonomicznej: proste oraz złożone (dyskontowe) [20], [124].

Proste metody oceny efektywności należą do tradycyjnych metod charakteryzujących się prostotą obliczeń przez co często są stosowane do wstępnej selekcji projektów inwestycyjnych [124]. Przyjmuje się w nich założenie, że wartość pieniądza jest niezmienna niezależnie od momentu pozyskania kwoty, dlatego też zalicza się je do metod statycznych. Najczęściej stosowanymi prostymi metodami oceny efektywności ekonomicznej są [21]: prosta stopa zwrotu, okres zwrotu. Główną wadą metod statycznych jest ich brak uwzględnienia w analizie pełnego okresu eksploatacji przedsięwzięcia oraz zmian wartości pieniądza w czasie, z tego względu metody proste stosuje się do wstępnej oceny efektywności inwestycji.

W odpowiedzi na ograniczenia metod statycznych zaczęto stosować metody dynamiczne, które umożliwiają znacznie precyzyjniejszą ocenę opłacalności efektywności ekonomicznej inwestycji, w których to podstawę obliczeń stanowią wartości dyskontowane. W praktyce do podstawowych wskaźników dynamicznych zalicza się [21], [20], [64], [97]: wartość bieżącą netto (NPV), wewnętrzną stopę zwrotu (IRR), zdyskontowany czas zwrotu nakładów (DPBT), wskaźnik korzyści i kosztów (BCR), równoważony jednolity roczny koszt (EUAC). Wskaźnik NPV umożliwia porównanie wariantów poprzez określenie różnic między wartością bieżącą przyszłych przepływów gotówkowych a początkowymi nakładami inwestycyjnymi dla każdej z wariantów. Kolejnym często stosowanym wskaźnikiem jest IRR, który stanowi uzupełnienie NPV. Poprzez wewnętrzną stopę zwrotu rozumie się stopę zwrotu z kapitału zainwestowanego w dane przedsięwzięcie [20], czyli stopę dyskontową, dla której wartość NPV przedsięwzięcia jest równa 0. W praktyce, przedsięwzięcie inwestycyjne jest akceptowane, w przypadku, gdy wartość IRR jest wyższa niż przyjęta przez inwestora wartość granicznej stopy zwrotu. Kolejnym wskaźnikiem wykorzystywanym do oceny i wyboru inwestycji drogowych jest zdyskontowany czas zwrotu nakładów. DPBT służy do wyznaczenia czasu jaki jest potrzebny do tego, aby zdyskontowane przepływy pieniężne zrekomensowały nakłady poniesione na inwestycje. Bardzo często do oceny inwestycji używany jest prosty wskaźnik BCR, który porównuje zdyskontowane oszczędności do nakładów w zadanym okresie. Gdy wartość BCR jest większa od 1 występuje uzasadnienie do podjęcia się danego przedsięwzięcia. Ostatnim wskaźnikiem ekonomicznym służącym do oceny kosztów w cyklu życia jest EUAC, który umożliwia porównanie kosztów dla obiektów o różnej długości życia poprzez przeliczenie zdyskontowanych kosztów na równoważne koszty roczne.

Bardzo duży wpływ na uzyskiwane wyniki w metodach złożonych ma stopa dyskontowa, która odzwierciedla ryzyko w ocenie ekonomicznej przedsięwzięć drogowych. Stopa dyskonta wyraża zmianę

wartości pieniądza w danym okresie (najczęściej 1 roku) [108] i jest przedstawiona za pomocą wartości procentowej, którą można wyznaczyć na podstawie wzoru 2.2.

$$a = \frac{FV - PV}{FV} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

gdzie:

a – stopa dyskonta (%),

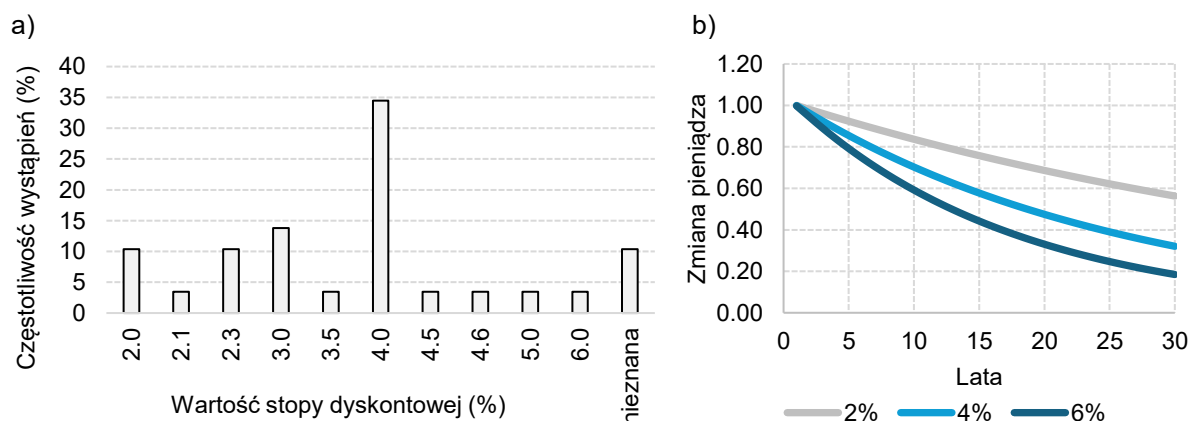
FV – przyszła wartość pieniądza,

PV – obecna wartość pieniądza.

Stopa dyskonta jest stosowana w procesie dyskontowania jako współczynnik uwzględniający spadek wartości pieniądza w czasie. Dyskontowania należy do powszechnie stosowanych technik finansowych umożliwiających porównanie kosztów i przychodów na różnych etapach cyklu życia obiektu, poprzez uwzględnienie między innymi inflacji [20]. Zastosowanie techniki dyskontowania w analizie efektywności ekonomicznej inwestycji umożliwia sprowadzenie wartości przyszłych strumieni kosztów i korzyści do ich ekwiwalentów w chwili dokonywania oceny. Pozwala to na uzyskanie porównywalności danych kosztowych rozłożonych w czasie oraz na objęcie analizą całego okresu życia inwestycji, co w rezultacie wpływa na dokładność przeprowadzonej analizy [124]. Technika ta umożliwia porównywanie różnych wariantów inwestycyjnych nawet gdy charakteryzują się one przepływami pieniężnymi w różnych momentach życia obiektu [168]. Oszacowanie obecnej wartości dla przyszłych przepływów pieniężnych wykonuje się zgodnie ze wzorem 2.3.

$$PV = \frac{FV}{(1 + a)^T} \quad (2.3)$$

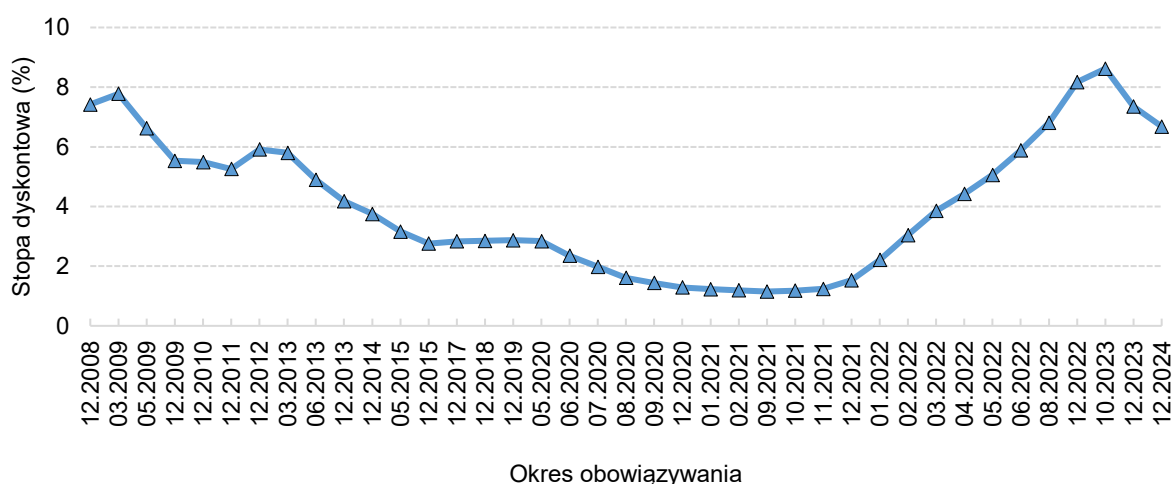
Dobór optymalnej stopy dyskontowej jest kluczowym krokiem w analizach ekonomicznych. Przyjmowanie wyższej stopy dyskontowej w analizach tożsame jest z uwzględnianiem wyższego poziomu ryzyka co prowadzi do obniżenia bieżącej wartości przepływów pieniężnych (PV) (rys. 2.6b). W analizach kosztów cyklu życia inwestycji drogowych najczęściej przyjmowano stopę dyskontową w przedziale 2–6%, co potwierdzają liczne badania [64], [181], [168] oraz przedstawione na zestawienie rys. 2.6a zestawienie stóp dyskontowych stosowanych w analizach NPV inwestycji drogowych w ok 30 publikacjach z lat 2011–2020.



Rys. 2.6 Stopa dyskontowa a) stosowana w analizach NPV inwestycji drogowych b) wpływ zmian na wartość pieniądza

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [168]

W analizach kosztów cyklu życia zaleca się stosowanie stopy dyskontowej odzwierciedlającej długookresowe trendy historyczne [64]. Na rys. 2.7 przedstawiono zmiany rzeczywistej wartości stóp dyskontowej w Polsce w latach 2008–2024. W badanym okresie wartość stopy dyskonta zmieniała się od minimalnej 1,5% do maksymalnej 8,75%, a średnio wyniosła 4,4%. W latach 2014–2020 średnia rzeczywista wartość stopy dyskontowej wynosiła 2,9%, jednak zgodnie z obowiązującymi wówczas zalecaniami w analizach ekonomicznych inwestycji drogowych przyjmowano stopę równą 4,5% [6]. Obecnie rekomenduje się stosowanie stopy dyskontowej na poziomie 3% [120]. W celu pełniejszej oceny ryzyka zaleca się, aby w analizach ekonomicznych uwzględnić wpływ stopy dyskontowej na zmianę całkowitych kosztów inwestycji.



Rys. 2.7 Zmiany wartości stopy dyskontowej w Polsce w latach 2008–2024

Źródło: Opracowanie własne

2.3. Metody szacowania kosztów cyklu życia

2.3.1. Definicje metody szacowania kosztów cyklu życia (LCC)

W celu zrozumienia istoty kosztu cyklu życia, w literaturze przedmiotu [18], [20], [242] często przywoływana jest metafora „góry lodowej”. Inwestorzy podejmujący decyzje dotyczące realizacji inwestycji zazwyczaj koncentrują się wyłącznie na kosztach początkowych, które są najłatwiejsze do oszacowania na etapie planowania. Natomiast koszty związane z kolejnymi fazami cyklu życia obiektu, takimi jak koszty eksploatacji, utrzymania i likwidacji nie są uwzględniane w analizach. Brak jednoznaczności w określaniu kosztów uznawanych za „ukryte” przyczynia się do występowania wielu interpretacji i definicji metody szacowania kosztów cyklu życia. Przykładowo zgodnie z definicją przedstawioną w normie ISO 15686-5 [108] LCC to metoda, która uwzględnia wszystkie istotne koszty od momentu pozyskania przez eksploatację aż do utylizacji. Z kolei zgodnie z definicją amerykańskiego instytutu rządowego (Federal Acquisition Institute – FAI) [72] są to wszystkie koszty ponoszone w trakcie cyklu życia budynku, systemu lub produktu, obejmujące koszty projektu, budowy, zakupu, użytkowania, konserwacji oraz wartość rezydualną, jeśli występuje. Jeszcze inne podejście prezentuje Center for Systems [35], według którego metoda LCC to całkowity koszt wdrożenia i posiadania systemu w całym okresie jego funkcjonowania, uwzględniający m.in. koszty rozwoju, zakupu, użytkowania, serwisowania, utrzymania oraz likwidacji.

Przedstawione podejścia można zapisać przy pomocy prostego modelu nieuwzględniającego zmianę wartości pieniądza w czasie według wzoru 2.4 lub złożonego modelu, uwzględniającego współczynnik dyskonta zgodnie ze wzorem 2.5:

$$LCC = C_0 + \sum_{i=1}^T C_i \quad (2.4)$$

$$LCC = C_0 + \sum_{i=1}^T \frac{C_i}{(1+a)^i} \quad (2.5)$$

gdzie:

C_0 – koszt początkowy (PLN),

C_i – koszty ponoszone w roku i (PLN),

a – stopa dyskontowa (%),

T – długość cyklu życia (lat).

W literaturze spotyka się również pojęcie całkowitego kosztu cyklu życia WLC (Whole Life Cost), które zgodnie z normą ISO 15686-5 [108] oznacza usystematyzowaną metodę oceny wszystkich kosztów i korzyści w całym okresie życia obiektu. Norma ta traktuje WLC jako rozszerzenie metody LCC poprzez uwzględnienie dodatkowych kosztów zewnętrznych, kosztów poza konstrukcyjnych oraz przychodów.

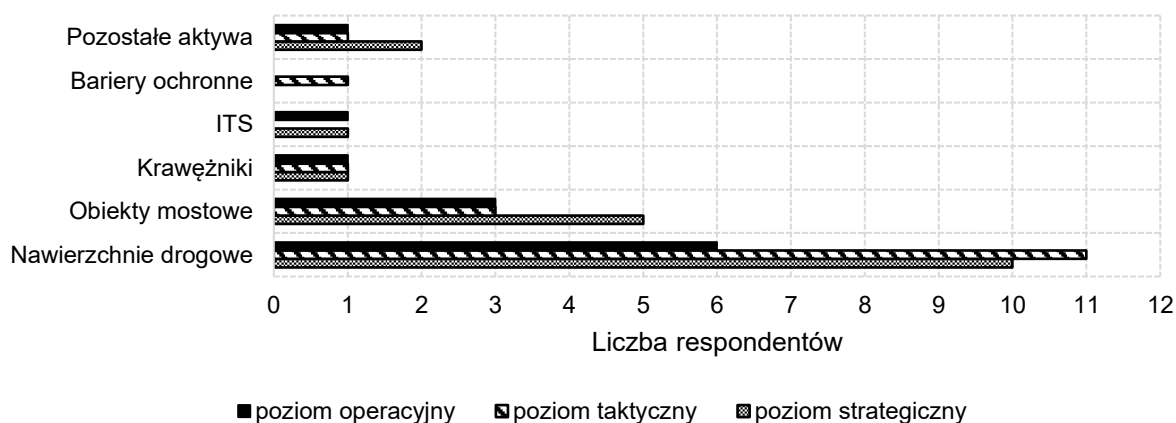
Jednak zakres kosztów branych pod uwagę w analizach LCC i WLC różni się w zależności od publikacji [108], [30], co sprawia, że terminy te bywają używane zamiennie. Na przykład w niemieckich wytycznych do metody LCC dla budynków [30] uwzględnia się koszty środowiskowe, które w normie ISO 15686-5 [108], są traktowane jako koszty zewnętrzne. Podobne rozbieżności można zaobserwować w analizach dotyczących drogowych barier ochronnych. Williams [238] przy szacowaniu kosztów cyklu życia drogowych barier ochronnych uwzględniał koszty ponoszone przez użytkowników (zdarzeń drogowych, straty czasu) oraz koszty środowiskowe, określając przy tym zastosowaną metodę jako WLC. Z kolei Karim [127], mimo uwzględniania podobnych kategorii kosztów (kosztów zdarzeń, kosztów strat czasu), sklasyfikował swoje podejście jako LCC.

W celu ujednolicenia terminologii na potrzeby dalszych analiz przyjmuje się, że metoda szacowania kosztów cyklu życia (metoda LCC) w przypadku elementów infrastruktury drogowej oznacza usystematyzowane podejście do szacowania ich kosztów życia uwzględniające filary zrównoważonego rozwoju. W związku z tym w metodzie tej uwzględnia się zarówno koszty ponoszone przez zarządcę drogi (koszty planowania, projektowania, budowy, utrzymania, likwidacji), jak i koszty ponoszone przez użytkowników dróg (straty czasu, zdarzenia drogowe, eksploatacja pojazdów) oraz koszty środowiskowe (emisja zanieczyszczeń).

2.3.2. Metody szacowania kosztów cyklu życia elementów infrastruktury drogowej

Metoda szacowania kosztów cyklu życia została po raz pierwszy zastosowana pod koniec lat 60. XX wieku na cele wojskowe. W roku 1983 US Navy wydało podręcznik [51], w którym przedstawiono jak wykorzystywać metodę LCC w zarządzaniu zasobami Marynarki Wojennej. Podręcznik ten szybko znalazł zastosowanie w innych dziedzinach przemysłu, przede wszystkim w branży lotniczej, energetyce, w branży chemicznej oraz w branży kolejowej [163], [132], [123].

Wraz ze wzrostem popularności tej metody zaczęto ją również wykorzystywać przy szacowaniu kosztów elementów infrastruktury drogowej takich jak obiekty mostowe, nawierzchnie drogowe. W XXI wieku rozszerzono jej zastosowanie na inne elementy m.in. drogowe bariery ochronne [45], [238], [177], [129], drogi dla pieszych [5], [9]. W praktyce metoda szacowania kosztów cyklu życia jest najczęściej stosowana dla oceny ekonomicznej nawierzchni drogowych oraz obiektów mostowych, o czym świadczą liczne wytyczne [217], [150], [185], [64], [215] oraz publikacje naukowe [11], [181], [222] poświęcone tej tematyce. Ponadto o popularności stosowania metod LCC w nawierzchniach drogowych i obiektach mostowych świadczą również wyniki raportu NCHRP 494 [176] ze Stanów Zjednoczonych. W raporcie tym [176] zarządcy infrastruktury drogowej wskazywali aktywa drogowe, w których uwzględniają zmienną długość życia w procesie zarządzania infrastrukturą drogową (rys. 2.8). Mimo tego, że drogowe bariery ochronne pełnią istotną funkcję w zapewnieniu bezpieczeństwa na drodze, jak i organizacji ruchu to były one najrzadziej wskazywanym aktywem drogowym, w którym uwzględniono cykl życia (1 wskazanie w ankiecie). Podobnie sytuacja wygląda w przypadku innych elementów infrastruktury drogowej, np. dróg dla pieszych i rowerów, które uwzględniane są przez ok. 1–2 zarządców drogowych w kontekście cyklu życia.



Rys. 2.8 Elementy infrastruktury drogowej, w których uwzględniono długość życia w [176]

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [176]

O niewielkiej popularności stosowania metod LCC dla drogowych barier ochronnych świadczy także ograniczona liczba publikacji naukowych podejmujących ten temat (tab. 2.1). Pierwsze badania w tym zakresie przeprowadził Williams [238], porównując koszty cyklu różnych rodzajów barier stalowych oraz betonowych zlokalizowanych na drodze M25 wokół Londynu. W metodzie zaprezentowanej przez Williamsa [238] w ocenie kosztów cyklu życia barier uwzględniono koszty: początkowe, utrzymania, likwidacji oraz koszty użytkowników (straty czasu, zdarzenia drogowe). Mimo, że głównym tematem badań [238] była identyfikacja oraz analiza zdarzeń z barierami ochronnymi na drogach krajowych w Wielkiej Brytanii, to w pracy tej nie przedstawiono modeli prognostycznych, które można zastosować do oszacowania kosztów zdarzeń z barierami. Pierwsze analizy dotyczące kosztów cyklu życia barier linowych można spotkać w pracy Coonera [45], gdzie zebrano informacje dotyczące częstości oraz konsekwencji zdarzeń z barierami linowymi oraz betonowymi w stanie Teksas w USA. Następnie wykonano analizę kosztów cyklu życia w celu porównania kosztów barier linowych oraz betonowych na podstawie ich średnich kosztów budowy oraz utrzymania [45]. W pracy tej [45] pominięto jednak

koszty wpływające na użytkowników dróg. Koszty użytkowników były uwzględniane natomiast w pracy Karima [127], który przeanalizował funkcjonowanie barier ochronnych na najdłuższej sieci dróg, ukazujący wpływ poszczególnych czynników na koszty utrzymania drogowych barier ochronnych w Szwecji. Głównym ograniczeniem w pracy Karima [126] było zastosowanie metody LCC dla jednego, krótkiego odcinka drogi (100 km), w związku z czym wyniki tej analizy nie mogą być zaimplementowane w sposób bezpośredni dla innych odcinków dróg charakteryzujących się odmiennymi parametrami geometrycznymi i ruchowymi. Najnowsze badania dotyczące szacowania kosztów cyklu życia zostały przeprowadzone przez Nematiego [177], który uwzględnił w kosztach zdarzeń drogowych czynniki wpływające na wypadnięcie pojazdu z drogi upraszczając tym samym model RSAPv3 na oczekiwane koszty zdarzeń. Niestety do opracowania modelu na koszty zdarzeń z barierami ochronnymi zastosowano dane Coopera [46] zebrane w roku 1978, znacznie odbiegające od warunków obecnych.

Tab. 2.1 Zestawienie zagranicznych prac dotyczących analiz kosztów cyklu życia barier ochronnych

Autor	Źródło	Kraj	Rok publikacji	Rodzaj barier	Długość odcinka	Baza zdarzeń drogowych
Williams	[238]	Wielka Brytania	2007	S, B	373 km	1990–2002
Conner	[45]	USA	2009	L, B	694 km	nd
Karim	[127],[129], [126]	Szwecja	2011	S, L, B	2670 km	2005–2008
Richards	[65]	Walia	2018	S, L, B	5 km	2005–2014
Nemati	[177]	USA	2024	S, B	3 km	1978

S – bariery stalowe, L – bariery linowe, B – bariery betonowe

Źródło: Opracowanie własne

Wykonane dotychczas badania dotyczące szacowania kosztów cyklu życia barier ochronnych skupiały się na konkretnych rodzajach barier. W żadnej z prac (tab. 2.1) nie przeanalizowano jak zmiana parametrów technicznych, szerokości pracującej, poziomu powstrzymywania, wpływa na koszt cyklu życia barier. Ponadto w większości przedstawionych badań analizowano bariery usytuowane w pasie dzielącym. Wyjątek stanowią badania Richardsa [65], w których oszacowano koszty cyklu życia barier w pasie dzielącym oraz w skrajni drogi, jednak analiza ta została wykonana na teoretycznym odcinku drogi. Ponadto wyniki dotyczące częstości i kosztów zdarzeń z barierami ochronnymi nie mogą być wprost wdrożone w innych analizach, co potwierdzają badania Richardsa [65] ukazując odmienne wyniki w wielkości kosztów zdarzeń barier stalowych oraz betonowych w porównaniu do badań Karima [127].

Z uwagi na liczne ograniczenia przedstawione wyniki badań nie mogą być wprost zaimplementowane dla polskich warunków, co rodzi konieczność opracowania metody LCC dla barier ochronnych.

W przypadku dróg dla pieszych, pieszo-rowerowych stosowanie metod szacowania kosztów cyklu życia występuje marginalnie [175]. Analiza kosztów cyklu życia dróg dla pieszych została wykonana m.in. przez ARA [5], w celu porównania dwóch rodzajów stosowanych nawierzchni (betonowej oraz asfaltowej). W związku z tym, że celem analizy LCC było porównanie dwóch rodzajów materiałów to w metodzie uwzględniono jedynie koszty związane z ich budową oraz utrzymaniem. Analiza kosztów cyklu życia dróg dla pieszych została również wykonana przy ocenie budowy infrastruktury

sportowo- rekreacyjnej w ramach ustawy PZP w Polsce [89]. W analizie tej w sposób deterministyczny uwzględniono koszty związane z nabyciem, użytkowaniem oraz utrzymaniem infrastruktury przy założonej długości cyklu życia wynoszącej 20 lat. Mimo tego, że budowa infrastruktury dla pieszych może wpłynąć w znaczący sposób na redukcję kosztów użytkowników dróg, to w przedstawionej analizie kosztów cyklu życia infrastruktury sportowo-rekreacyjnej pominięto koszty wypadków z pieszymi. Istotny wpływ na redukcję kosztów wypadków z pieszymi w związku z budową dróg dla pieszych potwierdzają m.in. badania Abou-Senna [1], z których wynika, że prawdopodobieństwo wypadku z pieszymi na odcinku drogi bez wydzielonej infrastruktury dla pieszych jest trzykrotnie większe niż na odcinkach z drogami dla pieszych.

2.3.3. Regulacje prawne w zakresie stosowania metod szacowania kosztów cyklu życia

Stosowanie metody szacowania kosztów cyklu życia jest w Unii Europejskiej uregulowane prawnie. Zgodnie z Dyrektywą 2014/24/UE „instytucje zamawiające mogą ustalać ofertę najkorzystniejszą ekonomicznie i ofertę o najniższym koszcie, stosując rachunek kosztów cyklu życia” [200]. Jak wynika z ustępu 1 tego artykułu, rachunek kosztu cyklu życia nie musi obejmować wszystkich kosztów cyklu życia. Niemniej niezwykle istotny jest art. 67 ust. 2 Dyrektywy 2014/24/UE, który nakłada na państwa członkowskie Unii Europejskiej obowiązek zapewnienia, iż instytucje zamawiające, które decydują się na stosowanie podejścia bazującego na rachunku kosztów cyklu życia, określały w dokumentach przetargowych następujące kwestie [216]:

- zakres danych, który powinni przedstawić oferenci;
- metodę, którą zastosuje instytucja zamawiająca do określenia kosztów cyklu życia na podstawie tych danych.

W Polsce zamawiający publiczny określając warunki wyboru najkorzystniejszej oferty może określić kryterium kosztu z wykorzystaniem rachunku kosztów cyklu życia [200]. Jeśli zamawiający szacuje koszty w oparciu o rachunek kosztów cyklu życia przedmiotu zamówienia, jest zobowiązany określić dane, które mają przedstawić wykonawcy i metodę, którą zastosuje do określenia kosztów cyklu życia na podstawie tych danych.

Zgodnie Dyrektywą 2014/24/UE [200] rachunek kosztów cyklu życia może obejmować przede wszystkim następujące grupy kosztów:

- poniesione przez zamawiającego lub innych użytkowników związane z nabyciem, użytkowaniem, utrzymaniem, wycofaniem z eksploatacji obiektu;
- przypisywane ekologicznym efektom zewnętrznym związane z cyklem życia produktu, usługi lub robót budowlanych dotyczące emisji gazów cieplarnianych i innych zanieczyszczeń oraz inne związane z łagodzeniem zmian klimatu (jeśli ich wartość pieniężną można określić i zweryfikować).

Chociaż Dyrektywa 2014/24/UE [200] wskazuje na potrzebę promowania podejścia opartego na rachunku kosztów cyklu życia, to nie przedstawia ona konkretnych procedur ani wytycznych dotyczących opracowania metod i modeli, które mogłyby być praktycznie stosowane w kontekście infrastruktury drogowej. Brak precyzyjnych ram metodycznych do stosowania analizy i szacowania kosztów cyklu życia elementów infrastruktury drogowej (z wyjątkiem obiektów mostowych i nawierzchni drogowych) stwarza istotne wyzwanie dla instytucji zamawiających oraz projektantów. W przypadku obiektów mostowych w ramach prac nad „Katalogiem typowych konstrukcji obiektów mostowych

i przepustów” [215] opracowano rozdział dotyczący szacowania kosztów LCC z ukazaniem praktycznego jej zastosowania. W przypadku nawierzchni drogowych przetłumaczono podręcznik EUPAVE [64], w którym zaprezentowano i wyjaśniono procedurę stosowania metody LCC. Niestety metoda ta nie została dostosowana do polskich warunków. Analiza kosztów cyklu życia znalazła również zastosowanie w zielonych zamówieniach publicznych na oświetlenie drogowe oraz sygnalizację świetlną [137]. W podręczniku tym przedstawiono sposób stosowania narzędzia obliczania LCC dla osób zajmujących się zamówieniami publicznymi. Oprócz infrastruktury drogowej badania w Polsce dotyczące stosowania metod LCC prowadzone są w szerokim zakresie dla budynków [189], [237] oraz ich wyposażenia [20] .

W związku z tym, konieczne jest opracowanie spójnej i możliwej do wdrożenia metodyki szacowania kosztów cyklu życia, która uwzględniałaby specyfikę inwestycji drogowych.

2.3.4. Metodyka opracowania metody szacowania kosztów cyklu życia

2.3.4.1. Procedura budowy metody LCC

Pomyślne wdrożenie metody szacowania kosztów cyklu życia obiektu podczas procesu planowania i projektowania dróg zależy od akceptacji zastosowanego podejścia przez podmioty zaangażowane w proces, co w dużej mierze wpływa na jej możliwości analityczne, jakość i dokładność wyników [91]. Metoda szacowania kosztów cyklu życia powinna uwzględniać scenariusze utrzymania badanego elementu (jeżeli występują), jego wymagania oraz ograniczenia; a przy tym być na tyle prosta aby mogła być w prosty sposób uaktualniania i modyfikowana [192]. W procesie opracowywania metody szacowania kosztów cyklu życia stosuje się wieloetapowe podejście, którego zakres i liczba etapów różni się w zależności od celu analizy LCC oraz obiektu [192], [11]. Przykładem elementu infrastruktury drogowej który charakteryzuje się odmienną procedurą LCC w porównaniu do obiektów mostowych i nawierzchni drogowych są bariery ochronne. W przypadku barier ochronnych nie określa się harmonogramu prac (etap ten jest pomijany), a jedynie identyfikuje czynności, działania, które mogą generować koszty w ich cyklu życia m.in. instalacja barier, naprawa barier [127].

Przedstawioną w literaturze procedurę budowy metody LLC można podzielić na 6 ogólnych etapów [115]:

1. Definiowanie celu i zakresu analizy.
2. Identyfikacja, dekompozycja składowych kosztów.
3. Wybór metody szacowania kosztów cyklu życia.
4. Szacowanie kosztów cyklu życia.
5. Analiza wrażliwości modelu.
6. Raport z wyników.

2.3.4.2. Definiowanie celu i zakresu analizy

Pierwszy etap jakim jest określenie celu i zakresu stosowania metody szacowania kosztów cyklu życia stanowi fundament budowy metody LCC. W ramach tego kroku definiuje się cel prowadzenia analizy LCC, jej założenia oraz wybiera obiekt badań. Analiza kosztów cyklu życia może być przeprowadzona w celu optymalizacji procesu zarządzania infrastrukturą drogową i jej elementami,

wspomagania procedury wyboru wariantów inwestycji, identyfikacji najbardziej istotnych czynników i składowych kosztów oraz działań wpływających na całkowity koszt cyklu życia [192], [108].

Istotnym również działaniem w etapie pierwszym jest przyjęcie założeń dotyczących okresu analizy oraz wielkości stopy dyskonta, które mogą istotnie wpłynąć na wyniki analizy LCC [64]. Długość przyjętego okresu analizy może zależeć od preferencji osoby wykonującej analizę LCC, celu badania oraz etapu cyklu życia, w którym wykonywana jest analiza. W przypadku stosowania analizy LCC do oceny wariantów, okres ten musi być na tyle długi aby umożliwić wskazania różnic pomiędzy badanymi aktywami ale nie musi obejmować takiej samej ilości działań naprawczych [76].

2.3.4.3. Identyfikacja i dekompozycja składowych kosztów cyklu życia

Zdefiniowanie celu oraz zakresu analizy wpływa na kolejny krok jakim jest identyfikacja i dekompozycja składowych kosztów obiektu. Krok ten w procesie zarządzania umożliwia kompleksową analizę kosztów, identyfikację działań, które mają wpływ na ich zmiany na każdym etapie cyklu życia elementu [190] oraz wybór najbardziej korzystnych ekonomicznie strategii utrzymaniowych. Dekompozycja kosztów cyklu życia powinna uwzględniać potrzeby i grupy osób dla jakich została opracowana metoda LCC [192], a tym samym definiować poziom uszczegółowienia metody LCC. Przedstawione w literaturze dekompozycje kosztów cyklu życia można podzielić na trzy grupy z uwagi na: zmienność, fazy życia, w których koszty są ponoszone oraz kryterium własności [91].

Kryterium cykliczności dotyczy powtarzalności kosztów w trakcie cyklu życia obiektu. W związku z tym koszty można podzielić na koszty stałe, które ponoszone są jednorazowo oraz koszty zmienne, które występują w każdym roku życia obiektu (np. koszty przeglądów i napraw) lub występują okresowo (np. koszty modernizacji). Taką klasyfikację zastosowano m.in. w badaniach [192], [45]. W przypadku analizy kosztów barier linowych i betonowych w Stanach Zjednoczonych [45] nie wyróżniono podziału na niższe poziomy szczegółowości. Model kosztów cyklu życia z uwzględnieniem cykliczności ich występowania można przedstawić za pomocą równania 2.6.

$$LCC = KS + KZ \quad (2.6)$$

gdzie:

LCC – łączny koszt cyklu życia obiektu ponoszony w okresie przyjętym do analizy (PLN),

KS – koszty stałe (niecykliczne), które występują jednorazowo w analizie (np. koszty instalacyjne) (PLN),

KZ – koszty zmienne (cykliczne), które charakteryzują się powtarzalnością w całym cyklu życia (np. koszty napraw barier) (PLN).

Kolejny podział kosztów cyklu życia bazuje na kryterium czasu i umożliwia zidentyfikowanie kosztów na każdym etapie ich cyklu życia. Podział ten jest szeroko stosowany w licznych badaniach [238], [18], [192], [20]. Z uwagi na kryterium czasu można wyróżnić trzy ogólne grupy odpowiadające kolejnym fazom cyklu życia inwestycji: koszty nabycia, posiadania oraz likwidacji opisane wzorem 2.7.

$$LCC = KN + KP + KL \quad (2.7)$$

gdzie:

KN – koszty nabycia (CAPEX, koszty kapitałowe), które są zazwyczaj łatwe do oszacowania przed podjęciem decyzji o zakupie, mogą obejmować także koszty instalowania urządzeń lub budowy obiektów (PLN),

KP – koszty posiadania (OPEX, koszty operacyjne) są często zasadniczym składnikiem LCC tj. w wielu przypadkach przekraczają koszty nabycia, są dosyć trudne do przewidzenia i oszacowania, mogą również obejmować koszty związane z instalowaniem (PLN),

KL – koszty likwidacji mogą w niektórych przypadkach stanowić znaczącą część łącznego LCC; w niektórych przypadkach regulacje prawne mogą narzucać zakres działań związanych z fazą likwidacji [192] (PLN).

Podziału kosztów cyklu życia można dokonać również przypisując wydatki do ich „właścicieli”. Na tej podstawie w literaturze wyróżnia się trzy grupy kosztów: koszty ponoszone przez zarządcę drogi, koszty ponoszone przez użytkowników drogi oraz koszty ponoszone przez społeczeństwo żyjące na obszarze, do którego należy droga [220], [219]. Zależność tą przedstawia wzór 2.8.

$$LCC = KZA + KUZ + KS \quad (2.8)$$

gdzie:

KZA – łączny koszt ponoszony przez zarządcę danego odcinka drogi w okresie przyjętym do analizy (PLN),

KUZ – łączny koszt ponoszony przez użytkowników danego odcinka drogi w okresie przyjętym do analizy (PLN),

KS – łączny koszt ponoszony przez społeczeństwo w okresie przyjętym do analizy (PLN).

Przykłady kosztów pogrupowane z uwagi na „właściciela” kosztów przedstawiono w tab. 2.2.

Tab. 2.2 Przykład dekompozycji składowych kosztów

Koszty inwestora, właściciela zarządcy	Koszty użytkowników	Koszty zewnętrzne Koszty społeczeństwa
Planowanie i projektowanie Pozyskiwanie gruntów Budowa Utrzymanie bieżące Utrzymanie okresowe Modernizacje Recykling	Czas podróży i opóźnień Kolizje, wypadki i ofiary wypadków Eksploatacja pojazdów	Emisje gazów toksycznych i gazów cieplarnianych Hałas Inne skutki społeczne

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: [76] i [214]

2.3.4.4. Metody szacowania kosztów cyklu życia

Stosowane powszechnie metody szacowania kosztów cyklu życia urządzeń i obiektów infrastruktury drogowej można sklasyfikować z uwagi na jakość oraz dostępność do danych. W literaturze można spotkać aż pięć metod szacowania kosztów [196] (rys. 2.8):

- bazujące na opinii ekspertów,
- trójpunktowe,
- porównawcze,
- parametryczne,
- inżynierskie.

Najczęściej jednak przy szacowaniu kosztów cyklu życia wyróżnia się podział na trzy podstawowe modele: porównawcze, inżynierskie oraz parametryczne [95], [192], [56].

Najszybszym, ale za to najmniej dokładnym sposobem szacowania kosztów cyklu życia jest metoda bazująca na opinii ekspertów (metoda jednopunktowa), w której eksperci na podstawie własnych doświadczeń wskazują czynniki i okoliczności, które mogą wpłynąć na wzrost kosztów.

Dokładniejszy wynik w szacowaniu kosztów cyklu życia można uzyskać poprzez uwzględnienie niepewności i ryzyka, czyli stosowania metod trójpunktowych. W metodach tych uwzględnia się ryzyko poprzez uwzględnienie trzech podstawowych scenariuszy i przyjętych rozkładów kosztów. Powszechnie w metodzie trójpunktowej stosuje się rozkład trójkątny lub rozkład beta wywodzący się z tradycyjnej analizy PERT [196]. Oczekiwany koszt można obliczyć na podstawie rozkładu beta z trzech analizowanych scenariuszy zgodnie ze wzorem 2.9.

$$C_E = \frac{C_O + 4 \cdot C_M + C_P}{6} \quad (2.9)$$

gdzie:

C_E – oczekiwany koszt inwestycji (PLN),

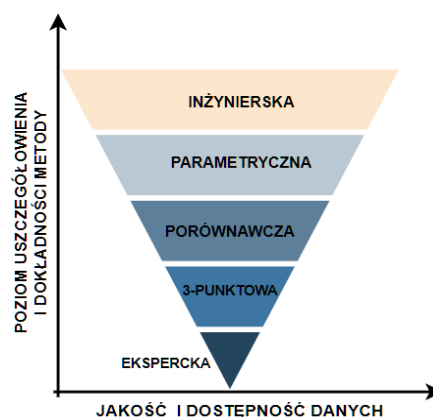
C_O – koszty inwestycji w scenariuszu optymistycznym (PLN),

C_M – koszty inwestycji w scenariuszu najbardziej prawdopodobnym (PLN),

C_P – koszty inwestycji w scenariuszu pesymistycznym (PLN).

W przypadku braku lub ograniczonej dostępności do danych w szacowaniu kosztów cyklu życia obiektów stosuje się metodę porównawczą. W metodzie tej wykorzystuje się nabyte doświadczenia z wykonanych dotychczas analiz kosztowych dla podobnych inwestycji [56]. Za punkt bazowy w metodzie porównawczej przyjmuje się rzeczywisty koszt podobnego i zrealizowanego projektu na podstawie, którego szacuje się koszty dla nowego przedsięwzięcia. W podejściu tym zakłada się korygowanie bazowego kosztu cyklu życia w zależności od różnic wynikających z złożoności projektu. Do podstawowych zalet metod porównawczych należy oszczędność czasu oraz kosztów związanych z wykonywaniem analizy kosztów i korzyści [196]. Jednak mimo zalet metoda ta charakteryzuje się mniejszą dokładnością niż metody inżynierskie oraz parametryczne.

W przypadku posiadania historycznych danych kosztowych można stosować metodę szacowania kosztów parametryczną. W metodzie tej wykorzystuje się zależności statystyczne pomiędzy danymi archiwalnymi, a innymi zmiennymi niezależnymi w celu oszacowania takich zmiennych zależnych jak np. koszt czy czas realizacji inwestycji [196]. Na podstawie analizy regresji opracowywane są modele równań, ukazujące zależności pomiędzy poszczególnymi zmiennymi. Dokładność metody parametrycznej zależy od jakości i dokładności danych na podstawie, których został opracowany model.



Rys. 2.9 Metody szacowania kosztów cyklu życia

Źródło: Opracowanie własne

Na etapach budowy i eksploatacji, gdy posiada się więcej informacji dotyczących inwestycji do określenia kosztów cyklu życia często stosuje metodę szacowania oddolnego (metodę inżynierską). W inżynierskim modelu szacowania kosztów, parametry poszczególnych składowych kosztów całkowitych są szacowane bezpośrednio przez badanie wyrobu element po elemencie. Koszt poszczególnych elementów i działań szacuje się na możliwym najbardziej szczegółowym poziomie. W celu ustalenia kosztu każdego elementu i jego powiązań z innymi stosuje się standardowo ustalone wskaźniki kosztów np. rzeczywiste oszacowania inżynierskie [56]. Wysokość kosztów oraz dokładność ich oszacowania zależy od wielkości i złożoności poszczególnych aktywów.

2.3.4.5. Szacowanie kosztów cyklu życia

Wyróżnia się dwa podejścia do wykonywania analizy LCC różniące się sposobem uwzględniania niepewności i zmienności parametrów wejściowych [59], [76], [214]: podejście deterministyczne oraz probabilistyczne. W praktyce wybór podejścia zależy od dostępności danych oraz preferencji osoby prowadzącej analizę LCC. W przypadku szacowania składowych kosztów inwestycji drogowych dominuje podejście deterministyczne, chociaż może być ono zamiennie stosowane z podejściem probabilistycznym (tab. 2.3).

W przypadku podejścia deterministycznego do szacowania kosztów cyklu życia przyjmuje się stałe wartości parametrów wejściowych na podstawie wiedzy i doświadczenia osoby przeprowadzającej analizę LCC. Mimo, że do analiz przyjmowane są wartości najbardziej prawdopodobne to w ujęciu kosztowym nie uwzględnia się niepewności wyników. Mimo tej wady, podejście deterministyczne jest powszechnie stosowane, o czym świadczy przyjmowanie wartości stałych w ponad 80% wykonanych analiz LCC przez administracje w Stanach Zjednoczonych [214]. Popularność podejścia deterministycznego w analizach LCC uzasadnia prostota, szybkość wykonywania analiz LCC oraz łatwość ich interpretacji. Analiza wykonana w sposób deterministyczny najczęściej jest uzupełniana o dodatkowe analizy, tj. wrażliwości lub scenariuszy w celu oceny wpływu poszczególnych parametrów na wynik końcowy.

Natomiast podejście probabilistyczne umożliwia dokładniejszą analizę ryzyka w metodach LCC, poprzez określenie rozkładu kosztów, a nie jedynie ich zakresu, jak to ma miejsce w metodach deterministycznych. Metody probabilistyczne umożliwiają opisanie danych wejściowych poprzez rozkłady ich prawdopodobieństwa. Najczęściej w analizach tych do szacowania kosztów przyjmowane są następujące rozkłady zmiennych [102], [126], [147], [212]: normalny, log-normalny, trójkątny. Stosowane są również inne rozkłady m.in. Weibulla do szacowania długości życia elementów i Poissona w celu przewidywania prawdopodobieństwa zdarzeń. Po ustaleniu rozkładu zmiennych, za pomocą programów symulacyjnych w sposób losowy wybiera się wartości zmiennych zależnych w celu opracowania rozkładu prawdopodobieństwa kosztów cyklu życia inwestycji drogowych. Podejście probabilistyczne umożliwia porównywanie kosztów różnych wariantów z uwzględnieniem poziomu ryzyka. Podejście to, mimo że jest zalecane do stosowania m.in. przy analizach kosztów cyklu życia nawierzchni to nie jest powszechnie stosowane z uwagi na: złożoność, trudność w zdefiniowaniu rozkładu prawdopodobieństwa zmiennych.

Tab. 2.3 Zestawienie składowych kosztów cyklu życia i sposobu ich szacowania

Składnik kosztów	Parametr	Podejście	PB	KO	KI	MD	DH	JP	SDR	IN
Budowa	Geometria obiektu	DET	x							
	Cena jednostkowa	PRB lub DET		x						
Bieżące utrzymanie	Geometria obiektu	DET	x							
	Cena jednostkowa	PRB lub DET			x					
Remonty częściowe	Geometria obiektu	DET	x							
	Cena jednostkowa	DET		x						
	Okres czasu	PRB lub DET					x			
Naprawa, modernizacja, przebudowa	Geometria obiektu	DET	x							
	Cena jednostkowa	PRB lub DET		x						
	Okres czasu	PRB lub DET				x	x			
Przeglądy	Okres czasu	PRB lub DET				x				x
Rozbiórka	Geometria obiektu	PRB lub DET								x
	Cena jednostkowa	PRB lub DET		x						
	Okres czasu	PRB lub DET				x				
Recykling	Cena jednostkowa	DET		x						
Eksploatacja pojazdów, czas pracy kierowców, pasażerów	Cena jednostkowa	PRB lub DET						x		
	Wielkość i rozkład ruchu	PRB lub DET							x	
	Prędkość podróży	PRB lub DET							x	
	Stan techniczny nawierzchni	PRB lub DET				x				x
	Długość odcinka drogi	DET	x							
Czas pracy w transporcie	Cena jednostkowa	PRB lub DET						x		
Wypadki drogowe	Wielkość i rozkład ruchu	PRB lub DET							x	
	Cena jednostkowa	PRB lub DET						x		
	Wielkość i rozkład ruchu	PRB lub DET							x	
	Długość odcinka drogi	DET	x							
	Szerokości użytkowe drogi	DET	x							
Hałas drogowy	Cena jednostkowa	PRB lub DET						x		
	Wielkość i rozkład ruchu	PRB lub DET							x	
	Prędkość podróży	PRB lub DET							x	
Emisja toksycznych spalin	Cena jednostkowa	PRB lub DET						x		
	Wielkość i rozkład ruchu	PRB lub DET							x	
	Prędkość podróży	PRB lub DET							x	
	Długość odcinka drogi	DET	x							

DET – deterministyczne, PRB – probabilistyczne, PB – projekt budowlany, KO – kosztorys ofertowy, KI – kosztorys inwestorski, wskaźniki, MD – modele degradacji, DH – dane historyczne, JP – publikowane wartości (Jaspers), SDR – prognozy ruchu i natężenie ruchu, IN – inne źródła np. systemy SOSN, projekt rozbiórki.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: [214]

2.3.4.6. Analiza niepewności i ryzyka

Wyniki szacowania kosztów cyklu życia w dużej mierze zależą od dostępności, jakości danych wejściowych oraz przyjętych założeń. Braki w informacjach, utrudnienia związane z przewidywaniem prac utrzymaniowych oraz wprowadzanie nowych technologii wpływa na rosnącą niepewność i ryzyko związane z szacowaniem kosztów cyklu życia, które może wpłynąć na błędną interpretację wyników LCC i tym samym podejmowanie błędnych decyzji [192]. W celu zniwelowania ryzyka w deterministycznych analizach kosztów cyklu życia stosuje się analizę wrażliwości [236].

Analiza wrażliwości wykonywana jest w celu identyfikacji czynników wpływających na zmianę składowych lub całkowitych kosztów cyklu życia elementów. Metoda ta umożliwia ocenę jak zmiana jednego parametru np. o zadany procent lub w przedziale wartości, który jest przyjmowany na podstawie rozkładu zmiennej i przy zachowaniu wartości stałych pozostałych parametrów, wpływa na zmianę kosztów cyklu życia. Dzięki temu analiza wrażliwości umożliwia określenie jak poszczególne parametry

wejściowe wpływają na całkowity koszt cyklu życia oraz opracowanie rankingu najbardziej istotnych zmiennych [64]. Zazwyczaj analiza wrażliwości przeprowadzana jest dla parametrów dotyczących długości życia, stopy dyskontowej, rodzaju i częstości wykonywanych prac utrzymaniowych oraz pozostałych parametrów wpływających na koszty cyklu życia. W Polsce analiza wrażliwości jest wykonywana w analizie kosztów i korzyści przy wyborze wariantu drogowego zgodnie z wytycznymi opisanymi w podręczniku Jaspers [120]. Zgodnie z nimi analiza wrażliwości ocenia efektywność ekonomiczną inwestycji dla czterech scenariuszy badawczych: (1) obniżenie średniodobowego natężenia ruchu o 15%, (2) podwyższenie nakładów inwestycyjnych o 35%, (3) obniżenie kosztów czasu podróży o 15% oraz (4) obniżenie natężenia ruchu o 15% przy jednoczesnym podwyższeniu nakładów inwestycyjnych o 20% [120].

W podejściu deterministycznym do szacowania niepewności wyników LCC oprócz analizy wrażliwości stosuje się również analizę scenariuszy. Najczęściej wykonuje się ją dla przynajmniej dwóch różnych wariantów (np. różnych stóp dyskontowych, okresów eksploatacji czy długości życia) [102]. Analiza scenariuszy może być również wykonana jedynie do oceny „najgorszego” przypadku.

W ramach podejścia probabilistycznego ryzyko i niepewność uwzględniana jest poprzez zastosowanie rozkładów prawdopodobieństwa dla parametrów wejściowych lub poprzez ich próbkowanie. Do określenia rozkładu zmiennych najczęściej wykorzystuje się dane historyczne [102]. W przypadku ograniczonej wiedzy na temat rozkładu danych, przyjmuje się najczęściej rozkład trójkątny, który pozwala przypisać parametrowi wejściowemu wartość minimalną, maksymalną oraz najbardziej prawdopodobną. Na podstawie tych rozkładów można przeprowadzać symulacje probabilistyczne za pomocą np. metody Monte Carlo. Symulacja ta umożliwia uwzględnienie zmienności i niepewności parametrów wejściowych poprzez ich wielokrotne próbkowanie i w ostateczności pozwala na opracowanie rozkładu prawdopodobieństwa kosztów cyklu życia. Metoda Monte Carlo w szacowaniu kosztów cyklu życia znalazła zastosowanie w nawierzchniach drogowych, obiektach mostowych, barierach ochronnych [102], [59]. Główne ograniczenia metod probabilistycznych to m.in. wysokie wymagania dotyczące danych oraz złożoność obliczeniowa.

Alternatywą lub uzupełnieniem metod probabilistycznych może być teoria możliwości, która umożliwia analizę i interpretację wyników przy bardziej ograniczonej dostępności do danych np. danych niekompletnych, niejednoznacznych lub niedostatecznej wiedzy eksperckiej. Teoria możliwości umożliwia bardziej elastyczną interpretację wyników analizy i może być stosowana równolegle z metodami probabilistycznymi [102]. Przykładem takich metod stosowanych do analizy ryzyka są m.in. zbiory rozmyte [188], [235].

2.4. Modele składowych kosztów cyklu życia infrastruktury drogowej

2.4.1. Wprowadzenie

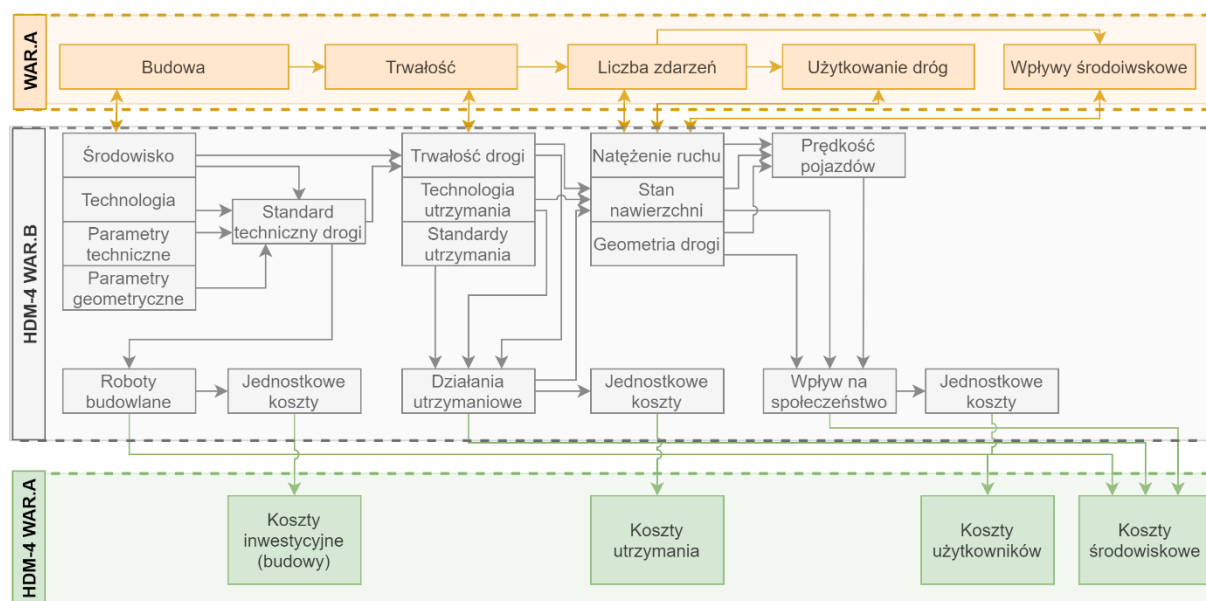
Modele szacowania kosztów cyklu życia w zależności od celu analizy i dostępności danych mogą być stosowane jako proste kalkulacje bazujące na średnich wycenach lub przyjmować postać złożonych modeli matematycznych. W celu określenia wpływu poszczególnych zmiennych na koszty cyklu życia stosuje się szereg powiązanych ze sobą modeli szacujących koszty ponoszone zarówno przez inwestora, właściciela obiektu jak i jego użytkownika. Najczęściej w analizach LCC stosuje się modele [211], [130], [120] (warstwa WAR.A na rys. 2.10):

- 1) kosztów inwestycyjnych – umożliwiają one wstępne oszacowanie kosztów projektu,
- 2) trwałości – stosowane są one do określenia harmonogramu prac naprawczych oraz kosztów utrzymaniowych,
- 3) częstości oraz liczby zdarzeń – stanowią one podstawę do określenia kosztów utrzymania oraz kosztów użytkowników dróg.
- 4) kosztów użytkowników dróg – związane są one ze zdarzeniami drogowymi, czasem podróży oraz kosztami eksploatacyjnymi.
- 5) kosztów środowiskowych – określają one negatywne oddziaływanie inwestycji na środowisko naturalne.

Każda z tych grup modeli wykorzystuje zbiór czynników, których analiza pozwala na określenie wielkości poszczególnych składowych kosztów cyklu życia. W standardzie HDM-4 [14] składowe te dzieli się na cztery główne grupy kosztów: koszty inwestycyjne, koszty utrzymania, koszty użytkowników oraz koszty środowiskowe (rys 2.10 – HDM-4WAR.A) i wyróżnia się podstawowy zbiór czynników związanych m.in. ze stanem technicznym dróg, natężeniem ruchu, prędkością (rys 2.10 – HDM-4WAR.B), które mają wpływ na wielkość analizowanych kosztów.

Rysunek 2.10 przedstawia strukturę powiązań między grupami modeli (WAR.A) a czynnikami określonymi w HDM-4 [14] oraz składowymi kosztów cyklu życia.

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono przykłady stosowanych w literaturze modeli szacowania kosztów cyklu życia oraz ukazano szczegółowo czynniki wpływające na ich zmianę.



Rys. 2.10 Powiązania pomiędzy czynnikami, modelami a składowymi kosztów LCC dróg

Opracowanie własne na podstawie HDM-4 [14]

2.4.2. Modele kosztów inwestycyjnych

Modele kosztów inwestycyjnych stanowią punkt wyjścia w metodach LCC, umożliwiając porównanie wariantów pod kątem kosztów początkowych obejmujących m.in. planowanie, projektowanie i budowę. Ze względu na ograniczoną dostępność danych we wczesnych fazach planowania, precyzyjne szacowanie kosztów stanowi istotne wyzwanie dla zarządców infrastruktury drogowej [151]. W przypadku analiz obejmujących wiele wariantów inwestycyjnych, konieczność każdorazowego

opracowania szczegółowych przedmiarów robót i kosztorysów inwestorskich może znacząco wydłużać cały proces decyzyjny. W związku z tym zdarza się, że do szacowania kosztów wykorzystuje się dane historyczne przyjmując koszty te jako uśrednione wartości. Jak jednak zauważa Simić [211], dostępność tych danych bywa ograniczona, a same dane mogą być niespójne oraz ograniczone. W związku z tym, że koszty budowy dróg są zmienne i zależą od wielu czynników, takich jak m.in. czas realizacji inwestycji, lokalizacja geograficzna, ukształtowanie terenu, poziom inflacji oraz specyfika projektu [44], podejmowano liczne próby opracowania modeli predykcyjnych kosztów inwestycyjnych oraz identyfikacji ich zmiennych niezależnych. Jedną z najczęściej stosowanych metod w tym zakresie jest analiza regresji. Przykładowo modele regresji zastosował w swoich badaniach Xia [243] analizując jak parametry techniczne i ekonomiczne wpływają na jednostkowe koszty budowy dróg. Regresja wieloraka została również zastosowana przez Mahamida [158], który opracował dziesięć modeli predykcyjnych kosztów budowy dróg. Przykładowy model kosztów budowy drogi zaproponowany przez Mahamida [158] przedstawia równanie 2.10.

$$TC = 142,6 \cdot x_8 + 28882,7 \cdot x_9 - 196877,7 \quad (2.10)$$

gdzie:

TC – całkowity koszt drogi (\$),

x_8 – długość drogi (m),

x_9 – szerokość drogi (m).

W przypadku pozostałych elementów infrastruktury drogowej takich jak np. bariery ochronne, drogi dla pieszych czy drogi rowerowe w literaturze nie występują szeroko opisywane modele predykcyjne kosztów budowy, porównywalne pod względem szczegółowości z tymi opracowywanymi dla wariantów tras drogowych. W analizach LCC koszty tych obiektów są najczęściej szacowane na podstawie uśrednionych jednostkowych wartości kosztów, pochodzących z kosztorysów inwestorskich lub katalogów cenowych [127], [238].

Przewidywane koszty początkowe nie są jednak wystarczające do pełnej analizy kosztów drogowych w cyklu ich życia, konieczne jest również uwzględnienie kosztów związanych z etapem eksploatacji. W związku z tym ważne są badania prognozujące trwałość elementów infrastruktury, które warunkują częstotliwość napraw i koszt całkowity w cyklu życia obiektu.

2.4.3. Modele trwałości

Kolejnymi modelami, które odgrywają kluczową rolę w analizie kosztów cyklu życia infrastruktury drogowej są modele prognostyczne służące do prognozowania długości życia elementów drogowych oraz określania momentów wymaganych działań i prac utrzymaniowych.

Stosowane w literaturze modele trwałości [39], [130] z uwagi na ich cel stosowania można podzielić na dwie grupy: (1) modele degradacji oraz (2) modele prognozowania żywotności. Głównym celem modeli degradacji jest określenie stanu, wydajności danego aktywów w wybranym horyzoncie czasowym. Natomiast modele prognozowania żywotności są stosowane w celu określenie czasu, w którym to badany element drogowy przestanie być funkcjonalny, użyteczny [16]. W procesie budowy tych modeli trwałości stosowane są zarówno metody deterministyczne, probabilistyczne jak i uczenie maszynowe.

Większość dostępnych modeli koncentruje się na ocenie nawierzchni drogowych, co potwierdza przegląd literatury opracowany przez Karimzadeha [130] obejmujący badania modeli trwałości z ostatnich dwóch dekad. W badaniach trwałości nawierzchni drogowych uwzględnia się zarówno modele degradacji jak i prognozowania żywotności za pomocą takich metod jak regresje wielowymiarowe, funkcje degradacji bazujące na empirycznych krzywych stanu czy modele Markowa [234], [41]. Poza nawierzchniami modele trwałości tworzone są również m.in. dla oznakowania pionowego i poziomego. W przypadku oznakowania poziomego analizuje się spadek właściwości refleksyjności na podstawie modeli probabilistycznych oraz deterministycznych uwzględniających m.in. takie zmienne jak różny typ zastosowanego materiału, natężenie ruchu drogowego czy też warunków atmosferycznych.

Modele trwałości znajdują również zastosowanie w kontekście oceny funkcjonowania barier ochronnych i koncentrują się na predykcji ich żywotności. W przeciwieństwie do nawierzchni drogowych, oznakowania poziomego trwałość barier nie jest oceniana na podstawie stopniowej degradacji materiału, a poprzez skutki zdarzeń drogowych takich jak uszkodzenia oraz częstość ich napraw. Skutki zdarzeń w tym wielkości kosztów napraw barier w kontekście ich kosztów cyklu życia analizował w swoich badaniach m.in. Karim [129], Chimba [40]. Jednak w pracach tych nie opracowano modeli szacujących liczbę napraw oraz długość uszkodzeń barier, a jedynie wskazano czynniki wpływające na koszty napraw.

W celu opracowania modeli kosztów napraw konieczne jest więc określenie wielkości strat związanych ze zdarzeniami drogowymi. Długość uszkodzeń barier ochronnych może być analizowana w kontekście pojedynczego zdarzenia pojazdu z wybraną barierą ochronną. Wówczas do takiej oceny najczęściej wykorzystuje się dane pozyskane z badań terenowych oraz symulacyjnych, na podstawie których definiowana jest zależność pomiędzy prawdopodobieństwem uszkodzenia bariery a czynnikami wpływającymi na absorbowaną przez nie energię – prędkość, masę pojazdu oraz kąt uderzenia w barierę [32], [119]. Konsekwencje pojedynczych zdarzeń z barierami w postaci długości uszkodzeń przeanalizował m.in. w swojej dysertacji Jeliński [121], który na podstawie danych pozyskanych w ramach projektu RID 3B [198] i RID 3A [199] opracował modele długości uszkodzeń barier stalowych, linowych oraz betonowych na drogach krajowych. Przykładowy model na długość uszkodzenia barier stalowych zależny od różnych parametrów przedstawia wzór 2.11. Równanie to może być stosowane do określenia długości uszkodzeń barier ochronnych o różnych parametrach technicznych a tam samym określania kosztów napraw różnych rodzajów barier ochronnych.

$$DU_s = 0,129 \cdot DM^{0,377} \cdot VPL^{0,823} \cdot MP^{0,360} \cdot KU^{-0,451} \cdot \exp\left(-0,086 \cdot \frac{EKL}{100}\right) \quad (2.11)$$

gdzie:

DU_s – długość uszkodzenia bariery stalowej (m),

DM – znormalizowane ugięcie bariery (m),

VPL – prędkość poprzeczna pojazdu uderzającego w barierę (km/h),

MP – masa pojazdu uderzającego w barierę ochronną (kg),

KU – kąt uderzenia pojazdu w barierę ochronną (°),

EKL – maksymalna (normatywna) energia kinetyczna poprzeczna bariery ochronnej (kJ).

Funkcjonalność barier ochronnych może być również oceniana w kontekście makroskopowym analizując długości uszkodzeń na odcinkach dróg, wówczas w celu predykcji długości uszkodzeń stosuje się modele uwzględniające narażenie na ryzyko jakim jest natężenie ruchu drogowego. W modelach tych do oszacowania całkowitej długości napraw istotny element odgrywają modele częstości i liczby zdarzeń drogowych. Modele na długość uszkodzeń barier na odcinku dróg krajowych w Polsce opracował w swoich badaniach m.in. Jeliński [121], który zbudował 16 modeli regresyjnych do szacowania długości uszkodzeń barier ochronnych. Przykład jednego z rekomendowanych modeli przedstawia równanie 2.12.

$$LUO_s = LZDB \cdot \exp(1,793 + 1,788 \cdot UCP + 1,040 \cdot WZA + 0,414 \cdot WBL) \quad (2.12)$$

gdzie:

$LZDB$ – liczba zdarzeń z barierami (zd./rok),

UCP – udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (–),

WZA – współczynnik wykrywalności zdarzeń (–),

WBL – współczynnik udziału krawędzi jezdni zabezpieczonych barierami linowymi (–).

Podstawową zmienną niezależną w opracowanym modelu jest liczba zdarzeń. Modele częstości i liczby zdarzeń stanowią, więc podstawę do określenia nie tylko trwałości barier, ale również kosztów związanych z zapewnieniem ich funkcjonalności. Dlatego też w analizach cyklu życia barier kluczowe znaczenie mają nie tyle klasyczne modele degradacji, ile modele prognozujące częstość oraz liczbę zdarzeń drogowych.

2.4.4. Modele częstości i liczby zdarzeń drogowych

W celu określenia kosztów utrzymania oraz użytkowania elementów infrastruktury drogowej konieczne jest oszacowanie częstości oraz liczby zdarzeń drogowych. W literaturze wyróżnia się dwa podejścia w analizie i predykcji zdarzeń drogowych: mikroskalowe oraz makroskalowe. Podejście mikroskalowe stosuje się do analizy czynników i skutków pojedynczych zdarzeń drogowych.

Podejście to jest szczególnie popularne w szczegółowych analizach wypadków polegających na rekonstrukcji zdarzeń drogowych w celu identyfikacji ich przyczyn. Podejście mikroskalowe zostało również zastosowane w barierach ochronnych do identyfikacji parametrów wpływających na siłę uderzenia pojazdów (masy, prędkości oraz kąt wypadnięcia) oraz jej efekty związane z utratą funkcjonalności barier na skutek absorpcji energii uderzenia [32], [119]. Podejście to znalazło zastosowanie m.in. w badaniach eksperymentalnych i testach zderzeniowych (np. wg normy EN 1317 [191]), a także w projektowaniu urządzeń bezpieczeństwa ruchu.

Z czasem większe znaczenie zyskały modele makroskalowe, które umożliwiają predykcję liczby zdarzeń na danym odcinku drogi. W podejściu tym wykorzystuje się najczęściej uogólnione modele regresji liniowej (GLM), oparte na rozkładach: Poissona, dwumianowym ujemnym lub Poisson-gamma [207], [40], [121]. Najczęściej oczekiwana liczba zdarzeń opisywana jest za pomocą funkcji potęgowo-wykładniczej uwzględniającej narażenie na ryzyko (natężenie pojazdów) oraz prawdopodobieństwa strat. Wówczas oczekiwaną liczbę zdarzeń można opisać równaniem 2.13 [144].

$$\lambda_i = E(Y_i) = \beta_0 \cdot L \cdot AADT^{\beta_1} \cdot \exp\left(\sum \beta_i \cdot x_i + \varepsilon_i\right) \quad (2.13)$$

gdzie:

$\lambda_i, E(Y_i)$ – oczekiwana liczba zdarzeń,

L – długość analizowanego odcinka drogi,

$AADT$ – średniodobowe natężenie pojazdów (tys. poj./ dobę),

β_0, β_i – współczynniki modelu,

x_i – zmienne niezależne.

Podejście to znalazło zastosowanie m.in. w predykcji ogólnej liczby wypadków na odcinkach dróg w których uwzględnia się bezpieczeństwo pieszych i rowerzystów [173], [3], [57]. Najczęściej w modelach tych uwzględnia się narażenie ryzyko, czyli natężenie pojazdów oraz pieszych lub rowerzystów. Przykład prostego modelu regresyjnego uwzględniające całkowite natężenie ruchu zaprezentował w swojej pracy Elvik [57] (wzór 2.14).

$$\lambda_{ped} = 0,0000734 \cdot AADT^{0,52} \cdot PED^{0,72} \quad (2.14)$$

gdzie:

λ_{ped} – oczekiwana liczba zdarzeń z pieszymi na odcinku,

PED – natężenie pieszych (piesi/dobę).

Kolejnym przykładem zastosowania uogólnionych modeli regresji do predykcji liczby wypadków z udziałem pieszych oraz rowerzystów są wyniki badań przedstawione w raporcie NCHRP 1064 [173], gdzie opracowano łącznie 46 modeli regresyjnych. Większość opracowanych w NCHRP 1064 [173] modeli (ok. 30) tak jak w przypadku modelu Elvika [57] uwzględnia rzeczywiste natężenie pieszych oraz rowerzystów na odcinkach dróg oraz skrzyżowaniach w warunkach miejskich, podmiejskich jak i wiejskich.

Najbardziej popularną metodą służącą do szacowania oczekiwanej liczby zdarzeń w tym zdarzeń z pieszymi i rowerzystami jest metoda HSM [3], w której uwzględnia się trzy podstawowe elementy: model bazowy (Base Safety Performance Function, SPF) współczynniki modyfikujące (CMFs – Crash Modification Factors) oraz wskaźniku ekspozycji.

Metoda HSM [3] znalazła również zastosowanie w predykcji wypadnięć pojazdów z drogi w procedurze opracowanej w ramach programu SAVERS [40], którego celem był wybór najbardziej optymalnych pod względem bezpieczeństwa i kosztów systemów powstrzymywania pojazdów.

Szerokie możliwości stosowania uogólnionych modeli regresji sprawiło, że zostały one nie tylko dla odcinków dróg, dróg dla pieszych oraz dróg rowerowych ale również zostały zaimplementowane w prognozowaniu częstości, liczby wypadnięć oraz zdarzeń z barierami ochronnymi (rys. 2.11) [100], [166], a także identyfikacji ich następstw, takich jak wywrócenie się pojazdu na poboczu, pasie dzielącym lub uderzenie w barierę ochronną. Obecnie w modelach predykcji częstości wypadnięć oraz zdarzeń z udziałem barier ochronnych najczęściej stosuje się funkcję potęgowo-wykładniczą, w której główną zmienną niezależną jest średniodobowe natężenie pojazdów [172], [26]. Funkcja ta została zastosowana m.in. przez Roque’a [206], do prognozowania oczekiwanej liczby zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinkach dróg jednojezdniowych oraz dwujezdniowych. Przykład jednego z opracowanych modeli Roque’a [206] do szacowania oczekiwanej liczby zdarzeń na odcinkach dróg dwujezdniowych przedstawia równanie 2.15:

$$\lambda_i = \beta_0 \cdot AADT^{\beta_1} \cdot \exp(\beta_2 \cdot \frac{AADT}{10000}) \cdot L_i^{\beta_3} \quad (2.15)$$

gdzie:

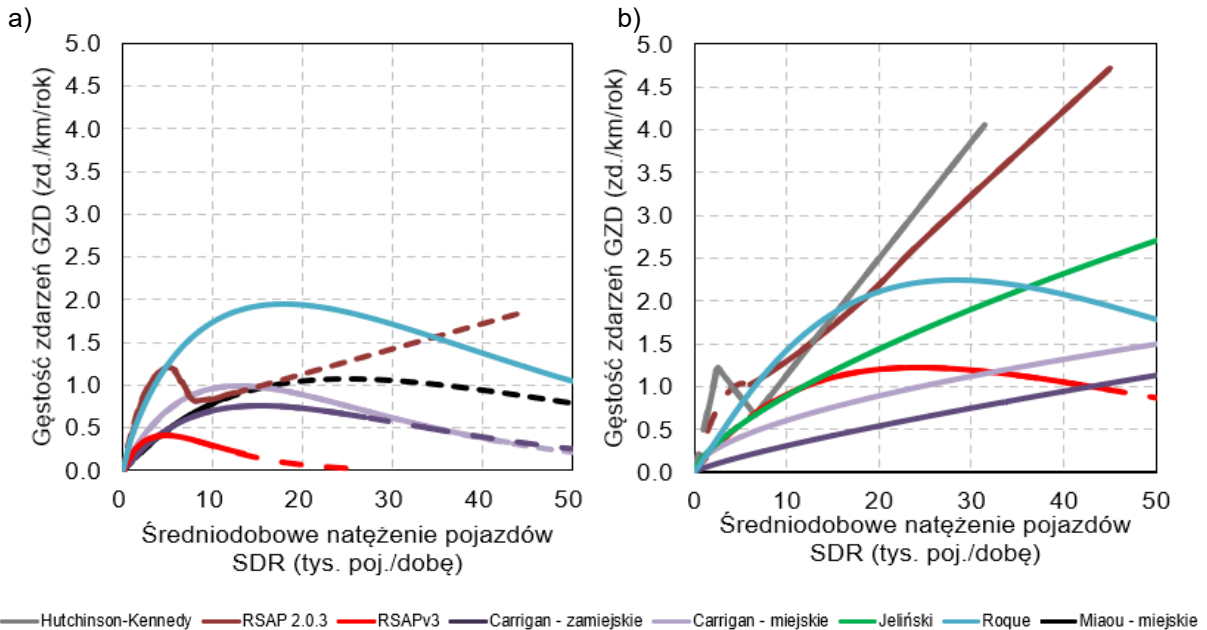
λ_i – oczekiwana liczba zdarzeń na i -tym odcinku drogi (zd.),

$AADT$ – średniodobowe natężenie pojazdów (tys. poj./dobę),

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ – współczynniki modelu,

L – długość i -tego odcinka drogi (km).

Zaletą stosowania tej funkcji potęgowo-wykładniczej względem modeli wykładniczych [100], [166] oraz potęgowych jest możliwość wystąpienia maksimum, co pozwala uwzględnić efekty nasycenia, przy którym wzrost natężenia pojazdów nie prowadzi do dalszego wzrostu liczby zdarzeń (rys. 2.11). Zależności tego typu były szeroko analizowane w literaturze, m.in. w badaniach Carrigana, Roque’a [206] i Jelińskiego [121], gdzie kalibrowano funkcje predykcyjne liczby zdarzeń dla różnych typów odcinków drogowych. Na rys. 2.11 przedstawiono przykładowe przebiegi funkcji regresji opisujących zależność pomiędzy średniodobowym natężeniem ruchu (SDR) a gęstością zdarzeń drogowych (GZD) dla wybranych modeli literaturowych.



Rys. 2.11 Zestawienie modeli na gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi a) drogi jednojezdniowe b) drogi dwujezdniowe

Opracowanie własne na podstawie [172]

Predykcja częstości i liczby zdarzeń ma nie tylko wpływ na koszty ponoszone przez zarządcę drogi, ale również koszty użytkowników oraz koszty środowiskowe. Przykład implementacji modeli prawdopodobieństwa do określenia kosztów użytkowników dróg widoczny jest m.in. w modelu opracowanym przez RSAPv3 [172], gdzie oczekiwane koszty zdarzeń z barierami na odcinku drogi są liczone jako funkcja opisana równaniem 2.16

$$E(CC) = AADT \cdot L_N \cdot P(Encr) \cdot P(CR|Encr) \cdot P(Sev|Cr) \cdot E(CC_s|Sev_s) \quad (2.16)$$

gdzie:

$E(CC)$ – oczekiwany koszt zdarzenia drogowego uwzględniający prawdopodobieństwo jego wystąpienia oraz skutki,

$AADT$ – średniodobowe natężenie pojazdów,

$P(EnCr)$ – prawdopodobieństwo wypadnięcia pojazdu z drogi,

$P(CR|EnCr)$ – prawdopodobieństwo zdarzenia drogowego pod warunkiem wystąpienia wypadnięcia,

$P(Sev|Cr)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia określonego poziomu ciężkości zdarzenia drogowego,

$E(CC_s|Sev_s)$ – średni (oczekiwany) koszt wypadku przy założonym poziomie ciężkości.

2.4.5. Modele kosztów użytkowników dróg

2.4.5.1. Koszty użytkowników

Koszty użytkowników dróg (RUC – Road User Costs) stanowią kluczowy komponent analizy kosztów cyklu życia inwestycji drogowych. Odnoszą się one do wpływu infrastruktury na ekonomię, bezpieczeństwo i mobilność użytkowników podczas eksploatacji drogi, szczególnie w kontekście utrudnień wynikających z robót drogowych, reorganizacji ruchu czy zmian geometrii. W analizach LCC koszty użytkowników służą do porównywania wariantów inwestycyjnych, oceny efektywności strategii utrzymaniowych oraz projektowania działań mających na celu poprawę dostępności i bezpieczeństwa ruchu drogowego. Próbę opracowania modeli kosztów użytkowników opracował m.in. w swoich badaniach Kedarsietty [133], tworząc ponad 270 modeli związanych z robotami drogowymi w Kalifornii, wykorzystując dane z narzędzia RealCostCA. Opracowane modele bazowały na regresji liniowej, log-liniowej, podwójnej logarytmicznej oraz sigmoidalnej i uwzględniały wpływ m.in. typu drogi, przekroju, długości strefy robót, liczby dostępnych pasów, prędkości strefie robót, czasu trwania zamknięcia na koszt użytkowników.

Najczęściej w literaturze szacując koszty użytkowników dróg analizuje się ich poszczególne składowe. Zgodnie z klasyfikacją przedstawioną m.in. w AASHTO [3], wytycznych FHWA [160] koszty użytkowników dróg dzielą się na trzy główne komponenty:

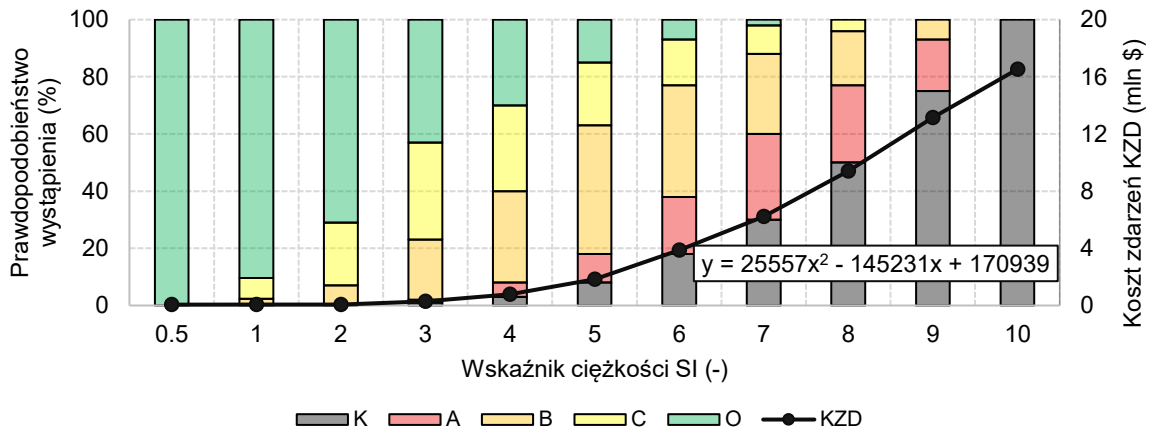
- koszty zdarzeń drogowych (AC – Accident Costs),
- koszty czasu użytkowników (VOT – Value of Time),
- koszty eksploatacji pojazdów (VOC – Vehicle Operating Costs).

2.4.5.2. Koszty zdarzeń drogowych

Koszty zdarzeń drogowych określają wielkość strat ponoszonych przez jednostkę lub społeczeństwo w wyniku zajścia zdarzenia i liczone są jako iloczyn jednostkowych kosztów strat oraz ich wielkości. Koszty zdarzeń drogowych tak samo jak liczbę zdarzeń drogowych można szacować stosując dwa podejścia: (1) Prawdopodobieństwo wystąpienia kosztu w wyniku pojedynczego zdarzenia (ujęcia mikroskopowe), (2) Szacowanie kosztów na odcinku drogi (ujęcie makroskopowe).

Istotnym krokiem w szacowaniu kosztów zdarzeń drogowych jest określenie ciężkości zdarzeń. W ujęciu makroskopowym powszechnie do szacowania konsekwencji zdarzeń z na odcinkach dróg i skrzyżowań stosuje m.in. wskaźnik ciężkości zdarzeń SI (Severity Index), który umożliwia oszacowanie prawdopodobieństwa strat w zdarzeniach drogowych w skali obrażeń KABCO a tym samym umożliwia zamodelowanie kosztów zdarzeń. Wraz ze wzrostem wskaźnika SI rośnie ciężkość zdarzeń oraz odpowiadające im koszty (rys. 2.12). W sytuacji, gdy SI osiąga wartość maksymalną 10 oznacza to 100% prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku śmiertelnego (rys. 2.12). Wskaźnik SI jest

wykorzystywany m.in. w narzędziu RISC (Roadside Impact Severity Calculator) [226], które pozwala oszacować prawdopodobieństwo skutków zdarzenia w zależności od potencjalnego niebezpieczeństwa oraz przeliczyć je na wartość ekonomiczną.



Rys. 2.12 Rozkład prawdopodobieństwa wystąpień obrażeń w skali KABCO oraz kosztów zdarzeń KZD w zależności od wskaźnika ciężkości SI

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [226]

Wadą dotychczasowo opracowanych wskaźników SI w przypadku drogowych barier był brak uwzględnienia ich parametrów technicznych, w związku z tym w pracy Burbridge'a [31] zastosowano alternatywny wskaźnik ASI (Acceleration Severity Index), który uwzględnia energię kinetyczną i deformację pojazdu, a jego wartość skorelowano z prawdopodobieństwem obrażeń wyrażonym według skali AIS (Abbreviated Injury Scale). Zgodnie z [31] ASI w uproszczeniu stanowi przyspieszenie wynikowe, uwzględniające energię kinetyczną poprzeczną pojazdu oraz jego ugięcie dynamiczne.

Tab. 2.4 Zestawienie skali KABCO i AIS

Skala KABCO	Skala AIS	Charakterystyka obrażeń
K	6	Ofiar śmiertelna
A	0-6	Ofiara ciężko ranna
B	0-3	Ofiara średnio ranna
C	0-2	Ofiara lekko ranna
O	0-1	Straty materialne

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [110]

W swoich badaniach Burbridge [31] zaimplementował krzywe Prasad-Mertza do określenia prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia w skali AIS na podstawie zmiennej ASI opisując to wzorem 2.7. a następnie opracował modele na wskaźnik intensywności przyspieszenia dla wybranych barier drogowych. Przykład jednego z opracowanego modeli dla barier sztywnych przedstawia równanie opisanego równaniem 2.17.

$$p(\text{injury} \geq \text{AIS } j) = \left[1 + \exp \left(\alpha_j + \frac{200}{144,58 \cdot \text{ASI}^{2,70}} \right) - \frac{\beta_j}{144,58 \cdot \text{ASI}^{2,70}} \right]^{-1} \quad (2.17)$$

przy czym

$$\text{ASI} = \frac{1}{50 \cdot m \cdot (DD / IS) + m^{0,2} \cdot (0,166 \cdot v \cdot \sin(KU))^{-1}} \quad (2.18)$$

gdzie:

- ASI – wskaźnik intensywności przyspieszenia (–),
- DM – ugięcie dynamiczne (m),
- EKL – energia kinetyczna poprzeczna pojazdu (kJ),
- MP – masa pojazdu (kg),
- VPL – prędkość poprzeczna pojazdu (km/h),
- VP – prędkość pojazdu (km/h),
- KU – kąt uderzenia pojazdu w barierę ochronną (°).

Wskaźnik ciężkości zdarzeń był również stosowany do oszacowania kosztów zdarzeń na odcinku dróg oraz skrzyżowań poprzez uwzględnienia stopnia narażenie na ryzyko jakim jest średniodobowe natężenie pojazdów [150]. Podejście to zastosował m.in. w swojej pracy Russo [207] do prognozowania liczby ofiar wyniku najechania na barierę linową w pasie dzielącym.

2.4.5.3. Koszty czasu użytkowników dróg

Koszty czasu ponoszone przez użytkowników dróg stanowią istotny składnik w analizach cyklu życia infrastruktury drogowej. Odnoszą się one do strat wynikających z czasu poświęconego na przemieszczanie się zarówno osób, jak i towarów, niezależnie od tego, czy dotyczy to przejazdów prywatnych, służbowych, czy transportu towarowego.

Koszty te można oszacować jako iloczyn czasu podróży i jednostkowej wartości czasu, która może być różna w zależności od struktury rodzajowej pojazdów, celu podróży, typu pojazdu czy kategorii drogi. Przykład modelu szacowania kosztów czasu użytkowników dróg na odcinku drogi przedstawiono w podręczniku Jaspers [120] (równanie 2.19).

$$KST = 365 \cdot \sum_{i=1}^4 W_{i,h} \cdot P_i \cdot U_i \cdot JKST \quad (2.19)$$

gdzie:

- KST – koszt czasu użytkowników dróg (PLN),
- $W_{i,h}$ – czasowa praca przewozowa (poj-h),
- P_i – wskaźnik napełnienia pojazdów (poj-h),
- U_i – udział motywacji podróży użytkowników (poj-h),
- $JKST$ – jednostkowy koszt czasu podróży (PLN/h),
- i – liczba użytkowników z podziałem na motywacje podróży.

Jednym z kluczowych wyzwań przy określaniu tych kosztów jest precyzyjne oszacowanie czasu podróży. W pierwszych podejściach wykorzystywano modele statyczne, które opierały się na założeniach o stałym natężeniu ruchu i średnich prędkościach przejazdu. Prosty model szacujący straty czasu związane z pracami tymczasowymi w zależności od długości odcinka drogi zaproponował w swojej pracy Karim [126] (równanie 2.20).

$$GST = \frac{1}{SPS} - \frac{1}{PS} \quad (2.20)$$

gdzie:

- GST – opóźnienia w ruchu związane z wykonywaniem prac liczone na długość odcinka (h/km),

SPS – prędkość na pasie ruchu, na którym wykonywane są prace (km/h),

PS – limit (ograniczenia) prędkości na analizowanym odcinku drogi (km/h).

Z czasem jednak coraz większe znaczenie zaczęły zyskiwać modele dynamiczne, które pozwalały na uwzględnienie zmiennych warunków ruchu i lepsze odwzorowanie rzeczywistości. Modele dynamiczne umożliwiają analizę takich zjawisk, jak powstawanie kolejek, rozchodzenie się fal zatorowych czy reakcje kierowców na zmieniającą się sytuację drogową. W literaturze wskazuje się, że tego typu podejścia pozwalają znacznie dokładniej oszacować rzeczywiste straty czasu, szczególnie w kontekście zdarzeń losowych, prac drogowych i innych zakłóceń w płynności ruchu. Z uwagi na złożoność procesu obliczeniowego w praktyce do określania czasu przejazdów różnych wariantów inwestycyjnych stosuje się oprogramowania, które umożliwiają uwzględnienie wielu cząstkowych modeli symulacyjnych, w tym scenariuszy badawczych [49]. Modele symulacyjne zostały wykorzystane m.in. w projekcie RID 3B do szacowania strat czasu użytkowników dróg w związku z występowaniem zdarzenia nieplanowanego (kolizji, wypadku) oraz zdarzeń planowanych (robót tymczasowych). Na podstawie rzeczywistych danych o zdarzeniach drogowych i pracach utrzymaniowych prowadzonych na sieci GDDKiA w latach 2016–2017 uzyskano straty czasu dla różnych natężeń oraz wariantów badawczych. Wyniki te posłużyły do budowy regresyjnych modeli strat czasu zdarzeń nieplanowanych oraz planowanych przy zamknięciu częściowym oraz całkowitym jezdni.

2.4.5.4. Koszty eksploatacji pojazdów

Koszty eksploatacyjne pojazdów są to wydatki ponoszone przez użytkowników dróg związane m.in. ze zużyciem paliwa, części, opon, płynów eksploatacyjnych, a także amortyzacją pojazdu wynikającą z intensywności jego użytkowania. Przykład modelu szacowania kosztów eksploatacji, który został zaimplementowany w metodzie LCC przedstawił w swoich badaniach Furch [79] (równanie 2.21). W modelu 2.18 uwzględniono koszty związane z zużyciem paliwa K_F , płynów (takich jak oleje i smary) K_{OL} , zużyciem opon K_T oraz akumulatora K_{AB} . Dodatkowo, model obejmuje koszty obowiązkowego ubezpieczenia pojazdu, podatku drogowego K_{IRT} , kosztów związanych z przeglądami technicznymi K_{MT} , pomiarem emisji spalin K_E , a także opłatami wynikającymi z obowiązujących przepisów prawa, w tym opłatami za korzystanie z infrastruktury drogowej K_{TC} :

$$KEP = K_F + K_{OL} + K_T + K_{AB} + K_{IRT} + K_{MT} + K_{TC} + K_E \quad (2.21)$$

Koszty eksploatacji mogą być szacowane na dwa sposoby [201]: jako koszt zużycia np. paliwa koszt zużycia paliwa wynikający ze zmiany prędkości lub wynikający ze zmiany czasu przejazdu. W Polsce do szacowania kosztów eksploatacji wykorzystuje się podejście wynikające ze zmiany średniej prędkości pojazdów na odcinku drogi. Zgodnie z [120] koszty te szacowane są jako iloczyn jednostkowy kosztu eksploatacji $JKEP_i$ zależny od kategorii pojazdów i , ukształtowania terenu t , stanu technicznego s oraz wykonanej $W_{i,km}$ pracy przewozowej, wyrażonej np. W pojazd kilometrach zgodnie ze wzorem 2.22.

$$KEP = 365 \cdot \sum_{i=1}^2 W_{i,km} \cdot JKEP_i(v, t, s) \quad (2.22)$$

2.4.6. Modele kosztów środowiskowych

Koszty środowiskowe generowane są przez negatywne oddziaływanie pojazdów na środowisko naturalne. W ramach kosztów środowiskowych wyróżnić można koszty związane zanieczyszczeniem powietrza, zmianami klimatu oraz emisją hałasu [81], [120].

Koszty zanieczyszczeń powietrza rozumiane są jako skumulowane obciążenia wynikające z emisji zanieczyszczeń powstających w wyniku eksploatacji pojazdów na analizowanej infrastrukturze drogowej. Oddziaływania te dotyczą zarówno bezpośrednich skutków zdrowotnych, jak i konsekwencji dla środowiska oraz gospodarki. Wśród najistotniejszych substancji zanieczyszczających powietrze, związanych z ruchem drogowym, wyróżnia się przede wszystkim pyły zawieszone (PM_{10} , $PM_{2,5}$), tlenki azotu (NO_x), dwutlenek siarki (SO_2) oraz niemetanowe lotne związki organiczne (NMVOC) [120]. Jednym z modeli szacujących koszty zanieczyszczeń powietrza jest model opracowanych w podręczniku Jaspers [120], w którym jednostkowe koszty zanieczyszczeń zależą od prędkości pojazdu, typu pojazdu, stanu technicznego drogi, jej nachylenia oraz lokalizacji odcinka drogi. Koszty te szacowane jako iloczyn pracy przewozowej i jednostkowych kosztów zanieczyszczeń.

W kontekście infrastruktury drogowej koszty klimatyczne definiuje zgodnie z podręcznikiem Jaspers [120] jako iloczyn łącznej emisji równoważnika CO_2 i jednostkowej wartości kosztu emisji. Ocena koncentruje się na emisjach generowanych w fazie eksploatacji infrastruktury, tj. w trakcie użytkowania sieci drogowej przez pojazdy. Zgodnie z przyjętymi założeniami, emisje innych gazów cieplarnianych niż CO_2 (np. metanu CH_4 i podtlenku azotu N_2O) nie są uwzględniane z uwagi na ich marginalny udział. Analiza skupia się więc wyłącznie na emisji dwutlenku węgla.

Opracowano wiele modeli służących do oszacowania wielkości emisji związanej z ruchem pojazdów. Jednym z takich modeli jest narzędzie MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) opracowane przez US EPA (Environmental Protection Agency), który umożliwia oszacowania emisji dla konkretnych typów pojazdów, warunków ruchu oraz odcinków dróg [60].

$$EF_{k,p} = \exp(\beta_0 + w_1\gamma + w_2\gamma^2 + w_3\gamma^3 + w_4\gamma S + \beta_1 \cdot \mu + \beta_2 S) \quad (2.23)$$

gdzie:

$EF_{k,p}$ – współczynnik emisji zanieczyszczeń p dla pojazdów typu k poruszających się po odcinku, wyrażony w gramach na milę (g/mile),

γ – moc właściwa pojazdu na odcinku drogi (kW/ton),

μ – dystrybuanta wieku pojazdów,

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ – współczynniki modelu regresyjnego,

w_1, w_2, w_3 – współczynniki związane z mocą właściwą γ ,

S – średnia prędkość na odcinku drogi (mile/h).

Modele szacujące wielkość emisji zanieczyszczeń zostały również zaimplementowane w oprogramowaniu COPERT V [66]. Narzędzie to wyposażono w trzy moduły obliczeniowe (TIER 1–3), które różnią się poziomem dokładności szacunków oraz wymaganiami dotyczącymi szczegółowości danych wejściowych. Całkowite emisje obliczane są jako iloczyn danych o aktywności transportu dostarczonych przez użytkownika i współczynników emisji zależnych od prędkości, wyznaczonych w oprogramowaniu na podstawie pomiarów w warunkach rzeczywistej eksploatacji [66].

2.4.7. Czynniki wpływające na koszty cyklu życia elementów infrastruktury drogowej

2.4.7.1. Wprowadzenie

Koszty cyklu życia infrastruktury drogowej są wynikiem wielu współzależnych czynników, które oddziałują na poszczególne składowe kosztów: zarządcy drogi, użytkowników oraz środowisko. Na koszty te składają się działania związane z m.in. budową, bieżącym utrzymaniem, remontami częściowymi, modernizacją, rozbiórką oraz eksploatacją infrastruktury drogowej. Na wysokość tych kosztów wpływ mają m.in. takie parametry jak m.in.: geometria obiektu, prędkość podróży, wielkość i struktura ruchu, długość odcinka drogi. Czynniki te można zagregować w cztery podstawowe grupy: konstrukcyjne, ruchowe, geometryczne oraz pozostałe.

2.4.7.2. Czynniki konstrukcyjne

Parametry konstrukcyjne drogi i jej elementów takie jak np. rodzaj materiału, typ konstrukcji, liczba i grubość warstw konstrukcyjnych, wymiary konstrukcji mają istotny wpływ na wysokość ich kosztów w cyklu życia [65], [177], [249]. Wybór parametrów z jednej strony determinuje koszty budowy a z drugiej koszty związane z ich utrzymaniem i eksploatacją wpływając m.in. na częstość wykonywanych prac utrzymaniowych [169], [213], [161].

Rodzaj zastosowanego materiału jest jednym z głównych czynników wpływających na koszty cyklu życia drogi i jej elementów. Przykładowo, jak wykazały badania Szydło [222] całkowite koszty nawierzchni betonowych w 30-letnim okresie cyklu życia może być nawet o ok 60% niższy w porównaniu do nawierzchni asfaltowych. Z kolei z badań EUPAVE [64] wynika, że koszt początkowy nawierzchni betonowej może być nawet o 50% wyższy niż asfaltowej. Jednak na etapie utrzymania to konstrukcje asfaltowe charakteryzują się wyższym kosztem naprawy oraz odbudowy związanym z większą częstotliwością wykonywanych działań naprawczych a tym samym większymi kosztami użytkowników dróg. Ponadto rodzaj zastosowanego materiału wpływa na całkowitą długość życia nawierzchni drogowej, która w przypadku betonowej może być o 30% dłuższa niż asfaltowa EUPAVE [64]. Parametry konstrukcyjne wpływają nie tylko na koszty ponoszone przez użytkowników dróg i zarządców, ale również na koszty środowiskowe. Jak wykazał w swojej pracy Kolanek [135], podczas produkcji betonu asfaltowego emisja zanieczyszczeń związanych z CO₂ może być prawie 4-krotnie wyższa niż podczas produkcji betonu cementowego.

Analogiczne wnioski można wysnuć w kontekście infrastruktury pieszo-rowerowej. Wybór materiału (np. kostka brukowa, asfalt lany, płyty betonowe) wpływa nie tylko na koszty budowy, ale również na trwałość. Przykładowo, w raporcie Atkinsona [9] wskazano, że jeśli mniej niż 0,3% kostki brukowej wymaga wymiany rocznie to całkowite koszty eksploatacyjne są niższe niż dla nawierzchni asfaltowych.

Rodzaj materiału ma również wpływ na koszty cyklu życia barier ochronnych [45], [238], [129]. Powszechnie uważa się, że koszty początkowe związane z instalacją barier betonowych są większe niż w przypadku barier stalowych, jednak ich koszty utrzymania są niższe [238]. Różnice pomiędzy kosztami budowy barier o różnych materiałach odnotowano między innymi w badaniach [128], [45]. Wyniki badań [128] wykazały, że koszt instalacji barier betonowych jest dwukrotnie wyższy w porównaniu do barier stalowych (typu w-beam) oraz 5-cio krotnie wyższy od barier linowych. Rodzaj zastosowanego materiału wpływa również na koszty napraw barier. Jak wykazano w [129] średni koszt naprawy barier linowych jest wyższy niż w przypadku barier stalowych. Wynikać może to z faktu,

iz liczba naprawę barier linowych była dwukrotnie wyższa niż barier w-beam, co wiąże się z ich większą podatnością na odkształcenia w wyniku najechania na nie pojazdu. Dodatkowo w badaniach [238] wskazano, że typ bariery drogowej jest jednym z czynników decydujących o żywotności barier [128], [45].

2.4.7.3. Czynniki ruchowe

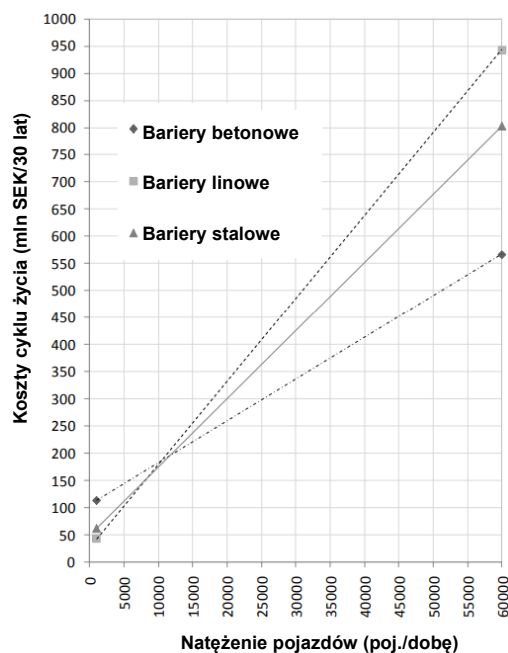
Czynniki ruchowe stanowią jedno z kluczowych zmiennych wpływających na koszty cyklu życia infrastruktury drogowej. Zmieniające się natężenie ruchu, struktura rodzajowa pojazdów oraz prędkości pojazdów mają bezpośredni wpływ m.in. na częstość interwencji utrzymaniowych, szybkość degradacji nawierzchni. W literaturze podkreśla się, że zmiany w natężeniu ruchu i strukturze rodzajowej pojazdów powinny być uwzględniane w modelach LCC (Life Cycle Cost), gdyż mają wpływ nie tylko na komponenty techniczne (utrzymanie, wymiany), ale również na koszty użytkowników oraz środowiska [127].

Jak wykazano w wielu badaniach [45], [129], [53] natężenie ruchu jest istotnym czynnikiem determinującym częstość zdarzeń, a tym samym wpływa na całkowite koszty użytkowania i napraw. W badaniach [128] zaprezentowano wpływ średniego dobowego natężenia ruchu na koszty cyklu życia różnych rodzajów barier (rys. 2.13). Z badań tych wynika, że:

- przy natężeniu poniżej 8 000 pojazdów na dobę najniższe koszty cyklu życia (LCC) generują bariery linowe,
- w zakresie 8 000–12 000 pojazdów bardziej opłacalne są bariery stalowe,
- dla natężenia powyżej 12 000 pojazdów najkorzystniejsze pod względem LCC są bariery betonowe.

Warto jednak zaznaczyć, że wyniki te nie powinny być traktowane jako uniwersalne progi decyzyjne. Każda droga cechuje się indywidualnymi warunkami techniczno-ruchowymi, co wymaga dostosowania modelu LCC do lokalnych uwarunkowań.

Równie istotnym parametrem ruchu jest prędkość pojazdów [177] [249] [128]. Prędkość pojazdów jest również podstawową zmienną, która jest uwzględniana w szacowaniu kosztów eksploatacyjnych pojazdów [120]. Ponadto jak wykazano w HDM- 4 [14] parametr ten wpływa zarówno na koszty użytkowników dróg jak i na koszty środowiskowe. W związku z czym zmienna ta jest stosowana w oprogramowaniu COPERT V [66] do szacowania emisji zanieczyszczeń. Wpływ prędkości na koszty cyklu życia przeanalizowano również w badaniach Karima [128], w których to najniższe koszty napraw zaobserwowano dla odcinków charakteryzujących się wyższymi limitami prędkości. W tym przypadku prędkość mogła być zmienną reprezentującą klasę drogi i odpowiadające jej standardy utrzymania.



Rys. 2.13 Wpływ rodzaju bariery i natężenia ruchu drogowego na koszty cyklu życia

Źródło: [128]

Kolejną zmienną wpływającą pośrednio na koszty cyklu życia jest struktura rodzajowa pojazdów. Jak wykazały liczne badania udział pojazdów ciężarowych w potoku ruchu wpływa na liczbę wypadków i ofiar wypadków drogowych [144], [57].

2.4.7.4. Czynniki geometryczne

W przypadku inwestycji drogowych w przeglądzie wykonanym przez Elyamany [58] wykazano, że parametry geometryczne takie jak m.in: długość trasy, szerokość pasa ruchu, liczba pasów ruchu, klasa drogi, typ terenu i jego nachylenie mają wpływ na koszty ponoszone we wczesnych etapach projektowania dróg. Ponadto jak wykazano w [43] znaczne spadki terenu wpływają na zwiększenie kosztów eksploatacyjnych pojazdów związanych ze zmianą prędkości pojazdów w ruchu.

Parametry geometryczne uwzględniane są nie tylko w szacowaniu kosztów początkowych infrastruktury drogowej, ale również kosztów związanych z ich użytkowaniem i eksploatacją [142]. Zgodnie z badaniami opisanymi przez Karima [128] typ drogi warunkuje częstość zdarzeń skutkujących kolizją z barierami, co bezpośrednio przekłada się na intensywność prac utrzymaniowych oraz poziom kosztów eksploatacyjnych w cyklu życia. Dodatkowo czynnikami, które wpływają na koszty cyklu życia są m.in. zmienne związane z otoczeniem drogi (udział odcinków zabudowanych, udział dróg pieszych oraz pieszo-rowerowych, udział barier drogowych) [27], [90] oraz występowaniem skrzyżowań, poboczy, łuków pionowych oraz poziomych [57], [144].

2.4.7.5. Pozostałe czynniki

Oprócz czynników konstrukcyjnych, ruchowych i geometrycznych na całkowite koszty cyklu życia infrastruktury drogowej mają również wpływ takie zmienne jak: warunki pogodowe, stan nawierzchni dróg, stopa dyskontowa, jednostkowy produkt brutto, wydatki na inwestycje, czas trwania projektu, rok budowy.

Warunki pogodowe jako zmienna wpływająca na koszty cyklu życia elementów infrastruktury drogowej została przebadana w pracy Karima [129]. Wykazano w niej, że większa liczba uszkodzeń elementów infrastruktury drogowej występuje w lokalizacjach charakteryzujących się długimi i mroźnymi zimami, co jest powiązane ze stanem nawierzchni dróg. Zmienna ta była analizowana m.in. w badaniach [45]. Wykazano w nich, że w przypadku mokrej, śliskiej nawierzchni dróg występuje więcej wypadnięć z drogi oraz uderzenia w urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego.

Kolejnym parametrem wpływającym na koszty cyklu życia jest stopa dyskontowa, która ukazuje zmianę wartości pieniądza w czasie. Wpływ stopy dyskontowej na całkowity koszt cyklu życia został ukazany m.in. w normie ISO 15686-5:2008 [108]. Zmiana stopy procentowej z 6% na 2% w okresie 30 - letnim może zwiększyć wartość bieżącą przyszłych kosztów nawet 3-krotnie.

Na wysokość kosztów cyklu życia mają również czynniki makroekonomiczne takie jak m.in. jednostkowy produkt krajowy brutto, inflacja czy też wydatki na infrastrukturę. Przykładem wykorzystania danych makroekonomicznych są modele zaprezentowane w habilitacji Jamroza [112]. W pracy [112] tej opracowano modele kosztów wypadków drogowych z uwzględnieniem zmiennej niezależnej jaką jest jednostkowy parytet siły nabywczej.

2.5. Podsumowanie syntezy studiów literatury

Infrastruktura drogowa jest elementem systemu transportu drogowego, który odpowiada za stymulację gospodarczą państw, kształtowanie oraz poprawę jakości życia społeczeństwa. W związku ze zróżnicowanymi cechami charakteryzującymi elementy infrastruktury drogowej oraz stawianymi jej wymaganiami zaczęto stosować podejście wielodyscyplinarne do oceny jej funkcjonalności. Początkowo przy wyborze oraz projektowaniu infrastruktury drogowej stosowano podejście tradycyjne, które uwzględniało jedynie aspekty techniczne oraz ekonomiczne skupiając się na minimalizacji nakładów inwestycyjnych. Obecnie w ocenie inwestycji drogowych stosuje się koncepcję zrównoważonego rozwoju, której celem jest poszukiwanie optymalnych rozwiązań pod względem ekonomicznym, społecznym oraz środowiskowym. Ważnym impulsem do uwzględniania wszystkich filarów zrównoważonego rozwoju w infrastrukturze drogowej były cele i działania podjęte pojęte przez ONZ w ramach Agendy 2030 [231].

Jednym z podejść do oceny funkcjonowania infrastruktury, propagowanych przez ekspertów oraz instytucje państwowe, a jednocześnie wpisującym się w założenia Agendy 2030, jest koncepcja myślenia w cyklu życia [8], [223]. Podejście to jest szczególnie istotne w procesie podejmowania decyzji dotyczących wyboru elementu infrastruktury drogowej, gdyż umożliwia ocenę inwestycji z uwzględnieniem kryteriów ekonomicznych, środowiskowych oraz społecznych. Ponadto myślenie w cyklu życia umożliwia rozwiązywanie problemów związanych m.in. ze starzejącą się infrastrukturą drogową, rosnącym niedofinansowaniem oraz wymaganiami stawianymi infrastrukturze drogowej [78]. Istotnym narzędziem stosowanym w procesie zarządzania cyklem życia infrastruktury są metody szacowania kosztów cyklu życia, które doczekały się już dość bogatej literatury dotyczącej: idei cyklu życia, składowych kosztów cyklu życia i zasad ich ustalania, metodyki opracowania metody szacowania kosztów oraz ich zastosowań w planowaniu, projektowaniu i utrzymaniu infrastruktury drogowej [223].

W ujęciu tradycyjnym analizy kosztów infrastruktury koncentrowano się jedynie na stosunkowo łatwych do oszacowania kosztach początkowych pomijając koszty pozostałe. Opisując istotę analiz kosztów cyklu życia bardzo często stosuje się metaforę „góry lodowej” [18], [20], [242], w której uwzględnia się także koszty „ukryte pod powierzchnią”, tj. koszty ponoszone w trakcie użytkowania i likwidowania infrastruktury lub jej elementów. To podejście umożliwia zastosowanie koncepcji zdyskontowanych przepływów pieniężnych, która służy do oceny inwestycji w oparciu o przyszłe przepływy pieniężne.

Analiza kosztów w cyklu życia wymaga zidentyfikowania wszystkich kosztów związanych z analizowanym projektem infrastrukturalnym. W przypadku infrastruktury drogowej są to: koszty początkowe (projektowania, budowy), koszty utrzymania (rutynowe i strukturalne), koszty użytkowników (czasu podróży, niebezpiecznych zdarzeń drogowych, eksploatacji pojazdów), koszty środowiskowe (emisji gazów toksycznych i cieplarnianych) i koszty pozostałe (utylicacji, rekultywacji terenu). Każdy rodzaj kosztów i ich składowe należy oszacować dla każdego roku analizy oddzielnie, zatem istotne jest ustalenie okresu analizy (okres cyklu życia) oraz metodyki szacowania poszczególnych składowych kosztów w kolejnych latach funkcjonowania drogi. Zastosowanie mają metody: inżynierskie (rachunkowe) wykorzystujące dane z projektów, bazy danych historycznych, prognostyczne

wykorzystujące wcześniej opracowane modele matematyczne, symulacje numeryczne, oceny ekspertów [18], [102].

Ogólny zakres metody analizy w cyklu życia opisany jest w dokumentach międzynarodowych (ISO, Dyrektywa UE) [108], [197] i krajowych [192]. Natomiast metodyka opracowania metody szacowania kosztów cyklu życia, wynikająca z przeglądu literatury składa się najczęściej z kilku etapów [115]: definiowanie celu i zakresu analizy, identyfikacja, dekompozycja składowych kosztów, wybór metody szacowania kosztów, modele i procedury szacowania kosztów, analiza wrażliwości metody, raport z wyników.

W praktyce metody analizy funkcjonowania drogi w cyklu życia stosowane są przede wszystkim do zarządzania dużymi i skomplikowanymi projektami infrastrukturalnymi [162] oraz do oceny i wyboru wariantu nawierzchni drogowych lub wariantu obiektów inżynierskich [217], [150], [185]. Wraz ze wzrostem popularności tych metod podjęto kilka prób zastosowania ich do innych elementów drogowych takich jak m.in: bariery drogowe [127], drogi dla pieszych [5], oznakowanie dróg [187], tunele drogowe [232], oświetlenie drogowe [137]. Należy przypuszczać, że metoda LCC w przyszłości będzie uważana za podstawę przy podejmowaniu decyzji inwestycyjnych.

Obecnie koszt cyklu życia obiektu jest kryterium (miarą kryterium), które może być stosowany przy wyborze wariantów projektów drogowych lub ocenie ofert przetargowych [200]. W konsekwencji, organy zarządzające administracją drogową są zachęcane do korzystania z analizy LCC, np. z punktu widzenia zamówień publicznych. Mimo, że w Polsce określono ramy i procedury wdrażania metody LCC w normach [192], [193], [194], to przepisy te są na tyle ogólne, że nie mogą być bezpośrednio zaimplementowane do praktycznego stosowania w infrastrukturze drogowej.

W przypadku wyboru wariantu lokalizacyjnego tras drogowych w Polsce na etapie planowania i projektowania stosuje się przede wszystkim analizę kosztów i korzyści opisaną w raporcie Jaspers [120]. Wykonując analizę kosztów i korzyści konieczne jest wykonywanie dla każdego analizowanego wariantu szczegółowego przedmiaru robót oraz opracowanie na jego podstawie kosztorysu inwestorskiego. W przypadku analizowania wielu wariantów lokalizacyjnych tras konieczne jest każdorazowe oszacowanie ich kosztów budowy, co może znacząco wydłużyć cały proces decyzyjny. W związku z tym w wielu badaniach [211], [243], [158] podjęto próby opracowania uproszczonych modeli, które mogą być stosowane we wstępnym etapie planowania tras drogowych. Brakuje jednak prostych, uniwersalnych modeli kosztów budowy tras, które pozwoliłyby na szybkie i efektywne szacowanie kosztów w fazie planowania, a jednocześnie dostosowanych do polskich warunków. Brak ten stanowi istotne ograniczenie w procesie wariantowania tras.

W przypadku wyboru wariantów obiektów inżynierskich w Polsce w ramach prac nad „Katalogiem typowych konstrukcji obiektów mostowych i przepustów” [215] opracowano metodę analizy kosztów cyklu życia obiektów mostowych, która jest rekomendowana do stosowania przez Ministerstwo Infrastruktury.

Podejmowano także, próby szacowania kosztów w cyklu życia różnych wariantów nawierzchni drogowych [64] niestety jak dotąd nie udało się wypracować jednolitej metodyki do stosowania na obszarze kraju.

W przypadku pozostałych urządzeń infrastruktury drogowej (przekrój poprzeczny, skrzyżowania i węzły, infrastruktura dla pieszych i rowerów, urządzenia bezpieczeństwa ruchu, urządzenia ochrony akustycznej, systemy zarządzania ruchem itp.) nie prowadzono prac studialnych, badawczych czy analitycznych. Niestety mimo rosnącej popularności, koszt cyklu życia jest nadal bardzo rzadko stosowany w Polsce przy wyborze wariantu inwestycji drogowej, jego elementów oraz przy ocenie ofert przetargowych. Wynikać to może z braku opracowanej, usystematyzowanej metody szacowania kosztów cyklu życia dla takich urządzeń infrastruktury drogowej (aktywów drogowych) jak m.in. skrzyżowania, węzły drogowe, drogowe bariery ochronne, urządzenia ochrony akustycznej, urządzenia dla pieszych i rowerów, systemy zarządzania ruchem, co stanowi istotną lukę badawczą.

Opracowanie metody szacowania kosztów cyklu życia uwzględniającej specyfikację każdego z wymienionych elementów infrastruktury drogowej wiąże się z koniecznością przeprowadzenia wielu złożonych badań. Z tego względu w niniejszej pracy zakres został ograniczony do trzech elementów: wariantowania tras drogowych, drogowych barier ochronnych oraz dróg dla pieszych i rowerów.

Mimo, że dotychczas na świecie podjęto kilka prób szacowania kosztów cyklu życia drogowych barier ochronnych [238], [127], [177], [65] oraz dróg dla pieszych i rowerzystów [5], [9] to metody i modele tam wykorzystane nie mogą być w sposób bezpośredni zaimplementowane dla polskich warunków z uwagi na liczne ograniczenia oraz różnice w uwarunkowaniach.

W przypadku barier ochronnych głównymi ograniczeniami opracowanych metod było szacowanie kosztów cyklu życia dla krótkich odcinków dróg, nieuwzględnienie parametrów technicznych barier takich jak: szerokość pracująca, poziom powstrzymywania, brak modeli szacujących koszty budowy, szacowanie kosztów dla wybranych barier przede wszystkim zlokalizowanych w pasie dzielącym, stosowanie nieaktualnych danych przy próbie szacowania kosztów zdarzeń drogowych [238], [127], [177], [65]. W kontekście drogowych barier ochronnych wyzwaniem stanowi nie tylko określenie kosztów zmiennych, ale również kosztów stałych. Nikt dotychczas nie podjął próby modelowania kosztów budowy barier drogowych. Opracowanie tych metody szacowania kosztów budowy w polskich warunkach odgrywa istotną rolę z uwagi na ograniczenia w stosowanych bazach cenowych taki jak np. Sekocenbud [183], BISTYP [240]. W bazach tych brakuje rozróżnienia jednostkowych kosztów budowy barier drogowych z uwagi na ich parametry techniczne (szerokość pracująca, poziom powstrzymywania). Wymienione parametry techniczne stanowią bazę na etapie projektowania i dobierania systemów na odcinku drogi.

Kolejnym istotnym elementem infrastruktury drogowej jest infrastruktura dla pieszych i rowerzystów. Stanowi ona ważny element zrównoważonego systemu transportowego, wymagający uwzględnienia w analizach ekonomicznych ze względu na jej specyfikę oraz wpływ na bezpieczeństwo niechronionych użytkowników ruchu drogowego. Mimo to jest jednym z najmniej popularnych elementów infrastruktury drogowej, w której stosuje się metody LCC. W badaniach [5], [9], w których szacowano koszty cyklu życia infrastruktury pieszo-rowerowej nie uwzględniono koszty użytkowników dróg. Mimo, że jak wykazały m.in. badania Abou-Senna [1] brak wydzielonej infrastruktury dla pieszych może powodować nawet 3-krotnie wyższe ryzyko wypadków występowania dróg pieszych.

Zidentyfikowane problemy oraz luki badawcze pozwoliły na zdefiniowanie celów pracy.

3. CELE I METODYKA PRACY

3.1. Cele pracy

Przeprowadzone studia literatury, analiza ich wyników oraz własnych wcześniejszych prac badawczych pozwoliły na zidentyfikowanie problemów i potrzeb dotyczących wsparcia naukowego w zakresie wprowadzania zasad myślenia w cyklu życia w wybranych obiektach (elementach infrastruktury drogowej). Potrzeba podjęcia tego zagadnienia w praktyce planistycznej, projektowej oraz w zarządzaniu infrastrukturą drogową w Polsce dopiero zaczyna być dostrzegana.

Jak wykazano w przeprowadzonych badaniach literaturowych (m.in. [45], [64], [128]) całkowity koszt cyklu życia elementów infrastruktury drogowej jest wynikiem wielu współzależnych zmiennych takich jak czynniki konstrukcyjne, ruchowe, geometryczne oraz inne. W związku z tym w celu opracowania metod szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej konieczne jest przeprowadzenie:

1. Badań terenowych, które umożliwią ocenę ich funkcjonalności w różnych warunkach np. na różnych kategoriach dróg.
2. Badań dokumentacyjnych, w celu zebrania informacji o czynnikach konstrukcyjnych wpływających na koszty elementów
3. Badań symulacyjnych w celu uzyskania i uzupełnienia danych, których nie udało się pozyskać w ramach badań terenowych.

Biorąc to pod uwagę sformułowano cel główny pracy oraz szczegółowe cele naukowe i praktyczne niniejszej rozprawy doktorskiej.

Głównym celem rozprawy doktorskiej jest opracowanie metody szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej na drogach krajowych oraz wojewódzkich wraz z niezbędnymi modelami matematycznymi składowych tych kosztów.

Z uwagi na liczbę oraz złożoność prac niezbędnych do wykonania oceny funkcjonowania każdego elementu infrastruktury oraz określenia ich kosztów w celu budowy brakujących metod LCC w pracy doktorskiej ograniczono ich zakres do składowych kosztów: wariantowania tras drogowych, drogowych barier ochronnych oraz dróg dla pieszych i rowerów.

Przyjęty cel główny uszczegółowiono w ramach pracy przyjmując cele naukowe i cele praktyczne.

Celami naukowymi rozprawy doktorskiej są:

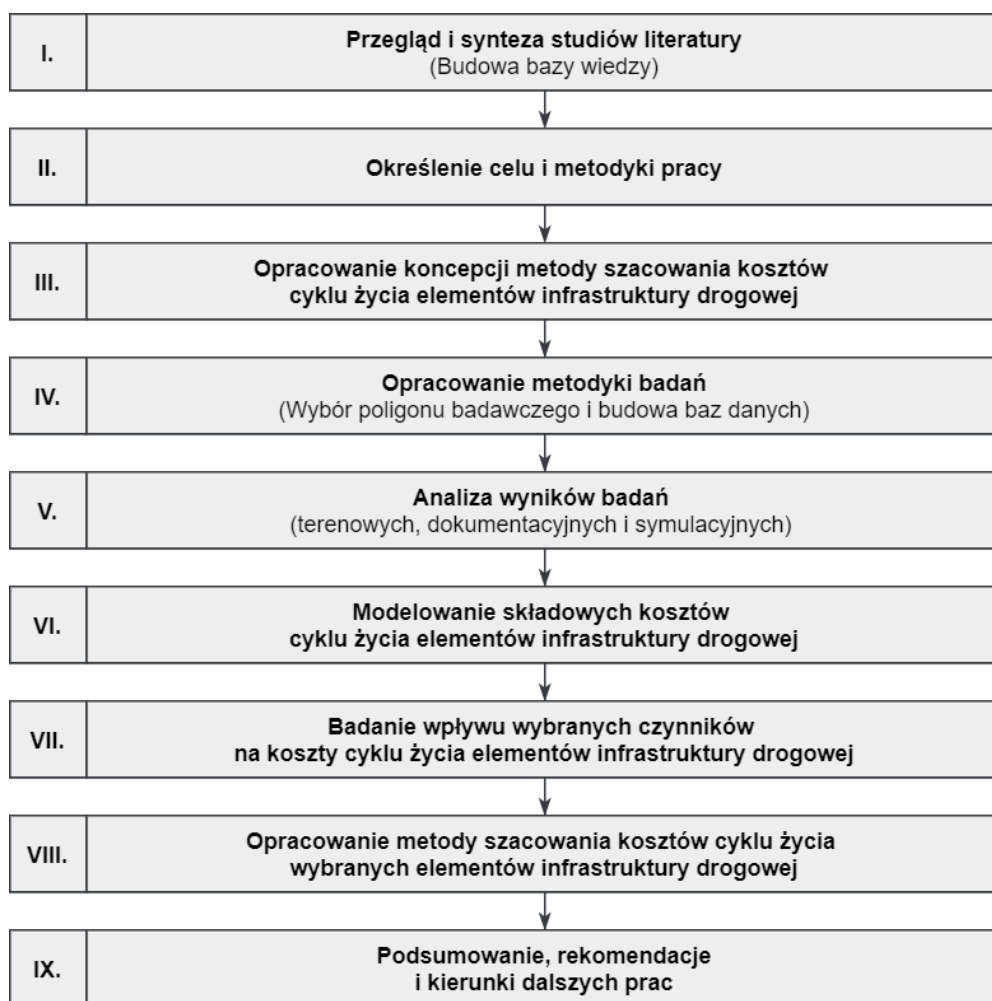
1. **CN1** – Identyfikacja oraz analiza czynników wpływających na koszty cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej na podstawie badań terenowych, symulacyjnych i dokumentacyjnych.
2. **CN2** – Opracowanie matematycznych modeli składowych kosztów cyklu życia: wariantów lokalizacyjnych tras drogowych i drogowych barier ochronnych na drogach krajowych oraz infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu na drogach wojewódzkich, ze szczególnym uwzględnieniem kosztów użytkowników dróg.
3. **CN3** – Określenie wielkości wpływu wybranych czynników drogowych, ruchowych, konstrukcyjnych i otoczenia na analizowane składowe koszty cyklu życia analizowanych elementów dróg krajowych i dróg wojewódzkich.

Celami praktycznymi rozprawy doktorskiej są:

1. **CP1** – Określenie charakterystyk funkcjonowania wybranych elementów infrastruktury drogowej, przegląd kosztów ich realizacji i funkcjonowania na poszczególnych etapach cyklu życia na drogach krajowych i wojewódzkich.
2. **CP2** – Opracowanie metod szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej uwzględniających rodzaj elementu infrastruktury drogowej, cel prowadzonej analizy oraz zróżnicowaną dostępność danych wejściowych.

3.2. Metodyka i zakres pracy

W celu realizacji założonych celów badawczych pracy opracowano dziewięcioetapowy proces obejmujący badania, studia i analizy, który przedstawiono schematycznie na rys. 3.1.



Rys. 3.1 Proces realizacji pracy doktorskiej

Źródło: Opracowanie własne

Etap I: Przegląd i synteza studiów literatury. W etapie tym przeprowadzano przegląd literatury zagranicznej i polskiej w kontekście podjętego problemu badawczego dotyczącego metod szacowania kosztów cyklu życia infrastruktury drogowej. Wyniki badań literaturowych zostały przedstawione w rozdziale 2 niniejszej dysertacji.

Etap II: Określenie celów i metodyki pracy. Przegląd i synteza literatury z etapu I umożliwiły zidentyfikowanie luki badawczej oraz określenie celów i tez rozprawy doktorskiej. W ramach prac zidentyfikowano trzy cele naukowe oraz dwa cele praktyczne.

Etap III: Opracowanie koncepcji metody szacowania kosztów cyklu życia. Jednym z celów tego etapu było przedstawienie ogólnych założeń dotyczących opracowanej metody szacowania kosztów cyklu życia, w tym wybór elementów infrastruktury drogowej, długości ich życia oraz etapu stosowania metod LCC i ich celu. Na podstawie przeprowadzonych badań własnych i literaturowych przedstawiono ogólną metodykę szacowania kosztów cyklu życia elementów infrastruktury drogowej. W efekcie końcowym opracowano klasyfikację kosztów stosowanych w metodzie LCC.

Etap IV: Opracowanie metodyki badań. W etapie tym została opracowana strategia badań. Przedstawiono metody zbierania i strukturyzacji danych w trzech przeprowadzonych badaniach: terenowych, symulacyjnych oraz dokumentacyjnych. Zdefiniowany został poligon badawczy, na którym przeprowadzono badania terenowe. W etapie tym opracowano bazy danych zawierające informacje z wybranych odcinków dróg krajowych i wojewódzkich o funkcjonowaniu wybranych elementów infrastruktury drogowej i ich kosztach.

Etap V: Analiza wyników badań. W etapie tym przeprowadzono analizę wyników badań na podstawie opracowanych baz danych z etapu IV. Rozdział ten pozwolił na osiągnięcie celu praktycznego CP1 oraz celu naukowego CN1 pracy doktorskiej: określenie charakterystyki funkcjonalnej wybranych elementów infrastruktury drogowej i przegląd ich kosztów na każdym etapie cyklu życia oraz na różnych kategoriach dróg. W etapie tym przeanalizowano również czynniki wpływające na koszty cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej.

Etap VI: Modelowanie składowych kosztów cyklu życia elementów infrastruktury drogowej. Na podstawie wyników badań przeprowadzonych w rozdziale V opracowano modele składowych kosztów cyklu życia: wariantów lokalizacyjnych tras, drogowych barier ochronnych oraz infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu drogowego. W wyniku tych działań opracowano modele kosztów: budowy, naprawy oraz składowe modele niezbędne do oszacowania kosztów użytkowników dróg. Etap ten umożliwił osiągnięcie celu naukowego CN2.

Etap VII: Badanie wpływu wybranych czynników na koszty cyklu życia z wykorzystaniem opracowanej metody. Wykorzystując modele opracowane w etapie IV przeprowadzono badania wpływu wybranych czynników na składowe i całkowite koszty cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej. Celem tych badań było określenie wrażliwości opracowanych modeli kosztów na zmienność poszczególnych parametrów oraz identyfikację kluczowych czynników generujących koszty. Etap ten umożliwił osiągnięcie celu naukowego CN3.

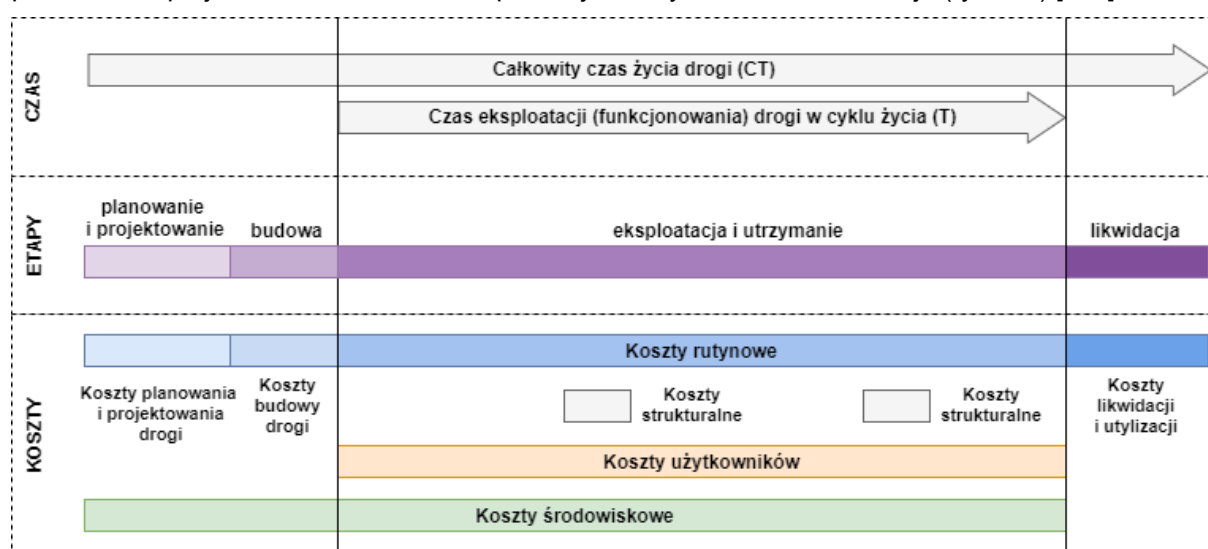
Etap VIII: Opracowanie metody szacowania kosztów cyklu życia elementów infrastruktury drogowej. Rozdział ten pozwoli na przedstawienie praktycznego celu pracy, jakim jest możliwość zastosowania wyników badań jako narzędzia do kompleksowego zarządzania infrastrukturą drogową. W kroku tym przedstawiono podstawowe założenia, niezbędne dane oraz strukturę metod szacowania kosztów cyklu życia: wariantów tras dróg krajowych, barier ochronnych oraz wybranej infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu dróg wojewódzkich. Etap ten umożliwił realizację celu praktycznego CP2.

Etap IX: Podsumowanie, rekomendacje i dalsze kierunki prac. W rozdziale tym przedstawiono wnioski, rekomendacje płynące z przeprowadzonych badań oraz kierunki dalszych badań.

4. KONCEPCJA METODY SZACOWANIA KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA

4.1. Wprowadzenie

Jedną z podstawowych decyzji jaką podejmuje zarządca drogi dotyczy wyboru wariantu inwestycji drogowej, jej elementów czy też scenariuszy utrzymania infrastruktury drogowej. Decyzje związane z infrastrukturą drogową powinny być tak podejmowane, aby spełniać oczekiwania użytkowników dróg, wymagania społeczne dotyczące m.in. sprawności, bezpieczeństwa, przy czym spełniać cele zrównoważonego rozwoju przez cały jej cykl życia. Jak przedstawiono w rozdziale 2.1.2.3 cykl życia obejmuje poszczególne powiązane ze sobą fazy cyklu istnienia obiektu [33]. Istotnym procesem przy podejmowaniu decyzji dotyczących infrastruktury drogowej jest podział cyklu życia obiektu drogowego na etapy, która umożliwia różnym podmiotom zarządzanie infrastrukturą drogową w odpowiednim stadium projektu. W przypadku infrastruktury drogowej wyróżnia się najczęściej pięć etapów jej życia: planowanie i projektowanie, budowa, eksploatacja i utrzymanie oraz likwidacja (rys. 4.1) [117].



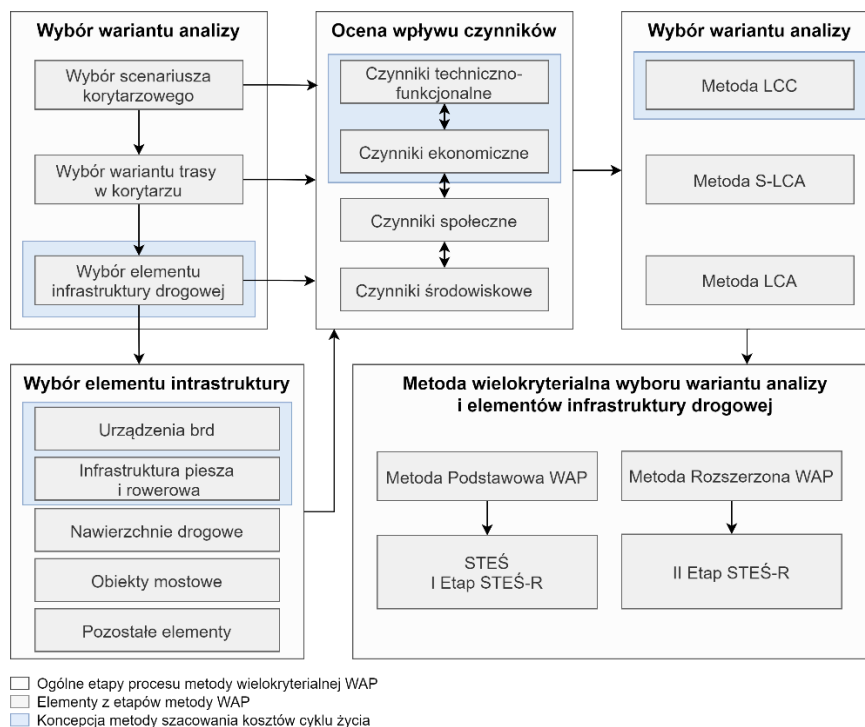
Rys. 4.1 Czas, etapy i składowe kosztów w cyklu życia

Źródło: Opracowanie własne

Decyzje o wyborze oraz zaprojektowaniu danego typu elementu infrastruktury drogowej projektanci i inwestorzy bardzo często podejmują na podstawie jedynie aspektów technicznych i ekonomicznych, a w szczególności na podstawie wielkości kosztów inwestycyjnych. W praktyce istotnym problemem, z punktu widzenia podmiotów zarządzających i utrzymujących infrastrukturę drogową, jest ponoszenie wydatków związanych z utrzymaniem i użytkowaniem obiektów drogowych (wykonywanie m.in. prac remontowych i naprawczych). Obecnie koszt cyklu życia obiektu jest nadal parametrem stosowanym bardzo rzadko przy wyborze wariantu projektu inwestycji drogowej lub przy dokonywaniu oceny ofert przetargowych [57], wynika to m.in. z braku metody LCC, która byłaby dostosowana do specyfiki elementów infrastruktury drogowej.

W rozdziale tym przedstawiono ogólną koncepcję metody szacowania kosztów w cyklu życia, która może być zastosowana m.in. jako składowa w narzędziu w wielokryterialnej analizie porównawczej (rys. 4.2) w celu ułatwienia podejmowania decyzji dotyczących wyboru wariantu trasy lub elementów infrastruktury drogowej na sieci dróg krajowych i wojewódzkich.

Celem analizy wielokryterialnej jest wskazanie najlepszego pod względem środowiskowym, ekonomicznym, użytkowym i społecznym analizowanego wariantu, czyli takiego, który spełnia założenia zrównoważonego rozwoju. Obecnie stosowana metoda wielokryterialna jest narzędziem subiektywnym, w którym to wysokość przyjmowanych wag oraz pod kryteriów zależy od osoby prowadzącej analizę. Opracowywana metoda szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów umożliwia bardziej usystematyzowane podejście w stosowaniu analiz wielokryterialnych poprzez uwzględnienie kosztów wybranych elementów w całym cyklu życia.



Rys. 4.2 Koncepcja metody szacowania kosztów cyklu życia elementów infrastruktury w metodzie wielokryterialnej

Źródło: Opracowanie własne

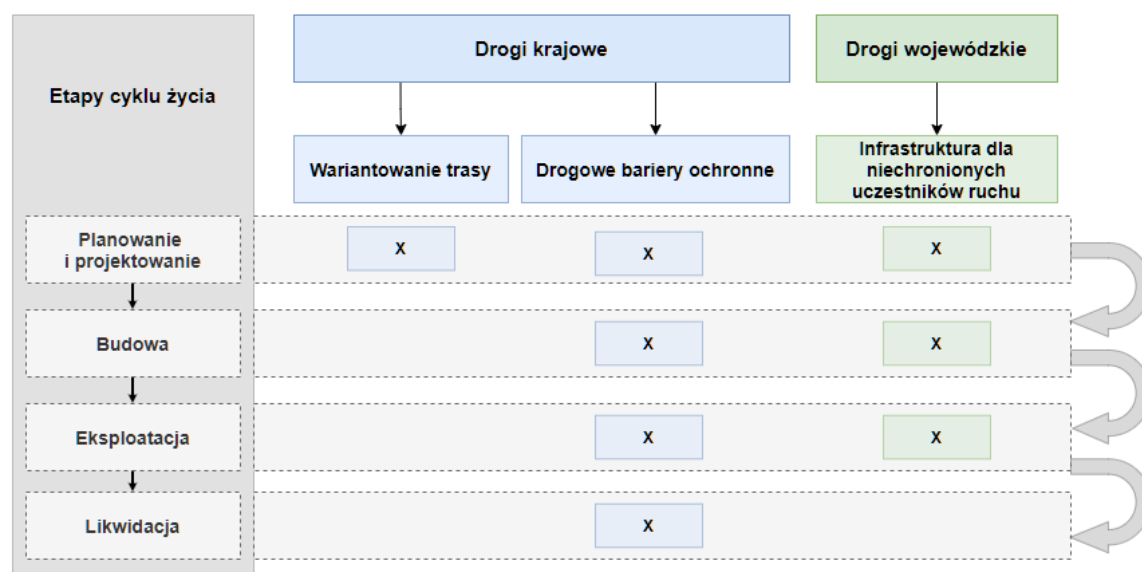
4.2. Założenia

4.2.1. Elementy infrastruktury drogowej

Przy opracowywaniu koncepcji metody szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej przyjęto następujące założenia:

1. Metoda szacowania kosztów cyklu życia może być zastosowana do oszacowania kosztów elementów infrastruktury drogowej zlokalizowanej na drogach krajowych lub drogach wojewódzkich.
2. W przypadku dróg krajowych metoda obejmuje swym zakresem procedurę szacowania kosztów wariantów lokalizacyjnych trasy drogowej oraz kosztów cyklu życia drogowych barier ochronnych.
3. W przypadku dróg wojewódzkich metoda obejmuje swym zakresem procedurę szacowania kosztów cyklu życia elementów infrastruktury niechronionych uczestników ruchu drogowego: dróg dla pieszych, dróg dla pieszych i rowerów w małych miejscowościach i obszarach niezabudowanych.
4. Metoda LCC powinna umożliwić oszacowanie kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej we wszystkich jej istotnych etapach cyklu życia. Dobór poszczególnych

etapów cyklu życia dla wybranych elementów infrastruktury drogowej był podyktowany dostępnością danych, co schematycznie przedstawiono na rys. 4.3.



Rys. 4.3 Wybrane elementy infrastruktury drogowej oraz ich etapy cyklu życia uwzględnione w metodzie

Źródło: Opracowanie własne

5. Metoda powinna umożliwić oszacowanie poszczególnych składowych kosztów cyklu życia w sposób ilościowy z uwzględnieniem istotnych etapów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej ułatwiając tym samym proces wyboru oraz zarządzania wybranymi aktywami drogowymi uwzględniając zarówno koszty ponoszone przez zarządcę dróg jak i użytkowników dróg.

4.2.2. Czas cyklu życia

Definicja i etapy cyklu życia obiektu różnią się w zależności od potrzeb wykonywanych analiz i obiektów, których ona dotyczy [192]. Zgodnie z PN-EN 60300-3-3 [192] wyróżnia się sześć ogólnych faz cyklu życia każdego obiektu: koncepcja i definiowanie, projektowanie i rozwój, produkcja, instalacja, użytkowanie i obsługa, likwidacja. W zależności od potrzeb analizy fazy te mogą być łączone lub pomijane. Podobne podejście do cyklu życia ujęte jest normach PN-EN ISO 14040/14044 [193], [194] gdzie wskazuje się, że ocena wpływu inwestycji na środowisko może być prowadzona w czterech granicach: budowie („cradle to gate”), budowie i okres eksploatacji („cradle to gate”), okresie eksploatacji („gate to gate”) oraz w całym cyklu życia (cradle to grave).

Biorąc pod uwagę, stosowane w praktyce horyzonty czasowe, do określania cyklu życia drogi przyjmuje się dwa okresy analiz (rys. 4.1):

- CT – całkowity okres cyklu życia drogi (lata),
- T – czas eksploatacji drogi w cyklu życia (lata).

Całkowity czas cyklu życia drogi CT obejmuje wszystkie fazy cyklu życia drogi, a w szczególności: planowanie, projektowanie, budowę, eksploatację (utrzymanie) oraz likwidację.

Czas eksploatacji drogi w cyklu życia T, zwany także (potocznie) cyklem życia drogi obejmuje okres eksploatacji i utrzymania drogi. W zależności od rodzaju obiektu, czas ten może wynosić od kilkunastu

(w przypadku elementów infrastruktury drogowej) do 150 lat (w przypadku drogowych obiektów inżynierskich) [73]. W Polsce, w ramach projektów RID [198], [199] metody szacowania kosztów cyklu życia barier drogowych w uzgodnieniu z GDDKiA przyjęto czas trwania cyklu życia obiektów drogowych $T = 30$ lat, a obiektów mostowych $T = 50$ lat. Na podstawie wyników studiów literatury oraz wyników wstępnych prac własnych przyjmuje się w przypadku infrastruktury drogowej okres $T = 30$ lat, co jest zgodne z wymaganiami dotyczącymi prognoz ruchu oraz zalecaną trwałość nawierzchni drogowych. Czas trwania cyklu w metodzie szacowania kosztów cyklu życia może ulec zmianie w zależności od wybranego celu zastosowania metody. W celu oszacowania kosztów cyklu życia należy koszty wcześniejsze (koszty planowania i projektowania) przypisać do pierwszego roku eksploatacji drogi, a koszty późniejsze (koszty likwidacji) do ostatniego roku jej eksploatacji.

4.2.3. Składowe kosztów w cyklu życia drogi

W przypadku cyklu życia infrastruktury drogowej i jej elementów wyróżnia się pięć zasadniczych etapów cyklu życia infrastruktury drogowej przy analizach kosztowych: planowanie, projektowanie, budowa, eksploatacja i likwidacja [117]. Każdy element infrastruktury drogowej przechodzi przez wiele faz w trakcie swojego cyklu życia, podczas których generowane są różne koszty związane z budową, utrzymaniem elementów infrastruktury drogowej na odpowiednim poziomie i jej wpływem na użytkowników i otoczenie (rys. 4.1). Jednak to decyzje podejmowane we wczesnych fazach życia obiektu mają znaczący wpływ na jego całkowite koszty cyklu życia [242].

Analizując cykl życia infrastruktury drogowej można stosować dwa podejścia: tradycyjne, w którym zakłada się, że poszczególne etapy następują po sobie liniowo oraz założenia gospodarki o obiegu zamkniętym, w której to uwzględnia się ponowne wykorzystanie materiałów [219]. W zależności od przyjętych celów analizy może być ona wykonana dla pojedynczej fazy lub kombinacji różnych faz cyklu życia.

Opracowana koncepcja metoda LCC zgodnie z normą PN-EN 60300-3:3-2017 [192] określana jest mianem metody złożonej, obejmującą analizę zdyskontowanych przepływów pieniężnych w okresie od montażu do wycofania elementów infrastruktury z użytkowania, integrującą różne elementy kosztów ponoszonych w cyklu życia.

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4.1, koszty funkcjonowania drogi generowane są na poszczególnych etapach, cyklu jej życia, a w szczególności:

1. Na etapie planowania i projektowania drogi generowane są następujące składowe kosztów:
 - koszty pozyskania lub opracowania map do celów projektowych,
 - koszty opracowania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej,
 - koszty inwentaryzacji, ekspertyzy stanu istniejącego i planowanego, w tym koszty analiz oddziaływania inwestycji na środowisko,
 - koszty praw autorskich,
 - koszty dokumentacji projektowej.
2. Na etapie budowy drogi generowane są następujące składowe kosztów:
 - koszty nabycia nieruchomości (terenu), w tym koszty odszkodowania szacowane na podstawie: wartości gruntów (rolnych, leśnych, mieszkaniowych, przemysłowych, usługowych oraz

drogowych), nawierzchni drogowych z podziałem na kategorie dróg, kosztów wyburzenia budynków mieszkalnych i gospodarczych oraz koszty związane z ograniczeniem w korzystaniu nieruchomości,

- koszty robót drogowych, w tym koszty materiału, robocizny i pracy sprzętu związane z wykonaniem: robót przygotowawczych, robotami ziemnymi, odwodnienia korpusu drogowego, wzmocnienia gruntu, konstrukcją nawierzchni drogowych, robotami wykończeniowymi, oznakowania i urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego, urządzeń ochrony środowiska, urządzeń obcych, elementów ulic, zieleni drogowego i innych prac,
- koszty robót mostowych, w tym koszty materiału, robocizny i pracy sprzętu poniesione na wykonaniu obiektów mostowych, wiaduktów drogowych, przejść dla zwierząt i innych obiektów np. przepustów melioracyjnych.

3. Na etapie eksploatacji i utrzymania drogi generowane są następujące składowe koszty:

- koszty związane z prowadzeniem prac rutynowych takich jak np. remonty częściowe nawierzchni drogowych, utrzymanie i remont urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego, usuwanie skutków zdarzeń drogowych.
- koszty związane z prowadzeniem prac strukturalnych i modernizacji odcinków i elementów dróg takich jak np. wykonanie i ustawienie nowych barier ochronnych,
- koszty ponoszone przez użytkowników dróg takie jak: koszty wypadków drogowych, czasu podróży i eksploatacji pojazdów związanych z wystąpieniem zdarzenia planowanego lub nieplanowanego,
- koszty środowiskowe związane z oddziaływaniem inwestycji na środowisko naturalne takie jak: koszty zanieczyszczeń powietrza, koszty emisji spalin, koszty hałasu itp.

4. Na etapie likwidacji drogi generowane są następujące składowe przepływy pieniężnych (kosztów i korzyści):

- koszty związane z przygotowaniem dokumentacji rozbiórkowej,
- koszty demontażu elementów infrastruktury drogowej takich jak np. nawierzchnia drogowa, oznakowanie pionowe,
- przepływy pieniężne związane z recyklingiem i utylizacją odpadów w tym koszty transportu.

4.3. Metodyka szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej

Szacowanie kosztów cyklu życia jest narzędziem, które umożliwia ukazanie trendów zmiany kosztów obiektu drogowego w poszczególnych etapach jego życia. Metoda LCC może być przedstawiona za pomocą prostych modeli matematycznych bądź bardziej zaawansowanych, ukazujących badany obiekt jako element, na który wpływają w sposób dynamiczny różne parametry. Na podstawie badań literaturowych oraz własnych przyjęto sześćoetapowy proces budowy koncepcji metody szacowania kosztów cyklu życia elementów drogowych [115], [192], [214]. Etapy te mogą być ze sobą łączone.

Etap 1 Określenie celu i zakresu analizy. W pierwszym etapie koncepcji LCC należy określić kontekst prowadzonych badań na który składa się definiowanie celu analizy, jej założeń oraz wybór analizowanych elementów

Określenie celu analizy. Metoda szacowania kosztów cyklu życia elementów drogowych może być prowadzona w celu: wspomaganie procedury wyboru obiektu, wyboru najkorzystniejszej oferty

przetargowej, wyboru firmy utrzymaniowej, identyfikacji. Wybór celu analizy wpływa na przyjęcie założeń związanych m.in. z przyjęciem horyzontu czasowego prowadzonej analizy.

Wybór analizowanych elementów infrastruktury drogowej. Zaproponowana metoda LCC dotyczy szacowania kosztów elementów infrastruktury drogowej zlokalizowanych na sieci dróg krajowych (planowanych tras drogowych oraz drogowych barier ochronnych) oraz sieci dróg wojewódzkich (infrastruktura dla pieszych i rowerów). Wybór konkretnego rodzaju aktywu drogowego determinuje pozostałe kroki w tym przede wszystkim zakres danych niezbędnych do metody LCC.

Po zdefiniowaniu celu oraz zakresu analizy należy pozyskać dane konieczne do wykonania analizy kosztów cyklu życia obiektu. Istotnym krokiem w tym etapie jest przyjęcie wysokości stopy dyskontowej. Jak wykazano w przeprowadzonych badaniach literaturowych do szacowania kosztów cyklu życia przyjmowano różne wartości od 2% do 6% [64], [181], [168]. W Polsce w badaniach oceny funkcjonowania infrastruktury drogowej zaleca się przyjmowanie stopy dyskontowej na poziomie 3% [120]. W związku z tym, że wielkość stopy dyskontowej może istotnie wpłynąć na wyniki analizy LCC [64] zaleca się w pierwszym etapie przyjąć stopę dyskontową 3% i ocenić jak jej zmiana wpływa na całkowity wynik kosztów.

Etap 2 Identyfikacja i dekompozycja kosztów. Na podstawie przyjętego celu i zakresu analizy identyfikuje się składowe koszty cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej. Etap ten umożliwia identyfikację działań, które mają największy wpływ na całkowite koszty oraz wybór strategii utrzymaniowych. W celu identyfikacji czynników wpływających na koszty cyklu życia elementów infrastruktury drogowej przeprowadzono badania terenowe, symulacyjne oraz dokumentacyjne (rozdział 5). Wybór składowych kosztów cyklu życia różni w zależności od wybranego aktywu drogowego, dostępności danych i celu analizy. Strukturę ogólną składowych kosztów infrastruktury drogowej opracowaną na podstawie badań literaturowych oraz własnych i szczegółowo przedstawioną w rozdziale 4.4 [91], [76], [214]. Wyróżnia się w niej trzy ogólne grupy kosztów, które można podzielić z uwagi na:

- zmienności kosztów: stałe, zmienne,
- właściciela kosztów: zarządcy drogi, użytkowników drogi,
- etapów cyklu życia: inwestycyjne, strukturalne, rutynowe oraz pozostałe.

Etap 3 Wybór metody szacowania LCC. Podstawowe założenie przy budowie metody szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej dotyczy zakresu stosowania metody. Jak wykazano w badaniach literaturowych metody szacowania różnią się w zależności od jakości i dostępności do danych a tym samym poziomu uszczegółowienia i dokładności metody. Najczęściej stosowane są trzy metody szacowania kosztów cyklu życia: porównawcza, parametryczna oraz inżynierska [18], [192], [56].. W opracowanych metodach LCC wykorzystuje się zarówno metody inżynierskie polegające na szczegółowej analizie każdego komponentu jak i parametryczne, w których buduje się modele kosztów.

Z uwagi na fakt, że zarządzanie infrastrukturą drogową i jej elementami może odbywać się na różnych poziomach: strategiczne, operacyjne i taktyczne oraz różną dostępność do danych wyróżniono trzy metody szacowania kosztów cyklu życia, które różnią się stopniem dokładności oraz zakresem danych wejściowych.

- Metoda uproszczona. Zasadniczym jej celem jest oszacowanie kosztów na etapie wstępnego planowania elementów infrastruktury drogowej w celu dokonania wyboru wariantu lub elementów infrastruktury drogowej. Ze względu na to, że metoda ta stosowana jest do wstępnego projektowania charakteryzuje się ona dużym stopniem ogólności.
- Metoda ogólna. Zasadniczym jej celem jest oszacowanie kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej na etapie projektowania lub utrzymania odcinka drogi. Metoda ta charakteryzuje się średnim stopniem ogólności danych z uwagi na ograniczony dostęp do informacji.
- Metoda szczegółowa. Zasadniczym jej celem jest oszacowanie kosztów cyklu życia elementu infrastruktury na konkretnym odcinku drogi. Metoda charakteryzuje się dużym stopniem dokładności szacowania składowych kosztów. Zakłada się, że metoda będzie wykorzystywana dla celów projektowych oraz na etapie utrzymania drogi.

Etap 4 Szacowanie kosztów cyklu życia. Wyróżnić można dwa sposoby szacowania kosztów cyklu życia: deterministyczne oraz probabilistyczne. W praktyce najczęściej stosowanym podejściem w analizach LCC jest podejście deterministyczne o czym świadczy m.in. zastosowanie tego ujęcia w ponad 80% analiz wykonanych w Stanach Zjednoczonych [214]. Przeprowadzone badania i analizy rozkładów kosztów wybranych elementów infrastruktury drogowej (rozdział 6) oraz opracowane matematyczne modele składowych kosztów (rozdział 7) umożliwiają zastosowanie zarówno podejścia deterministycznego jak i probabilistycznego w analizach LCC.

Etap 5 Analiza wrażliwości. W celu zidentyfikowania jak poszczególne czynniki wpływają na zmianę kosztów składowych lub całkowitych cyklu życia elementów drogowych konieczne jest wykonanie analizy wrażliwości. Analiza ta powinna być wykonana dla parametrów, które mogą w rzeczywistości ulegać zmianom lub są obarczone dużą niepewnością. Do czynników tych zalicza się: stopę dyskontową, średniodobowe natężenie ruchu i strukturę rodzajową pojazdów.

Etap 6 Opracowanie raportu z analizy LCC. W ostatnim etapie opracowuje się raport przedstawiający zestawienie całkowitych kosztów cyklu życia elementów infrastruktury drogowej oraz jej składowych. W przypadku wykonywania analizy LCC w celu porównania poszczególnych wariantów lub elementów infrastruktury drogowej przed wykonaniem raportu należy zweryfikować czy analiza LCC została wykonana dla wszystkich wariantów elementu.

4.4. Opis matematyczny składowych kosztów

W celu opracowania metody szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej konieczna jest identyfikacja i dekompozycja składowych kosztów cyklu życia. Na podstawie przeglądu literatury [91], [76], [192] oraz badań własnych opracowano ogólny matematyczny model metody wynikający z definicji kosztów cyklu życia i uwzględniający zmienność kosztów w czasie. W modelu tym zakłada się, że koszty cyklu życia elementów infrastruktury drogowej są funkcją dwóch zmiennych: kosztów stałych oraz kosztów zmiennych, co można zapisać za pomocą równania 4.1 i 4.2.

W celu zapewnienia porównywalności kosztów ponoszonych w całym cyklu życia uwzględniono wpływ czynnika czasu poprzez zastosowanie dyskontowania.

$$LCC = f(KS, KZ) \quad (4.1)$$

przy czym:

$$LCC = KS + \sum_{i=1}^T \frac{KZ_i}{(1+a)^i} \quad (4.2)$$

gdzie:

KS – koszty stałe (PLN), czyli koszty przyjmowane w pierwszym roku analizy, niepodlegające dyskontowaniu,

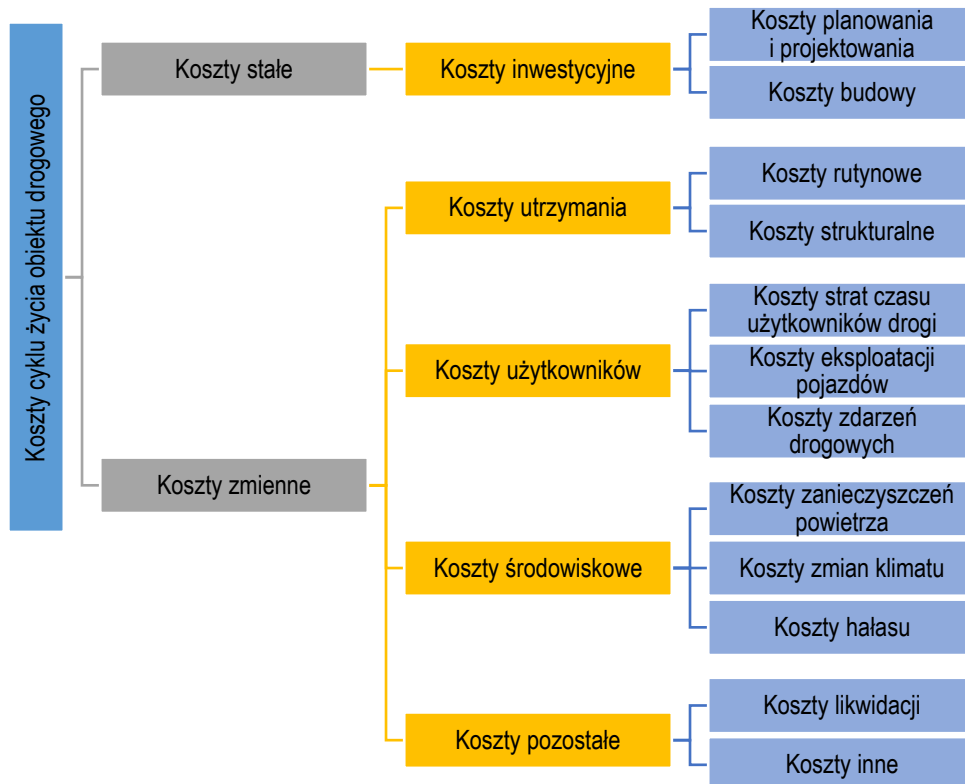
KZ – koszty zmienne (PLN), czyli koszty ponoszone w kolejnych latach analizy kosztów cyklu życia, które są zależne od wysokości stopy dyskontowej,

a – stopa dyskontowa (%), wartość umożliwiającą przeliczenie przyszłych wartości pieniężnych na wartość bieżącą,

i – rok w analizowanym cyklu życia T ($i = 1, 2, \dots, T$),

T – przyjęty okres analizy.

Powyższe równanie 4.2 można podzielić z uwagi na etapy cyklu życia, wówczas wyróżnia się następujące grupy kosztów: inwestycyjne, utrzymania, użytkowników, środowiskowe i pozostałe. Na schemacie (rys. 4.4) przedstawiono dekompozycję kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej.



Rys. 4.4 Ogólna klasyfikacja kosztów w metodzie szacowania kosztów cyklu życia elementów infrastruktury drogowej

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku etapów cyklu życia całkowite koszty cyklu życia są funkcją zależną od pięciu grup kosztów i równanie 4.2 przyjmuje postać równań 4.3–4.4:

$$LCC = f(KIN, KUT, KUZ, KŚR, KPO) \quad (4.3)$$

przy czym:

$$LCC = KIN + \sum_{i=1}^T \frac{KUT_i + KUZ_i + K\acute{S}R_i + KPO_i}{(1 + a)^i} \quad (4.4)$$

gdzie:

KIN – koszty inwestycyjne (PLN),

KUT – koszty utrzymania (PLN),

KUZ – koszty użytkowników dróg (PLN),

$K\acute{S}R$ – koszty środowiskowe (PLN),

KPO – koszty pozostałe (PLN),

W metodzie przyjęto klasyfikację kosztów, która uwzględnia zarówno koszty ponoszone przez inwestora (inwestycyjne, utrzymania, pozostałe) jak i przez użytkownika / społeczeństwo (koszty użytkowników, koszty środowiskowe). Dodatkowo klasyfikacja wpasowuje się w obecnie stosowany przez GDDKiA podział kosztów utrzymaniowych (strukturalne, rutynowe). Składowe poszczególnych grup kosztów (zgodnie z rys. 4.4) zostały omówione w kolejnych podrozdziałach.

4.4.1. Koszty inwestycyjne

W analizie kosztów cyklu życia koszty inwestycyjne nie są poddawane dyskontowaniu, w związku z tym przyjmuje się, że są ponoszone jednorazowo w bazowym roku cyklu życia obiektu. Poprzez koszty inwestycyjne rozumie się sumę kosztów budowy oraz planowania i projektowania, które ponoszone są przez inwestora. Koszty inwestycyjne wyliczane są na podstawie wzorów 4.5 – 4.7.

$$KIN = KPL + KBU \quad (4.5)$$

przy czym:

$$KPL = KWP + KBN + KPR \quad (4.6)$$

$$KBU = KWT + KPB \quad (4.7)$$

gdzie:

KIN – koszty inwestycyjne (PLN),

KPL – koszty planowania i projektowania, do których zalicza się koszty wstępnych prac przygotowawczych, prac badawczo rozwojowych oraz opracowania dokumentacji projektowej (PLN),

KBU – koszty budowy drogi związane z wykupem terenu pod inwestycję oraz kosztami prac budowlanymi (kosztami wytworzenia, dostawy i montażu) (PLN),

KWP – koszty wstępnych prac przygotowawczych takich jak opracowanie koncepcji przebiegu trasy drogi, wykonanie analiz ruchu i bezpieczeństwa ruchu drogowego a także pozyskaniem niezbędnych pozwoleń i uzgodnień (PLN),

KBN – koszty prac badawczo rozwojowych (PLN). Do kosztów tych zalicza się wydatki ponoszone na realizacji działań związanych z oceną wykonalności, środowiskową, ekonomiczną i społeczną planowanych wariantów przebiegu tras dróg lub elementów drogi,

KPR – koszty opracowania dokumentacji projektowej (PLN),

KWT – koszty wykupu terenu pod drogę (PLN), obejmujące odszkodowanie za nabycie nieruchomości oraz rekompensatę za ograniczenie w korzystaniu z nieruchomości,

KPB – koszty prac budowlanych wraz z materiałami i robocizną (PLN).

4.4.2. Koszty utrzymania

4.4.2.1. Koszty strukturalne

Koszty strukturalne są to wydatki nieobjęte wynagrodzeniem ryczałtowym, na które składają się koszty modernizacji i koszty utrzymania okresowego. Koszty strukturalne mogą występować kilkukrotnie w całym cyklu życia elementów infrastruktury drogowej. Częstość występowania kosztów strukturalnych jest zmienna i zależy od przyjętej strategii utrzymaniowej i związanego z nimi harmonogramu prac. Odpowiednio zaplanowane i regularnie prowadzone działania utrzymaniowe mogą znacząco wydłużyć żywotność infrastruktury drogowej, obniżając jednocześnie długoterminowe koszty strukturalne. W praktyce stosuje się cztery strategie utrzymania: reaktywną, prewencyjną, prognostyczną i proaktywną [209], [248], [69], które determinują harmonogram prac oraz wpływają na wielkość końcowych kosztów strukturalnych. Wybór konkretnej strategii zależy od wielu czynników m.in. od wielkości dostępnego budżetu, stanu technicznego drogi, jej kategorii, natężenia ruchu oraz struktury rodzajowej pojazdów. Ponadto duże znaczenie ma również zakres posiadanych danych o infrastrukturze, w tym m.in. modele degradacji nawierzchni. Koszty strukturalne można oszacować za pomocą wzoru 4.8.

$$KSTR = KMO + KUO \quad (4.8)$$

gdzie:

KMO – koszty modernizacji, czyli wydatki ponoszone w celu ulepszania stanu obiektu drogowego (PLN),

KUO – koszty utrzymania okresowego, czyli koszty związane z pracami wykraczającymi poza utrzymanie rutynowe (PLN).

4.4.2.2. Koszty rutynowe

Koszty rutynowe są to koszty, które są objęte wynagrodzeniem ryczałtowym i są ponoszone w związku z wykonywaniem prac rutynowych, które mają na celu zapewnienia parametrów funkcjonalnych i użytkowych drogi. Prace rutynowe są to wszelkiego rodzaju czynności, których zadaniem jest zachowanie bieżącego stanu technicznego, w związku z czym nie obejmują one przebudowy, modernizacji drogi. Do prac rutynowych zalicza się prace związane z utrzymaniem bieżącym letnim oraz zimowym (m.in. koszenie poboczy, czyszczenie barier ochronnych, odśnieżanie) oraz bieżącymi naprawami (m.in. naprawa barier ochronnych, wymiana uszkodzonych znaków pionowych). Na koszty rutynowe składają się koszty związane z naprawą i utrzymaniem bieżącym. Koszty rutynowe występują cyklicznie w całym cyklu życia drogi i jej elementów. W metodzie uwzględnia się dwie składowe kosztów, opisane zależnością 4.9.

$$KRU = KNA + KUB \quad (4.9)$$

gdzie:

KNA – koszty napraw, czyli koszty ponoszone w związku z naprawą / odnową elementu infrastruktury drogowej (PLN),

KUB – koszty utrzymania bieżącego są to koszty ponoszone w celu zapewnienia funkcjonalności elementów infrastruktury drogowej (PLN).

4.4.3. Koszty użytkowników

Koszty użytkowników zdefiniowano jako straty ponoszone przez pojedyncze osoby lub całe społeczeństwo w wyniku wykonywania prac lub występowania zdarzeń drogowych. Koszty użytkowników dróg wyliczane są na podstawie równania 4.10.

$$KUZ = KZD + KST + KEP \quad (4.10)$$

gdzie:

KZD – koszty zdarzeń drogowych, czyli koszty, które ponoszą użytkownicy w związku z zaistnieniem zdarzeń drogowych w rezultacie zastosowania analizowanego wariantu drogi (PLN),

KST – koszty czasu podróży, niekiedy liczone jako straty czasu w stosunku do wariantu bazowego, są to koszty, które ponoszą użytkownicy drogi w zależności od warunków drogowo-ruchowych występujących na drodze w rezultacie zastosowania analizowanego wariantu drogi (PLN),

KEP – koszty eksploatacji pojazdów są to koszty zużycia paliwa, materiałów eksploatacyjnych i pojazdów w rezultacie zastosowania analizowanego wariantu drogi (PLN).

4.4.4. Koszty środowiskowe

Koszty środowiskowe są to koszty związane z negatywnym wpływem planowanej inwestycji na środowisko naturalne na etapie jej planowania i projektowania, budowy, eksploatacji oraz likwidacji. Obejmują one swym zakresem m.in. koszty związane z ruchem takie jak: emisja spalin, hałas, zanieczyszczenia środowiska, a także koszty zużycia zasobów naturalnych oraz generowania odpadów budowlanych. Koszty środowiskowe ponoszone w cyklu życia inwestycji można oszacować na podstawie wzoru 4.11.

$$K\acute{S}R = K\acute{S}R_p + K\acute{S}R_B + K\acute{S}R_U + K\acute{S}R_L \quad (4.11)$$

gdzie:

$K\acute{S}R_p$ – koszty wpływu na środowisko generowane w czasie realizacji prac planistycznych i projektowych, w tym w czasie pozyskiwania materiałów lub produkcji urządzeń wykorzystywanych przy budowie lub utrzymaniu drogi (PLN),

$K\acute{S}R_B$ – koszty wpływu na środowisko generowane w czasie realizacji prac budowlanych (PLN),

$K\acute{S}R_U$ – koszty wpływu na środowisko generowane w czasie eksploatacji drogi i realizacji prac utrzymaniowych (PLN),

$K\acute{S}R_L$ – koszty wpływu na środowisko generowane w czasie likwidacji drogi i utylizacji materiałów (PLN).

4.4.5. Koszty pozostałe

Na koszty pozostałe składają się dwie grupy kosztów: likwidacji oraz inne opisane równaniem 4.12.

$$KPO = KLI + KNN \quad (4.12)$$

gdzie:

KLI – koszty likwidacji są to koszty demontażu oraz utylizacji ponoszone w ostatnim etapie życia drogi lub jej elementu (PLN),

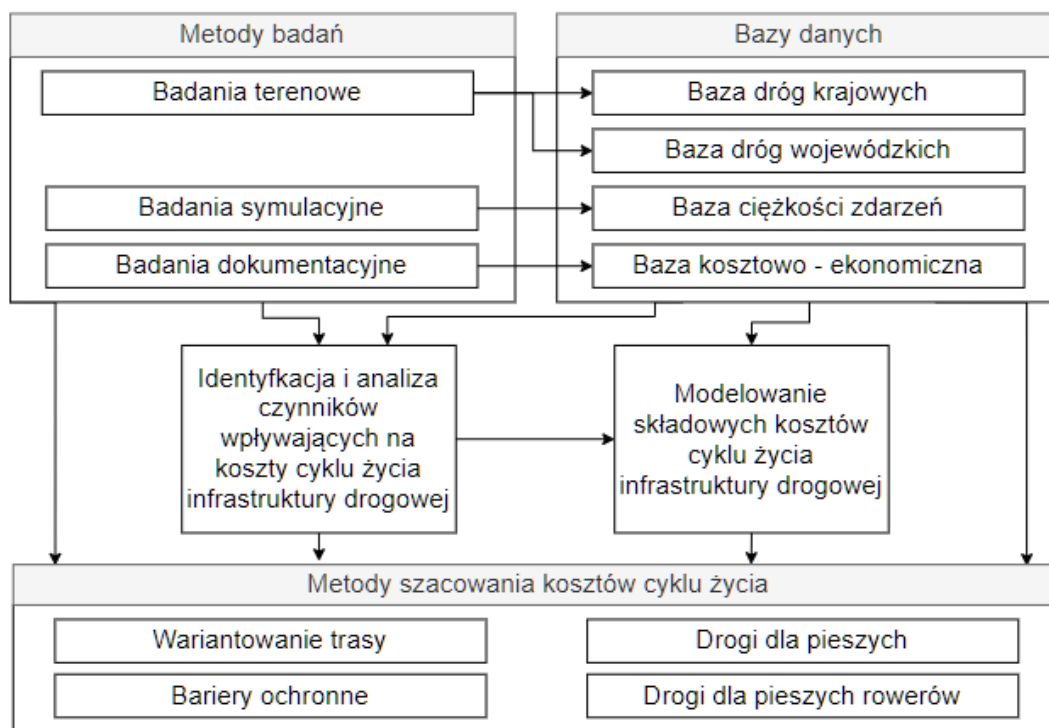
KNN – koszty inne są to dodatkowe koszty ponoszone przez zarządcę lub użytkownika drogi, które nie zostały uwzględnione we wcześniejszych analizach. Możliwe jest tu uwzględnienie m.in. kosztów związanych z przygotowaniem dokumentacji rozbiórkowej, wartości pieniężnych otrzymanych z odzyskanych surowców oraz pozostałych kosztów np. społecznych (PLN).

5. METODYKA PROWADZENIA BADAŃ

5.1. Metody badań

Infrastruktura drogowa jest złożonym systemem pełniącym istotną rolę we wspieraniu zrównoważonego rozwoju. Składa się z wielu elementów, z których każdy ma unikalne właściwości w zakresie długości życia, wartości ekonomicznej, wpływu na bezpieczeństwo czy środowisko. Zróżnicowanie tych komponentów sprawia, że opracowanie metody szacowania kosztów cyklu ich życia wymaga wieloaspektowego podejścia, polegającego na zastosowaniu metod badawczych, które umożliwią dokładną analizę i oszacowanie kosztów w kontekście różnych faz cyklu życia infrastruktury drogowej.

Realizacja celów pracy doktorskiej i uzyskanie odpowiedzi na postawione pytania badawcze, wymagało przeprowadzenia badań terenowych, badań symulacyjnych oraz badań dokumentacyjnych, których strukturę przedstawiono na rys. 5.1. Badania te skupiały się na identyfikacji i ocenie kosztów przypadających na każdą z faz cyklu życia: planowanie i projektowanie, budowę, utrzymanie oraz likwidację.



Rys. 5.1 Schemat metodyki prowadzenia badań dla realizacji celów pracy doktorskiej

Źródło: Opracowanie własne

Badania terenowe przeprowadzono na wybranych poligonach badawczych, na których były zbierane oraz analizowane dane dotyczące funkcjonowania wybranych elementów infrastruktury drogowej. Badania te umożliwiły opracowanie bazy danych dróg krajowych oraz dróg wojewódzkich. Dane zgromadzone w ramach badań terenowych umożliwiły określenie wpływu warunków eksploatacyjnych na trwałość i efektywność poszczególnych elementów infrastruktury drogowej. Szczegółowa analiza funkcjonowania barier ochronnych na drogach krajowych oraz dróg dla pieszych i rowerów na drogach

wojewódzkich pozwoliła na wskazanie głównych czynników wpływających na koszty cyklu życia tych elementów. Szczegółową charakterystykę i opis badań terenowych przedstawiono w rozdziale 5.2.

Symulacje numeryczne, w tym przypadku wykorzystano wyniki badań symulacyjnych dotyczących testów zderzeniowych z barierami ochronnymi prowadzonych w ramach projektu RID 3A [199] oraz RID 3B [198]. Wyniki badań numerycznych umożliwiły analizę zachowania barier i pojazdów po uderzeniu w barierę oraz ocenę skuteczności różnych typów barier w normowych warunkach testowych, a tym samym opracowanie modeli znajdujących zastosowanie w szacowaniu kosztów cyklu życia pojedynczej bariery ochronnej. Szczegółową charakterystykę i opis badań symulacyjnych przedstawiono w rozdziale 5.3.

Badania dokumentacyjne umożliwiły opracowanie bazy ekonomiczno–kosztowej, która zawiera dane kosztowe oraz ekonomiczne dotyczące infrastruktury drogowej. Baza kosztowa została opracowana na podstawie dostępnych kosztorysów, dokumentacji projektowej, uzyskanej w ramach projektu RIDII 2C [197], uzyskanych dokumentacji przetargowych, biuletynów cen i robót drogowych oraz informacji zebranych od wykonawców i producentów elementów infrastruktury drogowej. Zebrane dane pozwoliły na określenie średnich kosztów projektowanych tras drogowych oraz identyfikację czynników wpływających na ich zmianę. W przypadku danych ekonomicznych zebrano i przeanalizowano dane wpływające na zmianę kosztów takie jak stopa dyskonta, inflacja czy też PKB. Szczegółową charakterystykę i opis badań dokumentacyjnych przedstawiono w rozdziale 5.4.

Przeprowadzone badania miały przede wszystkim charakter ilościowy, koncentrując się na analizie statystycznej danych z badań terenowych, symulacyjnych i dokumentacyjnych oraz modelowaniu matematycznym.

5.2. Badania terenowe

5.2.1. Wprowadzenie

Realizacja założonego celu praktycznego CP1 i celu naukowego CN1 dotyczących szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej wymagała zebrania niezbędnych danych dotyczących ich funkcjonowania na wybranych poligonach badawczych. Wybrano dwa poligony badawcze, na których były zbierane niezbędne dane dotyczące wybranych elementów infrastruktury drogowej:

- poligon dróg krajowych,
- poligon dróg wojewódzkich.

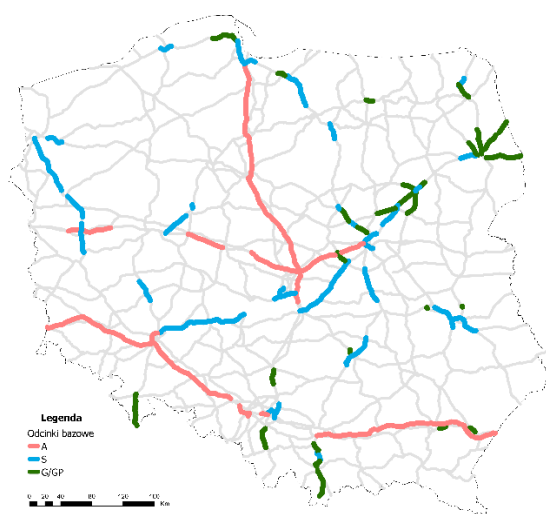
5.2.2. Poligony badawcze na drogach krajowych i drogach wojewódzkich

W przypadku barier ochronnych dane były zbierane na sieci dróg krajowych zarządzanych przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) oraz spółki koncesyjne – Gdańsk Transport Company (GTC), Autostradę Wielkopolską I, II (AWSA I, II). Do wstępnej analizy wybrano odcinki dróg krajowych o długości ok. 3 000 km położonych we wszystkich 16 województwach (rys. 5.2). Przy budowie bazy danych z poligonu badawczego wykorzystano dane opracowane w ramach projektu badawczego RID 3B [198] zrealizowanego na zlecenie Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad dotyczące m.in. wymian i kosztów barier na analizowanej sieci. Prace badawcze były prowadzone na drogach jednojezdniowych głównych,

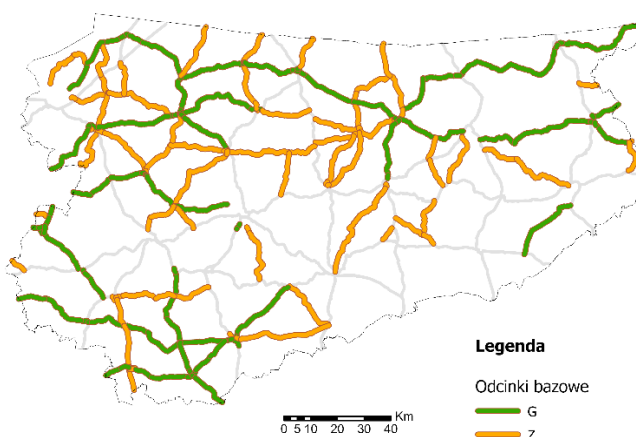
głównych ruchu przyspieszonego (G1x2, GP 1x2) oraz na drogach dwujezdniowych, w tym na autostradach (A2x2), drogach ekspresowych (S2x2), drogach głównych i głównych ruchu przyspieszonego (G2x2, GP2x2) – rys. 5.2a. Analizowany poligon składał się przede wszystkim z autostrad oraz dróg ekspresowych. Autostrady o łącznej długości prawie 1,2 tys. km stanowiły 42% badanej sieci a drogi ekspresowe o długości ponad 1 tys. km stanowiły ponad 37% sieci. Najmniejszy udział w badanym poligonie stanowiły drogi klasy G i GP prawie 21% sieci (ponad 0.5 tys. km dróg).

Wybrane odcinki dróg charakteryzowały się występowaniem różnorodnych typów (stary, nowy) oraz rodzajów barier ochronnych (stalowych, linowych, betonowych). W efekcie końcowym analizowana sieć dróg krajowych została podzielona na odcinki referencyjne a następnie na odcinki bazowe, na których zbierano informacje dotyczące: geometrii analizowanych odcinków i panujących na nich warunkach drogowych (natężenie ruchu kołowego), zdarzeń z barierami ochronnymi i ich konsekwencjami.

a)



b)



Rys. 5.2 Wybrane poligony badawcze na drogach a) krajowych b) wojewódzkich

Źródło: Opracowanie własne

Drugi poligon badawczy obejmował drogi wojewódzkie, a powstał w celu zebrania danych dotyczących funkcjonowania dróg dla pieszych oraz dróg dla pieszych i rowerzystów. Poligon ten obejmował sieć dróg wojewódzkich zlokalizowanych w województwie warmińsko-mazurskim, który jest zarządzany przez Zarząd Dróg Wojewódzkich w Olsztynie (rys. 5.2b). Poligon obejmował drogi jednojezdniowe główne (G1x2) oraz zbiorcze (Z1x2) o łącznej długości ponad 1880 km. Sieć dróg wojewódzkich została podzielona na ponad 180 odcinków bazowych, na których zbierano informacje o drogach dla pieszych. W przypadku dróg dla pieszych i rowerów z bazowego poligonu wybrano odcinki przechodzące przez małe miejscowości, obszary niezabudowane. Dane dotyczące barier ochronnych nie były zbierane dla poligonu dróg wojewódzkich z uwagi na ich mały udział występowania na drogach wojewódzkich. Analizowana sieć była pokryta barierami ochronnymi mniej niż w 10%. Przy czym bariery stalowe o łącznej długości 148 km stanowiły prawie 98% wszystkich barier zlokalizowanych na badanym poligonie badawczym. Dane dotyczące dróg dla pieszych oraz dróg dla pieszych i rowerzystów takie jak długość, lokalizacja zostały pozyskane za pomocą narzędzia Smart GEM [246], które jest wykorzystane przez ZDW Olsztyn do prowadzenia inwentaryzacji. Tak jak

w przypadku poligonu dróg krajowych zbierano dane dotyczące geometrii dróg i natężenia ruchu kołowego oraz danych dotyczących zdarzeń z wybranymi elementami infrastruktury drogowej.

5.2.3. Metody zbierania i strukturyzacji danych

W celu realizacji przyjętego programu badań należało zbudować bazy zawierające informacje o poszczególnych składowych kosztach cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej na dwóch badanych sieciach dróg: krajowych oraz wojewódzkich.

Na drogach krajowych pozyskano informacje dotyczące funkcjonowania barier ochronnych na ponad 900 odcinków dróg o długości ponad 2900 km.

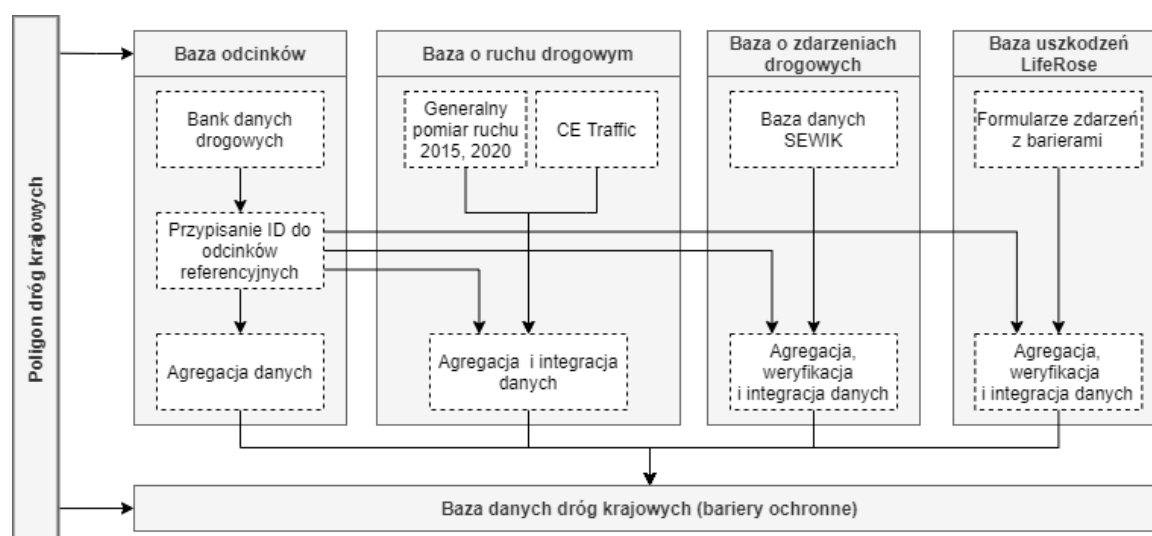
Na drogach wojewódzkich dane dotyczące dróg dla pieszych zostały zebrane z ponad 180 odcinków dróg wojewódzkich, natomiast dla dróg dla pieszych i rowerów z ponad 130 odcinków o łącznej długości ponad 1720 km.

Dla każdego z analizowanych poligonów uzyskano informacje od zarządów drogowych dotyczące badanego poligonu oraz informacje o wybranych elementach infrastruktury drogowej. Brakujące informacje zostały uzupełnione na podstawie prac własnych, w tym m.in. analizie zdarzeń drogowych, analizie danych geograficznych. Opracowano cztery bazy danych dla dróg krajowych (rys. 5.3a):

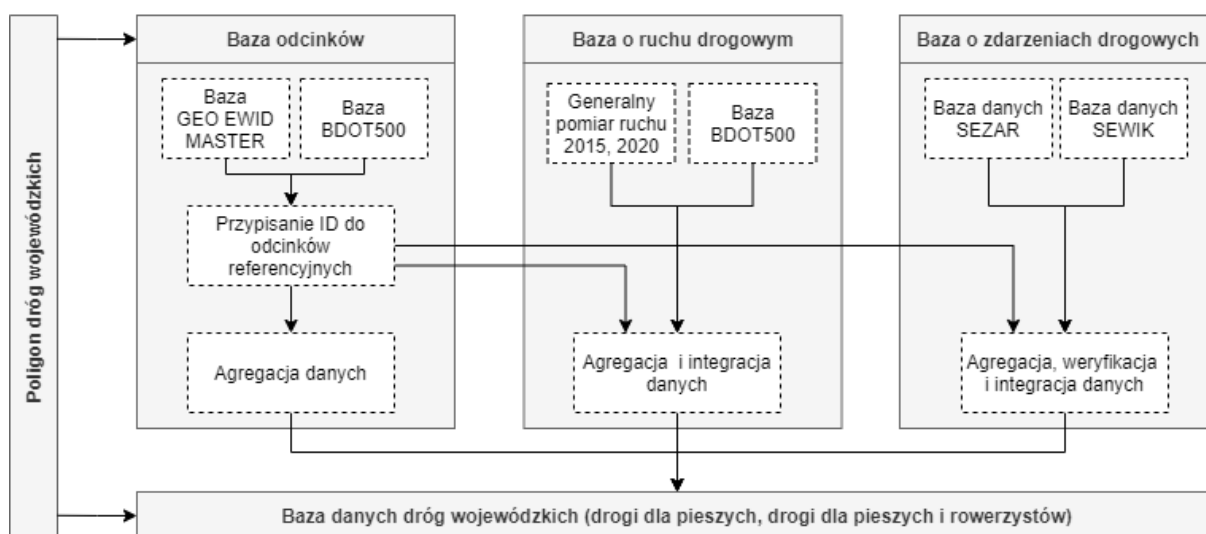
1. Baza odcinków dróg – zawierająca informacje o analizowanych odcinkach dróg.
2. Baza o ruchu drogowym – zawierająca dane o natężeniu i strukturze rodzajowej pojazdów. W przypadku dróg wojewódzkich dodatkowo informacje o zabudowie mieszkalnej.
3. Baza o zdarzeniach drogowych – zawierająca dane o kolizjach, wypadkach i ich konsekwencjach na analizowanych sieciach dróg, na podstawie policyjnego Systemu Ewidencji Wypadków i Kolizji (SEWIK) [136].
4. Baza uszkodzeń barier drogowych (LifeRose) – zawierająca informacje dotyczące napraw barier ochronnych takich jak koszt, długość, czas i lokalizacja.

Analogicznie jak w przypadku dróg krajowych również dla dróg wojewódzkich opracowano bazy danych dotyczące odcinków dróg, ruchu drogowego oraz zdarzeń drogowych (rys. 5.3b). W opracowywaniu tych baz danych wykorzystano dodatkowo informacje z bazy danych obiektów topograficznych (BDOT500) [250].

a)



b)



Rys. 5.3 Schemat budowy baz danych a) dróg krajowych b) dróg wojewódzkich

Źródło: Opracowanie własne

W celu wykorzystania zebranych danych do opracowania metody szacowania kosztów cyklu życia powyższe bazy danych zostały zagregowane do dwóch podstawowych baz danych: baza dróg krajowych oraz baza dróg wojewódzkich.

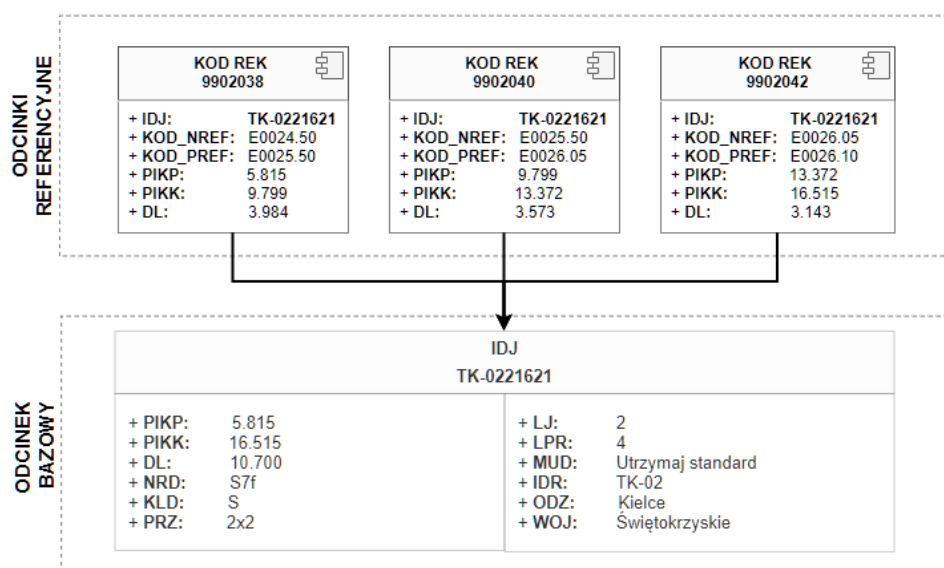
5.2.4. Bazy danych dróg krajowych

5.2.4.1. Baza odcinków dróg

Baza odcinków dróg krajowych pierwotnie składała się z ponad 900 wybranych referencyjnych odcinków dróg krajowych o łącznej długości ponad 2900 km. Podstawowe informacje o każdym z odcinków dróg zostały uzyskane z banku danych drogowych, gdzie znajdowały się takie informacje jak: kod referencyjny odcinka drogi (KOD REK), kod referencyjny początku (KOD_NREF) i końca odcinka (KOD_PREF), numer drogi (NRD), klasa drogi (KLD). Do dalszych prac wyodrębniono tylko te odcinki, dla których pozyskano informacje dotyczące zdarzeń z barierami ochronnymi dla całego roku. Zebrano łącznie ponad 4000 rekordów danych (z czego ponad 3500 zawierało informacje o kosztach napraw barier) na ponad 560 odcinków dróg o długości prawie 2 tys. km. Następnie odcinki referencyjne zostały zagregowane do odcinków bazowych za pomocą unikalnego identyfikatora (IDJ). W ten sposób uzyskano 329 odcinków dróg, które składały się z kilku odcinków referencyjnych i posiadały wspólne cechy takie jak: natężenie ruchu drogowego (SDR), przekrój poprzeczny drogi (PRZ), liczba jezdni (LJ), liczba pasów ruchu (LPR), klasa drogi (KLD), standard utrzymania drogi (MUD), rejon zarządzający drogą (IDR) (rys. 5.4).

Bazowe odcinki dróg składały się z:

- autostrad (klasa A) o łącznej długości ponad 900 km dróg co odpowiada ok 47% długości analizowanej sieci,
- dróg ekspresowych (klasa S), które miały długość ponad 700 km dróg (35% ogółu sieci),
- dróg głównych i głównych ruchu przyspieszonego (G, GP) o łącznej długości blisko 350 km, co stanowi prawie 18% długości sieci.



Rys. 5.4 Przykład procedury agregacji odcinków referencyjnych do odcinków bazowych

Źródło: Opracowanie własne

Dane z tych odcinków dróg zostały wykorzystane jako baza przy analizie i identyfikacji czynników wpływających na koszty cyklu życia drogowych barier ochronnych w rozdziale 6 oraz w rozdziale 7 przy opracowywaniu modeli składowych ich kosztów cyklu życia takich jak np. koszty napraw.

Dla potrzeb szczegółowych analiz zebrano informacje dotyczące udziału poszczególnych rodzajów drogowych barier ochronnych na bazowych odcinkach dróg. W celu dokładnego oszacowania ilości i rodzaju barier ochronnych znajdujących się na bazowych odcinkach dróg przeprowadzono na nich inwentaryzację, która polegała na dokładnym przeanalizowaniu projektów organizacji ruchu, filmów z przejazdów i zdjęć. W związku z brakiem projektów organizacji ruchu lub ograniczonym dostępem do nich inwentaryzacja została wykonana na ok. 1 / 3 bazowych odcinków. W wyniku tych prac zbudowano bazę (rys. 5.5), która zawierała informacje dotyczące odległości barier od krawędzi jezdni, długości barier w pasie dzielącym i skrajni jezdni z podziałem ich z uwagi na: materiał z jakiego została wykonana bariera (stalowa, betonowa, linowa, plastikowa), rodzaj bariery (drogowa, mostowa), funkcjonalność: (rozbieralna, tymczasowa).

Identyfikator	PAS DZIELĄCY kierunek L									SKRAJNIA JEZDNI kierunek P								
	stalowa	betonowa	linowa	plastikowa	drogowa	drogowa rozbieralna	mostowa	tymczasowa	odl. od krawędzi jezdni	stalowa	betonowa	linowa	plastikowa	drogowa	drogowa rozbieralna	mostowa	tymczasowa	odl. od krawędzi jezdni
IDJ	STd,I	BEd,I	LId,I	PLd,I	DRd,I	ROd,I	MOd,I	TYd,I	OBKJd,I	STs,P	BEs,P	LIs,P	PLs,P	DRs,P	ROs,P	MOs,P	TYs,P	OBKJs,P
GTC-0135683	1.12	0.01	0.00	0.00	1.13	0.00	0.00	0.00	1.75	0.44	0.00	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	4.33
GTC-0126951	3.49	0.02	0.00	0.64	3.32	0.00	0.19	0.64	1.96	2.37	0.00	0.00	0.00	2.17	0.00	0.20	0.00	3.44
GTC-0126951	4.88	0.01	0.00	0.00	4.52	0.17	0.20	0.00	2.14	3.28	0.00	0.00	0.00	3.07	0.00	0.21	0.00	3.68
GTC-0126951	6.98	0.01	0.00	0.00	6.91	0.02	0.06	0.00	2.20	3.63	0.00	0.00	0.00	3.61	0.00	0.03	0.00	3.71
GTC-0122619	5.34	0.02	0.00	0.00	5.14	0.17	0.05	0.00	2.65	2.47	0.00	0.00	0.00	2.42	0.00	0.05	0.00	3.82

Rys. 5.5 Fragment zinwentaryzowanej bazy danych

Źródło: Opracowanie własne

Informacje o długości barier na odcinkach i ich lokalizacja posłużyły do określenia pokrycia odcinka barierami ochronnymi. W celu obliczenia udziału barier UB_j na odcinkach posłużono się wzorem 5.1:

$$UB_j = \frac{\sum_{d=1}^2 (DLBd_{j,d} + DLBS_{j,d})}{4 \cdot DL_j} \quad (5.1)$$

gdzie:

UB_j – udział barier na j -tym bazowym odcinku drogi (–),

$DLBd_{j,d}$ – długość barier drogowych na j -tym odcinku drogi zlokalizowanych w pasie dzielącym na kierunku d (km),

$DLBS_{j,d}$ – długość barier drogowych na j -tym odcinku drogi zlokalizowanych w skrajni na kierunku d (km),

d – kierunek jezdni (lewy, prawy),

DL_j – długość j -tego bazowego odcinka drogi (km).

Udostępnione projekty organizacji ruchu i filmy z przejazdów umożliwiły opisanie bazowych odcinków dróg za pomocą dodatkowych parametrów: krętości odcinka drogi (WKO), średniej gęstości łuków poziomych na odcinku (GLU), falistości odcinka drogi (KIF) oraz średniej dopuszczalnej prędkości (VDOP).

5.2.4.2. Baza danych o ruchu drogowym

W bazie o ruchu drogowym zebrano informacje o średniorocznym dobowym natężeniu ruchu, strukturze rodzajowej pojazdów oraz pracy przewozowej na wybranych odcinkach referencyjnych dróg krajowych. W opracowywaniu tej bazy wykorzystano informacje zebrane w ramach generalnego pomiaru ruchu w latach 2015 oraz 2020 (GPR 2015 i GPR 2020). Dane te posłużyły do określenia natężenia na odcinkach bazowych w latach 2017–2019, na których były zbierane informacje o zdarzeniach drogowych z barierami ochronnymi.

Każdemu analizowanemu odcinkowi drogi przypisano informacje o średniorocznym dobowym natężeniu wszystkich pojazdów (SDRR) oraz natężenie poszczególnych rodzajów pojazdów SDR_j (poj./dobę/rok) oraz udział pojazdów U_j (%) w zależności od przypisanej struktury rodzajowej „j”. Z uwagi na strukturę rodzajową wyróżniono osiem typów pojazdów: osobowe i mikrobusy (O), dostawcze (D), ciężarowe (C), ciężarowe bez przyczepy (CBP), ciężarowe z przyczepą (CP), autobusy (A), motocykle i motorowery (M) oraz pozostałe pojazdy (P).

Dodatkowo w bazie o ruchu drogowym do każdego z odcinków przypisano udział pojazdów lekkich (UO) czyli pojazdów o masie do 3,5 tony oraz udział pojazdów ciężkich (UC), czyli pojazdów o masie przekraczającej 3,5 tony.

W tablicy 5.1 przedstawiono zbiór zmiennych zawartych w bazie danych o ruchu drogowym na analizowanych drogach krajowych.

Tab. 5.1 Zestawienie zmiennych z bazy danych o natężeniu ruchu pojazdów na drogach krajowych

Lp.	Zmienna	Opis	Jednostka
Podstawowe dane ruchowe			
1.	SDRR	Średni dobowy roczny ruch pojazdów	poj./dobę/rok
2.	PP	Praca przewozowa	mln poj. km
Średni dobowy ruch roczny pojazdów „j” (SDRj)			
1.	SDRO	Średni dobowy roczny ruch pojazdów osobowych	poj./dobę/rok
2.	SDRD	Średni dobowy roczny ruch pojazdów dostawczych	poj./dobę/rok
3.	SDRC	Średni dobowy roczny ruch pojazdów ciężarowych	poj./dobę/rok
4.	SDRCBP	Średni dobowy roczny ruch pojazdów ciężarowych bez przyczepy	poj./dobę/rok
5.	SDRCP	Średni dobowy roczny ruch pojazdów ciężarowych z przyczepą	poj./dobę/rok
6.	SDRA	Średni dobowy roczny ruch autobusów	poj./dobę/rok
7.	SDRM	Średni dobowy roczny ruch motocykli i motorowerów	poj./dobę/rok
8.	SDRP	Średni dobowy roczny ruch pozostałych pojazdów	poj./dobę/rok
Udział pojazdów „j” (Uj)			
1.	UO	Udział samochodów osobowych	%
2.	UD	Udział samochodów dostawczych	%
3.	UC	Udział samochodów ciężarowych	%
4.	UCBP	Udział samochodów ciężarowych bez przyczepy	%
5.	UCP	Udział samochodów ciężarowych z przyczepą	%
6.	UA	Udział autobusów	%
7.	UM	Udział motocykli i motorowerów	%
8.	UP	Udział pozostałych pojazdów	%
9.	UPO	Udział pojazdów o masie do 3.5 t.	%
10.	UPC	Udział pojazdów ciężkich o masie powyżej 3.5 t.	%

Źródło: Opracowanie własne

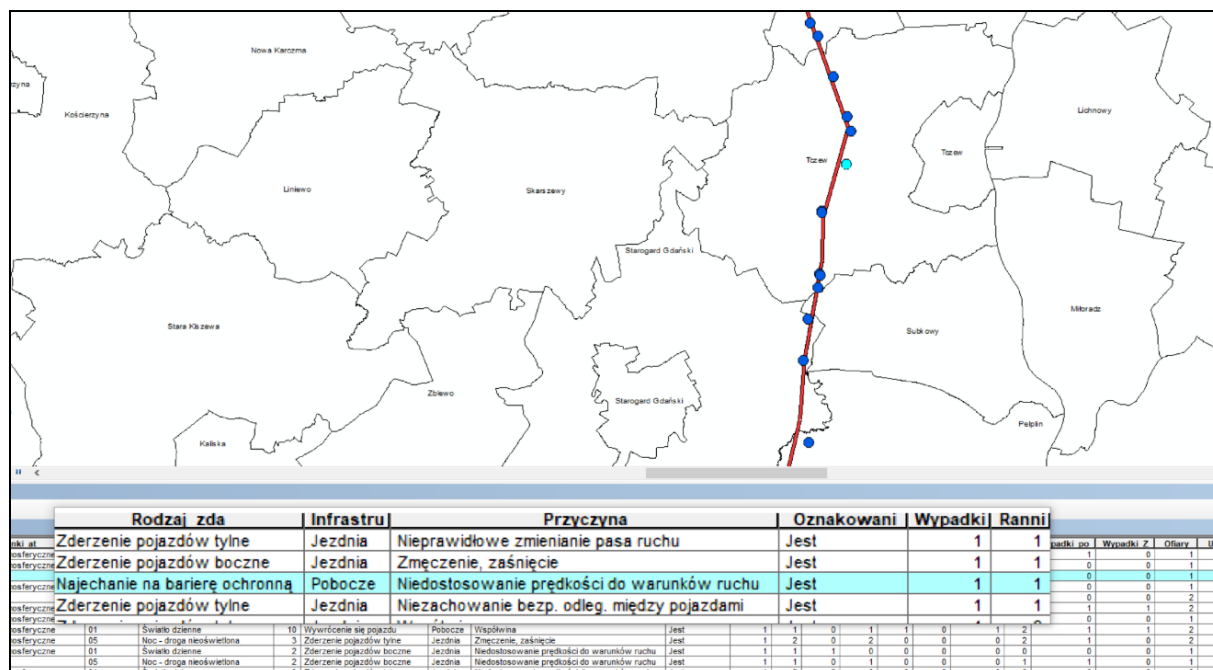
5.2.4.3. Baza zdarzeń drogowych na odcinkach dróg krajowych z barierami ochronnymi

Baza zdarzeń drogowych z barierami ochronnymi stanowi zbiór danych, który został opracowany dla wybranych odcinków dróg krajowych w celu identyfikacji i analizy czynników wpływających na liczbę oraz konsekwencje niebezpiecznych zdarzeń drogowych z barierami ochronnymi. Baza ta powstała na podstawie analizy i weryfikacji danych z policyjnej bazy danych SEWiK [136].

W celu wyeliminowania wahań w liczbie zdarzeń jakie miały miejsce w wyniku COVID-19 oraz wpływu wojny na Ukrainie do analiz przyjęto zdarzenia z okresu wcześniejszych lat (2017–2019) eliminując w ten sposób sezonowe odchylenia. Ponadto przyjęcie trzyletniego okresu do analizy zdarzeń drogowych zmniejszyło wpływ występowania nietypowych zdarzeń drogowych (jak np. przebudowy dróg, warunki pogodowe czy okresowe ograniczenia ruchu drogowego).

Do dalszych prac z bazy SEWiK [136] zostały wybrane tylko rekordy, w których rodzaj zdarzenia został określony jako najechanie na barierę ochronną a kategoria drogi jako krajowa lub niezdefiniowana. Weryfikację przestrzenną wykonano za pomocą oprogramowania ArcGIS Pro (rys. 5.6), w którym sprawdzano dokładną lokalizację zdarzenia na podstawie dostępności danych w następującej hierarchii: współrzędne GPS, kilometraż i numer drogi, adres. W przypadku zdarzeń, w których współrzędne geograficzne były określone w sposób nieprawidłowy (zdarzenie było zlokalizowane poza drogą), w pierwszej kolejności weryfikowano numer drogi i kilometraż. Gdy dane te były również niepoprawne lub niekompletne w kolejnym kroku sprawdzano przypisany adres

zdarzenia w tym, nazwę gminy i miejscowości. Jeśli informacje adresowe były prawidłowe, zdarzenie przypisywano do odpowiedniego odcinka drogi, w przeciwnym przypadku dane były korygowane.



Rys. 5.6 Inwentaryzacja bazy SEWiK na podstawie współrzędnych GPS

Źródło: Opracowanie własne na podstawie SEWiK [136] i ArcGIS Pro [61]

W efekcie końcowym do bazy odcinków dróg zaimplementowano prawie 3200 rekordów danych zawierających informacje o zdarzeniach z barierami ochronnymi, ich lokalizacjach oraz kosztach. Dodatkowo informacje te w przypadku wypadków zostały uzupełnione o rodzaj, liczbę ofiar i ich ciężkość.

5.2.4.4. Baza uszkodzeń LifeRose

Baza dotycząca funkcjonowania barier ochronnych została opracowana na potrzeby niniejszej pracy, projektu badawczego RID 3B [198] oraz pracy doktorskiej [121]. Dane o zdarzeniach z urządzeniami brd były gromadzone w okresie od 1 stycznia 2017 do 1 kwietnia 2018 roku z 16 województw. Baza została zbudowana na podstawie informacji wypełnianych przez wybrane firmy zajmujące się utrzymaniem bieżącym barier, oddziały GDDKiA oraz firmy zarządzające autostradami (GTC oraz AWSA I), gdzie uzupełniano informacje dotyczące pojedynczego uszkodzenia barier ochronnych. W przygotowanym formularzu zbierano podstawowe informacje o zdarzeniach dotyczących drogowych barier ochronnych, m.in. czas zdarzenia, lokalizacja oraz konsekwencje – koszt całkowity wymiany uszkodzonej bariery, typ bariery, długość jej uszkodzenia oraz czas wymiany. Informacje te zostały wzbogacone o zdjęcia z miejsca zdarzenia, które umożliwiły weryfikację zebranych danych w tym typ bariery, długość uszkodzenia oraz lokalizację zdarzenia. Przykład wycinka zbieranych danych przedstawiono na rys. 5.7.

W ramach przeprowadzonych prac pozyskano też dostęp do danych historycznych dla dróg S6 i S7, które zostały również zastosowane do analizy czynników wpływających na koszty cyklu życia drogowych barier ochronnych.

Data	Pikietaż	Lokalizacja w pla-ty	Jezdnia	Strona jezdni	Rodzaj urządzenia brd	Nazwa	Rozst.	Typ	Poziom_pow	Szerok
13.08.2017 336,3		Jezdnia główna	2P	L	Bariera ochronna drogowa (stała) SP-07/4	SP07	4,00	Stalowa	H1	W6
15.08.2017 317,1		Jezdnia główna	2P	L	Bariera ochronna drogowa (stała) SP-01/2	SP01	2,00	Stalowa	H1	W5
17.08.2017 313,4		Jezdnia główna	2P	P	Bariera ochronna drogowa (stała) SP-01/2	SP01	2,00	Stalowa	H1	W5
17.08.2017 313,45		Jezdnia główna	2P	L	Bariera ochronna drogowa (stała) SP-07/2	SP07	2,00	Stalowa	H1	W5
21.08.2017 313,2		Jezdnia główna	2L	P	Bariera ochronna drogowa (stała) H1W4	MegaRail sl	2,00	Stalowa	H1	W4
22.08.2017 329,7		Jezdnia główna	2P	L	Bariera ochronna drogowa (stała) SP-07/2	SP07	2,00	Stalowa	H1	W5
22.08.2017 313,8		Jezdnia główna	2L	L	Bariera ochronna drogowa (stała) SP-07/4	SP07	4,00	Stalowa	H1	W6
22.08.2017 313,3		Jezdnia główna	2L	P	Bariera ochronna drogowa (stała) H1W4	MegaRail sl	2,00	Stalowa	H1	W4
25.08.2017 314,2		Jezdnia główna	2L	L	Bariera ochronna drogowa (stała) SP-07/4	SP07	4,00	Stalowa	H1	W6
25.08.2017 313,8		Jezdnia główna	2L	L	Bariera ochronna drogowa (stała) SP-07/4	SP07	4,00	Stalowa	H1	W6
28.08.2017 345,54		Jezdnia główna	2P	P	Bariera ochronna drogowa (stała) SP-01/2	SP01	2,00	Stalowa	H1	W5
29.08.2017 343,75		Jezdnia główna	2P	L	Bariera ochronna drogowa (stała) SP-07/4	SP07	4,00	Stalowa	H1	W6

2. Data powstania szkody: 04.01.2017
3. Wstępna przyczyna powstania szkody: Kolidacja pojazdu
4. Przedmiot szkody: Bariera energochłonna SP-01/2, SP-07/4



Lp.	Typ/rodzaj uszkodzonego elementu	Ilość	Lokalizacja		Jezdnia	Wartość brutto
			Pikietaż	Umiejscowienie w pasie		
1.	Bariera energochłonna SP-01/2	12mb	S6 319+150	pobocze	prawa	8 383,68 zł
2.	Bariera energochłonna SP-07/4	8mb	S6 319+150	pas rozdzielu	prawa	
3.	Bariera energochłonna SP-01/2	8mb	S6 319+150	pobocze	prawa	

Rys. 5.7 Widok fragmentu danych wejściowych do bazy uszkodzeń LifeRoSE

Źródło: Opracowanie własne.

5.2.5. Bazy danych dróg wojewódzkich

5.2.5.1. Baza odcinków dróg

W celu opracowania metody szacowania kosztów cyklu życia dla wybranych elementów infrastruktury drogowej sieć dróg wojewódzkich w województwie warmińsko-mazurskim została podzielona na odcinki bazowe. Przyjęto podział odcinków bazowych dróg zgodny z podziałem występującym w bazie dróg wojewódzkich z Generalnego Pomiaru Ruchu (GPR). Każdemu odcinkowi z bazy został przypisany unikalny identyfikator odcinka (IDJ), który stanowił łącznik pomiędzy bazą odcinków a bazami o ruchu drogowym i pieszym, zdarzeniach drogowych.

W celu zebrania informacji dotyczących analizowanych odcinków dróg wykorzystano narzędzie Smart GEM [246] stosowane przez ZDW Olsztyn do zarządzania siecią, ArcGIS Pro [61] oraz Microsoft Access. W pierwszym kroku tworzenia bazy danych, dane zostały pobrane z systemu Smart GEM [246] w postaci tabelarycznej oraz warstw geograficznych. Jednakże, system Smart GEM [246] stosuje własny podział odcinków dróg, który różni się od ogólnie przyjętego GPR. Z tego względu, konieczne było przekształcenie danych z systemu ZDW do formatu zgodnego z GPR, aby umożliwić integrację z innymi bazami danych oraz zapewnić jednolitą klasyfikację dróg wojewódzkich.

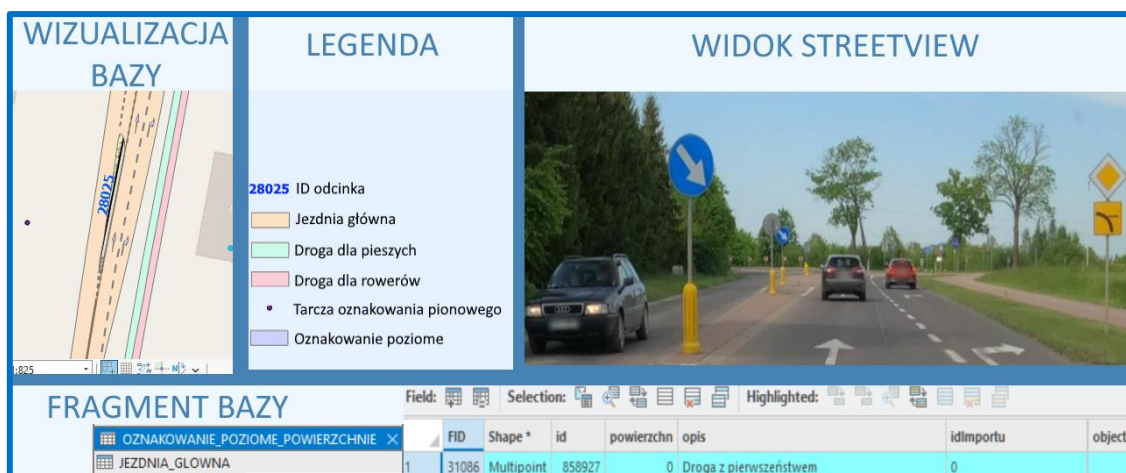
W celu przypisania elementów do bazy GPR, wykorzystano narzędzie Access, które pozwoliło na wstępne przypisanie poszczególnych odcinków dróg do bazowych odcinków dróg zgodnych z GPR. Po zakończeniu analizy danych w narzędziu Access, przekształcone dane zostały następnie wykorzystane w programie ArcGIS Pro [61], który umożliwił ich mapowanie i wizualizację przestrzenną.

Łącznie scharakteryzowano ponad 180 odcinków dróg o długości ponad 1880 km. Zebrane dane dotyczące odcinków bazowych zostały podzielone na trzy podstawowe grupy:

1. Ogólne informacje – identyfikator odcinka, numer drogi, numer odcinka zgodny z GPR, klasa drogi, pikietaż początkowy, pikietaż końcowy odcinka.

2. Parametry techniczne – długość odcinka bazowego, średnia szerokość jezdni, liczba, gęstość i rodzaj oznakowania pionowego, długość i gęstość oznakowania poziomego na odcinku.
3. Infrastruktura dla niechronionych użytkowników dróg – długość oraz gęstość dróg dla pieszych, dróg dla rowerów, dróg dla pieszych i rowerów na odcinku.

Widok fragmentu opracowanej bazy danych dróg wojewódzkich przedstawiono na rys. 5.8.



Rys. 5.8 Wizualizacja fragmentu bazy danych o odcinkach dróg wojewódzkich

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Smart GEM [246] oraz ArcGIS Pro [61]

Opracowane odcinki dróg zostały zastosowane jako baza przy identyfikacji czynników wpływających na koszty cyklu życia infrastruktury dla pieszych i rowerzystów (rozdział 6) oraz przy modelowaniu ich składowych kosztów zdarzeń (rozdział 7.5).

5.2.5.2. Baza o ruchu pojazdów i pieszych

Proces budowy bazy dla dróg wojewódzkich dotyczącej ruchu kołowego wyglądał w sposób analogiczny do bazy dla dróg krajowych. W bazie dla dróg wojewódzkich zebrano informacje o średniodobowym natężeniu ruchu, strukturze rodzajowej pojazdów oraz pracy przewozowej na wybranych odcinkach referencyjnych. W opracowywaniu tej bazy wykorzystano informacje zebrane w ramach generalnego pomiaru ruchu z 2020 roku. Dane te zostały wykorzystane do określenia natężenia w latach poprzednich to jest 2017, 2018 oraz 2019. Tak jak w przypadku bazy Dróg Krajowych określono łączne średnio natężenie ruchu dla badanych odcinków jak i natężenie ruchu uwzględniające strukturę rodzajową pojazdów (tab. 5.2).

Pomiary natężenia pieszych na sieci dróg krajowych i wojewódzkich nie są wykonywane w ramach generalnego pomiaru ruchu. W związku z tym informacje dotyczące ruchu pieszych zostały zastąpione za pomocą informacji o zabudowie mieszkalnej w obrębie analizowanych dróg.

Budowę bazy o zabudowie mieszkalnej rozpoczęto od zaimportowania z ogólnodostępnej bazy obiektów topograficznych BDOT500 [250] do programu ArcGIS Pro [61] wszystkich obiektów mieszkalnych w woj. warmińsko-mazurskim. Następnie wybrano tylko te obiekty, które znajdowały się w odległości od dróg mającej potencjalnie wpływ na generowanie ruchu pieszego wzdłuż dróg. W obszarach zabudowanych przyjmuje się, że dystans ten może wynosić nawet do 400 m i jest to odległość od miejsca zamieszkania do celu podróży [10]. W obszarach niezabudowanych ludzie mają tendencję do pokonywania krótszych odległości niż na obszarach wiejskich ze względu na brak

dedykowanych udogodnień dla pieszych i potencjalne wyzwania związane z dużymi odległościami między miejscami docelowymi [145]. Natomiast w przypadku osób starszych i dzieci przedszkolnych pokonywana odległość może wynosić ok. 200 metrów. [10]. Dojście do drogi nie stanowi głównego celu podróży, dlatego też w badaniach przyjęto bufor o promieniu 100 m w obrębie analizowanych odcinków. Na podstawie przyjętego buforu wyselekcjonowano budynki mające potencjalnie wpływ na charakterystykę ruchu na drogach (rys. 5.9).



Rys. 5.9 Przypisywanie budynków mieszkalnych do bazowych odcinków dróg wojewódzkich

Źródło: Opracowanie własne na podstawie BDOT500 [250] oraz ArcGIS Pro [61]

W efekcie końcowym uzyskano ponad 18 tys. rekordów dotyczących zabudowy mieszkalnej wokół analizowanych odcinków dróg, które zostały dołączone do bazy danych o ruchu drogowym i pieszym na bazowych odcinkach dróg. Opracowane dane obejmują zarówno liczbę budynków mieszkalnych, jak i ich typ, przeznaczenie, a także zagregowaną gęstość w przeliczeniu na jednostkę powierzchni.

W tab. 5.2 przedstawiono zbiór zmiennych wchodzących w skład bazy o ruchu pojazdów i pieszym dróg wojewódzkich.

Tab. 5.2 Zestawienie fragmentu bazy danych o ruchu pojazdów i pieszych

Lp.	Zmienna	Opis	Jednostka
Zabudowa mieszkalna „k” (ZABk)			
1.	ZAB	Całkowita zabudowa mieszkalna	szt.
2.	ZAB1	Zabudowa jednorodzinna	szt.
3.	ZAB2	Zabudowa o 2 mieszkańcach jednorodzinnych	szt.
4.	ZAB3	Zabudowa o 3 i więcej mieszkańcach jednorodzinnych	szt.
5.	ZAB99	Zabudowa wielorodzinna	szt.
Gęstość zabudowy mieszkalnej „k” (GZABk)			
1.	GB	Gęstość zabudowy mieszkalnej	szt./ha
2.	GB1	Gęstość zabudowy jednorodzinnej	szt./ha
3.	GB2	Gęstość zabudowy o 2 mieszkańcach jednorodzinnych	szt./ha
4.	GB3	Gęstość zabudowy o 3 i więcej mieszkańcach jednorodzinnych	szt./ha
5.	G99	Gęstość zabudowy wielorodzinnej	szt./ha

Źródło: Opracowanie własne

5.2.5.3. Baza zdarzeń drogowych

W celu budowy bazy zdarzeń drogowych dla dróg wojewódzkich z policyjnej bazy SEWIK [136] wyeksportowano wszystkie zdarzenia mające miejsce w województwie warmińsko-mazurskim w latach 2017–2019. Wybór trzyletniego okresu analizy został uzasadniony w rozdziale 5.2.4.3. Przy wykorzystaniu programu ArcGIS Pro [61] zweryfikowano dane dotyczące wypadków i kolizji wykorzystując przy tym mapę przebiegu dróg pozyskaną z ZDW Olsztyn. Korzystając z oprogramowania ESRI [61] sprawdzano i przypisywano lokalizację zdarzenia według hierarchii dostępnych informacji:

- współrzędne GPS – dane te stanowiły podstawę i najważniejszą informację przy określaniu lokalizacji zdarzenia,
- kilometraż i numer drogi – w przypadku, gdy występował brak współrzędnych GPS lub były one niedokładne wykorzystywano informacje o kilometrażu i numerze drogi,
- skrzyżowanie dróg – w przypadku braku kilometrażu zdarzenia, które miały miejsce na skrzyżowaniu dróg były lokalizowane na podstawie nazw krzyżujących się ulic,
- adres – ostatnim elementem w przypadku braku informacji o współrzędnych GPS, kilometrażu, numeru drogi i skrzyżowaniu był dokładny adres posesji, przy której doszło do zdarzenia.

Ostatecznie do bazy zdarzeń drogowych na analizowanych odcinkach bazowych zaimplementowano łącznie ponad 7800 rekordów, z czego około 9% zostało zaklasyfikowanych jako wypadki drogowe. W opracowanej bazie danej wyróżniono rodzaj zdarzeń, ich lokalizację oraz uczestników zdarzenia. Baza ta stanowiła podstawę w budowie modeli kosztów zdarzeń z infrastrukturą dla niechronionych uczestników ruchu drogowego.

5.3. Badania symulacyjne

W ramach niniejszej pracy wykorzystano wyniki z testów zderzeniowych oraz symulacji komputerowych wykonanych w ramach projektów badawczych RID 3A [199] oraz RID 3B [198]. Na potrzeby dalszych analiz wykorzystano 313 wyników testów [199] na podstawie, których opracowano bazę dotyczącą ciężkości zdarzeń związanej z najechaniem pojazdów na bariery ochronne. Analizowane testy różniły się:

- rodzajem barier: stalowe (164 testy numeryczne i 18 testów zderzeniowych), linowe (104 testy numeryczne i 3 testy zderzeniowe), betonowe (24 testy numeryczne i 3 testy zderzeniowe),
- rodzajem pojazdów użytych do badań: osobowe o masie 0,9 i 1,5 t, autobusy o masie 13,0 t ciężarowe o masie 10,0 t, ciężarowe z przyczepą o masie 38,0 t.
- prędkością pojazdów uderzających w barierę: samochody osobowe w zakresie: 60–140 km/h (7 klas prędkości), samochody ciężarowe i autobusy w zakresie: 60–100 km/h (5 klas prędkości).
- kątem uderzenia w zakresie od 2 do 90 stopni (9 klas kąta uderzenia).

Opracowana baza ciężkości zdarzeń zawiera cztery grupy danych: opisowe, normatywne, testowe oraz wynikowe (tab. 5.3). Dane opisowe zawierają informacje tekstowe dotyczące barier takie jak materiał wykonania bariery ochronnej (stalowe, linowe, betonowe).

Zgromadzony zbiór danych umożliwił identyfikację czynników wpływających na wartość wskaźnika intensywności zdarzeń drogowych *ASI* oraz opracowanie modeli *ASI*, które znajdują zastosowanie w szacowaniu kosztów zdarzeń z pojedynczą barierą ochronną o określonych parametrach

technicznych (poziomie powstrzymywania, szerokości pracującej oraz materiale, z którego została wykonana).

Tab. 5.3 Zestawienie zmiennych z bazy danych o natężeniu ruchu pojazdów na drogach krajowych

Lp.	Zmienna	Opis	Jednostka
Dane opisowe			
1.	MAT	Materiał bariery ochronnej	–
2.	PP	Praca przewozowa	kJ
3.	W	Szerokość pracująca	m
4.	TYP	Typ pojazdu	–
Dane normatywne			
1.	EKL	Energia kinetyczna poprzeczna normatywna	kJ
2.	WM	Szerokość pracująca normatywna	m
3.	DM	Ugięcie dynamiczne normatywne	m
Dane testowe			
1.	MP	Masa pojazdu	kg
2.	VP	Prędkość pojazdu	km/h
3.	α	Kąt uderzenia	°
4.	EKLt	Energia kinetyczna poprzeczna testowa	kJ
Dane wynikowe			
1.	WMs	Szerokość pracująca z symulacji	m
2.	DMs	Ugięcie dynamiczne z symulacji	m
3.	ASI	Wskaźnik intensywności zdarzenia z symulacji	–

Źródło: Opracowanie własne

5.4. Badania dokumentacyjne

Dla potrzeb niniejszej dysertacji wykonano obszerne badania dokumentacyjne, których wynikiem było opracowanie bazy ekonomiczno-kosztowej. Opracowana baza zawiera informacje i zestawienie danych umożliwiających analizę oraz modelowanie kosztów związanych z cyklem życia wybranych elementów infrastruktury drogowej: wariantów tras dróg krajowych, barier ochronnych oraz infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu drogowego. Opracowana baza powstała na podstawie czterech głównych źródeł danych:

1. Informacje od producentów, dostawców i wykonawców barier (dane o barierach ochronnych). Dane dotyczące kosztów barier ochronnych zostały zebrane w ramach prac badawczych wykonanych w projekcie RID 3B [198]. Zebrano informacje od producentów oraz wykonawców barier ochronnych, w których wyróżniono koszty budowy (w tym materiału, robocizny i pracy sprzętu) oraz demontażu barier ochronnych. Pozyskane dane kosztowe zostały uzupełnione o dane szczegółowe dotyczące barier ochronnych takich jak:
 - typ bariery ochronnej – drogowe (128 rekordów danych), mostowe (63 rekordy danych),
 - rodzaj bariery – jednostronna (67 rekordów danych), dwustronna (33 rekordy danych),
 - materiał z jakiego została wykonana bariera: stalowa (144 rekordów danych), linowa (47 rekordów danych), betonowa (1 rekord),
 - parametry funkcjonalne: poziom powstrzymywania i szerokości pracujące barier (100 rekordów danych w każdej kategorii),
 - parametry konstrukcyjne: masa barier ochronnych, rozstaw słupków barier oraz liczba słupków przypadająca na 100 mb bariery (100 rekordów danych w każdej kategorii).

2. Dane z platformy przetargowej ZDW Olsztyn [155]. Dane o infrastrukturze dla niechronionych uczestników ruchu dotyczące zamówień publicznych związanych z budową, remontem dróg dla pieszych w ciągu dróg wojewódzkich w latach 2020–2024 pozyskano z platformy przetargowej ZDW Olsztyn [155]. W ramach prowadzonych prac zebrano ok. 60 rekordów danych, w których zawarto informacje o nazwie inwestycji, numerze postępowania, numerze drogi wojewódzkiej, roku przetargu, wielkości robót (długość drogi dla pieszych), planowanym koszcie inwestycji przez zamawiającego oraz rzeczywiście poniesionym koszcie.
3. Dokumentacje projektowe i kosztowe uzyskane od GDDKiA (dane o wariantach lokalizacyjnych tras). W ramach projektu badawczego RIDII 2C [197] pozyskano z GDDKiA oraz ogólnodostępnych źródeł dokumentacje projektowe oraz kosztowe dotyczące ponad 280 inwestycji związanych z budową autostrad i dróg ekspresowych w Polsce latach 2006–2023. Zgromadzona baza danych stanowiła podstawę w procesie identyfikacji czynników i budowy modeli kosztów dla dróg krajowych.
4. Baza cenowa SEKOCENBUD i BISTYP [183], [240], Bank Danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) [88] (dane ogólne). Informacje dotyczące barier drogowych, dróg dla pieszych oraz wariantów lokalizacyjnych tras zostały uzupełnione o informacje z baz cenowych oraz wskaźniki makroekonomiczne m.in. jednostkowy produkt krajowy brutto (JPKB), roczne wydatki na infrastrukturę drogową (INW) oraz wskaźnik inflacji (CPI). Dane te umożliwiły identyfikację czynników oraz opracowanie dynamicznych modeli kosztów zmiennych w czasie.

Fragment bazy danych dotyczących wariantów lokalizacyjnych tras i zaimplementowanego zbioru ogólnych danych i danych przedstawiono w tab. 5.4.

Tab. 5.4 Fragment bazy ekonomiczno-kosztowej dla wariantów tras dróg krajowych

Lp.	Zmienna	Opis	Przykład
Dane o wariantach lokalizacyjnych tras			
1	DRG	Droga	S7
2	ODC	Odcinek	Płońsk Pn – Płońsk Pd
3	KLD	Klasa drogi	S
4	DL	Długość	4,7 km
5	KIN	Koszty planowane na realizację inwestycji	203,9 mln PLN
6	JKIN	Jednostkowy koszt inwestycyjny	43,4 mln PLN/km
7	PRZ	Rok przetargu	2007
8	SDR	Średniodobowe natężenie ruchu drogowego	19 287 poj./dobę
9	MRE	Planowana liczba miesięcy na realizację inwestycji	15
10	TUN	Zaprojektowano tunel	nie
Dane ogólne			
1	CPI	Wskaźnik inflacji	102,5
2	INW	Wydatki na drogi krajowe	2,06 mln PLN
3	JPKB	Jednostkowy produkt krajowy brutto	31,16 tys. PLN/mk.

Źródło: Opracowanie własne

6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

6.1. Wprowadzenie

W celu identyfikacji czynników wpływających na koszty wybranych elementów infrastruktury drogowej przeprowadzono eksplorację baz danych i analizę wyników badań terenowych, symulacyjnych oraz dokumentacyjnych. W analizie uwzględniono aspekty techniczne, funkcjonalne i ekonomiczne, które mogą wpływać na wielkość poszczególnych składowych kosztów cyklu życia elementów infrastruktury drogowej, obejmujące m.in. koszty jej budowy, utrzymania i eksploatacji. Zakres analizy obejmuje cztery główne obszary tematyczne:

1. Drogi krajowe wyposażone w bariery drogowe. Analizowany poligon badawczy został scharakteryzowany pod względem następujących parametrów:
 - Geometria dróg – opisano parametry planu sytuacyjnego oraz niwelety badanych odcinków dróg,
 - Ruch drogowy – badane odcinki opisano pod kątem średniego dobowego natężenia ruchu oraz struktury rodzajowej pojazdów,
 - Bezpieczeństwo ruchu drogowego – przeanalizowano statystyki wypadków i kolizji, ze szczególnym uwzględnieniem zdarzeń związanych z barierami ochronnymi,
 - Charakterystyka i analiza stosowanych barier na odcinkach dróg – dokonano inwentaryzacji barier ochronnych zlokalizowanych na badanym poligonie z analizą ich kosztów napraw i średnich uszkodzeń.
2. Drogi wojewódzkie. W ramach tego poligonu przeprowadzono charakterystykę dróg wojewódzkich w woj. warmińsko-mazurskim skupiając się na następujących obszarach:
 - Geometria dróg – badane odcinki dróg zostały opisane pod względem udziału obszaru niezabudowanego, gęstości łuków poziomych, udziału odcinków o ograniczonej widoczności na wyprzedzanie oraz gęstości skrzyżowań,
 - Ruch drogowy – scharakteryzowano odcinki dróg pod względem średniego dobowego natężenia pojazdów, struktury rodzajowej oraz gęstości zabudowy mieszkalnej, która może reprezentować ruch pieszych,
 - Bezpieczeństwo ruchu drogowego – przeanalizowano statystyki zdarzeń drogowych wraz z ich podziałem na wypadki z pieszymi oraz z pieszymi i rowerzystami.
 - Odcinki dróg wyposażone w urządzenia dla osób niechronionych – określono gęstość dróg dla pieszych, dróg dla pieszych i rowerów.
3. Badania symulacyjne. Przeanalizowano wyniki badań symulacyjnych dotyczących najechań pojazdów na bariery ochronne w celu identyfikacji czynników wpływających na wskaźnik intensywności zdarzeń drogowych.
4. Analiza danych kosztowo – ekonomicznych. Przeanalizowano oraz zidentyfikowano czynniki wpływające na koszty wariantów lokalizacyjnych tras, barier ochronnych oraz dróg dla pieszych ponoszonych przez inwestora.

6.2. Charakterystyka badanych odcinków dróg krajowych

6.2.1. Geometria dróg

6.2.1.1. Gęstość łuków poziomych

Gęstość łuków poziomych stanowi jeden z podstawowych parametrów geometrycznych wpływających na bezpieczeństwo na sieci drogowej. Szacuje się, że ponad 25% wypadków śmiertelnych jest związana z występowaniem łuku poziomego w planie sytuacyjnym, z czego większość z nich to wypadnięcia z drogi [52]. Miara gęstość łuków poziomych została obliczona jako suma występujących łuków poziomych na analizowanym odcinku do całkowitej długości odcinka i określa średnią liczbę łuków na odcinku. Średnio na kilometrze analizowanego odcinka występowało 0,47 łuków poziomych. Na badanym poligonie występuje różnorodny zakres gęstości łuków poziomych od 0 do 1,81 łuków na 1 kilometr odcinka. Analizując parametr gęstość łuków pod względem klasy drogi (tab. 6.1) stwierdza się, że autostrady charakteryzują się najmniejszą zmiennością w średniej gęstości łuków poziomych, co wskazuje na bardziej jednolite ukształtowanie drogi w porównaniu do innych klas dróg. Najwyższą średnią gęstością łuków poziomych zarejestrowano na drogach ekspresowych (0,49 łuków/1km).

Tab. 6.1 Gęstość łuków poziomych z podziałem na klasy dróg

Klasa drogi	Gęstość łuków pozioma (łuków/km)					
	liczebność	minimum	maksimum	średnia	mediana	odchylenie stand.
Autostrady A	39	0,173	1,127	0,459	10,9	0,235
Drogi ekspresowe S	42	0,000	1,811	0,492	11,4	0,372
Główne i główne ruchu przyspieszonego GGP	23	0,000	1,598	0,430	11,9	0,425
Razem	104	0,000	1,811	0,470	11,5	0,339

Źródło: Opracowanie własne

6.2.1.2. Krętość dróg

Wskaźnik krętości obliczany jako suma bezwzględnych kątów zwrotów trasy do długości odcinka został wyznaczony dla wybranych odcinków bazowych, które zostały zinwentaryzowane poprzez analizę projektów organizacji ruchu i filmów z przejazdów. Podstawowe charakterystyki statystyczne dotyczące krętości dróg z uwzględnieniem ich klasy zostały przedstawione w tab. 6.2.

Tab. 6.2 Wskaźnik krętości dróg z podziałem na klasy dróg

Klasa drogi	Krętość (°/km)					
	liczebność	minimum	maksimum	średnia	mediana	odchylenie stand.
Autostrady A	39	2,7	54,0	14,5	10,9	11,4
Drogi ekspresowe S	42	0,7	94,0	15,3	11,5	16,3
Główne i główne ruchu przyspieszonego GGP	23	0,0	83,9	21,9	11,9	22,3
Razem	104	0,0	94,0	16,5	11,5	16,3

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdza się, że średnia wartość wskaźnika krętości na wszystkich analizowanych odcinkach dróg wynosiła 16,5°/km. Wraz ze zwiększeniem się klasy drogi średni wskaźnik krętości maleje od 21,9°/km dla dróg głównych i głównych ruchu przyspieszonego do wartości 14,5°/km dla autostrad. Najczęściej na analizowanych odcinkach występowała bardzo mała krętość na poziomie ok. 11°/km.

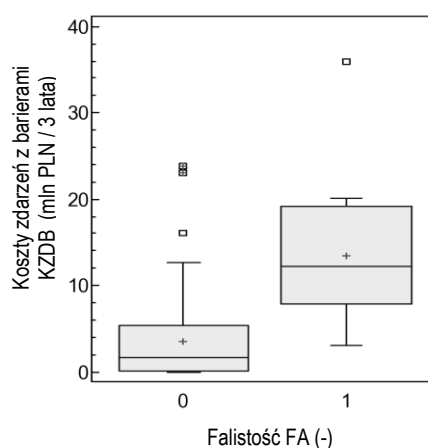
6.2.1.3. Falistość drogi

W celu scharakteryzowania analizowanego poligonu i badanych odcinków pod względem krzywych pionowych wprowadzono pomocniczy parametr określający występowanie falistości odcinka drogowego. Dla każdego z analizowanych odcinków określono występowanie łuków pionowych oraz maksymalne pochylenie załomów. Przyjęto założenie zgodne z [233], że za teren płaski przyjmuje się taki, na którym pochylenie niwelety wynosi 3°–5°. Za wartość graniczną decydującą o występowaniu terenu falistego przyjęto wartość powyżej 5°. Zmienna określająca występowanie falistości FA na odcinku została określona za pomocą danych binarnych zgodnie ze wzorem 6.1:

$$FA_i = \begin{cases} 0 & \text{dla pochylenia podłużnego} < 5\% \\ 1 & \text{dla pochylenia podłużnego} \geq 5\% \end{cases} \quad (6.1)$$

Falistość odcinków ma wpływ na zmianę kosztów zdarzeń drogowych, które zostały określone na podstawie zdarzeń z policyjnej bazy SEWiK [136]. Porównując uzyskane dane można stwierdzić, że występowanie falistości na odcinku ($FA=1$) wiąże się z wyższymi kosztami zdarzeń z barierami ochronnymi (rys. 6.1). Średnie koszty dla odcinków falistych są wyższe o ok. 75% w porównaniu do odcinków płaskich ($FA=0$) a mediana o ok. 85%. Ponadto rozpiętość kosztów (zakres między kwartylowy) jest również wyższa dla odcinków falistych – 11,2 mln PLN/3 lata w porównaniu do 5,2 mln PLN/3 lata.

Odcinki, na których nie zarejestrowano zdarzeń z barierami ochronnymi należały do grupy odcinków o falistości równej 0. Stanowiły one prawie 12% wszystkich analizowanych odcinków na badanym poligonie.



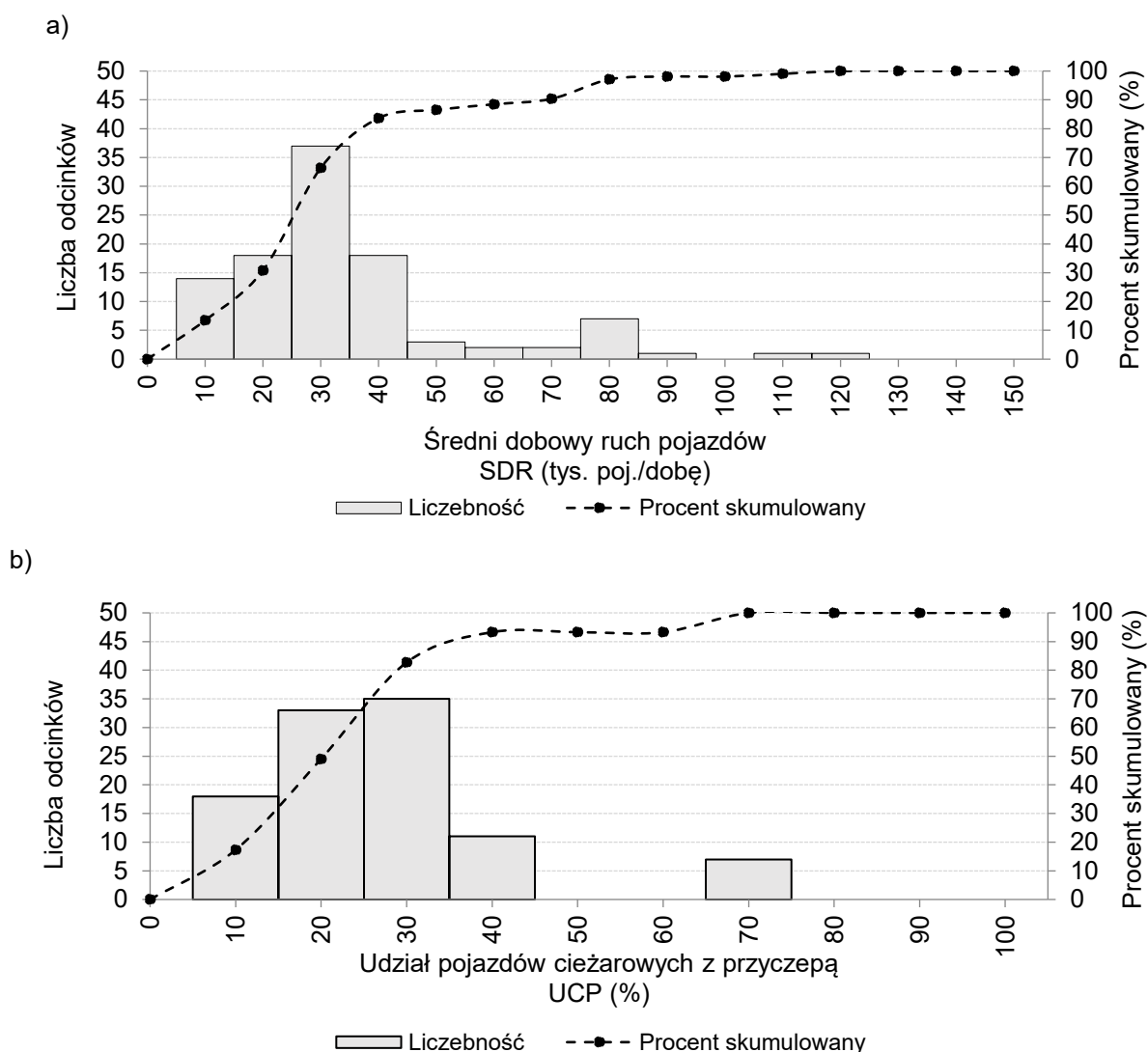
Rys. 6.1 Wpływ falistości FA na koszty zdarzeń z barierami KZDB

Źródło: Opracowanie własne

6.2.2. Ruch drogowy

Dane dotyczące natężenia ruchu kołowego na drogach krajowych zostały uzyskane z generalnego pomiaru ruchu z roku 2015 oraz 2020 / 2021 a następnie oszacowane na lata 2017–2019. Na rys. 6.2a przedstawiono rozkład średniodobowego natężenia ruchu dla środkowego okresu analizy.

Około 90% analizowanych odcinków dróg ma natężenie ruchu poniżej 70 tys. pojazdów na dobę. Na większości odcinków występuje natężenie ruchu w przedziale 20–30 tys. pojazdów na dobę. Analizując udział pojazdów ciężarowych na badanych odcinkach dróg można stwierdzić, że jest on różnorodny (zakres od 3% do 61%) (rys. 6.2b). W przypadku 90% analizowanych dróg udział ten nie przekracza 40%. Na większości badanych odcinków dróg występował udział pojazdów ciężarowych z przyczepą w zakresie 20–30%.



Rys. 6.2 Charakterystyki ruchowe badanych odcinków dróg krajowych a) średniodobowe natężenie ruchu pojazdów SDR
b) udział pojazdów ciężarowych z przyczepą UCP

Źródło: Opracowanie własne

6.2.3. Bezpieczeństwo ruchu na sieci dróg krajowych

Wypadki związane z wypadnięciem pojazdu z drogi, w tym najechanie na drzewo, słup, znak czy barierę ochronną znajdujące się w strefie bezpieczeństwa stanowią ok. 10% wszystkich wypadków w Polsce, w wyniku, których ginie ponad 18% uczestników, co w efekcie generuje znaczące koszty. Koszty zdarzeń drogowych szacowane są jako suma iloczynów jednostkowych kosztów zdarzeń, ich liczby i konsekwencji, gdzie jednostkowe koszty zdarzeń uwzględniają zarówno straty operacyjne, materialne jak i straty, które wynikają z uszkodzenia ciała i śmierci ofiar. Straty wynikające z uszkodzenia ciała uwzględnia się poprzez klasyfikację ofiar na lekko ranne i ciężko ranne.

Na przyjętym do analiz poligonie w przeciągu 3 lat doszło do prawie 3200 zdarzeń drogowych z barierami ochronnymi, z czego ponad 94% stanowiły kolizje (ponad 3000 kolizji). Zarejestrowano 187 wypadków w wyniku, których zostało rannych 248 osób, w tym 58 osób ciężko rannych, a 22 osoby poniosły śmierć. Szacuje się, że koszt tych zdarzeń wyniósł prawie 490 mln PLN (tab. 6.3).

Tab. 6.3 Zestawienie zbiorcze danych o zdarzeniach z barierami drogowymi na przyjętym do badań poligonie w latach 2017–2019 z podziałem na klasy dróg

Klasa drogi	Długość odcinków	Liczba zdarzeń	Liczba wypadków	Liczba ofiar	Liczba ofiar ciężko rannych	Liczba ofiar śmiertelnych	Koszty zdarzeń
	DL	LZDB	LWB	LOFB	LCRB	LZB	KZDB
	(km)	(zd./3 lata)	(wyp./3 lata)	(ofiar/3 lata)	(ofiar/3 lata)	(ofiar/3 lata)	(mln PLN/3 lata)
A	487,00	2011	83	116	29	9	246,4
S	366,72	980	83	129	26	13	210,1
GGP	185,55	199	21	25	3	0	36,0
Suma	1039,27	3190	187	270	58	22	492,5

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych analiz zdarzeń z barierami na badanym poligonie można stwierdzić, że najwięcej zdarzeń miało miejsce na autostradach (A). Stanowią one ok. 60% wszystkich zarejestrowanych zdarzeń. Większa liczba zdarzeń z barierami na autostradach wynikać może ze zwiększonego natężenia ruchu drogowego na nich, dłuższej analizowanej sieci oraz większych prędkości pojazdów. Na drogach ekspresowych (S) zarejestrowano największą liczbę ofiar (129 ofiar, 47% ogółu wszystkich ofiar), mimo, że ten poligon dróg charakteryzował się krótszą długością odcinków w porównaniu do autostrad (A) – tab. 6.3.

Na podstawie przeprowadzonych analiz gęstości zdarzeń i kosztów (tab. 6.4) można stwierdzić, że im wyższa klasa drogi tym większa gęstość zdarzeń związanych z najechaniem na barierę ochronną – od 1,072 zd./km/3 lata w przypadku dróg głównych i głównych ruchu przyspieszonego (GGP) do 4,129 w przypadku autostrad (A). Największą gęstością wypadków i ofiar wypadków charakteryzują się drogi ekspresowe (S). Przedstawione różnice wynikają z jednej strony z większej gęstości barier drogowych na drogach wyższych klas, jak również z większego natężenia ruchu i prędkości rozwijanych na autostradach i drogach ekspresowych w porównaniu do innych dróg.

Tab. 6.4 Zestawienie zbiorcze danych o gęstościach zdarzeń z barierami drogowymi na przyjętym do badań poligonie w latach 2017–2019 z podziałem na klasy dróg

Klasa drogi	Długość odcinków	Gęstość zdarzeń	Gęstość wypadków	Gęstość ofiar	Gęstość ofiar ciężko rannych	Gęstość ofiar śmiertelnych	Gęstość kosztów zdarzeń
	DL	GZDB	GWB	GOFB	GCRB	GZB	GKZDB
	(km)	(zd./km/3 lata)	(wyp./km/3 lata)	(ofiar/km/3 lata)	(ofiar/km/3 lata)	(ofiar/km/3 lata)	(mln PLN/km/3 lata)
A	487,00	4,129	0,170	0,238	0,060	0,018	0,506
S	366,72	2,672	0,226	0,352	0,071	0,035	0,573
GGP	185,55	1,072	0,113	0,135	0,016	0,000	0,194
Suma / Średnia	1039,27	3,069	0,180	0,260	0,056	0,021	0,474

Źródło: Opracowanie własne

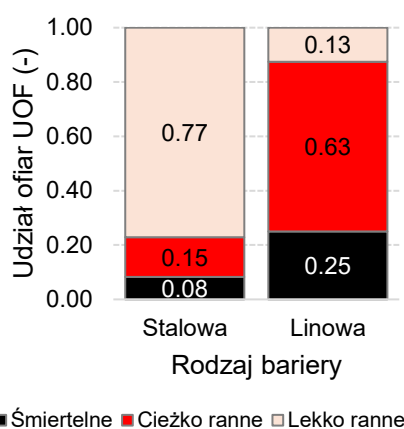
Następnie dla odcinków dróg wyposażonych w jeden typ barier (tylko stalowych lub linowych) przeanalizowano skutki zdarzeń drogowych z barierami ochronnymi oraz ich częstość występowania (tab. 6.5).

Tab. 6.5 Zestawienie zbiorcze danych o zdarzeniach z barierami w latach 2017–2019 z podziałem na rodzaj bariery

Rodzaj bariery (materiał)	Długość odcinków	Liczba zdarzeń	Częstość kolizji	Częstość wypadków	Częstość ofiar lekko rannych	Częstość ofiar ciężko rannych	Częstość ofiar śmiertelnych
	DL	LZDB	LWB	LRB	LCRB	LZB	KZDB
	(km)	(zd./3 lata)	(kol./zd./3 lata)	(wyp./zd./3 lata)	(ofiar/zd./3 lata)	(ofiar/zd./3 lata)	(ofiar/zd./3 lata)
Stalowe	234,51	394	0,914	0,086	0,094	0,018	0,010
Linowe	68,60	270	0,981	0,019	0,004	0,019	0,007
Suma	303,11	664	0,941	0,059	0,057	0,018	0,009

Źródło: Opracowanie własne

Z przeprowadzonej analizy wynika, że bariery stalowe charakteryzują się większą częstością wypadków w porównaniu do barier linowych. Analizując strukturę ofiar w zależności od rodzaju zastosowanej bariery (rys. 6.3) stwierdza się, że w przypadku barier stalowych zdecydowaną większość poszkodowanych stanowiły ofiary lekko ranne (77%), natomiast ofiar ciężko rannych było 15%, a śmiertelnych 8%. W przypadku barier linowych struktura ta była odmienna, aż 63% ofiar stanowiili ciężko ranni, 25% ofiary śmiertelne a udział ofiar lekko rannych wynosił jedynie 13%. Może to sugerować, że chociaż bariery linowe skuteczniej ograniczają liczbę wypadków, to w sytuacjach, gdy do nich dochodzi, skutki dla uczestników ruchu bywają poważniejsze niż w przypadku barier stalowych.



Rys. 6.3 Udział ofiar w zdarzeniach z barierami

Źródło: Opracowanie własne

6.2.4. Charakterystyka i analiza stosowanych barier na odcinkach dróg

6.2.4.1. Rodzaj i udział barier ochronnych na odcinkach

W celu określenia rodzaju i lokalizacji barier ochronnych na analizowanym poligonie badawczym przeprowadzono inwentaryzację wybranych odcinków dróg. Udział barier na odcinku został określony zgodnie ze wzorem 5.1. Na podstawie badań stwierdza się, że średni udział barier w przekroju wyniósł ok. 75%, z czego najmniejszym pokryciem charakteryzują się drogi główne oraz główne ruchu przyspieszonego ok. 30% barier na odcinkach dróg. Na badanym poligonie najczęściej stosowano bariery stalowe (średni udział 65%), linowe (8%), betonowe (1%).

Analizując parametry konstrukcje barier (tab. 6.6) stwierdza się, że na analizowanych odcinkach najczęściej występowały bariery o podwyższonym poziomie powstrzymywania H1, H2 (ok. 85% wszystkich barier). Na większości analizowanych odcinkach dróg występowały przede wszystkim bariery o szerokości pracującej W5 (ok. 30% na drogach ekspresowych i ok. 54% na autostradach).

Tab. 6.6 Udział barier ochronnych na analizowanych odcinkach z podziałem na klasy dróg

Parametry konstrukcyjne		Autostrady			Drogi ekspresowe		
		Pas dzielący	Pobocze jezdni	Łącznie	Pas dzielący	Pobocze jezdni	Łącznie
		(m/km/pas)	(m/km/pas)	(m/km/pas)	(m/km/pas)	(m/km/pas)	(m/km/pas)
Szerokość pracująca	W1	0,5%	1,1%	1,6%	0,0%	0,4%	0,4%
	W2	2,0%	3,0%	5,0%	2,7%	4,0%	6,8%
	W3	2,5%	5,1%	7,6%	1,6%	6,3%	7,9%
	W4	1,3%	2,4%	3,8%	4,6%	22,8%	27,4%
	W5	25,6%	28,2%	53,9%	16,4%	14,2%	30,6%
	W6	27,5%	0,6%	28,1%	17,4%	0,5%	17,8%
	W7	0,0%	0,0%	0,0%	9,0%	0,0%	9,0%
Poziom powstrzymywania	N1	1,1%	0,6%	1,7%	0,1%	0,4%	0,5%
	N2	3,4%	8,8%	12,2%	1,9%	12,8%	14,7%
	H1	32,1%	23,8%	55,9%	23,8%	32,1%	55,9%
	H2	22,1%	7,2%	29,4%	26,0%	2,9%	28,9%
	H3	0,8%	0,0%	0,8%	0,0%	0,0%	0,0%

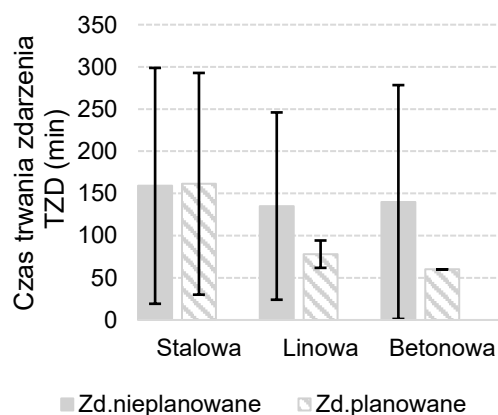
Źródło: Opracowanie własne

6.2.4.2. Zdarzenia z barierami ochronnymi na odcinkach dróg

Analiza zdarzeń i kosztów napraw barier ochronnych została przeprowadzona na sieci dróg krajowych. W ramach badań zarejestrowano 5084 zdarzenia drogowe, które zostały zakodowane w bazie uszkodzeń LifeRose. Ze zbioru wytypowanych danych, ponad 97% wszystkich zdarzeń związanych było z uderzeniem pojazdu w barierę ochronną. Wśród innych urządzeń brd zarejestrowano m.in. uszkodzenie terminali zderzeniowych, osłon energochłonnych i osłon U-15b. Na analizowanym poligonie zarejestrowano ponad 3550 zdarzeń, dla których uzyskano informacje dotyczące kosztów i długości naprawy barier. Analizując średni czas trwania zdarzeń (rys. 6.4) (planowanych – remontów oraz nieplanowanych – wypadków i kolizji) można stwierdzić, że bariery stalowe charakteryzowały się najdłuższym średnim czasem zdarzenia zarówno planowanego jak i nieplanowanego (ok. 160 min). Natomiast najkrótszy czas napraw barier występował w przypadku barier betonowych (ok. 60 min), w których to zarejestrowano najmniejszą liczbę uszkodzeń.

Na podstawie przeprowadzonych badań (tab. 6.7)

można stwierdzić, że wraz ze wzrostem klasy drogi wzrasta liczba zarejestrowanych przez służby utrzymaniowe zdarzeń z barierami ochronnymi, średnia długość uszkodzeń barier oraz ich koszty naprawy (od 2,6 tys. PLN do 4,36 tys. PLN). Analizując materiał z jakiego wykonana jest bariera ochronna można stwierdzić, że bariery linowe charakteryzują się najdłuższą średnią długością uszkodzeń. Mimo tego, że w przypadku tych barier zarejestrowano największe średnie długości uszkodzeń to mają one niższy średni oraz maksymalny koszt naprawy w porównaniu do barier



Rys. 6.4 Średni czas trwania zdarzeń z barierami

Źródło: Opracowanie własne

stalowych. Najmniej zdarzeń zarejestrowano z barierami betonowymi. Bariery te charakteryzują się najmniejszą średnią długością uszkodzeń oraz najmniejszymi średnimi kosztami naprawy.

6.2.4.3. Koszty napraw barier ochronnych na odcinkach dróg

W celu porównania jednostkowych kosztów napraw barier w trzech grupach (stalowe, linowe, betonowe) przeprowadzono test Kruskala-Wallisa ($H = 186,361$, $p < 0,001$), który wskazuje na istotne statystycznie różnice między grupami. Najwyższymi jednostkowymi kosztami napraw charakteryzują się kolejno: bariery stalowe, linowe, betonowe. Średni jednostkowy koszt barier wyniósł w przypadku barier stalowych ponad 235 PLN/mb, linowych poniżej 135 PLN/mb, a betonowych poniżej 70 PLN/mb. Analiza post-hoc z korektą Bonferroniego dodatkowo potwierdza, że jednostkowe koszty barier stalowych są istotnie wyższe niż barier linowych oraz betonowych.

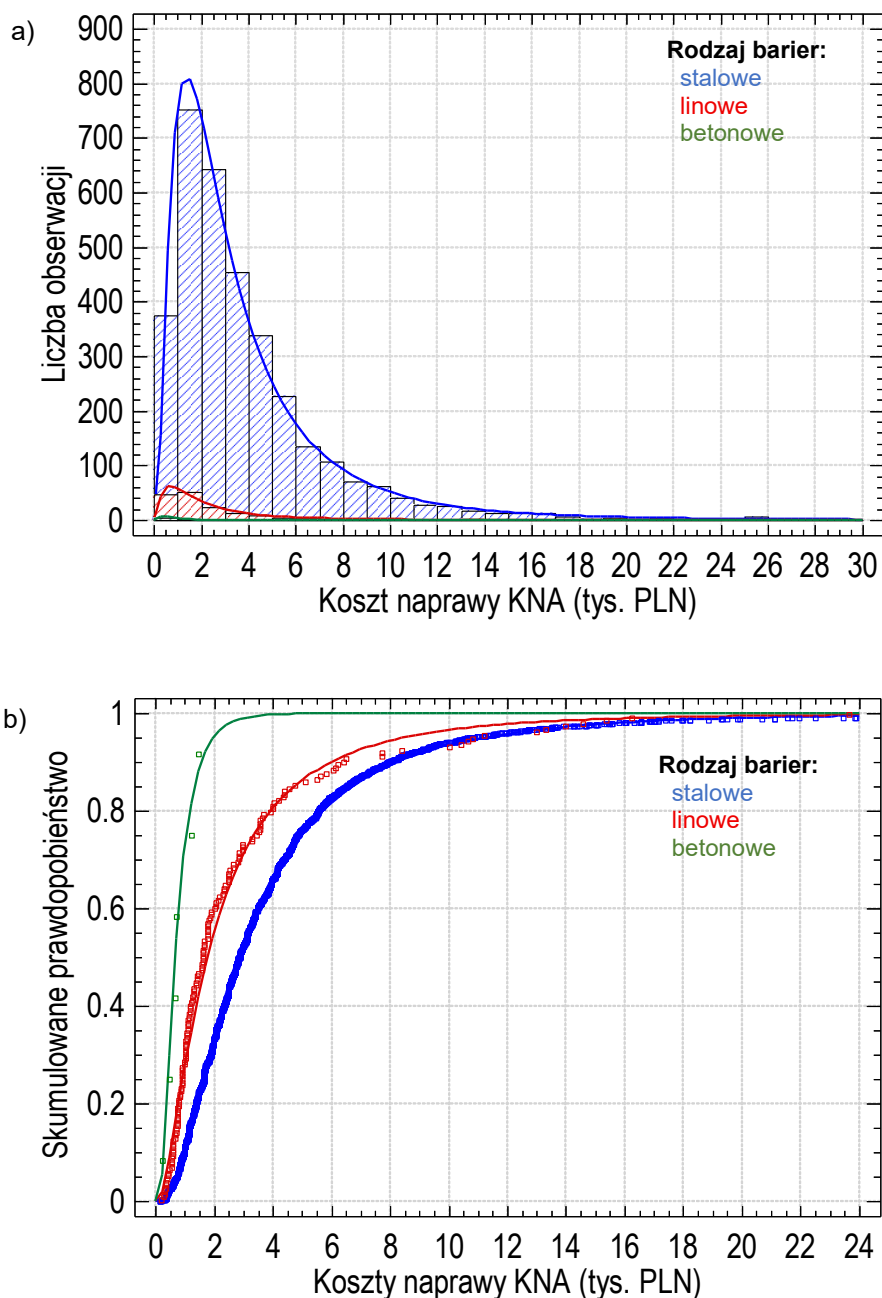
Tab. 6.7 Jednostkowe koszty napraw w zależności od klasy dróg i rodzaju bariery

Rodzaj bariery	Liczba zdarzeń	Średnia długość uszkodzeń	Koszty naprawy KNA				
RBD	n	LU	min	max	średnia	mediana	Odch. std
	(–)	(–)	(tys. PLN)	(tys. PLN)	(tys. PLN)	(tys. PLN)	(tys. PLN)
Autostrady A							
stalowa	1660	19,1	0,15	38,43	4,39	3,30	4,30
linowa	9	24,8	0,47	10,81	2,98	2,98	3,16
betonowa	8	13,8	0,00	1,20	0,33	0,33	0,44
Razem	1677	19,1	0,00	38,428	4,36	3,28	4,30
Drogi ekspresowe S							
stalowa	1239	16,0	0,17	94,04	4,04	2,80	4,92
linowa	80	25,1	0,28	23,65	3,48	1,79	4,12
betonowa	2	14,0	0,00	0,00	0,00	0,00	–
Razem	1321	16,5	0,00	94,04	4,00	2,73	4,87
Drogi główne i główne ruchu przyspieszonego GGP							
stalowa	470	12,5	0,16	26,65	2,66	2,01	2,52
linowa	77	18,6	0,18	16,23	2,25	1,28	2,82
betonowa	2	10,0	0,65	1,46	1,05	1,05	0,58
Razem	549	13,3	0,16	26,65	2,60	1,91	2,56
Łącznie	3547	17,3	0,00	94,04	3,96	2,79	4,35

Źródło: Opracowanie własne

Histogram oraz dystrybuenta rozkładów kosztów napraw barier w wyniku pojedynczego zdarzenia pojazdu z barierą ochronną przedstawiono na rys. 6.5. Rozkładem najlepiej opisującym badaną zmienną jest rozkład lognormalny, który charakteryzował się najlepszym wskaźnikiem wiarygodności (chi-kwadrat, Kolmogorov-Smirnov). Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że na badanym poligonie najczęściej rejestrowano szkody związane z naprawą barier stalowych, następnie linowych oraz betonowych. Na podstawie dystrybuenty empirycznej rozkładów kosztów z podziałem na rodzaj bariery stwierdza się, że koszty napraw dla barier betonowych są najniższe a w przypadku 90% zdarzeń koszt ten nie przekraczał 1,5 tys. PLN. Porównując bariery stalowe oraz

linowe stwierdza się, że bariery stalowe charakteryzują się niższymi kosztami napraw niż bariery linowe. W 90% zdarzeń z barierami stalowymi koszt ich naprawy nie przekraczał wartość 5,5 tys. PLN, gdzie w przypadku barier linowych koszt ten był nie większy niż 6 tys. PLN.

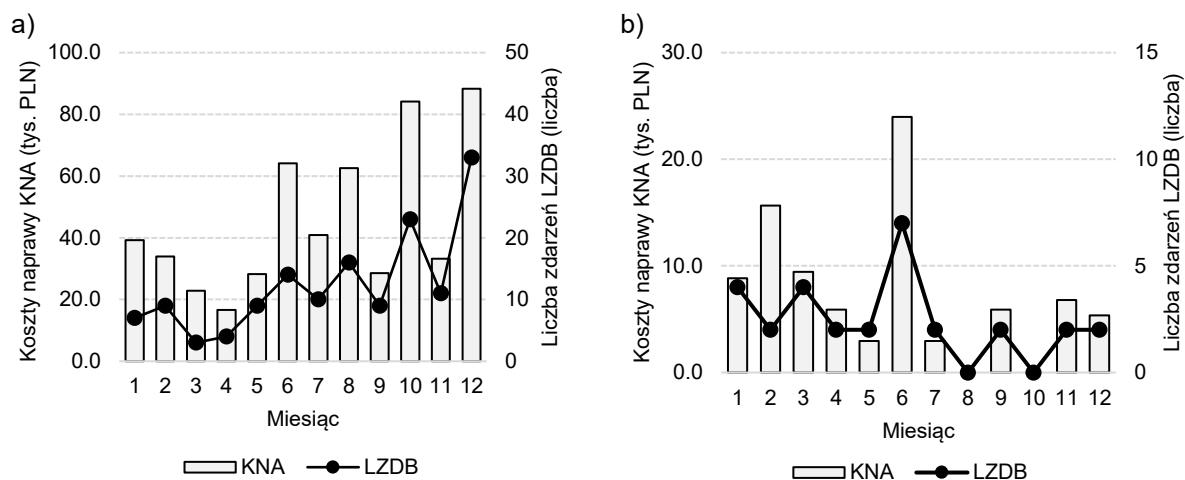


Rys. 6.5 Rozkład kosztów napraw barier z podziałem na ich rodzaj a) histogram z dopasowanymi rozkładami prawdopodobieństwa b) dystrybuanta empiryczna i teoretyczna

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie danych historycznych z 2016 roku z odcinków dróg krajowych nr S6 i S7 porównano zależności między liczbą i kosztami uderzeń pojazdu w barierę drogową oraz wpływem sezonowości na liczbę zdarzeń z barierami oraz ich całkowity koszt. Przedstawione wyniki wskazują, że istnieje dość ścisła zależność między liczbą uderzeń pojazdu w barierę i kosztami uszkodzeń barier w poszczególnych miesiącach (współczynnik korelacji $R^2 = 0,89-0,92$). W przypadku drogi S6 (rys. 6.6a) najwięcej zdarzeń odnotowano w grudniu, a największe koszty poniesione zostały w październiku. W

przypadku drogi S7 (rys. 6.6b) miesiącem generującym największe koszty oraz liczbę zdarzeń okazał się czerwiec.



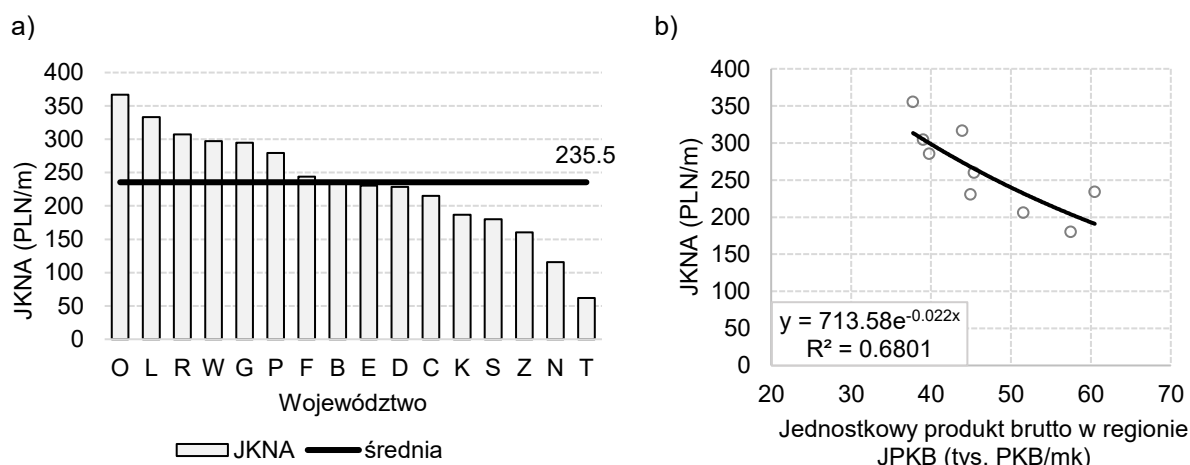
Rys. 6.6 Rozkład kosztów napraw KNA i liczby zdarzeń z barierami LZDB w miesiącach na wybranych odcinkach a) drogi S6 b) drogi S7

Źródło: Opracowanie własne

Analizując koszty napraw z podziałem na pory roku w przypadku drogi S6 (rys. 6.6a) największe koszty były generowane w okresie letnim, a najmniejsze w okresie wiosennym. Natomiast w przypadku drogi S7 (rys. 6.6b) największy koszt napraw barier zarejestrowany były w okresie zimowym a najniższe w okresie jesiennym. Ze względu na duże zróżnicowanie otrzymanych wyników nie stwierdzono wpływu sezonowości na całkowite koszty napraw uszkodzeń.

Na podstawie opracowanej bazy danych określono średni jednostkowy koszt naprawy drogowych barier stalowych dla każdego z 16 analizowanych województw. Przeprowadzona analiza wykazała, że średni jednostkowy koszt naprawy w Polsce w roku 2018 wyniósł ok. 236 PLN/mb. Zróżnicowane wartości średnich jednostkowych kosztów napraw wynikać mogą m.in. ze zróżnicowanego rodzaju stosowanych barier (jednostronne, dwustronne), ich zmiennego poziomu powstrzymywania. Na wysokość kosztów miały również wpływ indywidualne ustalenia pomiędzy zarządcami dróg, a podmiotami odpowiedzialnymi za ich utrzymanie. Najwyższą średnią jednostkową ceną naprawy bariery odnotowano kolejno w województwach: opolskim (O), lubelskim (L), podkarpackim (R) i mazowieckim (W). Najniższe ceny za naprawę barier stalowych wystąpiły w województwie świętokrzyskim (T) oraz w województwie warmińsko-mazurskim (N). Niska cena występująca w tych województwach podyktowana była m.in. indywidualnymi ustaleniami takimi jak m.in. dostarczanie nowych prowadnic przez zarządcę drogi.

Przeprowadzono analizę wpływu jednostkowego produktu krajowego brutto *JPKB* na zmianę jednostkowych kosztów napraw barier w województwach. Województwa zostały pogrupowane w pięć głównych regionów: wschodni, mazowiecki regionalny, południowo-zachodni, północno-zachodni, centralny i południowy. Na podstawie przeprowadzonej analizy rys. 6.7b można wywnioskować, że wraz ze wzrostem *JPKB*, średni jednostkowy koszt naprawy *JKNA* maleje. Wyjątek stanowią tu dwa regiony: północny oraz centralny w skład których wchodzi województwa z indywidualnymi ustaleniami pomiędzy zarządcą a firmami utrzymaniowymi dotyczące m.in. dostarczania materiałów, takich jak prowadnice barier przez zamawiającego (oddział GDDKiA).



Rys. 6.7 Średni jednostkowy koszt napraw drogowych barier stalowych z podziałem na a) województwa b) PKB w regionie

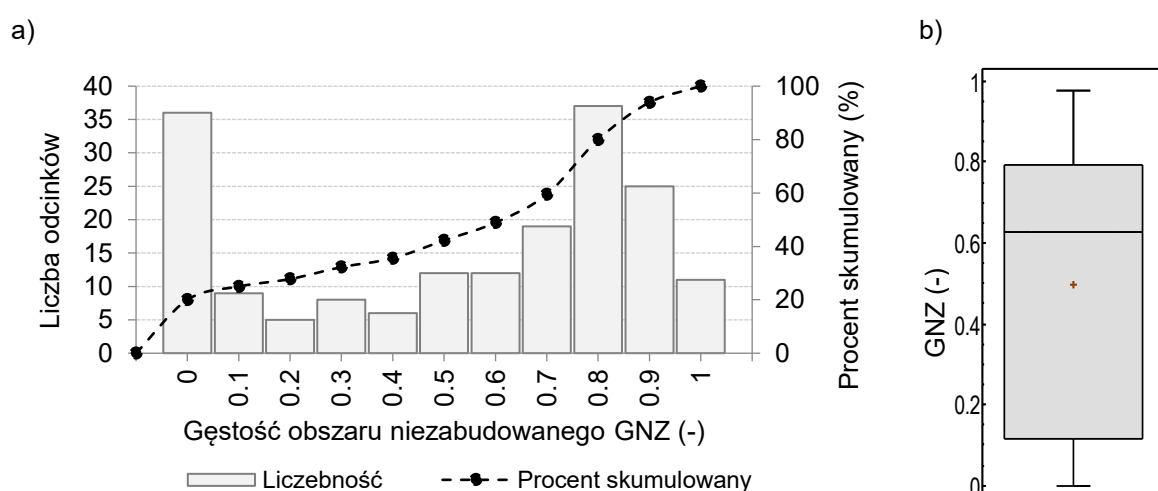
Źródło: Opracowanie własne

6.3. Charakterystyka badanych odcinków dróg wojewódzkich

6.3.1. Geometria dróg

6.3.1.1. Obszar niezabudowany

Przeanalizowano udział obszaru niezabudowanego na analizowanych odcinkach dróg wojewódzkich, a na rys. 6.8 przedstawiono jego rozkład oraz podstawowe statystyki. Analizowana sieć dróg charakteryzuje znacznym zróżnicowaniem pod względem występującego obszaru, o czym świadczyć może wysoka wartość odchylenia standardowego (0,33), wysoki współczynnik zmienności wynoszący ok. 67% oraz rozpiętość danych przyjmująca wartości 0 do maksimum równego 1. Większość badanych odcinków dróg charakteryzuje się znacznym udziałem obszarów niezabudowanych o czym świadczy m.in. mediana (0,63), która jest wyższa od średniej (0,50). Obszar zabudowany występuje na ok. 20% całej sieci.



Rys. 6.8 Gęstość obszarów zabudowanych na drogach wojewódzkich a) rozkład danych na odcinkach b) wykres pudełkowy

Źródło: Opracowanie własne

Tab. 6.8 Zestawienie zdarzeń z pieszymi i ich konsekwencje w zależności od rodzaju obszaru

Obszar	Liczba wypadków	Liczba ofiar ciężko rannych i śmiertelnych	Wskaźnik ciężkości ofiar	Koszt zdarzenia drogowego		
	LWP	LCRZP	WCRZP	KZDP		
	(wyp./3 lata)	(of./3 lata)	(of./wyp/3 lata)	(mln PLN)		
				Wartość średnia	Mediana	Odchylenie stand.
Zabudowy	59	26	0,43	1,18	0,06	1,23
Niezabudowany	23	15	0,65	1,61	2,32	1,16
Razem	82	41	0,49	1,30	2,25	1,22

Źródło: Opracowanie własne

6.3.1.2. Gęstość łuków poziomych oraz udział odcinków o ograniczonej widoczności

Miara gęstość łuków poziomych została obliczona jako łączna liczba łuków o kącie zwrotu większym niż 5° i promieniu mniejszym niż 750 m występująca na 1km odcinka drogi. W celu określenia liczby łuków zinwentaryzowano sieć pod względem występowanie oznakowania pionowego dotyczącego niebezpiecznych zakrętów (A-1, A-2, A-3 i A-4) oraz tablic informacyjnych T-3 w oprogramowaniu ArcGIS Pro [61]. Łącznie na podstawie oznakowania pionowego zidentyfikowano ponad 2380 niebezpiecznych zakrętów. Miara gęstości łuków poziomych na analizowanej sieci dróg przyjmuje wartości od 0 do 4,74 łuków/km (tab. 6.9). Średnio na badanym poligonie występowało ok 1,32 łuków poziomych na 1 km długości odcinka. Ponadto wysoka wartość odchylenia standardowego (1,14) wskazuje na znaczne zróżnicowanie ukształtowania odcinków pod względem gęstości łuków.

Tab. 6.9 Podstawowe statystyki dotyczące gęstości zakrętów oraz udziału odcinków o ograniczonej widoczności na sieci dróg wojewódzkich

Zmienna	Jednostka	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Wartość średnia	Mediana	Odchylenie standardowe
Gęstość łuków poziomych	(łuków/km)	0	4,74	1,32	1,19	1,14
Udział odcinków o ograniczonej widoczności	(–)	0	0,73	0,23	0,20	0,21

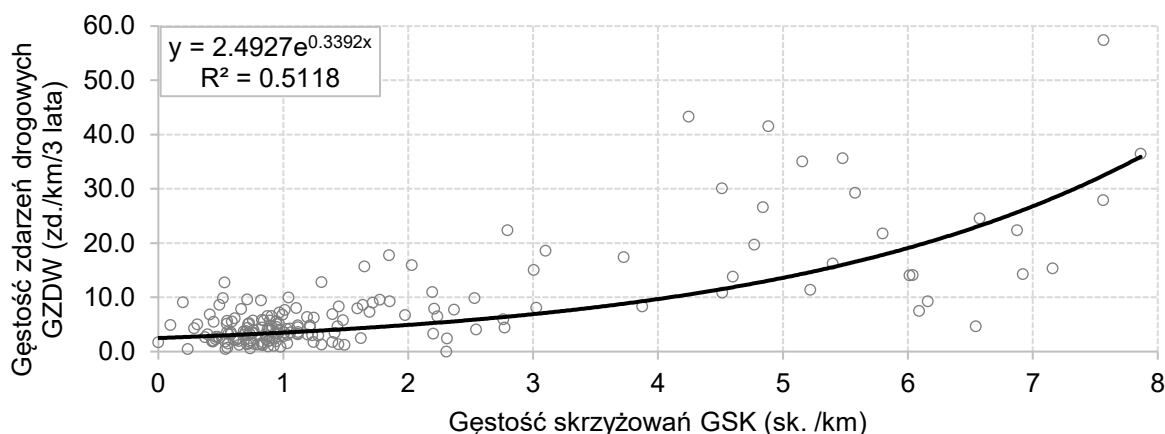
Źródło: Opracowanie własne

Kolejną analizowaną zmienną niezależną był udział odcinków charakteryzujących się ograniczoną widocznością na wyprzedzanie (tab. 6.9). W celu określenia udziału odcinków o ograniczonej widoczności na sieci dróg wykonano inwentaryzację oznakowania poziomego. Dla każdego z analizowanych odcinków określono łączną długość oznakowania poziomego P-4 (linia podwójnie ciągła), a następnie obliczono udział jego na całej długości odcinka. W najgorszym przypadku ograniczona widoczność występowała, aż na 73% długości odcinka. Niskie odchylenie standardowe (0,21) oraz zbliżone wartości średniej (0,23) i mediany (0,20) świadczą o relatywnie jednorodnej widoczności na analizowanych odcinkach dróg.

6.3.1.3. Gęstość skrzyżowań dróg

Gęstość skrzyżowań na drogach wojewódzkich jest czynnikiem wpływającym na gęstość zdarzeń co potwierdzają badania własne (rys. 6.9) oraz studia literatury [134], [57]. W celu określenia miary gęstość skrzyżowań dróg przeprowadzano inwentaryzację dróg wojewódzkich za pomocą

oprogramowanie ArcGIS Pro [61] a następnie obliczono liczbę skrzyżowań przypadającą na 1 km analizowanego odcinka. Łącznie zidentyfikowano ponad 1800 skrzyżowań. Na badanych odcinkach dróg zarejestrowano od 0 do maksymalnie 7,86 skrzyżowań na 1 km drogi. Badany poligon badawczy charakteryzujący się średnią gęstością skrzyżowań na poziomie 1,32 sk./km, co jest wartością wyższą od mediany wynoszącej 1,19 sk./km.



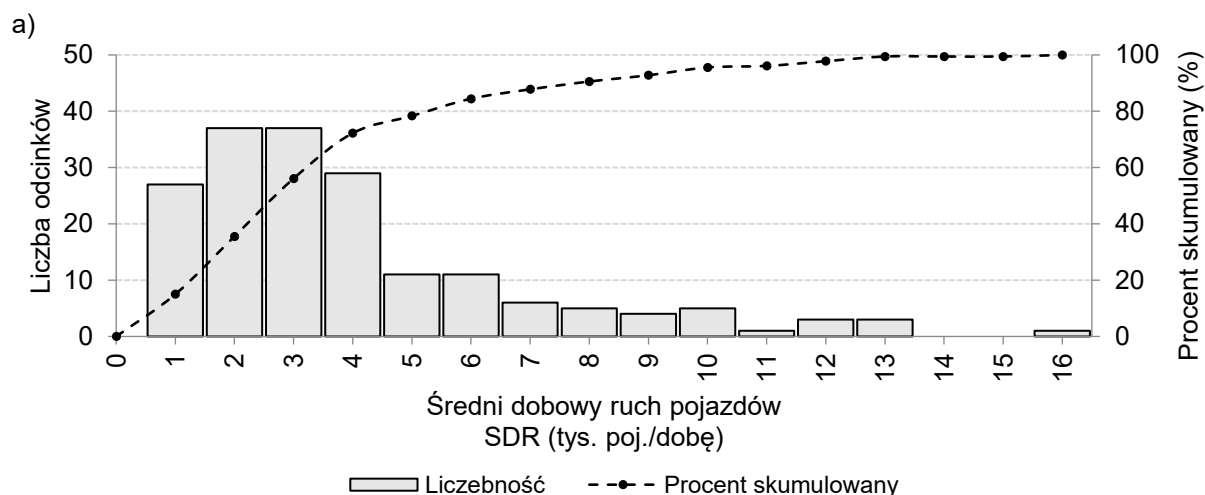
Rys. 6.9 Wykres zależności pomiędzy zmienną gęstość zdarzeń GZD a gęstością skrzyżowań GSK

Źródło: Opracowanie własne

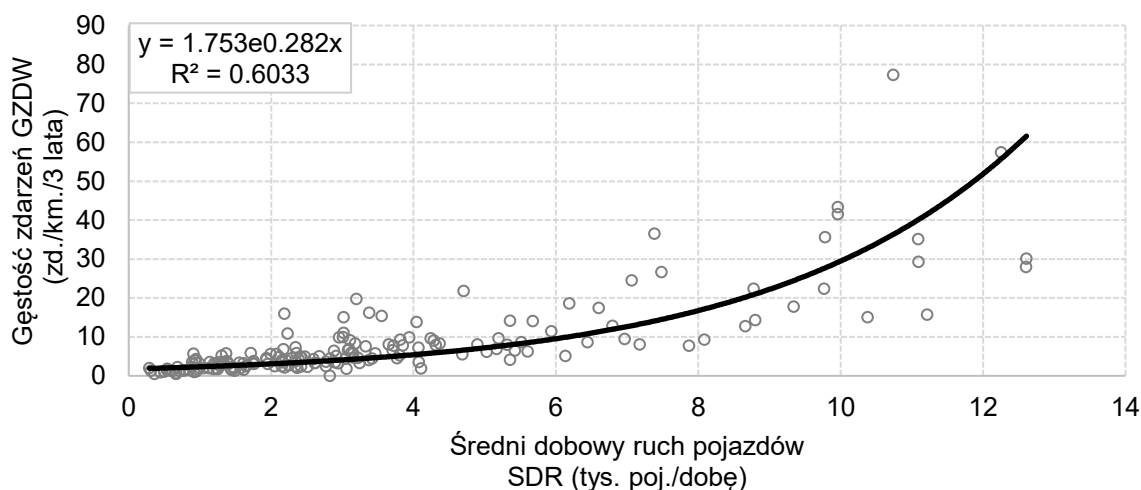
6.3.2. Natężenie ruchu pojazdów i pieszych

6.3.2.1. Natężenie i struktura rodzajowa pojazdów

Dane dotyczące obciążenia ruchem analizowanej sieci drogowej i występującej na niej struktury rodzajowej pojazdów na latach 2017–2019 zostały interpolowane na podstawie danych uzyskanych z generalnego pomiaru ruchu drogowego wykonanego na sieci dróg wojewódzkich w latach 2020–2021 oraz 2015 roku. Na rys. 6.10a zaprezentowano rozkład średniodobowego natężenia ruchu dla roku 2018. Zdecydowana większość analizowanych odcinków charakteryzuje się natężeniem ruchu wynoszącym od 1 do 3 tys. pojazdów na dobę, a blisko 90% zbadanych dróg ma natężenie poniżej 8 tysięcy pojazdów na dobę. W przypadku pojazdów ciężarowych najniższy udział na badanym poligonie wyniósł ok. 0,6% a najwyższy 30%, w 90% analizowanych przypadków udział pojazdów ciężarowych nie przekracza 15%. Na większości badanych odcinków dróg występował udział do 5%.



b)



Rys. 6.10 Średniodobowe natężenie ruchu pojazdów SDR a) rozkład danych na poligonie b) wpływ na gęstość zdarzeń GZD

Źródło: Opracowanie własne

Natężenie ruchu drogowego jest miarą określającą narażenie na wystąpienie zdarzenia drogowego. Analizując zależność pomiędzy zmienną gęstość zdarzeń GZDW a średnio dobowym natężeniem ruchu pojazdów rys. 6.10b stwierdza się, że wraz ze wzrostem natężenia następuje wykładniczy wzrost gęstości zdarzeń, co potwierdzają m.in. badania [202], [144], [7].

6.3.2.2. Gęstość zabudowy mieszkalnej

Pomiary natężenia pieszych na sieci dróg wojewódzkich nie są obecnie wykonywane w ramach generalnego pomiaru ruchu. W związku z tym za miarę reprezentującą wielkość natężenie niechronionych uczestników ruchu przyjęto gęstość zabudowy mieszkalnej. W obrębie 100m od analizowanej sieci drogowej występuje ponad 18 tys. budynków mieszkalnych, z czego większość (87,5%) stanowią budynki jednorodzinne, budynki o trzech lub więcej mieszkaniach jednorodzinnych stanowią ok. 10% ogółu budynku. Gęstość zabudowy została wyznaczona jako liczba budynków przypadająca na hektar powierzchni.

W tab. 6.10 przedstawiono podstawowe statystyki dla zmiennej gęstość budynków dla odcinków dróg przechodzących przez małe miejscowości i obszar niezabudowany z uwzględnieniem klasy zabudowy zgodnej z [17]. Na większości analizowanych odcinków dróg (ok. 96% długości sieci) występuje zabudowa ekstensywna co potwierdza mediana wynosząca 0,39 bud./ha dla całego poligonu badawczego. Bardzo małą gęstością zabudowy charakteryzuje się ok. 4% długości analizowanej sieci dróg wojewódzkich, w których to zakres zabudowy zmienia się od 0 do 0,09. Umiarkowana gęstość zabudowy występuje na niecałym 1% analizowanej sieci dróg.

Gęstość zabudowy na badanym poligonie występuje w szerokim zakresie: od wartości minimalnej 0,00 bud./ha, aż do 5,03 bud./ha (umiarkowanej zabudowy). Średnio na analizowanej sieci dróg występuje 0,56 bud/ha a odchylenie standardowe wynosi 0,73.

Tab. 6.10 Gęstość budynków z podziałem na klasy zabudowy

Gęstość zabudowy	Gęstość budynków	Gęstość obszarowa pieszych	Długość odcinków	Wartość min.	Wartość maks.	Wartość średnia	Mediana	Odch. stand.
	GB	GOB	DL					
	(ob./ha)	(os./ha/24h)	(km)					
bardzo mała	<0.1	<1	70,27	0,00	0,09	0,03	0,00	0,04
ekstensywna	0,1–3,0	1–4	1647,51	0,11	2,59	0,50	0,41	0,44
umiarkowana	3,0–10,0	4–20	6,13	3,05	5,03	3,77	3,49	0,45
Razem	<=10	<=20	1723,91	0,00	5,03	0,56	0,39	0,73

Źródło: Opracowanie własne

6.3.3. Bezpieczeństwo ruchu na sieci dróg

Badanie i analiza przyczyn powstania zdarzeń ich typów oraz miejsca pełni kluczową rolę w poprawie bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz redukcji kosztów związanymi z tymi zdarzeniami. Badany poligon dróg wojewódzkich stanowi ok. 13,5% długości całej sieci w województwie warmińsko-mazurskim. W latach 2017–2019 na analizowanej sieci dróg zarejestrowano ponad 7 800 zdarzeń, w tym 705 wypadków drogowych na 180 odcinkach dróg (tab. 6.11). W wyniku tych wypadków drogowych 876 osób zostało rannych, w tym 292 ciężko rannych i 89 osób poniosło śmierć. Szacunkowy koszt tych zdarzeń drogowych to ponad 990 mln PLN/3 lata.

Tab. 6.11 Zestawienie zbiorcze danych o zdarzeniach z barierami drogowymi na przyjętym do badań poligonie w latach 2017–2019 z podziałem na klasy drogi

Rodzaj zdarzenia	Długość odcinków	Liczba zdarzeń	Liczba wypadków	Liczba ofiar	Liczba ofiar ciężko rannych	Liczba ofiar śmiertelnych	Koszty zdarzeń
	DL	LZD	LW	LOF	LCR	LZ	KZD
	(km)	(zd./3 lata)	(wyp./3 lata)	(ofiar/3 lata)	(ofiar/3 lata)	(ofiar/3 lata)	(mln PLN/3 lata)
Wszystkie	1880,1	7867	705	965	292	89	991,7
Z pieszymi	1880,1	82	82	85	26	16	106,6
Niechronieni uczestnicy	1723,9	92	92	95	31	17	121,8

Źródło: Opracowanie własne

Wypadki z pieszymi stanowią 13% wszystkich wypadków na badanym poligonie. W latach 2017–2019 doszło do 82 wypadków z pieszymi, w których odnotowano 85 ofiar, w tym 26 ciężko rannych oraz 16 ofiar śmiertelnych. Całkowite koszty tych zdarzeń z pieszymi oszacowano na 106,6 mln PLN. Średnio w latach 2017–2019 na 100 km dróg wojewódzkich dochodziło do ponad 4 wypadków drogowych z pieszymi.

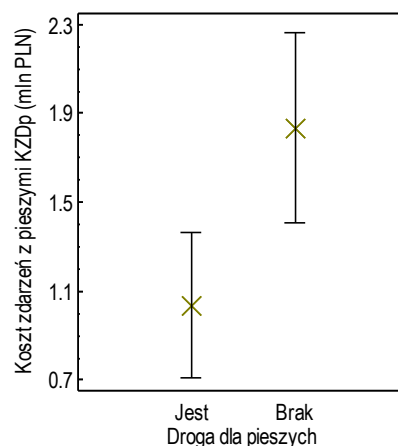
W przypadku zdarzeń z niechronionymi uczestnikami przeanalizowano zdarzenia z pieszymi i rowerzystami występujące na odcinkach o niskim poziomie zaludnienia. Wybór odcinków o mniejszym poziomie zurbanizowania był podyktowany innym zachowaniem kierujących w tych obszarach. Jak potwierdzają badania [140], przy dopuszczalnej prędkości 70 km/h kierujący w rejonie przejść dla pieszych zlokalizowanych w miastach poruszają się z mniejszą średnią prędkością (68,5 km/h) niż

w rejonie przejść zlokalizowanych w małych miejscowościach (72,4 km/h) lub obszarze niezabudowanym (83,2 km/h). Analiza dotycząca niechronionych uczestników obejmowała odcinki przechodzące przez małe miejscowości oraz przez obszar niezabudowany. W przypadku tych odcinków średnio w latach 2017–2019 rejestrowano ponad 5 wypadków z niechronionymi uczestnikami ruchu na 100 km sieci. Łącznie doszło do 92 zdarzeń, w których rannych zostało 31 osób w tym 17 poniosło śmierć. Szacuje się, że koszt tych zdarzeń wyniósł prawie 122 mln PLN.

6.3.4. Infrastruktura dla niechronionych uczestników ruchu

6.3.4.1. Drogi dla pieszych

Na podanym poligonie badawczym drogi dla pieszych stanowią mniej niż 20% jego całkowitej długości. Przeanalizowano koszty zdarzeń z pieszymi na poligonie w zależności od występowania lub braku dróg dla pieszych. Na rys. 6.11 przedstawiono średni koszt zdarzeń z pieszymi oraz ich przedziały ufności wyznaczone na podstawie indywidualnego odchylenia standardowego z podziałem na lokalizację zdarzeń z pieszymi. W przypadku braku dróg dla pieszych średni koszt zdarzeń z pieszymi kształtował się na poziomie ok. 1,83 mln PLN a mediana wynosiła 2,39 mln PLN, co stanowi znaczącą różnicę w porównaniu do miejsc z infrastrukturą dla pieszych, gdzie średni koszt zdarzeń wyniósł ok. 1,04 mln PLN, a mediana 0,06 mln PLN.



Rys. 6.11 Koszty zdarzeń z pieszymi KZDP w zależności od występowania dróg dla pieszych – średnie oraz 95% przedziały ufności

Źródło: Opracowanie własne

Przedziały ufności na poziomie 95% w przypadku występowania dróg dla pieszych (95%CI: 0,709; 1,363) oraz ich braku (95%CI: 1,409; 2,260) nie nakładają się na siebie, co w połączeniu z wynikiem testu Manna-Whitneya ($p=0,0215$) potwierdza statystyczną istotność różnicy w kosztach między analizowanymi grupami. Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że występowanie infrastruktury dla pieszych może przyczynić się do redukcji kosztów zdarzeń drogowych z pieszymi.

Dla każdego z badanych odcinków obliczono miarę gęstość dróg dla pieszych liczoną w przekroju dróg. Analizowana sieć dróg pod względem miary gęstości dróg dla pieszych charakteryzuje się dużą zmiennością od 0 do 1. Na większości badanych odcinków dróg gęstość wynosiła 0,16, przy czym średnio drogi dla pieszych na badanym poligonie stanowiły około 28% długości odcinka.

6.3.4.2. Droga dla pieszych i rowerów

Przeanalizowano zdarzenia w małych miejscowościach oraz w obszarach niezabudowanych z niechronionymi uczestnikami ruchu oraz ich konsekwencje w zależności od występowania infrastruktury pieszorowerowej (tab. 6.12). Liczba wypadków w obszarach wyposażonych w drogi dla pieszych i rowerów oraz w miejscach ich pozbawionych jest zbliżona. W ciągu trzech lat w rejonach z infrastrukturą pieszorowerową odnotowano 50 wypadków (47% ogółu wypadków), natomiast w miejscach, gdzie infrastruktura ta nie występowała 57 (53% ogółu wypadków). Mimo porównywalnej liczby wypadków to ich skutki okazały się poważniejsze tam, gdzie brakowało dróg dla pieszych

i rowerzystów. Wskaźnik ciężkości ofiar w tych rejonach wyniósł 0,58 of./wyp/3 lata, podczas gdy na obszarach z infrastrukturą był niższy (0,44 of./wyp/3 lata). Podobną zależność zaobserwowano w przypadku kosztów wypadków.

W obszarach wyposażonych w drogi dla pieszych i rowerów odnotowano średni koszt na poziomie 1,20 mln PLN, podczas gdy w rejonach, gdzie taka infrastruktura nie występuje średni koszt wzrósł do 1,46 mln PLN.

Tab. 6.12 Zestawienie zdarzeń z niechronionymi uczestnikami ruchu i ich konsekwencje

Drogi dla pieszych i rowerów	Liczba wypadków	Liczba ofiar ciężko rannych i śmiertelnych	Wskaźnik ciężkości ofiar	Koszt zdarzenia drogowego		
	LWPR	LCRZPR	WCRZPR	KZDPR		
	(wyp./3 lata)	(of./3 lata)	(of./wyp/3 lata)	(mln PLN)		
				Wartość średnia	Mediana	Odchylenie stand.
Występują	50	22	0,44	1,20	0,06	1,54
Brak	57	33	0,58	1,46	2,32	1,21
Razem	107	55	0,51	1,34	2,25	1,37

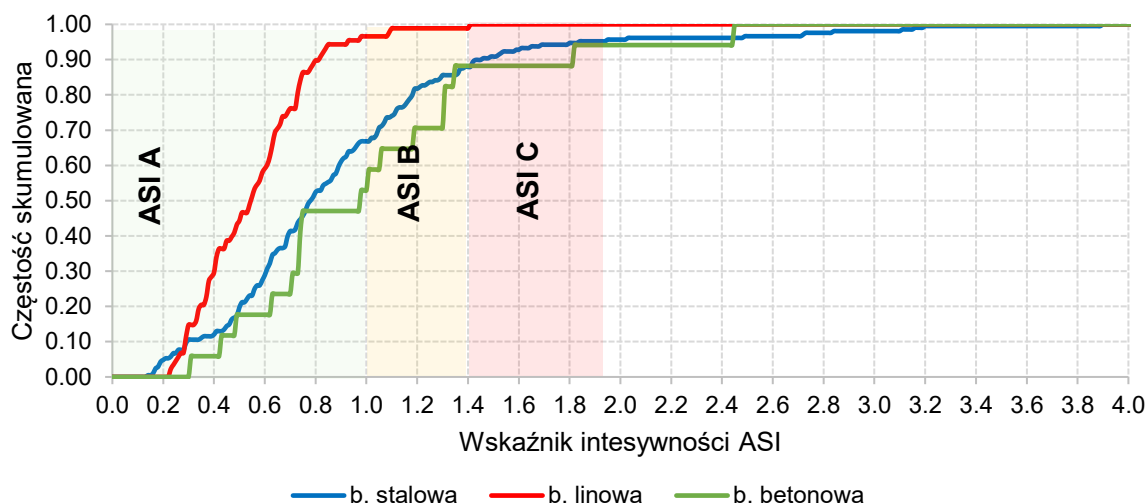
Źródło: Opracowanie własne

W dalszych analizach posłużono się miarą gęstość dróg dla pieszych i rowerów, która została obliczona jako suma dróg dla pieszych lub dróg dla rowerów liczona w przekroju drogi do całkowitej długości odcinka. Średnio na kilometrze analizowanego odcinka występowało 0,22 km infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu. Na większości sieci udział dróg dla pieszych i rowerów był mniejszy niż średnia i wynosił 0,13. Analogiczne jak w przypadkach gęstości dróg dla pieszych gęstość dróg dla pieszych i rowerów charakteryzuje się dużą zmiennością od wartości minimalnej 0 do maksymalnej 1.

6.4. Analiza wyników badań symulacyjnych

W celu określenia kosztów zdarzeń drogowych w wyniku pojedynczego zdarzenia wykorzystano bazę zawierającą wyniki z symulacji i testów zderzeniowych z trzema rodzajami barier ochronnych: stalowymi, linowymi oraz betonowymi. Podstawowym parametrem określającym ciężkość zdarzeń z barierami jest wskaźnik intensywności przyspieszenia ASI. Na rys. 6.12 przedstawiono dystrybuanty rozkładu wskaźnika ASI dla badanych testów symulacyjnych w zależności od rodzaju bariery. Analiza wyników wskazuje, że w przypadku:

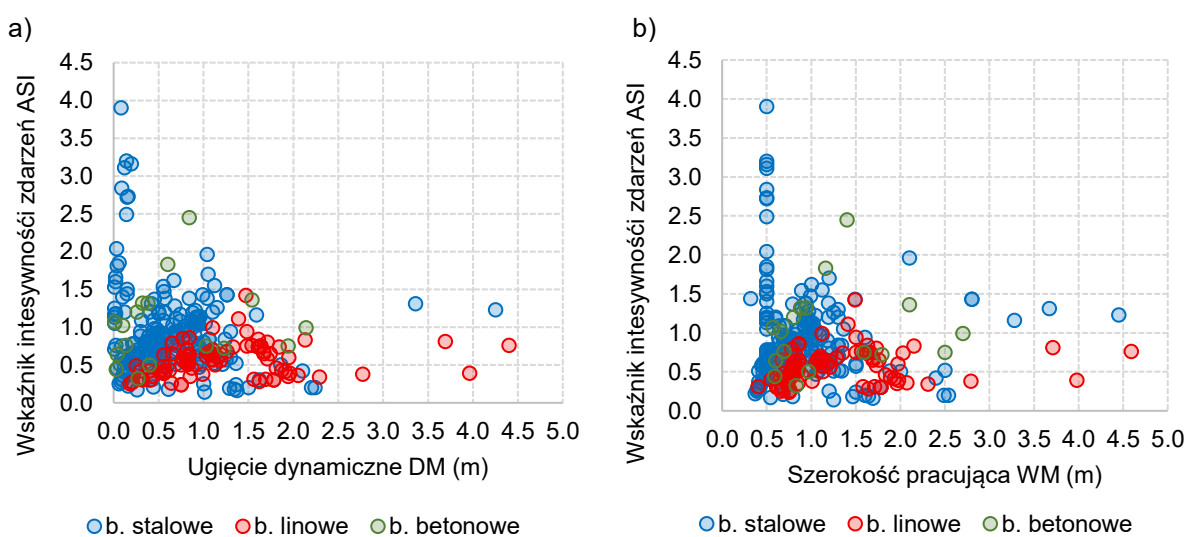
- barier linowych w 97% przypadków wystąpił poziom intensywności zdarzenia w klasie A, a w 3% przypadków poziom B;
- barier stalowych w prawie 70% przypadków wystąpił poziom intensywności zdarzenia w klasie A, ok. 20% przypadków poziom B, w 5 % przypadków poziom C;
- barier betonowych w ok. 55% przypadków wystąpił poziom intensywności zdarzenia w klasie A, ok. 35% przypadków poziom B, w 6 % przypadków poziom C.



Rys. 6.12 Dystrybuanty rozkładów wskaźnika ASI dla różnych rodzajów barier

Źródło: Opracowanie własne

Przeanalizowano zależności pomiędzy wskaźnikiem intensywności przyspieszenia ASI a podstawowymi parametrami konstrukcyjnymi barier uzyskanych z testów symulacyjnych – ugięciem dynamicznym DM , szerokością pracującą WM (rys. 6.13), podatnością bariery SS oraz prędkością poprzeczną pojazdów VPL (rys. 6.14).

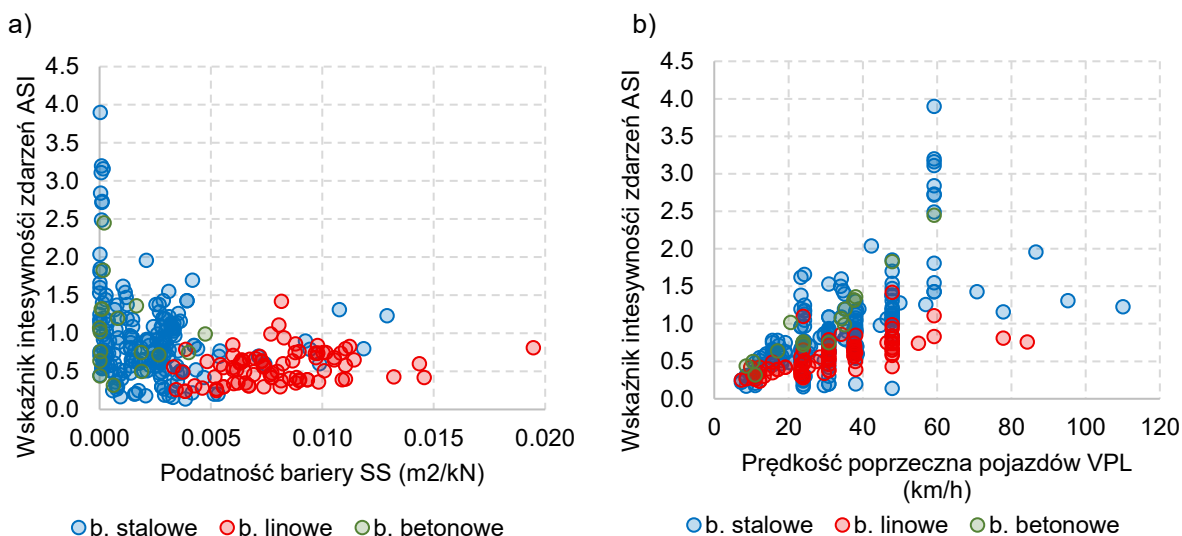
Rys. 6.13 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności wskaźnika intensywności zderzenia ASI od: a) ugięcia dynamicznego bariery DM , b) szerokości pracującej bariery WM .

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych badań (rys. 6.13, rys. 6.14) stwierdza się, że:

- wzrost szerokości pracującej WM , ugięcia dynamicznego DM , podatności barier SS powoduje zmniejszanie wskaźnika intensywności przyspieszenia ASI
- ciężkość wypadków spowodowanych uderzeniem pojazdu w barierę rośnie wraz ze wzrostem prędkości poprzecznej VPL pojazdu,

- wskaźnik intensywności *ASI* jest odwrotnie proporcjonalny do ugięcia dynamicznego *DM* i wprost proporcjonalny do energii kinetycznej poprzecznej pojazdu *EKL*.



Rys. 6.14 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności wskaźnika intensywności zderzenia ASI od: a) podatności bariery SS, b) prędkości poprzecznej pojazdów VPL

Źródło: Opracowanie własne

6.5. Analiza danych kosztowo-ekonomicznych

6.5.1. Koszty wariantowania tras

Przeanalizowano koszty inwestycyjne dróg krajowych. Podstawowe charakterystyki statystyczne zostały przedstawione w tab. 6.13. Średnia wartość jednostkowych kosztów inwestycyjnych na analizowanych odcinkach dróg wyniosła ok. 40 mln PLN na 1 km drogi. W przypadku autostrad szacuje się, że średni koszt na 1 km w latach 2006–2023 wyniósł ok. 39 mln PLN, natomiast w przypadku dróg ekspresowych ok 41 mln PLN. Na podstawie przeprowadzonego testu Manna-Whitneya nie stwierdzono występowania istotnych różnic w medianach jednostkowych kosztów dla autostrad oraz dróg ekspresowych ($p=0,415$).

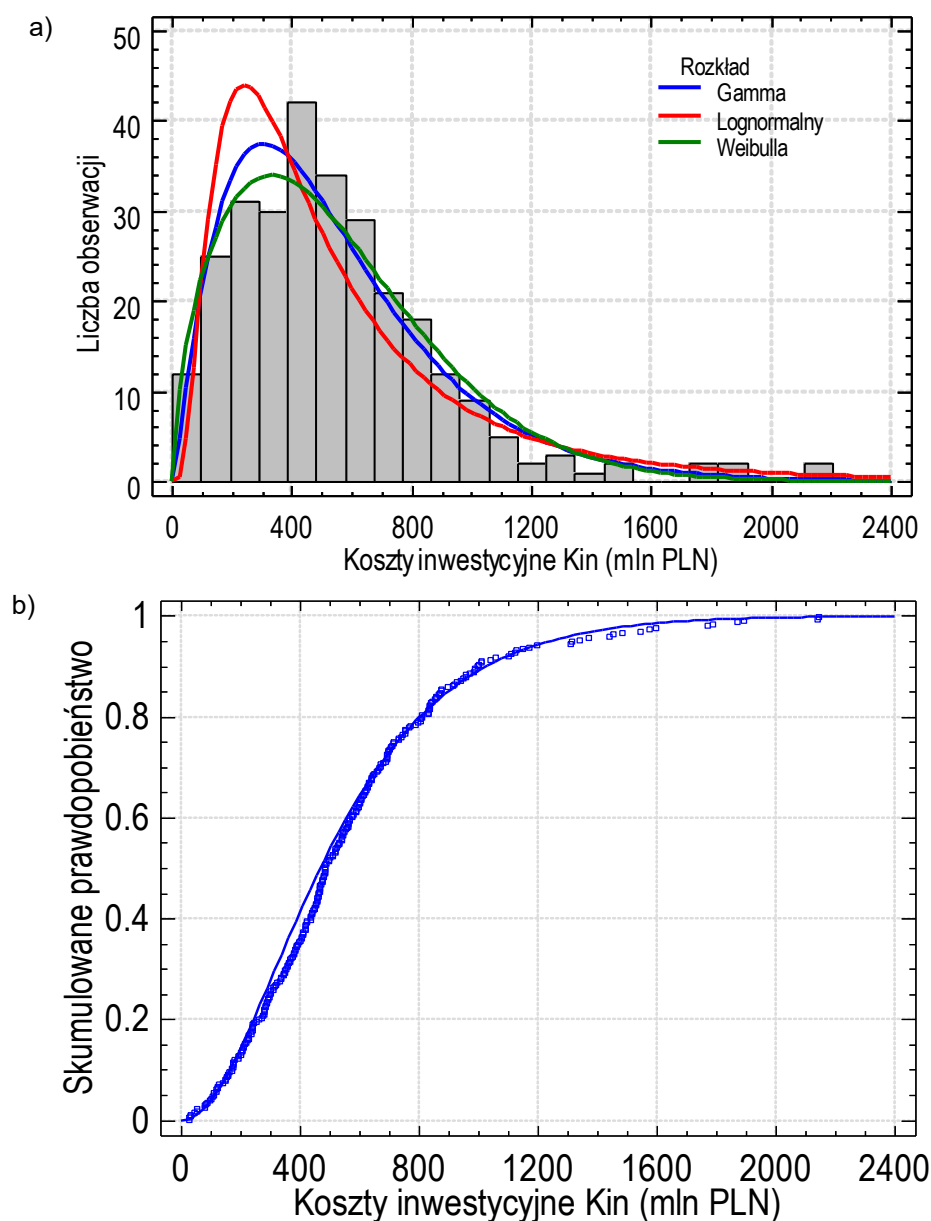
Tab. 6.13 Jednostkowe koszty inwestycyjne dróg krajowych z podziałem na klasy drogi

Klasa drogi	Długość odcinków	Liczba odcinków	Jednostkowe koszty inwestycyjne dróg krajowych JKIN				
			Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Wartość średnia	Mediana	Odchylenie standardowe
			mln PLN	mln PLN	mln PLN	mln PLN	mln PLN
A	783,7	49	4,00	94,00	38,81	41,00	18,12
S	3218,9	229	3,00	181,00	40,57	34,00	25,29
Razem	4002,6	278	3,00	181,00	40,26	35,00	24,16

Źródło: Opracowanie własne

Wysokie zróżnicowanie między jednostkowymi kosztami minimalnymi a maksymalnymi dróg wynika z różnego zakresu prac, odmiennych warunków geotechnicznych, zmiany technologii, różnego okresu bazowego oraz zmiany długości odcinków jak to miało miejsce m.in. na odcinku S6 Koszalin z (Bielice) – Koszalin Wschód, gdzie początkowo zaplanowano kontrakt na prawie 19 km a następnie został

skrócony do ok 7 km. Histogram oraz dystrybucję rozkładów kosztów inwestycyjnych przedstawiono na rys. 6.15.



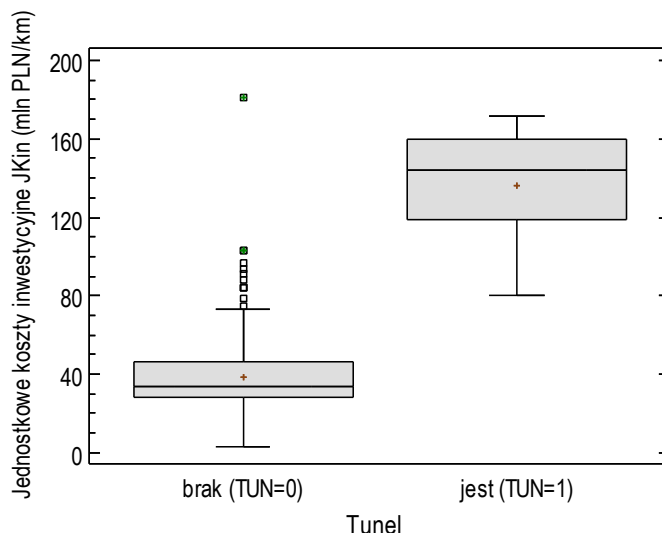
Rys. 6.15 Rozkład kosztów inwestycyjnych dla dróg krajowych a) histogram z dopasowanymi rozkładami prawdopodobieństwa b) dystrybucja empiryczna i teoretyczna

Źródło: Opracowanie własne

Najlepsze dopasowanie do danych dotyczących planowanych kosztów inwestycyjnych mają rozkłady: lognormalny, gamma oraz Weibulla. Weryfikację hipotez dotyczących zgodności rozkładów teoretycznych z danymi empirycznymi przeprowadzono w oparciu o testy nieparametryczne Kołmogorowa-Smirnowa oraz chi-kwadrat, przy przyjętym poziomie istotności $\alpha=0,05$. Uzyskane wartości krytyczne testów nie dały podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o zgodności analizowanych rozkładów z danymi empirycznymi. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdza się, że występuje rozstęp kosztów inwestycyjnych wynosi 90 mln PLN, przy czym inwestycje o kosztach powyżej 1,6 mld

PLN stanowią niewielki odsetek całej populacji. Na podstawie dystrybuanty empirycznej rozkładów kosztów stwierdza się, że koszty inwestycyjne w 90% przypadków były nie wyższe niż 1,1 mld PLN.

Przeanalizowano wpływ występowania tuneli na wysokość jednostkowych kosztów inwestycyjnych. Istotną statystycznie różnicę między grupami potwierdził test Manna-Whitneya ($p < 0,001$) porównujący mediany kosztów inwestycyjnych. W przypadku inwestycji drogowych, w których nie planowano budowy tunelu, mediana kosztów wynosiła ponad 34 mln PLN/km co stanowi istotną różnicę w porównaniu do inwestycji z tunelami, w których to mediana wyniosła ponad 144 mln PLN /km (rys. 6.16).



Rys. 6.16 Wykres pudełkowy jednostkowych kosztów inwestycyjnych dróg krajowych z podziałem na występowanie lub brak tuneli

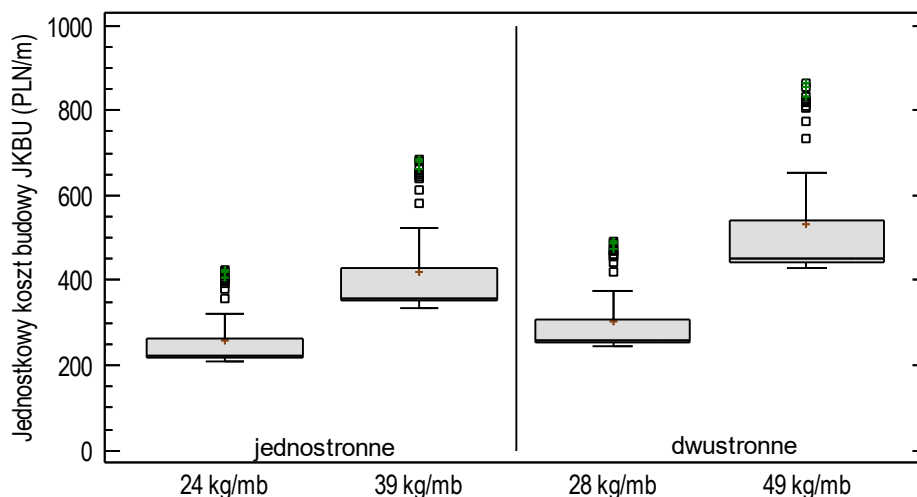
Źródło: Opracowanie własne

6.5.2. Koszty barier ochronnych

6.5.2.1. Koszty budowy

Dane dotyczące kosztów budowy barier i czynników na niej wpływających zostały przeanalizowane na podstawie bazy kosztów opracowanej z dwóch źródeł danych: baza producentów i wykonawców barier ochronnych, bazy Sekocenbud [183] i BISTYP [240].

Analiza biuletynów z okresu 2010–2024 pozwoliła na ustalenie czynników wpływających na zmianę kosztów jednostkowy budowy barier (rys. 6.17). Należą do nich: materiał, z którego wykonano zasadnicze części bariery (stal, beton). W przypadku barier stalowych występuje zależność ceny od masy bariery, na którą wpływ ma rozstaw barier oraz typ barier (jednostronne, dwustronne). Jednostkowy koszty budowy barier dwustronnych jest wyższy od jednostronnych o ok. 18%. Wraz ze wzrostem masy bariery występuje wzrost jednostkowego kosztu jej budowy, co potwierdza wykres pudełkowy (rys. 6.17). W przypadku barier lżejszych tj. o masie 24kg/mb jednostkowy koszt budowy barier był w zakresie od 210 PLN/mb do ponad 440 PLN/mb a przypadku barier cięższych, czyli o masie ok. 49 kg/mb w zakresie od ok. 430 PLN/mb do ok 860 PLN/mb. Występowanie istotnie statystycznej różnicy między czterema badanymi grupami potwierdza test Kruskala-Wallisa ($H=149,21$; $p < 0,001$). Średnie rangi znacznie się różniły, co potwierdziły analizy post-hoc z korekcją Bonferroniego. Wszystkie pary grup wykazały statystycznie istotne różnice ($p < 0,05$). Najniższą średnią rangę miały bariery jednostronne o masie 24kg/mb, a najwyższą bariery dwustronne o masie 49kg/mb.



Rys. 6.17 Wykresy pudełkowe kosztów budowy barier stalowych z podziałem na typ i masę bariery w latach 2010–2024

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [183]

Dane od producentów barier i firm utrzymaniowych zestawiono w postaci tabelarycznej (tab. 6.14), która przedstawia minimalne, maksymalne i średnie wartości jednostkowych kosztów budowy barier ochronnych. Tak samo jak w przypadku biuletynów widoczne jest rozróżnienie cen w zależności do zastosowanego materiału oraz typu bariery (jednostronne, dwustronne).

Tab. 6.14 Informacje kosztowe uzyskane od producentów barier i firm utrzymaniowych

Typ bariery (lokalizacja)	Typ bariery	Jednostkowe koszty budowy JKBU					Liczebność
RLA	STR	min	max	średnia	mediana	odch. std	n
		(PLN/mb)	(PLN/mb)	(PLN/mb)	(PLN/mb)	(PLN/mb)	(–)
Stalowa							
drogowa	jednostronna	86	664	185	154	110	67
drogowa	dwustronna	120	626	224	209	94	33
mostowa	–	172	1648	604	586	284	44
Razem		86	1648	322	216	260	144
Linowa							
drogowa	–	84	185	124	119	30	28
mostowa	–	100	344	205	160	94	19
Razem		100	344	156	127	75	47
Betonowa							
Razem		492	492	492	492	–	1

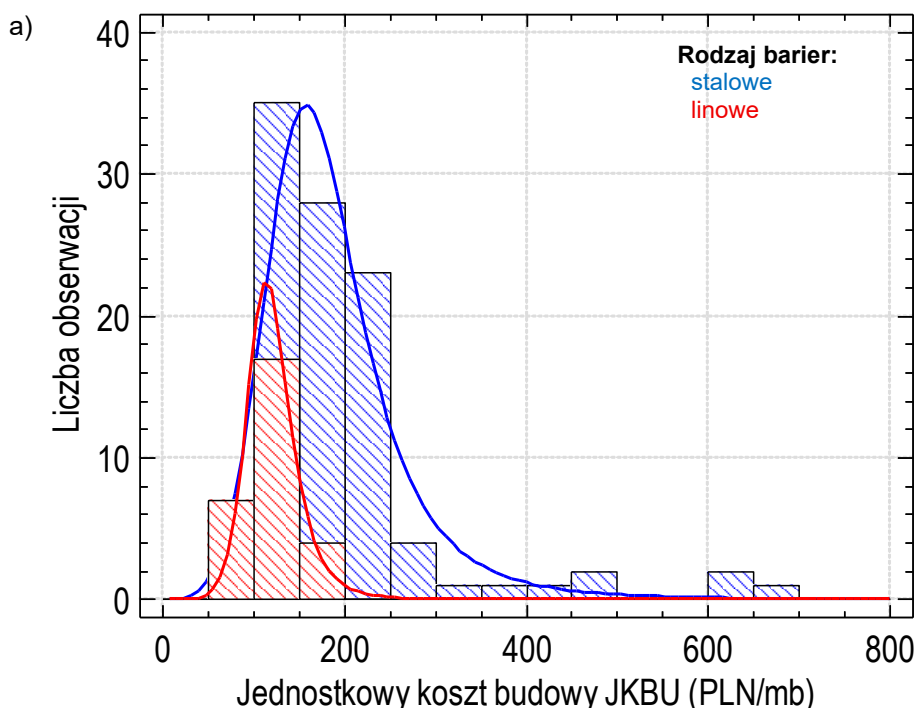
Źródło: Opracowanie własne

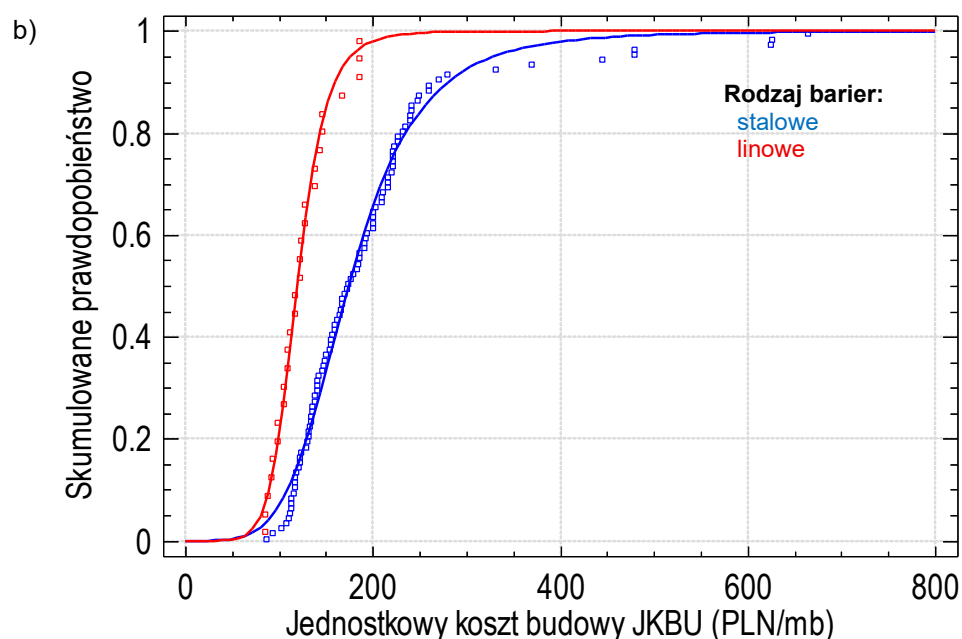
Z uwagi na zastosowany materiał najwyższymi średnimi kosztami budowy charakteryzują się kolejno bariery betonowe, stalowe i linowe. W wyniku przeprowadzonego testu Manna-Whiteya ($p < 0,001$) potwierdzono występowanie istotnie statystycznych różnic pomiędzy barierami stalowymi, linowymi i betonowymi.

Analogicznie jak w przypadku danych z biuletynów jednostkowy koszt budowy barier jest wyższy dla barier dwustronnych w porównaniu do jednostronnych (tab. 6.14). Przedstawione różnice wynikają z większej masy barier dwustronnych a tym samym zastosowaniem większej ilości materiału niezbędnego do ich wykonania.

W celu oceny dopasowania rozkładów do danych empirycznych założono, że istotność statystyczna różnicy między danymi obserwowanymi a oczekiwanymi mieści się w granicach 95% przedziału ufności. Oznacza to, że przyjęto wartość graniczną dla wartości $p \leq 0,05$. Dobroć dopasowania została zweryfikowana za pomocą testów Chi-kwadrat oraz Kolmogorova-Smirnova. Najlepsze dopasowanie do danych dotyczących kosztów budowy barier stalowych i linowych uzyskano kolejno dla rozkładów: loglogistycznego, lognormalnego oraz odwrotnego Gaussa. Histogram oraz dystrybucję rozkładów jednostkowych kosztów budowy barier stalowych i linowych dla rozkładu loglogistycznego przedstawiono na rys. 6.18a.

Na podstawie uzyskanych wyników (rys. 6.18, tab. 6.14) można stwierdzić, że jednostkowy koszt barier stalowych charakteryzuje się wyższym rozstępem kosztów (ponad 550 PLN/mb) oraz wyższą średnią w porównaniu do barier linowych ($R=101$ PLN/mb, $\bar{X}=124$ PLN/mb). Na podstawie dystrybucji empirycznej rozkładów kosztów budowy barier stalowych i linowych stwierdza się, że w 90% przypadków koszty budowy barier stalowych nie przekraczały kwoty 280 PLN/mb, a w przypadku barier linowych koszt ten był nie większy niż 160 PLN/mb.



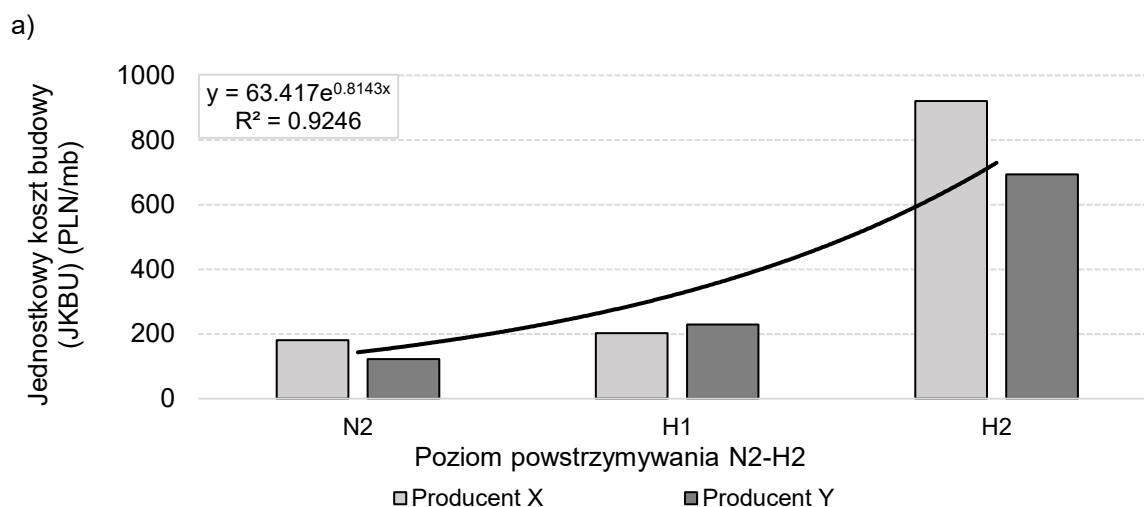


Rys. 6.18 Rozkład jednostkowy kosztów budowy barier stalowych i linowych a) histogram empiryczny z dopasowanymi rozkładami prawdopodobieństwa b) dystrybucja empiryczna

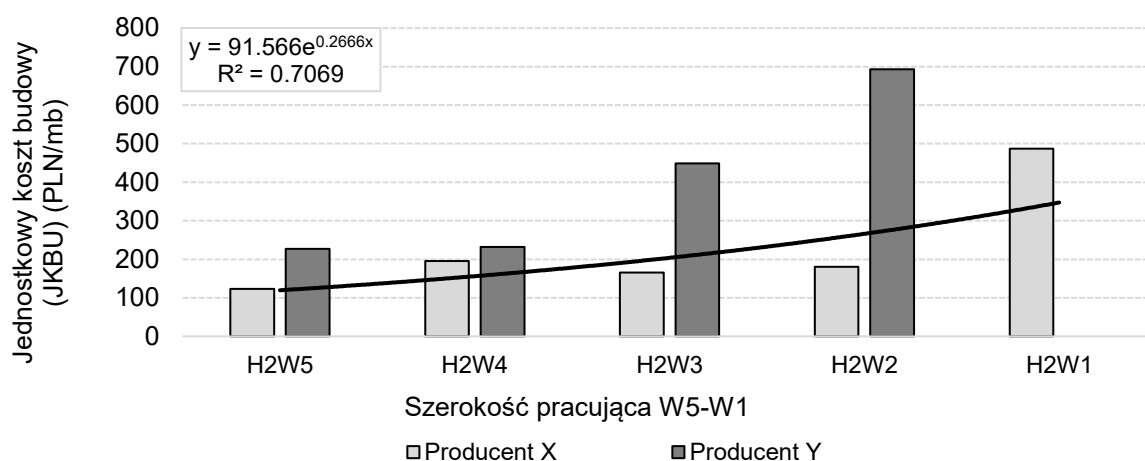
Źródło: Opracowanie własne

W bazie kosztowej dodatkowo wyróżniono elementy związane z przeznaczeniem barier (mostowe, drogowe), parametrami funkcjonalnymi (maksymalna poprzeczna energia kinetyczna znormalizowana *EKL*, szerokość pracująca *WM*, rozstaw słupków *ROZ*). Poziom powstrzymywania jest daną jakościową, dlatego aby przedstawić jej wpływ na jednostkowe koszty budowy została przekształcona na daną ilościową poprzez przypisanie jej maksymalnej energii kinetycznej pojazdu jaka jest rozpraszana przez barierę ochronną. Wartości maksymalnej energii kinetycznej zostały przypisane na podstawie energii normatywnych, które stanowią podstawę przy projektowaniu barier ochronnych.

Przeprowadzone analizy wskazują, że średnie jednostkowe koszty budowy barier stalowych wykazują zależność od poziomu ich powstrzymywania oraz szerokości pracującej (rys. 6.19).



b)

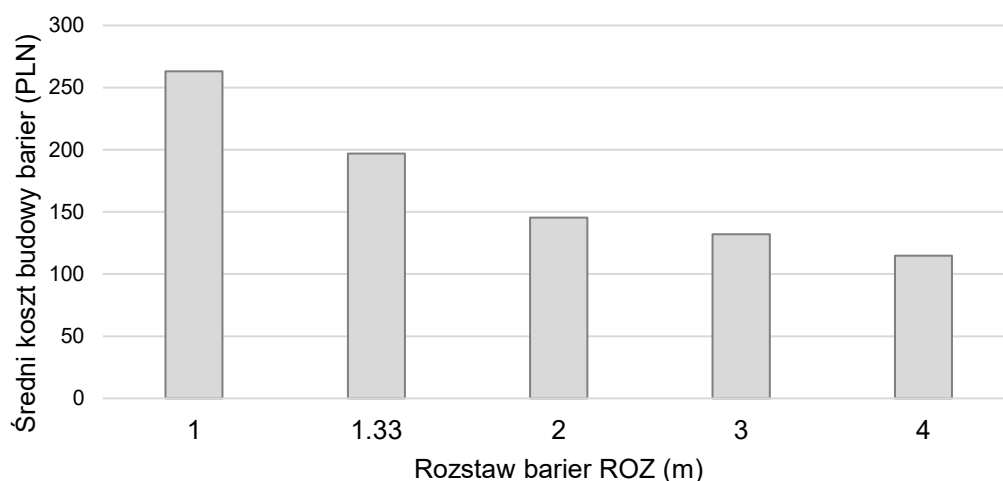


Rys. 6.19 Zmiany jednostkowych kosztów budowy barier drogowych stalowych w zależności od a) poziomu powstrzymywania (PP) dla poziomu powstrzymywania W2, b) szerokości pracującej (W)

Źródło: Opracowanie własne

Zwiększenie poziomu powstrzymywania oraz zmniejszenie szerokości pracującej skutkuje wzrostem kosztów budowy tych barier (rys. 6.19). Obserwowane zmiany w kosztach mają charakter nieliniowy, co może sugerować konieczność uwzględnienia dodatkowych czynników wpływających na ekonomikę tych inwestycji.

W przypadku rozstawu słupków barier stalowych średnie jednostkowe koszty budowy barier maleją wraz ze wzrostem rozstawu między słupkami. Dla rozstawu słupków barier co 1m średni jednostkowy koszt budowy bariery wyniósł 263 PLN w 2018 roku. Zwiększenie rozstawu do 2 m zmniejszyło koszt budowy bariery o ok. 45%. W przypadku rozstawu wynoszącego 4 m kosztów budowy barier zmniejsza się o ok. 56% w porównaniu do średniego kosztu budowy barier o rozstawie jedno metrowym.

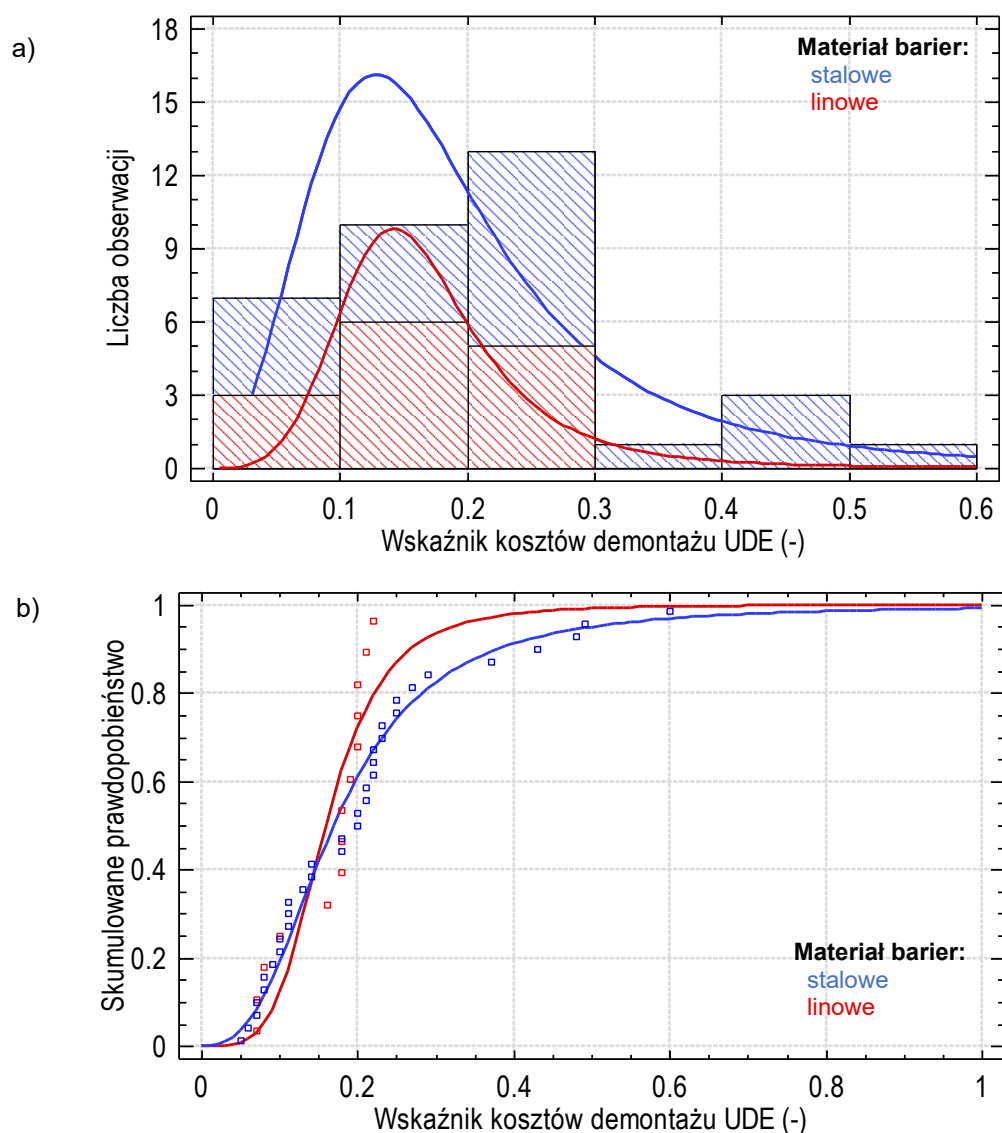


Rys. 6.20 Zmiany jednostkowych kosztów budowy w zależności od rozstawu barier

Źródło: Opracowanie własne

6.5.2.2. Koszty demontażu

Na podstawie bazy danych kosztów barier ochronnych oszacowano wskaźnik kosztów demontażu liczony jako stosunek kosztów demontażu do kosztów budowy. Tak jak w przypadku kosztów budowy najniższym kosztem demontażu charakteryzowały się kolejno: bariery linowe (ok. 19 PLN/mb), stalowe (ok. 52 PLN/mb). Na rys. 6.21 przedstawiono histogram oraz dystrybucję rozkładów wskaźnika kosztów demontażu dla barier stalowych oraz linowych. Rozkładem najlepiej opisującym badaną zmienną jest rozkład lognormalny, który charakteryzował się najlepszym wskaźnikiem wiarygodności (Chi-kwadrat, Kolmogorov-Smirnov). Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdza się, że koszty demontażu barier stalowych stanowią nie więcej niż 60% kosztów ich budowy a w 90% przypadkach nie więcej niż 43% kosztów budowy. Natomiast udział koszty demontażu barier linowych w ich kosztach budowy w 90% przypadkach jest nie większy niż 0,21. Średni wskaźnik kosztów demontażu wyniósł 0,20 dla barier stalowych oraz 0,18 dla barier linowych.

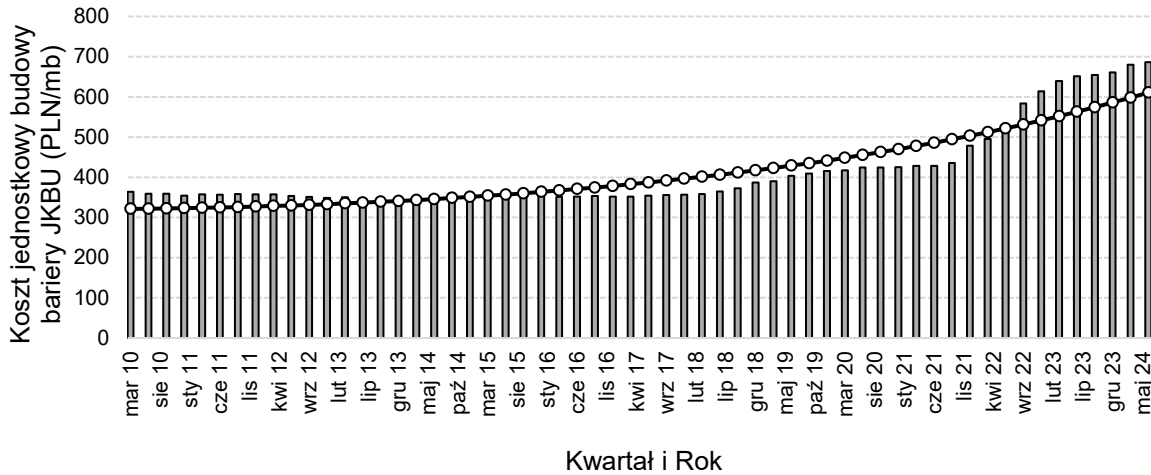


Rys. 6.21 Wskaźnik kosztów demontażu a) histogram b) skumulowany rozkład

Źródło: Opracowanie własne

6.5.2.3. Prognozowanie zmian kosztów budowy barier ochronnych

W celu określenia wielkości zmiany jednostkowych kosztów budowy w czasie przeprowadzono analizę dla okresu od 1 kwartału 2010 roku do 2 kwartału 2024 roku. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdza się, że widoczny jest ogólny trend wzrostowy jednostkowych kosztów budowy barier ochronnych w czasie (rys. 6.22).



Rys. 6.22 Zmiana jednostkowych kosztów budowy barier stalowych w latach 2010–2024

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie jednostkowych kosztów budowy barier wyznaczono wskaźnik zmiany kosztów barier $WSKB$ zgodnie ze wzorem 6.2, który umożliwia przeliczenie jednostkowych kosztów barier z roku bazowego 2018.

$$WSKB = \frac{JKBU_i}{JKBU_{2018}} \quad (6.2)$$

gdzie:

$WSKB$ – wskaźnik zmiany kosztów (korekcyjny) (–),

$JKBU_i$ – jednostkowy koszt barier w i -tym roku analizy (PLN/mb),

$JKBU_{2018}$ – jednostkowy (bazowy) koszt barier w 2018 roku (PLN/mb).

Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowanych modeli zmian kosztów barier (tab. 6.15) stwierdza się, że:

1. Opracowane modele na wskaźniki zmian kosztów budowy barier $WSKB$ charakteryzowały się skorygowanym współczynnikiem determinacji na poziomie $R_{sk}^2 = 0,64–0,84$.
2. Zmiennymi niezależnymi wpływającymi na wzrost współczynnikiem determinacji R_{sk}^2 oraz redukcję błędu średniokwadratowego $RMSE$ są produkt krajowy brutto na mieszkańca $JPKB$, rok analizy T , wydatki na drogi publiczne INW , wskaźnik inflacji z roku wcześniejszego CPI .
3. Najlepsze dopasowanie danych do rzeczywistych uzyskano w przypadku zastosowania funkcji wykładniczej.

Tab. 6.15 Zestawienie wybranych modeli wskaźnika zmian kosztów budowy barier ochronnych WSKB

Model	R ²	R ² _{sk}	RMSE	MAD	AIC	Nr
$WSKB = \exp(-0,562 + 0,012 \cdot JPKB)$	0,804	0,789	0,102	0,082	-66,6	6.3
$WSKB = \exp(-0,194 + 0,040 \cdot (T - 2009))$	0,640	0,612	0,138	0,110	-57,5	6.4
$WSKB = \exp(-0,353 + 0,092 \cdot INW)$	0,840	0,827	0,073	0,054	-77,7	6.5
$WSKB = \exp(-0,407 + 0,108 \cdot CPI)$	0,767	0,749	0,150	0,108	-53,0	6.6

Źródło: Opracowanie własne

Modelem najlepiej opisującymi dane rzeczywiste dla zmiennej zależnej *WSKB* jest model opisany równaniem 6.5. Model ten jest rekomendowany do korekty kosztów budowy barier ochronnych.

6.5.3. Koszty infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu drogowego

Na podstawie informacji z bazy cenowej BISTYP przeanalizowano jednostkowe koszty budowy infrastruktury dla pieszych (DP) oraz pieszych i rowerów (DPR) z lat 2014–2024. W analizowanym okresie wszystkie inwestycje charakteryzowały się podobnym średniorocznym tempem wzrostu kosztów *WWK* (tab. 6.16). W przeciągu 11 lat jednostkowe koszty budowy zwiększyły się prawie dwukrotnie. Najwyższymi jednostkowymi kosztami budowy charakteryzuje się chodnik z kanalizacją deszczową, którego jednostkowy koszt jest prawie 4-krotnie wyższy niż chodnika z kostki betonowej.

Tab. 6.16 Zestawienie jednostkowych kosztów budowy infrastruktury dla pieszych i rowerzystów z lat 2014–2024 z IV kwartału

Identyfikator	Rodzaj urządzenia	Rodzaj inwestycji	Koszt jednostkowy budowy urządzeń dla pieszych i rowerów			Współczynnik średniorocznego tempa wzrostu kosztów <i>WWK</i>
			JKPR _{min}	JKPR _{max}	JKPR _{sr}	
			PLN/m ²	PLN/m ²	PLN/m ²	-
BCOID.1.025	DPR	Chodnik dla pieszych ze ścieżką rowerową	176,53	319,64	223,90	1,061
BCOID.1.028	DP	Chodnik dla pieszych z kostki betonowej	144,53	266,09	185,01	1,063
BCOID.1.040	DP	Chodnik z kanalizacją deszczową	526,01	1001,66	687,73	1,061
BCOID.1.043	DPR	Ścieżka pieszo-rowerowa z odwodnieniem	172,35	307,16	215,70	1,059
BCOID.1.062	DPR	Ciąg pieszo-rowerowy	145,65	257,88	181,41	1,059

Źródło: Opracowanie własne na podstawie bazy BISTYP [240]

Na podstawie danych uzyskanych z platformy przetargowej Zarządu Dróg Wojewódzkich [155] przeanalizowano dokładność oszacowania kosztów budowy i remontów dróg dla pieszych *KDP* w województwie warmińsko-mazurskim w kosztorysach inwestorskich.

Do oceny dokładności oszacowania tych kosztów wyznaczono wskaźnik odchylenia kosztów *WKO* liczony jako stosunek rzeczywistych kosztów realizacji inwestycji (budowy lub remontu) *KDP_R* do kosztów zaplanowanych przez zarządcę drogi *KDP_P* ustalonych na podstawie kosztorysów inwestorskich 6.7.

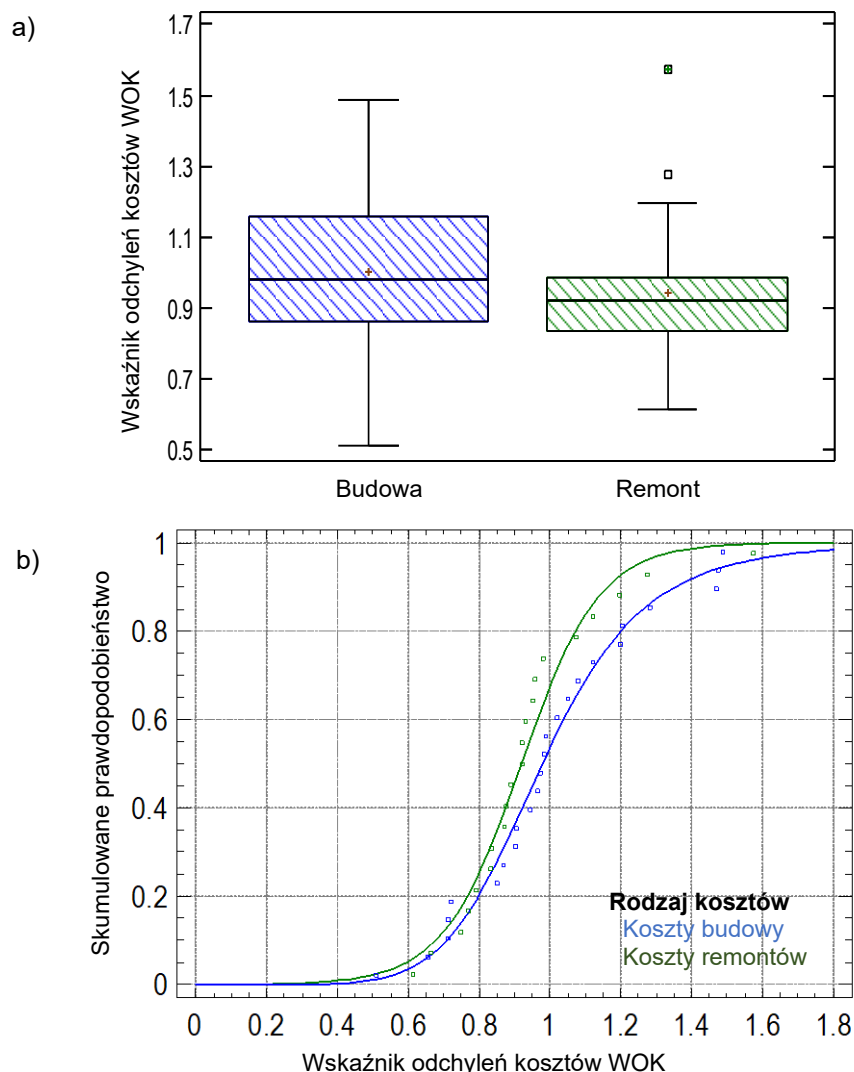
$$WOK_j = \frac{KDP_{R,j}}{KDP_{P,j}} \quad (6.7)$$

gdy:

$WOK_j > 1,0$ – planowane koszty są przekroczone, projekt niedoszacowany,

$WOK_j < 1,0$ – rzeczywiste koszty są mniejsze od planowanych, projekt przeszacowany.

Na rys. 6.23 przedstawiono porównanie wykresów pudełkowych oraz dystrybuant empirycznych wskaźnika odchylenia kosztów budowy i kosztów remontu dróg dla pieszych WOK dla prawie 60 inwestycji.



Rys. 6.24 Porównanie wskaźnika odchylenia kosztów budowy i remontu dróg dla pieszych WOK a) wykres pudełkowy b) dystrybuant empiryczna

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie prowadzonej analizy wskaźnika WKO stwierdzono, że:

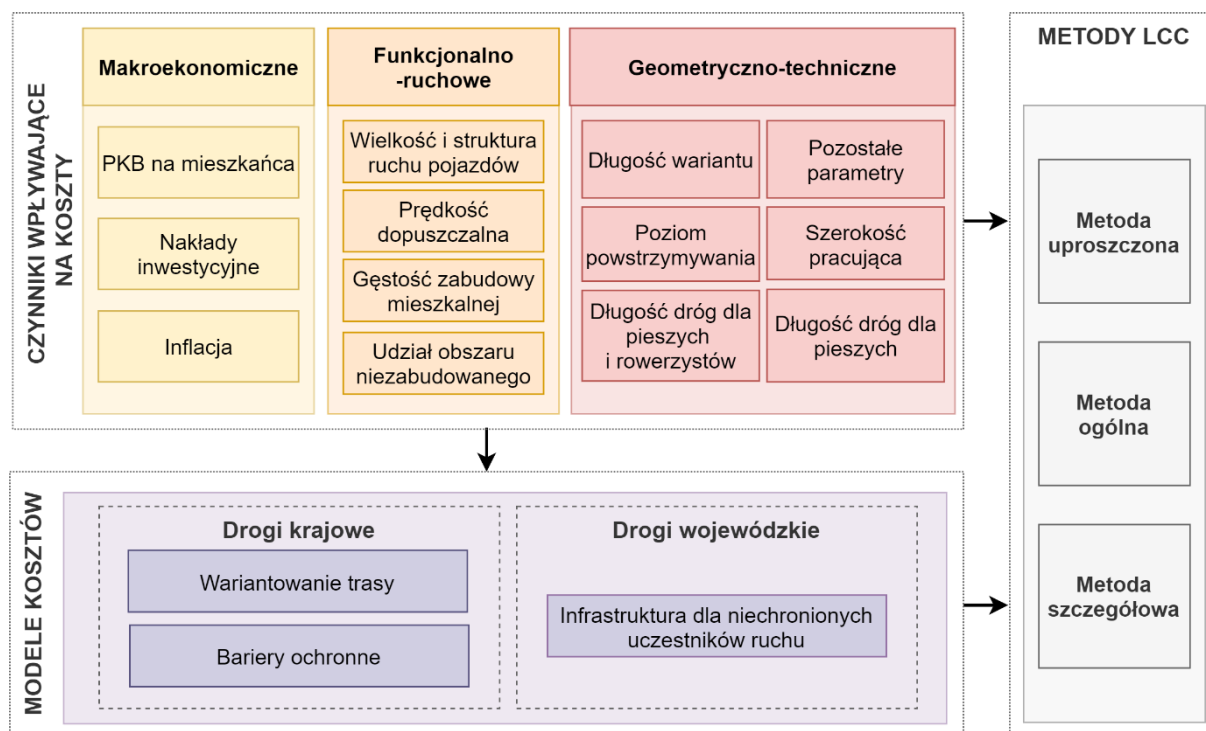
- rzeczywiste koszty budowy dróg dla pieszych nie przekraczały kosztów planowanych w 55% przypadków, a koszty remontów w 70 % analizowanych inwestycji drogowych,
- mediana wskaźnika odchylenia dla kosztów budowy $WKO = 0,98$ a dla remontów $WKO = 0,92$ co oznacza, że średni rzeczywisty koszt budowy jest zbliżony do kosztu planowanego,
- najmniejszy rzeczywisty koszt budowy chodnika był prawie 2-krotnie niższy niż koszt planowany ($WOK = 0,51$), a rzeczywisty koszt remontu chodnika był ponad 1,5-krotnie niższy niż koszt planowany ($WOK = 0,61$).

7. MODELOWANIE SKŁADOWYCH KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA WYBRANYCH ELEMENTÓW INFRASTRUKTURY DROGOWEJ

7.1. Wprowadzenie

Szacowanie kosztów cyklu życia stanowi jedno z kluczowych narzędzi wspierających proces podejmowania decyzji inwestycyjnych w infrastrukturze drogowej. W zależności od zakresu i celu analizy metody LCC mogą przyjmować postać uproszczoną lub złożoną, uwzględniającą szczegółowe składowe koszty oraz czynniki wpływające na ich zmienność w czasie. Szczegółowość stosowanego podejścia jest ściśle związana z dostępnością danych i fazą cyklu życia inwestycji. W dotychczas prowadzonych badaniach podkreśla się znaczenie zarówno kosztów ponoszonych w początkowych etapach cyklu życia [18], [242] jak i w trakcie eksploatacji i użytkowania [76], [214].

Na koszty cyklu życia wpływa szereg czynników, które można pogrupować na trzy główne grupy: makroekonomiczne, funkcjonalno-ruchowe i geometryczno-techniczne. Schematyczne zestawienie głównych grup czynników wpływających na koszty cyklu życia oraz ich powiązanie z typami modeli przedstawiono na rys. 7.1.



Rys. 7.1 Schemat czynników wpływających na składowe koszty w metodach LCC

Źródło: Opracowanie własne

W procesie budowy modeli składowych kosztów cyklu życia, czynniki te pełnią rolę zmiennych objaśniających opisujących zależność między cechami infrastruktury a składowymi kosztami. Procedura budowy modeli została oparta m.in. na założeniach wynikających z koncepcji metody szacowania kosztów cyklu życia (rozdział 4), opracowanych baz danych dotyczących kosztów i funkcjonowania wybranych elementów infrastruktury drogowej (rozdział 5) oraz wyników przeprowadzonych badań (rozdział 6). Opracowane modele podzielono na trzy grupy:

- modele kosztów wariantów lokalizacyjnych tras,
- modele kosztów barier drogowych,

- modele kosztów infrastruktury niechronionych uczestników ruchu drogowego.

Wyniki uzyskane w niniejszym rozdziale stanowią podstawę do opracowania metod szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej oraz realizują założony cel naukowy CN2 obejmujący opracowanie matematycznych modeli wybranych składowych kosztów cyklu życia: tras dróg krajowych i drogowych barier ochronnych na drogach krajowych oraz infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu na drogach wojewódzkich, ze szczególnym uwzględnieniem kosztów zdarzeń drogowych.

7.2. Metodyka budowy modeli składowych kosztów cyklu życia

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie metodyki budowy modeli składowych kosztów cyklu życia elementów infrastruktury drogowej. Modele te zostały opracowane w odniesieniu do poszczególnych grup kosztów: budowy, eksploatacji czy utrzymania stanowiących etapy cyklu życia drogi, z wykorzystaniem zebranych danych i analiz przedstawionych w rozdziałach 5 – 6.

Procedura budowy modeli składowych kosztów cykl życia inwestycji drogowych obejmuje następujące etapy:

1. Definiowanie celu badań.
2. Dobór zmiennych niezależnych.
3. Dobór kształtu funkcji aproksymującej.
4. Walidacja i weryfikacja modeli.

7.2.1. Definiowanie celu

Podstawowym krokiem w procesie budowy modeli jest zdefiniowanie celu prowadzonych badań oraz ich zakresu. W związku z tym konieczne jest zrozumienie kontekstu, charakteru analizowanego zjawiska oraz czynników, które na niego wpływają. Zastosowanie wyłącznie podejścia formalnego do procesu modelowania, opartego jedynie na analizie danych bez uwzględnienia ich znaczenia merytorycznego, może skutkować opracowaniem niepoprawnego modelu [87].

W kontekście niniejszej pracy celem budowy modeli jest opracowanie składowych kosztów cyklu życia dla wybranych elementów infrastruktury drogowej, które umożliwiają identyfikację kluczowych czynników wpływających na ich koszty. Zakres prowadzonych badań jest zdefiniowany z jednej strony poprzez przyjęte założenia w koncepcji metody szacowania kosztów cyklu życia (przedstawione w rozdziale 4), obejmujące różne elementy infrastruktury, różne etapy stosowania metod LCC, a z drugiej strony przez dostępność odpowiednich zbiorów danych. Opracowane składowe modele kosztów znajdą zastosowanie w metodach LCC o różnym stopniu dokładności i różnych wymaganiach dotyczących wielkości zbiorów danych wejściowych.

Na podstawie powyższych założeń zidentyfikowano zmienne zależne, które stanowią modelowane składowe koszty cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej.

7.2.2. Dobór zmiennych niezależnych

Po zidentyfikowaniu zmiennych zależnych następnie dobrano najbardziej istotne zmienne niezależne wykorzystując czteroetapową procedurę ich doboru.

Etap I. W pierwszym etapie zidentyfikowano zmienne niezależne z podziałem na grupy danych: jakościowe oraz ilościowe. Następnie dane jakościowe poddawano procesowi standaryzacji w celu

uzyskania danych ilościowych. Ostatecznym krokiem w etapie I było opracowanie podstawowych charakterystyk zawierających podstawowe statystyki poszczególnych zmiennych (wartość minimalna, maksymalna, średnia, mediana, współczynnik zmienności).

Etap II. W kolejnym etapie prac przeprowadzono wstępną eliminację mało istotnych zmiennych. Jako kryterium eliminacji przyjęto wskaźnik zmienności $V = 5,0\%$. Do dalszego etapu prac przyjęto tylko te czynniki, dla których wskaźnik zmienności był większy niż przyjęta wartość graniczna. W przypadku wystąpienia zmiennych mniejszych od wartości granicznej były one usuwane z uwagi na to, że charakteryzowały się niewielkim rozrzutem danych wokół średniej.

Etap III. W dalszym etapie prac określono siły współzależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi. W celu określenia siły współzależności wykorzystano współczynnik korelacji liniowej Pearsona R oraz nieliniowej Spearmana R_s [138]. Współczynnik Pearsona umożliwia określenie zależności liniowej pomiędzy badanymi zmiennymi. Natomiast współczynnik rang Spearmana w przeciwieństwie do współczynnika Pearsona jest bardziej odporny na odstające wartości oraz nieliniowe zależności.

Współczynniki R oraz R_s mogą przyjmować wartości z przedziału $[-1; 1]$, gdzie uzyskana wartość 0,0 określa brak występowania korelacji, a wartości bliskie $-1,0$ lub $1,0$ świadczą o silnej korelacji. Siłę zależności podzielono na cztery klasy, które przedstawiały siłę związku pomiędzy zmiennymi: bardzo silna i silna korelacja ($|R|, |R_s| \geq 0,7$), znaczna ($0,5 \leq |R|, |R_s| < 0,7$), średnia i mała ($0,2 \leq |R_s| < 0,5$) oraz brak lub korelacja znikoma ($|R|, |R_s| < 0,2$). W celu uniknięcia nadmiarowości przyjęto, że w przypadku występowania korelacji silnej lub bardzo silnej korelacji między zmiennymi jedna z nich musi zostać odrzucona z modelu kosztów.

Etap IV. W kolejnym kroku określono siłę zależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi i zależnymi. W tym celu ponownie zastosowano współczynnik korelacji liniowej i nieliniowej, z podziałem na cztery klasy sił współzależności jak to miało miejsce w etapie III.

7.2.3. Dobór kształtu funkcji aproksymującej

Istotnym krokiem w procesie budowy matematycznych modeli składowych kosztów cyklu życia elementów infrastruktury drogowej jest wybór postaci analitycznej modelu. Etap ten ma istotne znaczenie w jakości odzwierciedlenia zależności między zmiennymi zależnymi i niezależnymi. Dobór kształtu funkcji aproksymującej powinien uwzględniać charakter analizowanych danych empirycznych, ich rozrzut oraz oczekiwany sposób zmiany zmiennej objaśnianej w zależności od parametrów wejściowych. Powszechnie przyjmuje się, że zastosowanie zbyt prostej funkcji może prowadzić do pominięcia istotnych zależności między zmiennymi, natomiast nadmiernie skomplikowany model może skutkować jego przeuczeniem (ang. overfitting). W kontekście opracowywania metody LCC istotne jest zatem indywidualne dopasowanie kształtu funkcji do każdej ze składowych kosztów.

Ze względu na nieliniowy charakter wielu zależności występujących w składowych kosztach cyklu życia, do ich modelowania zastosowano uogólnione modele regresji liniowe (GLM – Generalized Linear Models). Modele te, mimo liniowości względem parametrów, umożliwiają odwzorowanie nieliniowych relacji między zmiennymi dzięki zastosowaniu odpowiednich funkcji wiążących oraz elastycznego doboru rozkładów zmiennej objaśnianej. Modele GLM są powszechnie stosowane m.in. w modelowaniu parametrów wpływających na wielkość kosztów ponoszonych na etapie eksploatacji takich jak liczba zdarzeń [173], długość uszkodzeń [121] czy liczba i rodzaj ofiar [207]. W przypadku tych kosztów można

przyjąć, że dla i -tej obserwacji oczekiwana wartość kosztów μ_i będzie zależna od wartości zmiennych objaśniających $X_{i,j}$ poprzez funkcję wiążącą g , zgodnie z ogólną postacią uogólnionego modelu regresji liniowej 7.1.

$$g(\mu_i) = \beta_o + \sum_{j=1}^n \beta_j \cdot X_{i,j} \quad (7.1)$$

Na podstawie analizy literatury oraz rozkładów składowych kosztów cyklu życia przyjęto do dalszych prac następujące formy odwrotności funkcji wiążących, czyli modele opisu składowych kosztów Y w postaci funkcji:

- Funkcja wykładnicza o ogólnej postaci opisanej równaniem 7.2.

$$Y = \exp \left(\beta_o + \sum_{j=1}^n (\beta_j \cdot X_j) \right) \quad (7.2)$$

- Funkcja potęgowa o ogólnej postaci opisanej równaniem 7.3.

$$Y = \beta_o \cdot \prod_{j=1}^n (X_j^{\beta_j}) \quad (7.3)$$

- Funkcja potęgowo-wykładnicza o ogólnej postaci opisanej równaniem 7.4

$$Y = x_o^\alpha \cdot \exp \left(\beta_o + \sum_{j=1}^n (\beta_j \cdot X_j) \right) \quad (7.4)$$

7.2.4. Walidacja i weryfikacja modeli

W niniejszym podrozdziale przedstawiono metodykę oceny składowych modeli kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej. Przyjęcie odpowiedniej metodyki pełni ważną rolę w procesie oceny dokładności i weryfikacji opracowanych metod oraz wpływa na dokładność metod szacowania kosztów elementów infrastruktury drogowej, w których to modele te są stosowane. Opracowano czteroetapową metodykę oceny modeli obejmującą swym zakresem:

- Etap I – Ocena poprawności przyjętych danych i parametrów modeli;
- Etap II – Analiza podstawowych parametrów oceny modeli;
- Etap III – Analiza pomocniczych parametrów oceny modeli;
- Etap IV – Weryfikacja spełnienia warunków brzegowych.

W etapie I wykonano analizę reszt oraz przeprowadzono test istotności oszacowanych parametrów modelu β_i . Identyfikacja obserwacji odstających została przeprowadzona za pomocą reszt standaryzowanych. Przyjęto za obserwacje odstające te, dla których wartość bezwzględna reszt jest większa niż 2. W celu identyfikacji wartości, które mogłyby mieć potencjalny wpływ na wielkość oszacowanych parametrów modeli obliczono wartości miary odległości Cooka D [38] dla każdej obserwacji. Przyjęto, że obserwacja ma znaczny wpływ na model w przypadku, gdy odległość Cooka D jest większa niż 0,5. Przeprowadzono test istotności, który miał na celu zweryfikowanie czy zmienna niezależna ma istotny wpływ na zmianę wartości zmiennej zależnej. Istotność parametrów modelu β_i została zweryfikowana za pomocą testu Walda [138]. W pierwszym kroku sprawdzono hipotezę zerową ($H_0: \beta_i = 0$) mówiącą o braku wpływu badanej zmiennej na zmienną objaśnianą. Następnie porównano obliczoną wartość statystyki Walda z krytyczną wartością rozkładu Chi-Kwadrat przy założonym poziomie istotności 0,05. W przypadkach, gdy obliczona wartość przekraczała wartość

krytyczną, hipoteza zerowa była odrzucona na korzyść hipotezy alternatywnej ($H_1: \beta_i \neq 0$), czyli parametr β_i był istotny statystycznie [138].

W etapie II oceniono dobroć dopasowania modeli do danych rzeczywistych wykorzystując przy tym skorygowany współczynnik determinacji oraz kryterium informacyjnym Akaike (AIC – Akaike Information Criterion). Skorygowane współczynniki determinacji zastosowano do przeprowadzenia oceny dobroci dopasowania opracowanego modelu regresji do danych obserwowanych. Współczynnik ten umożliwia uwzględnienie liczby zmiennych niezależnych n w modelu oraz liczby obserwacji k wprowadzając tym samym korektę do standardowego współczynnika determinacji. Współczynnik ten przyjmuje wartości z przedziału od 0 do 1. Im wartość R_{sk}^2 jest bliższa 1 wówczas model wyjaśnia zmienność zmiennej Y w większym stopniu. Wartość skorygowanego współczynnika determinacji określana jest za pomocą wzoru 7.5 [138].

$$R_{sk}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \cdot \frac{n-1}{n-k-1} \quad (7.5)$$

Natomiast kryterium informacyjne Akaike [38], służy do porównywania modeli z uwagi na ich dopasowania do danych rzeczywistych oraz do oceny ich złożoności poprzez uwzględnienie liczby zmiennych niezależnych zgodnie ze wzorem 7.6.

$$AIC = 2k + n \cdot \log\left(\frac{RSS}{n}\right) \quad (7.6)$$

W etapie III zastosowano dwa pomocnicze kryteria do oceny dobroci dopasowania opracowanych modeli do danych rzeczywistych: pierwiastek błędu średniokwadratowego oraz średnie odchylenie bezwzględne.

Pierwiastek błędu średniokwadratowego ($RMSE$ – root mean squared error) umożliwia ocenę dokładności dopasowania modelu do danych rzeczywistych poprzez obliczenie pierwiastka z sumy kwadratów różnic pomiędzy wartościami rzeczywistymi a szacowanymi przez model, podzielonej przez liczbę obserwacji. Oblicza się go na podstawie wzoru 7.7.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i - y_i)^2}{n}} \quad (7.7)$$

Natomiast średnie odchylenie bezwzględne (MAD – Mean Absolute Deviation) jest miarą umożliwiającą określenie przeciętnych różnic wartości między danymi rzeczywistymi a prognozowanymi na podstawie modelu (wzór 7.8).

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \mu|}{n} \quad (7.8)$$

Ze zbioru opracowanych modeli wybierano te, które spełniały przyjęte warunki brzegowe i charakteryzowały się w przypadku kryterium podstawowego: najwyższym skorygowanym współczynnikiem determinacji R_{sk}^2 oraz najniższym kryterium informacyjnym Akaike AIC . W kryterium pomocniczym poszukiwano zbioru modeli, które miały mniejsze wartości pierwiastka błędu średniokwadratowego $RMSE$ oraz średniego odchylenia bezwzględnego MAD .

W etapie IV sprawdzano spełnienie warunków brzegowych. Konieczność ich uwzględnienia wynika z potrzeby uzyskania realistycznych wyników oraz zapewnienia możliwości ich praktycznego zastosowania w metodach szacowania kosztów cyklu życia. Na podstawie studiów literatury [210], [112]

oraz własnych analiz przyjęto cztery warunki brzegowe, które powinny spełniać opracowane modele. Zestawienie warunków oraz odpowiadających im przykładów zastosowania przedstawiono w tab. 7.1.

Tab. 7.1 Przyjęte warunki brzegowe modeli

Numer warunku	Warunek brzegowy	Przykład zastosowania
1	$Y \geq 0$	$KBU \geq 0$
2	$Y = 0 \text{ dla } X = 0$	$KNA = 0 \text{ dla } LU = 0$
3	$Y = Y_{max} \text{ dla } X = X_{max}$	$KNA = KNA_{max} \text{ dla } LU = LU_{max}$
4	$Y = Y_{max} \text{ dla } X = X_{opt}$	$GZDB = GZDB_{max} \text{ dla } SDR = SDR_{opt}$

gdzie: Y – zmienna objaśniana, X – zmienna objaśniająca, KBU – koszty budowy, KNA – koszty naprawy, LU – długość uszkodzenia, $GZDB$ – gęstość zdarzeń z barierami, SDR – średniodobowe natężenie pojazdów

Źródło: Opracowanie własne

7.3. Modelowanie kosztów wariantów lokalizacyjnych trasy drogowej

7.3.1. Wprowadzenie

Zgodnie z koncepcją metody szacowania kosztów cyklu elementów infrastruktury drogowej przedstawionej w rozdziale 4 w przypadku wariantów lokalizacyjnych tras drogowych metoda ta znajduje zastosowanie na etapie planowania i wstępnego projektowania drogi. Jej celem jest ułatwienie procesu decyzyjnego związanego z wyborem optymalnego i racjonalnego przebiegu trasy drogowej. Obecnie analiza każdego nowego wariantu wymaga od projektanta przygotowania odrębnego kosztorysu inwestorskiego, co generuje dodatkowe koszty oraz wpływa na wydłużenie etapu projektowania. W rozdziale tym opracowano modele, które umożliwiają szybkie porównanie kosztów wstępnych wariantów lokalizacyjnych drogi bez konieczności opracowywania pełnej dokumentacji kosztorysowej.

7.3.2. Prace wstępne

7.3.2.1. Baza danych

Podstawą do opracowania modeli kosztów wariantów lokalizacyjnych tras drogowych była baza ekonomiczno-kosztowa dotycząca inwestycji realizowanych na drogach krajowych, której analiza danych została przedstawiona w rozdziale 6.5. W bazie tej zebrano informacje dotyczące 280 odcinków dróg krajowych wybudowanych w latach 2006–2023, w których wyodrębniono koszty inwestycyjne oraz czynniki wpływające na ich zmienność.

7.3.2.2. Identyfikacja zmiennych zależnych

Na podstawie opracowanej bazy danych i przyjętych celów badawczych zidentyfikowano zmienną zależną dotyczącą wielkości kosztów planowania i projektowania różnych wariantów tras – koszty inwestycyjne KIN .

Poprzez koszty inwestycyjne KIN należy rozumieć całkowite koszty ponoszone w związku z budową drogi. W analizowanym zbiorze danych zmienna ta obejmowała przypadki o zróżnicowanej skali kosztów od niewielkich inwestycji rzędu 0,02 mld PLN, aż po odcinki dróg o wartości 2,15 mld PLN. Średnia wartość kosztów inwestycyjnych wyniosła 0,54 mld PLN, przy stosunkowo wysokim poziomie

rozproszenia danych (odchylenie standardowe 0,36 mld PLN), co wskazuje na dużą zmienność analizowanych inwestycji.

7.3.2.3. Dobór zmiennych niezależnych i kształtu funkcji aproksymującej

W ramach prowadzonych prac wstępnych zidentyfikowano zmienne niezależne wpływające na koszty wariantów lokalizacyjnych tras drogowych na drogach krajowych. Wszystkie analizowane zmienne niezależne miały charakter ilościowy, w związku z czym nie było potrzeby wykonywania standaryzacji danych jakościowych. Podstawowe charakterystyki statystyczne analizowanych zmiennych zostały przedstawione tab. 7.2 i zawierają informacje o wartościach minimalnych, maksymalnych, średnich, medianach oraz współczynnikach zmienności.

Tab. 7.2 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych kosztów wariantowania tras dróg krajowych

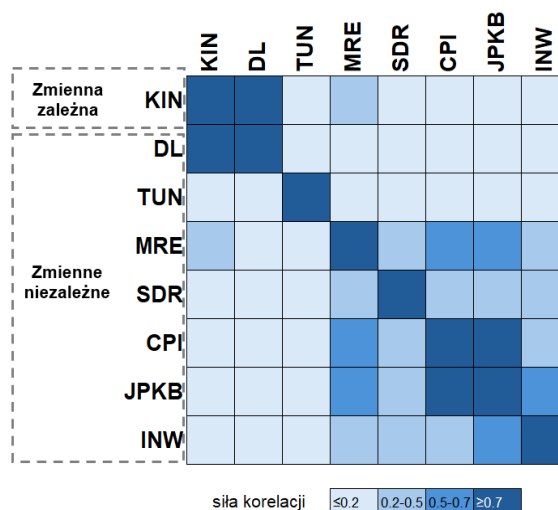
Zmienna niezależna			Charakterystyki statystyczne				
Nazwa	Symbol	Jednostka	Minimum Xmin	Maksimum Xmax	Średnia μ_X	Odch. stand. σ_X	Współ. zmien. v_X (%)
Długość odcinka	<i>DL</i>	(km)	1,70	59,50	14,25	13,25	51,96
Występowanie tunelu	<i>TUN</i>	(1 – występuje 0 – brak)	0,00	1,00	0,02	0,001	679,44
Planowana liczba miesięcy na realizację inwestycji	<i>MRE</i>	(miesiące)	3,00	54,00	27,71	29,00	31,11
Średniodobowe natężenie pojazdów	<i>SDR</i>	(tys. poj./dobę/rok)	1,04	93,10	21,27	18,56	63,16
Wskaźnik inflacji	<i>CPI</i>	(-)	97,30	116,19	100,04	100,00	6,24
Produkt krajowy brutto na mieszkańca	<i>JPKB</i>	(tys. PLN / mk)	25,96	84,79	41,20	37,24	28,09
Wydatki na drogi krajowe	<i>INW</i>	(mld PLN)	1,58	9,38	4,25	4,13	31,16

Źródło: Opracowanie własne

Wszystkie analizowane zmienne charakteryzują się współczynnikiem zmienności większym niż przyjęty graniczny ($v=5,0\%$), w związku z tym wszystkie zmienne zostały przyjęte do dalszej analizy.

W kolejnym kroku zbadano siłę współzależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi, stosując współczynniki korelacji Pearsona oraz Spearmana. Silną i bardzo silną ($|R_s| \geq 0,7$) korelację zaobserwowano pomiędzy wskaźnikiem inflacji *CPI* a produktem krajowym brutto na mieszkańca *JPKB* (rys. 7.2).

W przypadku zależności pomiędzy zmienną zależną, a zmiennymi niezależnymi bardzo silną korelację ($|R_s| \geq 0,7$) zaobserwowano pomiędzy zmienną koszty inwestycyjne *KIN* a długością wariantu *DL* (rys. 7.2).



Rys. 7.2 Macierz siły współzależności między analizowanymi zmiennymi wariantów lokalizacyjnych dróg krajowych

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przyjętej metodyki budowy modeli składowych kosztów cyklu życia inwestycji drogowych oraz wstępnych analiz do opracowania modeli wykorzystano funkcję wykładniczą opisaną ogólnym równaniem 7.9.

$$KIN_j = DL_j \cdot \exp\left(\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot X_{i,k}\right) \quad (7.9)$$

7.3.3. Modele kosztów inwestycyjnych

Do budowy tych modeli kosztów inwestycyjnych wariantów lokalizacyjnych tras drogowych wykorzystano bazę danych ekonomiczno–kosztowych oraz znajdujący się w niej zbiór danych ogólnych dotyczących kosztów wariantów lokalizacyjnych dróg. W tab. 7.3 przedstawiono 5 opracowanych modeli dla zmiennej kosztów inwestycyjnych KIN , które najlepiej dopasowują się do danych rzeczywistych. W procesie budowy tych modeli zastosowano 7 zmiennych niezależnych.

Tab. 7.3 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli KIN dróg krajowych

Modele kosztów budowy tras dróg krajowych						
Zmienne	Wsp. modelu	KIN1	KIN2	KIN3	KIN4	KIN5
	β_0	–3,746	–3,586	–4,447	–3,782	–3,759
DL	β_1					
TUN	β_2		1,305	1,273	1,323	1,291
MRE	β_3					0,005
SDR	β_4	6,202	5,017	0,005	4,270	
CPI	β_5			0,010		
JPKB	β_6				0,009	0,007
INW	β_7		0,037			
R^2		0,455	0,643	0,652	0,669	0,663
R^2_{sk}		0,451	0,639	0,649	0,666	0,659
RMSE		0,264	0,214	0,211	0,206	0,208
MAD		0,171	0,158	0,156	0,152	0,154
AIC		–321,7	–371,4	–374,9	–380,9	–378,6

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowanych modeli planowanych kosztów odcinkach dróg krajowych (tab. 7.3) stwierdza się, że:

1. W zależności od przyjętej liczby zmiennych niezależnych zbudowane modele kosztów inwestycyjnych dla dróg krajowych charakteryzują się współczynnikiem determinacji na poziomie $R^2_{sk}=0,45\text{--}0,67$.
2. Zmiennymi niezależnymi wpływającymi na wzrost współczynnikiem determinacji R^2_{sk} oraz redukcję błędu średniokwadratowego RMSE są w modelu zmienne: długość planowanego wariantu trasy DL, występowanie tunelu TUN, planowana liczba miesięcy na realizację inwestycji MRE, średniodobowe natężenie pojazdów SDR, zmiana wskaźnika inflacji CPI, produkt krajowy brutto na mieszkańca JPKB, wydatki na drogi krajowe INW.
3. Najlepsze dopasowanie danych do rzeczywistych uzyskano w przypadku zastosowania funkcji potęgowo-wykładniczej (model KIN4).

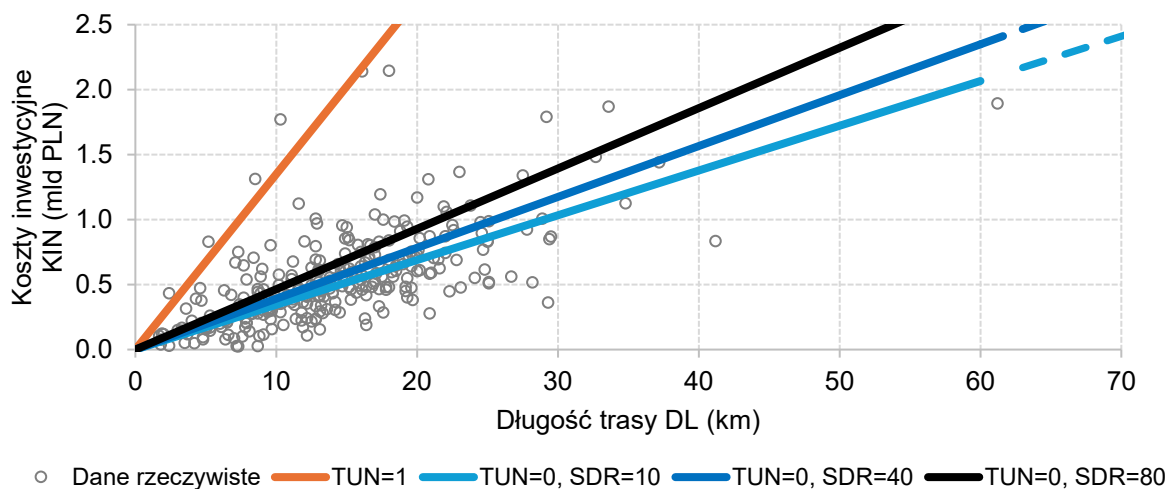
4. Modele osiągające optymalną równowagę pomiędzy złożonością a jakością dopasowania danych obserwowanych do rzeczywistych posiadały 4 parametry. Modele te charakteryzowały się najwyższym parametrem podstawowym R_{sk}^2 oraz najniższym kryterium pomocniczym $RMSE$.

Modelem najlepiej opisującymi koszty inwestycyjne jest model (KIN4) opisany równaniem 7.10. Model ten jest rekomendowany do określania planowanych kosztów budowy dróg krajowych.

$$KIN = DL \cdot \exp(-3,782 + 1,323 \cdot TUN + 4,270 \cdot SDR \cdot 10^{-3} + 0,009 \cdot JPKB) \quad (7.10)$$

Na podstawie analizy rekomendowanego modelu kosztów inwestycyjnych dla dróg krajowych (równanie 7.10) oraz wykresów (rys. 7.3 – rys. 7.5) można stwierdzić, że wraz ze wzrostem wartości wszystkich analizowanych zmiennych niezależnych następuje wzrost kosztów inwestycyjnych. Kluczowy wpływ na jego wzrost ma długość przyjętego do analizy wariantu trasy DL . O istotności wpływu długości drogi na koszty inwestycyjne świadczy m.in. przegląd literatury wykonany przez Simicia [211], z którego wynika, że długość drogi była parametrem stosowanym, aż w 64% publikacjach z lat 1998–2021 dotyczących prognozowania kosztów inwestycyjnych, w związku z tym zasadne jest uwzględnianie długości w procesie szacowania kosztów inwestycyjnych. Zmienna ta była również stosowana we wszystkich modelach kosztów inwestycyjnych opracowanych przez Mahamida [158].

Kolejnymi zmiennymi niezależnymi, które wpływają na wzrost kosztów inwestycyjnych tras drogowych są: obecność tuneli TUN oraz średniodobowe natężenie ruchu pojazdów SDR (rys. 7.3). Mimo, że zmienna dotycząca obecności, długości tuneli nie jest często uwzględniana w modelach kosztów dróg, to uznaje się ją za jedną ze zmiennych najbardziej determinującą koszty całkowite, co potwierdzają m.in. badania ankietowe wykonane przez Simicia [211].



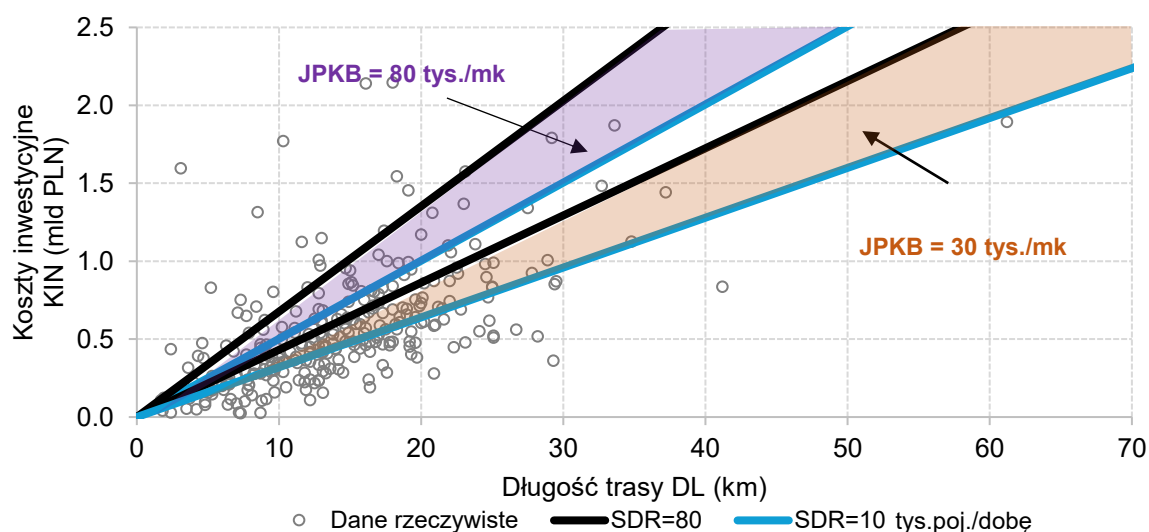
Rys. 7.3 Wykres zależności kosztów inwestycyjnych KIN trasy drogowej od długości trasy DL, występowania tunelu TUN i natężenia ruchu SDR

Opracowanie własne

Z kolei średniodobowe natężenie pojazdów SDR , mimo, że jest rzadko stosowaną zmienną w prognozach kosztów to jest ona bezpośrednio powiązana z przekrojem poprzecznym drogi (m.in. liczbą pasów ruchu, szerokością pobocza). Większe natężenie ruchu zazwyczaj wymusza projektowanie dróg o większej przepustowości, co oznacza więcej pasów ruchu, szersze pobocza i tym samym wyższe koszty budowy. Zależność tą potwierdzają również wytyczne poszerzenia jezdni [116], w których koszty budowy drogi są skorelowane z natężeniem ruchu i przekrojem poprzecznym dróg.

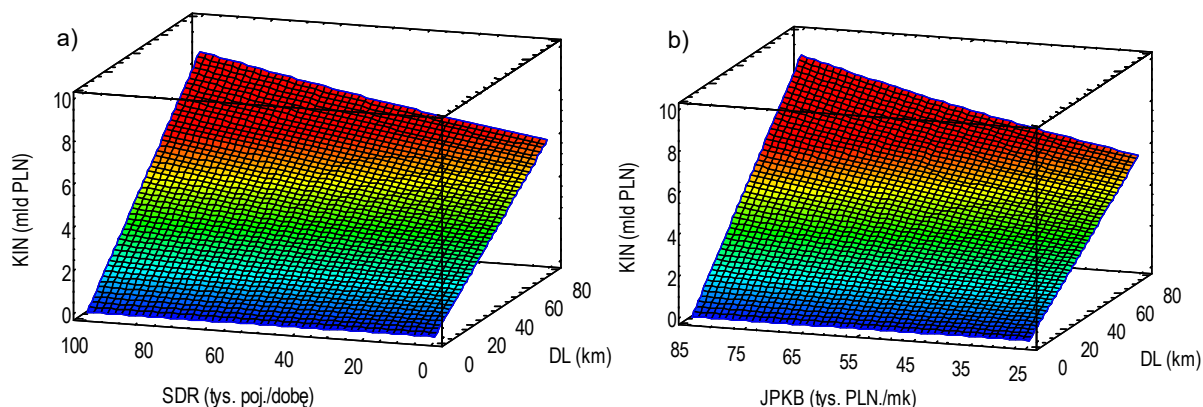
Ostatnim zastosowanym w modelu *KIN* parametrem wpływającym na wzrost kosztów inwestycyjnych jest jednostkowy produkt krajowy brutto w Polsce, liczony dla roku opracowania kosztorysu inwestorskiego (rys. 7.4). Jednostkowy PKB, czyli produkt krajowy brutto na mieszkańca *JPKB*, jest wskaźnikiem ekonomicznym, który ukazuje trendy społeczno-ekonomiczne, w związku z czym jest często stosowany w szacowaniu zmian cen w czasie [63], [103], [245]. W opracowanym modelu pełni on funkcję zmiennej powiązanej z czasem opracowania inwestycji oraz poziomem cen w danym roku.

Na rys. 7.4 przedstawiono zależność kosztów inwestycyjnych od długości trasy przy różnych wartościach *JPKB*, z którego wynika, że wzrost jednostkowego PKB z 30 do 80 tys./mk wiąże się ze wzrostem prognozowanych kosztów inwestycyjnych o prawie 60%.



Rys. 7.4 Wykres zależności kosztów inwestycyjnych *KIN* trasy drogowej od długości trasy *DL*, jednostkowego PKB i natężenia ruchu *SDR*

Opracowanie własne



Rys. 7.5 Wykresy zależności kosztów inwestycyjnych *KIN* trasy drogowej od długości wariantu *DL* oraz a) średniodobowego natężenia pojazdów *SDR* b) produktu krajowego brutto na mieszkańca *JPKB*

Opracowanie własne

7.3.4. Podsumowanie i dyskusja wyników

W rozdziale 7.3 opracowano modele matematyczne umożliwiające szacowanie kosztów inwestycyjnych wariantów lokalizacyjnych dróg krajowych. Zbudowane modele znajdują zastosowanie w metodzie uproszczonej i umożliwiają oszacowanie kosztów bez konieczności przygotowywania pełnej dokumentacji kosztorysowej, co może wpłynąć na ułatwienie oraz przyspieszeniu procesu decyzyjnego na etapie planowania inwestycji drogowych.

Spośród analizowanych zmiennych niezależnych najistotniejsze w modelu *KIN* okazały się: długość odcinka *DL*, występowanie tunelu *TUN*, natężenie ruchu *SDR* oraz jednostkowy produkt krajowy brutto w roku opracowania kosztorysu *JPKB*.

Uzyskane wyniki znajdują potwierdzenie również w literaturze zagranicznej. Przykładowo w badaniach Simicia [211] wykazano, że długość projektowanego odcinka dróg jest jedną z najważniejszych zmiennych wpływającą na koszty inwestycyjne, w związku z tym była dotychczas najczęściej uwzględnianą zmienną przy szacowaniu całkowitych kosztów inwestycyjnych tras.

Długość tras była również zmienną stosowaną w badaniach Mahamida [158], który opracował modele regresji wielorakiej do szacowania koszty budowy dróg. W jednym z uproszczonych modeli autor wykorzystał jedynie długość trasy jako zmienną niezależną, uzyskując wysoki współczynnik determinacji ($R_{sk}^2=0,95$ i $MAPE=18,8\%$). Jednak próba adaptacji tego podejścia do danych pochodzących z dróg krajowych w Polsce wykazała znacznie niższą jakość dopasowania modelu ($R_{sk}^2=0,41$ i $MAPE=50,8\%$), co wykazuje na organiczną możliwość implementacji tego modelu dla warunków krajowych i rodzi konieczność uwzględnienia dodatkowych zmiennych niezależnych w procesie tworzenia modeli kosztów inwestycyjnych.

Jedną z kluczowych zmiennych niezależnych w modelach kosztów inwestycyjnych okazała się obecność tunelu na analizowanym odcinku drogi. Realizacja tego typu obiektów inżynierskich wiąże się z wysokim nakładem inwestycyjnych przez co wpływa na całkowity koszt budowy. Potwierdzają to również wyniki badań ankietowych Simicia [211], w których wskazano, że tunele należą do grupy najsilniejszych determinant kosztów budowy dróg.

Kolejną istotną zmienną niezależną uwzględnioną w modelu *KIN* jest średniodobowe natężenie ruchu *SDR*. Choć zmienna ta nie jest powszechnie stosowana w klasycznych modelach kosztów, wykazuje bezpośredni związek z przekrojem poprzecznym drogi – wyższe natężenie ruchu wymusza zastosowanie większej liczby pasów ruchu, szerszych poboczy czy dodatkowych elementów infrastruktury, co prowadzi do wzrostu całkowitych kosztów budowy. Zależność tą potwierdzają również krajowe wytyczne projektowe [116], w których natężenie *SDR* wskazywane jest jako jedna z przesłanek do poszerzania przekroju jezdni.

Ostatnią zmienną niezależną uwzględnianą w opracowanym modelu jest jednostkowy produkt krajowy brutto w roku opracowania kosztorysu, oznaczony jako *JPKB*. Zmienna ta pełni funkcję wskaźnika czasowego, pozwalającego uwzględnić zmiany cen zachodzące w gospodarce w kolejnych latach. Wzrost *JPKB* wiąże się z ogólnym wzrostem poziomu cen, kosztów pracy co znajduje odzwierciedlenie w kosztach realizacji inwestycji drogowych.

7.4. Modelowanie kosztów barier drogowych

7.4.1. Wprowadzenie

Zgodnie z koncepcją metody szacowania kosztów cyklu życia elementów infrastruktury drogowej, przedstawionej w rozdziale 4, w przypadku drogowych barier ochronnych metody te mogą być stosowane do szacowania: kosztów pojedynczych barier ochronnych oraz kosztów odcinków dróg wyposażonych w drogowe bariery ochronne.

W obecnej praktyce koszty budowy oraz naprawy barier ochronnych szacowane są na podstawie przedmiarów robót oraz jednostkowych cen zawartych w bazach cenowych, takich jak np. BISTYP [240], Sekocenbud [183]. Ograniczeniem jednak tego podejście jest niedostateczna szczegółowość informacji dostępnych w tych zbiorach. Mimo, że bazy te zawierają informacje o jednostkowych cenach barier stalowych z wyróżnieniem ich konstrukcji (bariery jednostronne, dwustronne), to brakuje w nich danych dotyczących barier linowych, których średni koszt budowy w porównaniu do barier stalowych jest niższy. Ponadto bazy te nie uwzględniają zróżnicowania jednostkowych cen barier od ich parametrów technicznych takich jak np. poziom powstrzymywania, szerokość pracująca, rozstaw słupków czy masa konstrukcji. Wobec powyższych ograniczeń konieczne jest opracowanie modeli kosztów budowy, kosztów napraw barier z uwzględnieniem ich parametrów technicznych, które mogą być zastosowane w metodzie szacowania kosztów cyklu życia drogowych barier ochronnych.

W metodzie szacowania kosztów cyklu życia barier niezbędne jest również uwzględnienie kosztów ponoszonych przez użytkowników dróg. Obecnie koszty te w Polsce nie są liczone na żadnym etapie życia barier ochronnych. Próby oszacowania kosztów użytkowników dróg generowane przez zdarzenia, uszkodzenia i naprawy barier ochronnych były podjęte m.in. w pracach: Nematiego [177] Karima [238], Richardsa [65], Burbridge’a [31]. W badaniach tych, koszty zdarzeń drogowych były szacowane na dwa sposoby:

1. Określenie prawdopodobieństwa wystąpienia pojedynczego zdarzenia drogowego, ich konsekwencji oraz oczekiwanych kosztów [177], [170].
2. Szacowanie średnich koszt zdarzeń drogowych na odcinkach dróg [238], [65].

W celu uwzględnienia kosztów użytkowników dróg konieczne jest opracowanie modeli zdarzeń drogowych uwzględniających oczekiwany koszt w związku z wystąpieniem pojedynczego uszkodzenia barier ochronnych, które mogą być zastosowane do wyboru barier w newralgicznych miejscach gdzie poziom zagrożeń jest większy niż poziom zagrożeń dominujący dla całego odcinka [197]. Ponadto do szacowania całkowitych kosztów użytkowników dróg konieczne jest opracowanie odrębnych modeli uwzględniających zróżnicowane parametry geometryczne oraz natężenie ruchowe na analizowanych odcinkach dróg. W przypadku pozostałych kosztów użytkowników, takich jak: koszty strat czasu oraz eksploatacji pojazdów, możliwe jest ich szacowanie na podstawie wzorów opisanych w JASPERS [120] oraz przy zastosowaniu modeli opracowanych w ramach projektu RID 3B [198].

7.4.2. Modelowanie kosztów budowy

7.4.2.1. Prace wstępne

Baza danych

Podstawą do opracowania modeli kosztów budowy drogowych barier ochronnych na drogach krajowych była analiza bazy kosztowo-ekonomicznych, których wyniki zostały przedstawione w rozdziale 6.5.2. W bazie tej zebrano informacje pochodzące z baz cenowych Sekocenbud [183], BISTYP [240]. dotyczące barier ochronnych. Dane te zostały następnie rozszerzone o informacje uzyskane od producentów drogowych barier ochronnych oraz firm zajmujących się ich utrzymaniem. Na podstawie opracowanej bazy danych do opracowania modeli kosztów wyselekcjonowano dwa zestawy informacji, które zostały podzielone z uwagi na rodzaj analizowanej bariery:

1. Zbiór danych kosztowych dla barier stalowych.
2. Zbiór danych kosztowych dla barier linowych.

Zbiór danych dla barier betonowych nie został uwzględniony ze względu na niewystarczającą liczbę dostępnych informacji dotyczących kosztów ich budowy, co uniemożliwiło opracowanie wiarygodnych modeli kosztowych dla tego typu barier.

Identyfikacja zmiennych zależnych

Na podstawie opracowanej bazy danych i przyjętych celów pracy zidentyfikowano zmienne zależne kosztów barier ochronnych występujące na etapie ich planowania, projektowania i budowy. W przypadku każdego elementu infrastruktury drogowej wysokość kosztów bezpośrednich zależy od sumy trzech zmiennych: kosztów robocizny, kosztów materiału oraz kosztów najmu sprzętu (wzór 7.11).

$$KBU_k = KR_k + KM_k + KS_k \quad (7.11)$$

gdzie:

KBU_k – koszt budowy k -tego rodzaju bariery ochronnej (tys. PLN/km),

KR_k – koszty robocizny związanej z wykonaniem k -tego rodzaju bariery ochronnej (tys. PLN/km),

KM_k – koszt materiału k -tego rodzaju bariery ochronnej (tys. PLN/km),

KS_k – koszty najmu sprzętu niezbędnego do wykonania k -tego rodzaju bariery ochronnej (tys. PLN/km).

Z powyższego wzoru 7.11 wynika, że koszt budowy bariery KBU_k może być traktowany jako zmienna ogólna, będąca sumą trzech zmiennych szczegółowych KR_k, KM_k, KS_k . Taki podział zmiennych pozwala na dostosowanie poziomu szczegółowości analiz kosztów do dostępnych danych i celów badania. W związku z tym, zmienne zależne uwzględnione w analizie podzielono na dwie grupy:

1. Zmienne ogólne – odnoszące się do całkowitych kosztów budowy barier ochronnych, bez rozbijania ich na poszczególne składniki.
2. Zmienne szczegółowe – uwzględniające podział kosztów na robociznę, materiał i sprzęt.

Zmienne ogólne znajdują zastosowanie przy określaniu całkowitych kosztów budowy barier ochronnych. W modelach tych nie wyróżnia się szczegółowych składowych kosztów budowy barier takich jak: koszty robocizny, sprzętu i materiału. W wyniku prowadzonych prac zidentyfikowano następujące zmienne ogólne: koszty budowy barier stalowych KBU_s oraz koszty budowy barier linowych KBU_l .

Kolejna grupa, czyli zmienne szczegółowe umożliwiają określenie pojedynczych składowych kosztów budowy barier (materiału, robocizny, sprzętu). Modele kosztów materiałów oraz robocizny i sprzętu zostały opracowane na podstawie danych uzyskanych od firm zajmujących się utrzymaniem barier ochronnych oraz ich producentów. Poprzez koszty robocizny i sprzętu rozumie się koszty ponoszone w wyniku prac związanych montażem drogowych barier ochronnych. Koszty robocizny oraz koszty sprzętu stanowią ok. 15,5% całkowitych kosztów budowy. Nieznaczny udział tych składowych w całkowitych kosztach budowy sprawia, że mają one niewielki wpływ na całkowite koszty budowy barier i często nie są wyróżniane przez producentów barier. W związku z tym opracowano modele obejmujące łączne koszty robocizny i najmu sprzętu KRS_i oraz oddzielnie modele dla kosztów materiału KM_i . Analogicznie jak w przypadku zmiennej reprezentującej ogólne koszty budowy zmienne szczegółowe zostały przeanalizowane z podziałem na rodzaj bariery: stalowe, linowe.

Opisy zbiorów danych dla poszczególnych, modelowanych zmiennych zależnych wraz z ich podstawowymi charakterystykami statystycznymi zostały przedstawione w tab. 7.4.

Tab. 7.4 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych zależnych kosztów budowy drogowych barier

Zmienna zależna			Liczba danych	Charakterystyki statystyczne				
LP	Symbol	Jednostka	N	Minimum KXmin	Maksimum KXmax	Średnia μ_{KX}	Odchylenie standardowe σ_{KX}	Współczynnik zmienności v_{KX} (%)
Barierę stalowe								
1	KRS_s	10 tys. PLN / km	62	1,20	8,10	2,89	1,27	44,03
2	KM_s	10 tys. PLN / km	62	7,40	54,50	16,80	8,43	50,17
3	KBU_s	10 tys. PLN / km	100	8,60	66,40	19,82	10,60	53,45
Barierę linowe								
1	KRS_l	10 tys. PLN / km	28	1,70	2,8	2,17	0,30	13,98
2	KM_l	10 tys. PLN / km	28	6,50	15,70	10,18	2,69	26,41
3	KBU_l	10 tys. PLN / km	28	8,40	18,50	12,35	2,99	24,17

Źródło: Opracowanie własne

Dobór zmiennych niezależnych i kształtu funkcji aproksymujących

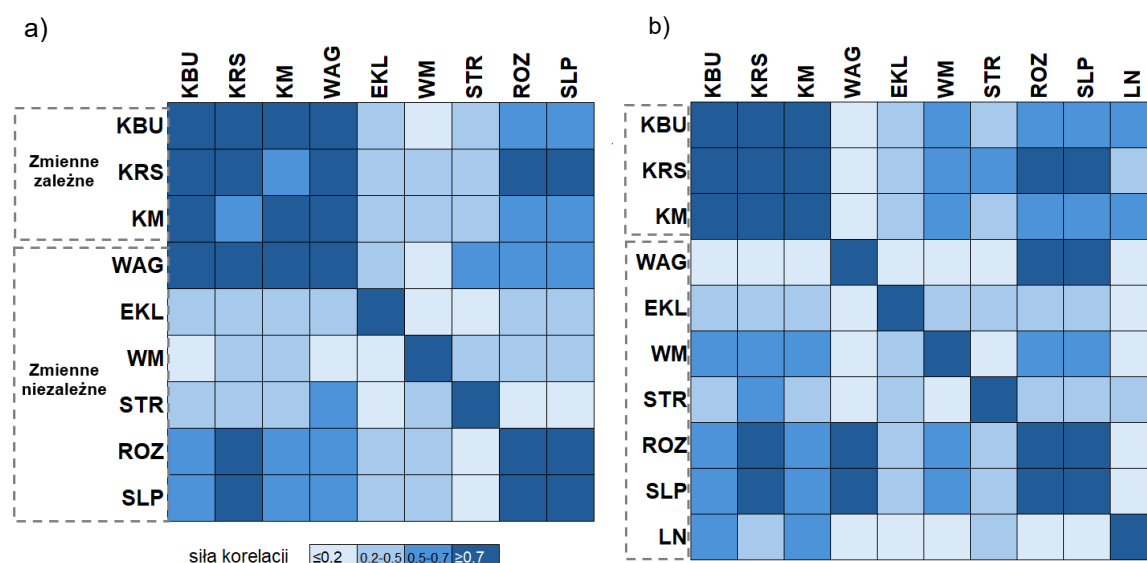
W ramach prowadzonych prac wstępnych zidentyfikowano zmienne niezależne wpływające na ogólne oraz szczegółowe (koszty materiału, robocizny, pracy sprzętu) koszty budowy barier stalowych i linowych. Większość analizowanych zmiennych niezależnych miała charakter ilościowy. Wyjątek stanowiła zmienna określająca typ bariery STR (jednostronna, dwustronna), która miała charakter jakościowy. W celu jej standaryzacji przypisano następujące wartości liczbowe: w przypadku barier dwustronnych 1,00 (wartość odniesienia) oraz dla barier jednostronnych 0,83, odpowiadające średniemu stosunkowi kosztów ich budowy względem barier dwustronnych. Podstawowe charakterystyki statystyczne analizowanych zmiennych zostały przedstawione w tab. 7.5 i zawierają informacje o wartościach minimalnych, maksymalnych, średnich, medianach oraz współczynnikach zmienności.

Tab. 7.5 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych kosztów budowy barier ochronnych

Zmienna niezależna				Charakterystyki statystyczne				
LP	Nazwa	Symbol	Jednostka	Minimum Xmin	Maksimum Xmax	Średnia μX	Odch. stand. σX	Współ. zmien. vX (%)
Barierę stalowe								
1	Masa bariery	WAG	(kg)	14,00	47,00	26,97	26,67	30,71
2	Maksymalna poprzeczna energia kinetyczna znormalizowana	EKL	(kJ)	43,00	725,00	168,05	127,00	74,42
3	Szerokość pracująca znormalizowana	WM	(m)	0,60	2,50	1,36	1,30	30,09
4	Typ bariery	STR	1,00 – dwustronna 0,83 – jednostronna	0,83	1,00	0,87	0,83	9,32
5	Rozstaw słupków	ROZ	(m)	1,00	6,00	2,28	2,00	52,31
6	Liczba słupków	SLP	(sł./100 mb)	17,00	101,00	57,03	51,00	45,21
Barierę linowe								
1	Masa bariery	WAG	(kg)	9,70	13,00	11,69	9,90	30,60
2	Maksymalna poprzeczna energia kinetyczna znormalizowana	EKL	(kJ)	82,00	288,00	168,43	127,00	54,97
3	Szerokość pracująca znormalizowana	WM	(m)	0,80	3,50	1,66	1,70	40,29
4	Rozstaw słupków	ROZ	(m)	1,00	4,00	2,22	2,00	37,19
5	Liczba słupków	SLP	(sł./100 mb)	26,00	101,00	52,89	51,00	41,60
6	Liczba lin	LN	(szt.)	3,00	4,00	3,57	4,00	14,12

Źródło: Opracowanie własne

Wszystkie analizowane zmienne charakteryzują się współczynnikiem zmienności większym niż przyjęty graniczny ($v=5\%$). Analizując siłę współzależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi stwierdza się, że największa zależność występuje pomiędzy zmiennymi bezpośrednio ze sobą powiązanymi. Silną i bardzo silną ($|Rs|\geq 0,7$) korelację zaobserwowano pomiędzy rozstawem słupków w barierze ROZ, a liczbą słupków przypadającą na 100 mb LSP (rys. 7.6a, b).

Rys. 7.6 Macierz siły współzależności między analizowanymi zmiennymi kosztów budowy a) barier stalowych b) barier linowych
Opracowanie własne

Następnie określono siłę zależności pomiędzy zmiennymi zależnymi a zmiennymi niezależnymi. W przypadku barier stalowych bardzo silną korelację ($|R_s| \geq 0,7$) zaobserwowano pomiędzy zmiennymi: koszt budowy *KBU*, koszt robocizny i pracy sprzętu *KRS*, koszt materiału *KM* a masą barier *WAG* (rys. 7.6a). W przypadku barier liniowych taka zależność nie została zaobserwowana co może być uzasadnione tym, że większość z nich charakteryzuje się podobną masą. Dodatkowo bardzo silną korelację zaobserwowano pomiędzy zmiennymi *KRS* a zmiennymi *ROZ* oraz *SLP*. Należy jednak podchodzić ostrożnie do interpretacji wyników w przypadku barier liniowych, ze względu na ograniczoną liczebność próby, która może prowadzić do tłumienia korelacji i zwiększonej wrażliwości na obserwacje odstające.

Na podstawie przyjętej metodyki budowy modeli składowych kosztów cyklu życia barier ochronnych oraz wstępnych analiz do opracowania modeli ogólnych i szczegółowych budowy barier wykorzystano funkcję potęgową. Przykład jej zastosowania dla modeli ogólnych kosztów budowy barier przedstawiono za pomocą równania 7.12.

$$KBU_k = \beta_0 \cdot \prod_{i=1}^n (X_i^{\beta_i}) \quad (7.12)$$

gdzie:

KBU_k – koszty budowy k -tego rodzaju bariery (10 tys. PLN/km),

β_0, β_i – współczynniki wpływu zmiennych objaśnianych na koszty budowy barier,

X_k – zmienne objaśniające koszty budowy barier.

7.4.2.2. Modele ogólne kosztów budowy

Modele ogólne kosztów budowy drogowych barier ochronnych zlokalizowanych na drogach krajowych zarządzanych przez GDDKiA znajdują zastosowanie w metodzie szacowania kosztów cyklu życia barier. Do budowy tych modeli wykorzystano bazę danych ekonomiczno-kosztowych oraz znajdujący się w niej zbiór danych dotyczących kosztów budowy barier stalowych i liniowych, który został opracowany na podstawie informacji od producentów, wykonawców barier oraz biuletynów cen robót drogowych. W tab. 7.6 przedstawiono po 4 modele dla zmiennych zależnych kosztów ogólnych budowy *KBU* barier stalowych oraz barier liniowych, które najlepiej odwzorowują dane rzeczywiste. W procesie budowy modeli barier stalowych zastosowano 6 zmiennych niezależnych, a w przypadku barier liniowych 7 zmiennych niezależnych.

Tab. 7.6 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli *KBU* barier ochronnych stalowych i liniowych

Koszty budowy		bariery stalowe				bariery linowe			
Zmienne	Wsp. modelu	<i>KBU_{s1}</i>	<i>KBU_{s2}</i>	<i>KBU_{s3}</i>	<i>KBU_{s4}</i>	<i>KBU_{l1}</i>	<i>KBU_{l2}</i>	<i>KBU_{l3}</i>	<i>KBU_{l4}</i>
	β_0	0,098	1,989	8,387	0,520	0,023	4,726	2,073	4,309
<i>WAG</i>	β_1	1,626				1,494			
<i>EKL</i>	β_2		0,515	0,284	0,285		0,24	0,210	
<i>WM</i>	β_3		−0,421				−0,593	−0,506	
<i>STR</i>	β_4		1,380	1,447	1,447				
<i>ROZ</i>	β_5			−0,591					−0,311
<i>SLP</i>	β_6				0,602				
<i>LN</i>	β_7							0,739	0,939

Koszty budowy		bariery stalowe				bariery linowe			
Zmienne	Wsp. modelu	KBU _{s1}	KBU _{s2}	KBU _{s3}	KBU _{s4}	KBU _{l1}	KBU _{l2}	KBU _{l3}	KBU _{l4}
R^2		0,935	0,489	0,596	0,596	0,720	0,746	0,921	0,703
R^2_{sk}		0,936	0,463	0,574	0,574	0,710	0,726	0,911	0,663
RMSE		5,595	7,087	6,415	6,417	2,025	1,563	0,891	1,491
MAD		16,131	6,501	6,694	6,695	2,590	2,328	2,331	1,965
AIC		65,9	111,7	103,1	103,1	21,5	15,5	3,3	10,8

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowanych modeli ogólnych kosztów budowy barier (tab. 7.6) stwierdza się, że:

1. W zależności od przyjętej liczby zmiennych niezależnych opracowane modele charakteryzowały się skorygowanym współczynnikiem determinacji na poziomie $R^2_{sk}=0,46-0,94$,
2. Zmiennymi niezależnymi o największym wpływie (ustalonymi na podstawie skorygowanego współczynnika determinacji R^2_{sk} , błędu średniokwadratowego RMSE analizowanych modeli) są w przypadku:
 - kosztów budowy barier stalowych KBU_s zmienna: masa bariery WAG,
 - kosztów budowy barier linowych KBU_l zmienne: energia kinetyczna poprzeczna EKL, szerokość pracująca WM oraz liczba lin LN.
3. Zmienne, które wpływają na zmianę kosztów ogólnych budowy KBU wpływają również na zmianę kosztów szczegółowych budowy – kosztów materiału KM oraz robocizny i pracy sprzętu KRS.
4. Najlepsze dopasowanie do danych rzeczywistych uzyskano w przypadku zastosowania funkcji potęgowej, tak jak to miało miejsce przy modelach szczegółowych kosztów budowy barier.
5. Modele osiągające optymalną równowagę pomiędzy złożonością, a jakością dopasowania do danych rzeczywistych posiadały 2–4 parametry. Modele te charakteryzowały się najwyższym parametrem podstawowym R^2_{sk} oraz najniższymi kryteriami pomocniczymi: RMSE oraz kryterium informacyjnym Akaike AIC.

Modelem matematycznym najlepiej odzwierciedlającym całkowite koszty budowy jest w przypadku barier stalowych model uwzględniający wysokość nakładów od masy bariery (równanie 7.13), a w przypadku barier linowych model uwzględniający poziom powstrzymywania, szerokość pracującą oraz liczbę lin (równanie 7.15). W przypadku braku informacji o masie barier stalowych można do oszacowania ich kosztów budowy przyjąć model uwzględniający posiadany zbiór danych np. poziom powstrzymywania i szerokość pracująca (równanie 7.14).

Koszty budowy barier stalowych KBU_s (10 tys. PLN/km) opisane wzorami:

$$KBU_s = 0,098 \cdot WAG^{1,626} \quad (7.13)$$

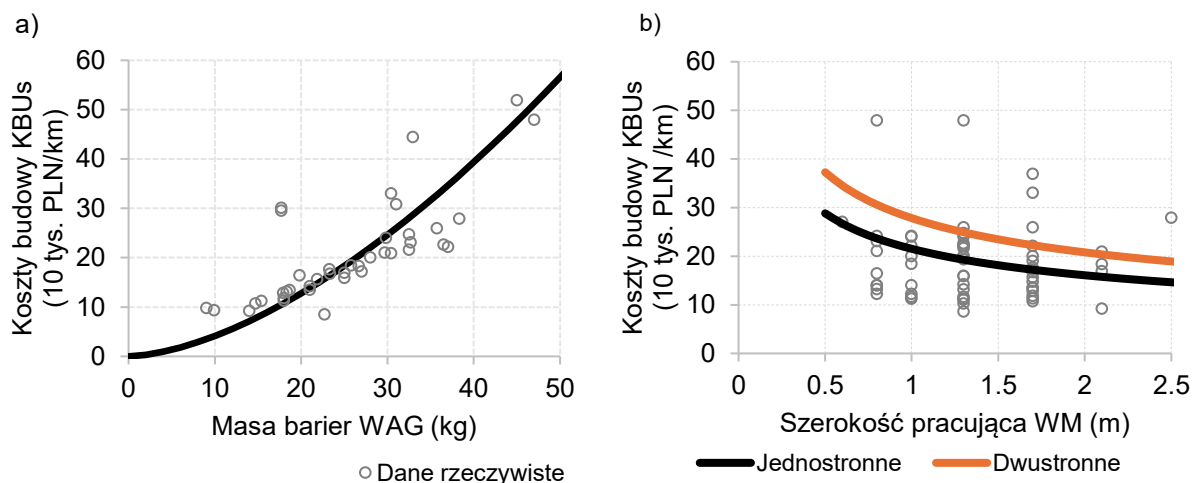
lub

$$KBU_s = 1,989 \cdot EKL^{0,515} \cdot WM^{-0,421} \cdot STR^{1,380} \quad (7.14)$$

Koszty budowy barier linowych KBU_l (10 tys. PLN/km) opisane wzorem:

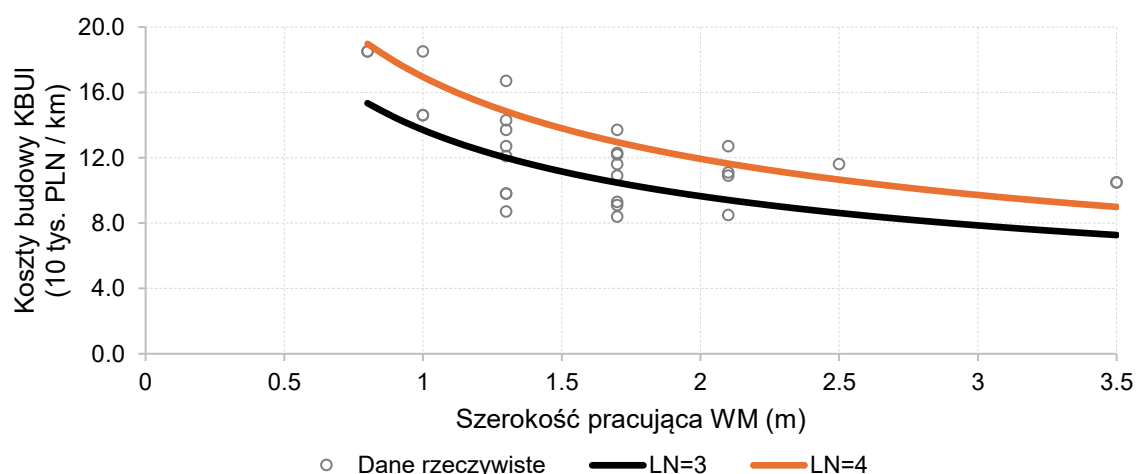
$$KBU_l = 2,073 \cdot EKL^{0,210} \cdot WM^{-0,506} \cdot LN^{0,739} \quad (7.15)$$

Na podstawie analizy modeli kosztów budowy barier stalowych i linowych (równania 7.13 – 7.15) oraz wykresów (rys. 7.7 – rys. 7.9) można stwierdzić, że wraz ze wzrostem masy barier stalowych WAG wzrasta ich koszt budowy KBU_s . Analizując parametry techniczne barier widoczne jest, że wraz ze wzrostem maksymalnej energii poprzecznej uderzającego w barierę pojazdu EKL , która reprezentuje poziom powstrzymywania barier, wzrasta koszt budowy barier zarówno stalowych jak i linowych. Natomiast na spadek tych kosztów wpływa zwiększenie szerokości pracującej WM . Zmiennymi wpływającymi na wzrost kosztów budowy barier stalowych jest ich rodzaj (jednostronne, dwustronne) STR , a w przypadku barier linowych liczba lin LN . Wszystkie przedstawione zmienne powiązane są z masą konstrukcji, ilością materiału, robocizną i pracą sprzętu potrzebnego do montażu barier ochronnych. Ze względu na brak w literaturze przedmiotu badań dotyczących budowy modeli kosztów barier ochronnych nie istnieje możliwość bezpośredniego porównania uzyskanych wyników. Jednak uzyskane zależności w opracowanych modelach są zgodne z wynikami analiz przeprowadzonymi w rozdziale 6.



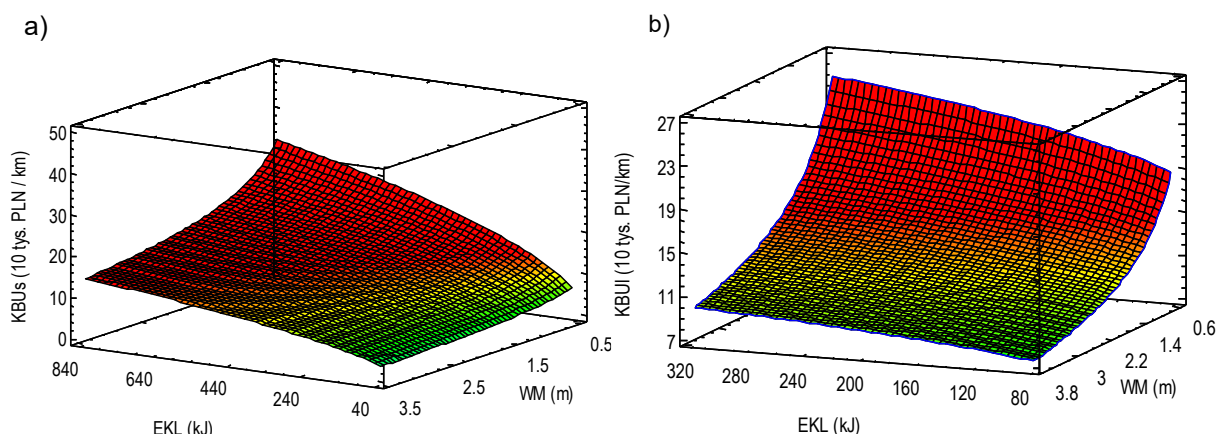
Rys. 7.7 Wykres zależności kosztów budowy barier stalowych od a) ich masy WAG b) szerokości pracującej WM i typu barier

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7.8 Wykres zależności kosztów budowy barier linowych od szerokości pracującej WM i liczby lin LN

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7.9 Wykresy zależności kosztów budowy KBU barier od ich maksymalnej energii kinetycznej poprzecznej EKL oraz szerokości pracującej WM a) bariery stalowe b) bariery linowe

Źródło: Opracowanie własne

7.4.2.3. Modele kosztów materiałów, robocizny i sprzętu

Modele szczegółowe kosztów budowy (kosztów materiałów, robocizny i sprzętu) zostały opracowane dla barier drogowych zlokalizowanych na drogach krajowych zarządzanych przez GDDKiA i znajdujących bezpośrednie zastosowanie w metodzie szacowania kosztów cyklu życia barier. Do budowy tych modeli wykorzystano bazę danych ekonomiczno-kosztową oraz znajdujący się w niej zbiór danych dotyczących szczegółowych kosztów budowy barier stalowych i linowych, który został opracowany na podstawie informacji od producentów, wykonawców barier oraz biuletynów cen robót drogowych. W tab. 7.7 przedstawiono charakterystyki 4 modeli dla kosztów materiałów *KM* oraz 4 modeli dla zmiennej kosztów robocizny i pracy sprzętu *KRS* dla barier stalowych. Charakterystyki modeli kosztów szczegółowych budowy barier liniowych zostały przedstawione w tab. 7.8.

Tab. 7.7 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli KM oraz KRS barier ochronnych stalowych

Koszty barier stalowych		Modele kosztów materiału				Modele kosztów robocizny i sprzętu			
Zmienne	Wsp. modelu	KMs1	KMs2	KMs3	KMs4	KRSs1	KRSs2	KRSs3	KRS4
	β_0	0,082	0,275	6,937	0,447	0,024	0,532	2,119	0,169
WAG	β_1	1,634				1,494			
EKL	β_2		0,540	0,292	0,293		0,395	0,172	0,173
WM	β_3		-0,372				-0,409		
STR	β_4		5,122	1,534	1,534		1,309	1,394	1,395
ROZ	β_5			-0,582				-0,536	
SLP	β_6				0,594				0,547
R^2		0,949	0,501	0,600	0,600	0,720	0,373	0,373	0,493
R^2_{sk}		0,934	0,475	0,579	0,579	0,710	0,340	0,340	0,466
RMSE		5,025	6,105	5,465	5,467	2,025	1,033	1,033	0,929
MAD		17,172	5,654	5,644	5,645	2,590	0,881	0,881	0,881
AIC		45,2	103,6	97,7	97,7	21,5	8,0	8,0	2,2

Źródło: Opracowanie własne

Tab. 7.8 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli KM oraz KRS barier ochronnych linowych

Koszty barier linowych		Modele kosztów materiału					Modele kosztów robocizny i sprzętu				
Zmienne	Wsp. modelu	KMI1	KMI2	KMI3	KMI4	KMI5	KRSI1	KRSI2	KRSI3	KRSI4	KRSI5
	β_0	0,402	3,603	1,436	2,991	0,616	0,095	1,213	0,840	1,582	0,625
WAG	β_1	1,363					1,331				
EKL	β_2		0,260	0,226				0,145	0,132		
WM	β_3		-0,649	-0,546				-0,343	-0,314		
STR	β_4										
ROZ	β_5				-0,336					-0,198	
SLP	β_6					0,341					0,200
LN	β_7			0,825	1,080	1,087			0,333	0,330	0,334
R^2		0,745	0,740	0,920	0,707	0,706	0,737	0,788	0,900	0,652	0,650
R^2_{sk}		0,720	0,720	0,910	0,668	0,696	0,711	0,771	0,887	0,606	0,603
RMSE		3,487	1,424	0,805	1,343	4,487	0,761	0,145	0,102	0,156	0,157
MAD		5,583	2,102	0,211	1,769	3,343	1,131	0,239	0,239	0,196	0,196
AIC		16,1	13,2	0,8	9,2	85,5	0,2	-42,4	-49,4	-24,5	-24,4

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowanych modeli szczegółowych kosztów budowy barier (tab. 7.7, tab. 7.8) stwierdza się, że:

1. Zmienne, które wpływają na zmianę kosztów materiału *KM* wpływają również na zmianę kosztów robocizny i pracy sprzętu *KRS*.
2. W zależności od przyjętej liczby zmiennych niezależnych opracowane modele charakteryzowały się skorygowanym współczynnikiem determinacji na poziomie $R^2_{sk}=0,49-0,95$.
3. Najistotniejszymi zmiennymi niezależnymi (ustalonymi na podstawie skorygowanego współczynnika determinacji R^2_{sk} , błędu średniokwadratowego *RMSE* analizowanych modeli) są w przypadku kosztów materiału *KM* oraz pracy sprzętu *KRS*:
 - barier stalowych zmienna: masa bariery *WAG*,
 - barier linowych zmienna: energia kinetyczna poprzeczna *EKL*, szerokość pracująca *WM* oraz liczba lin *LN*.
4. Najlepsze dopasowanie do danych rzeczywistych uzyskano przy zastosowaniu funkcji potęgowej.
5. Modele osiągające optymalną równowagę pomiędzy złożonością a jakością dopasowania do danych rzeczywistych posiadały od 2 do 4 parametrów. Modele te charakteryzowały się najwyższym parametrem podstawowym R^2_{sk} oraz najniższymi kryteriami pomocniczymi *RMSE* oraz kryterium informacyjnym Akaike *AIC*.

Modelami najlepiej obrazującym dane rzeczywiste dla zmiennych zależnych *KRS* oraz *KM* w przypadku barier stalowych są modele *KMs1* oraz *KRs1* opisane za pomocą równań 7.16, 7.17:

- Koszty materiału barier stalowych *KM* w (tys. PLN/100mb) opisane wzorem:

$$KM_s = 0,082 \cdot WAG^{1,634} \quad (7.16)$$

- Koszty robocizny i pracy sprzętu *KRS* przy montażu barier stalowych w (tys. PLN/100mb) opisane wzorem:

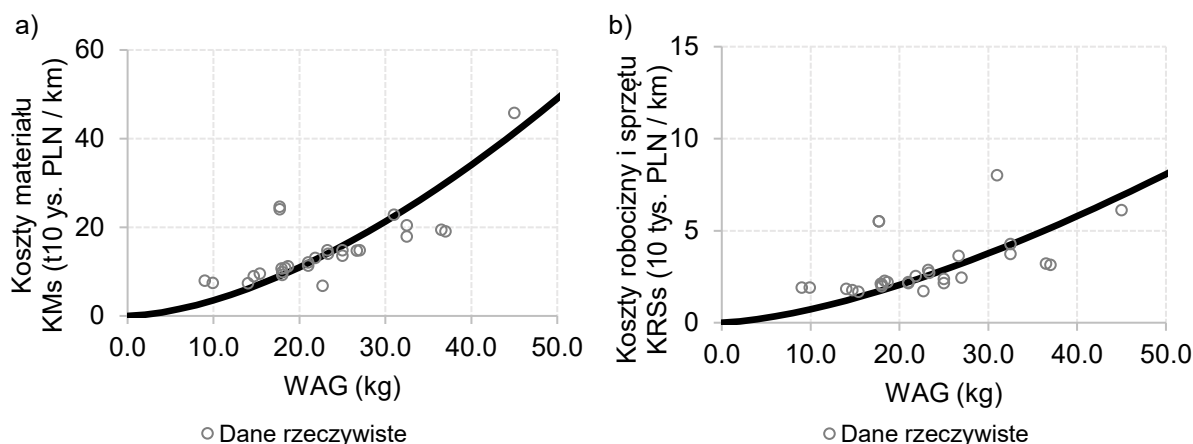
$$KRS_s = 0,024 \cdot WAG^{1,494} \quad (7.17)$$

W przypadku braku informacji o masie barier stalowych można do oszacowania ich szczegółowych kosztów przyjąć modele uwzględniające posiadany zbiór danych np. poziom powstrzymywania i szerokość pracującą. Wówczas koszty materiału bariery stalowych są opisane za pomocą równania 7.18, natomiast koszty robocizny i pracy sprzętu równaniem 7.19.

$$KM_s = 0,233 \cdot EKL^{0,462} \cdot WM^{-0,478} \cdot STR^{1,458} \quad (7.18)$$

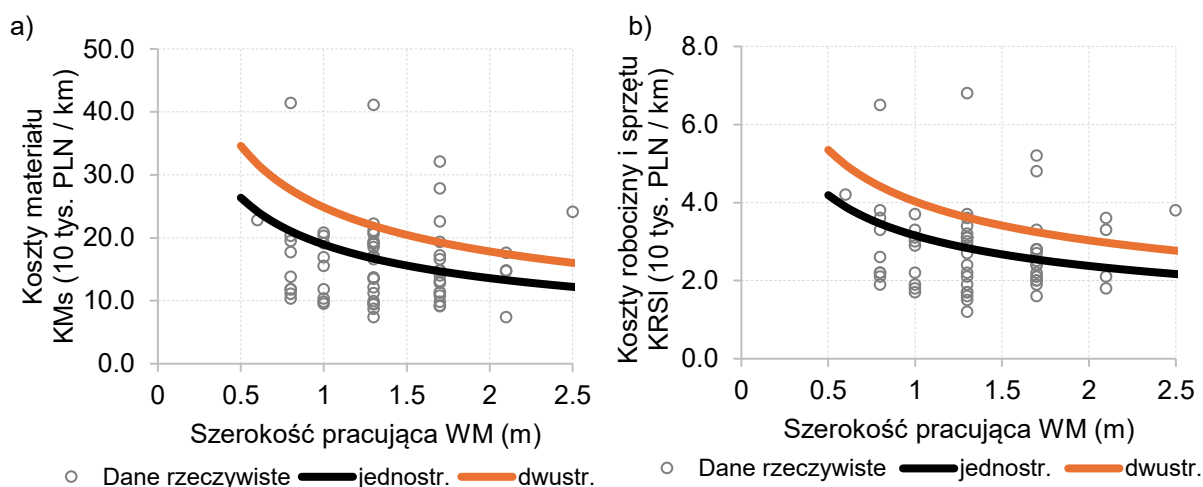
$$KRS_s = 0,532 \cdot EKL^{0,395} \cdot WM^{-0,409} \cdot STR^{1,309} \quad (7.19)$$

Na podstawie analizy modeli szczegółowych kosztów budowy barier stalowych (równania 7.16 – 7.19) oraz wykresów (rys. 7.10, rys. 7.11) można stwierdzić, że tak jak w przypadku ogólnych kosztów budowy wraz ze wzrostem masy barier stalowych WAG , wzrastają ich koszty, a w szczególności: koszty materiału KMs oraz koszty robocizny i pracy sprzętu $KRSs$. Koszty te wzrastają wraz ze wzrostem maksymalnej energii poprzecznej EKL , rodzaju bariery (liczby prowadnic) STR i spadkiem szerokości pracującej WM . Analizując wielkość tych kosztów można stwierdzić, że największy wpływ na całkowite koszty budowy barier mają koszty materiałów, które to są ponad 5-krotnie wyższe niż koszty związane z ich montażem i transportem (koszty robocizny i pracy sprzętu).



Rys. 7.10 Wykres zależności kosztów szczegółowych budowy barier stalowych od ich masy a) koszty materiału KMs b) koszty robocizny i pracy sprzętu $KRSs$

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7.11 Wykres zależności kosztów szczegółowych budowy barier stalowych od szerokości pracującej WM oraz rodzaju bariery STR (jednostronna, dwustronna) a) koszty materiału KMs b) koszty robocizny i sprzętu $KRSs$

Źródło: Opracowanie własne

Modelami najlepiej opisującymi dane rzeczywiste dla zmiennych zależnych KRS oraz KM w przypadku barier linowych są modele opisane za pomocą równań 7.20, 7.21:

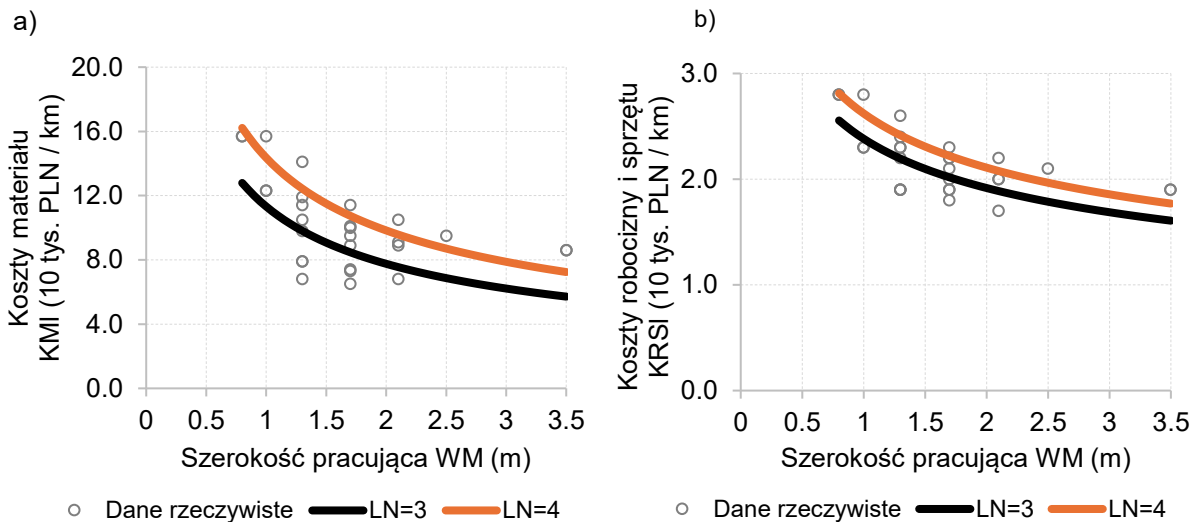
- Koszty materiału barier linowych KM w (10 tys. PLN/km) opisane wzorem:

$$KM_l = 1,436 \cdot EKL^{0,226} \cdot WM^{-0,546} \cdot LN^{0,825} \quad (7.20)$$

- Koszty robocizny, pracy sprzętu i maszyn budowlanych KRS przy montażu barier linowych w (10 tys. PLN/km) opisane wzorem:

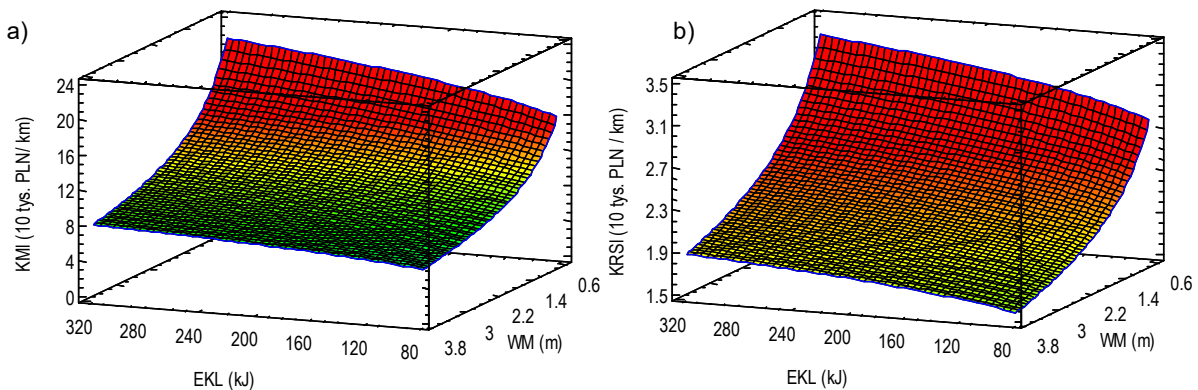
$$KRS_l = 0,840 \cdot EKL^{0,132} \cdot WM^{-0,314} \cdot LN^{0,333} \quad (7.21)$$

Na podstawie analizy rekomendowanych modeli szczegółowych kosztów budowy barier linowych (równania 7.20, 7.21) oraz wykresów (rys. 7.12, rys. 7.13) można stwierdzić, że tak jak w przypadku ogólnych kosztów budowy wraz ze zwiększeniem liczby lin LN oraz maksymalnej energii poprzecznej EKL wzrastają koszty budowy barier (koszty materiału, robocizny i pracy sprzętu). Natomiast na ich spadek wpływa zwiększenie szerokości pracującej WM . Średnie koszty materiału barier stalowych są ponad 4-krotnie wyższe niż koszty związane z ich montażem i transportem (koszty robocizny i pracy sprzętu).



Rys. 7.12 Wykres zależności kosztów szczegółowych budowy barier stalowych od szerokości pracującej WM oraz liczby lin LN
a) koszty materiału KMI b) koszty robocizny i sprzętu $KRSI$

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7.13 Wykresy zależności kosztów szczegółowych budowy barier linowych od ich maksymalnej energii kinetycznej poprzecznej EKL oraz szerokości pracującej WM a) kosztów materiałów KMI b) kosztów robocizny i pracy sprzętu $KRSI$

Źródło: Opracowanie własne

7.4.3. Modelowanie kosztów napraw

7.4.3.1. Prace wstępne

Baza danych

Podstawą do opracowania modeli kosztów napraw drogowych barier ochronnych na drogach krajowych była analiza wyników badań terenowych, których wyniki zostały przedstawione w rozdziale 6.2. Badania terenowe były prowadzone na sieci dróg krajowych o łącznej długości ok. 3000 km przez okres 12 miesięcy. Na podstawie zebranych danych zidentyfikowano koszty napraw dla trzech grup barier: stalowych, linowych oraz betonowych. Dla każdej analizowanej bariery, oprócz jej rodzaju określono również jej parametry techniczne takie jak np. poziom powstrzymywania, szerokość pracująca, rozstaw barier, liczba słupków. Na podstawie opracowanej bazy danych do opracowania modeli kosztów wyselekcjonowano dwa zestawy informacji, które zostały podzielone z uwagi na rodzaj analizowanej bariery:

1. Zbiór danych kosztowych dla barier stalowych,
2. Zbiór danych kosztowych dla barier linowych.

Zbiór danych dla barier betonowych nie został uwzględniony ze względu na niewystarczającą liczbę dostępnych informacji dotyczących kosztów ich naprawy, co uniemożliwiło opracowanie wiarygodnych modeli kosztowych dla tego typu barier. W toku zbierania danych dotyczących naprawy barier betonowych na poligonie badawczym odnotowano zaledwie 13 przypadków uszkodzeń barier betonowych, przy czym 7 z nich nie miało przypisanej wartości kosztowej.

Identyfikacja zmiennych zależnych

Na podstawie opracowanej bazy danych i przyjętych celów pracy zidentyfikowano zmienne zależne kosztów barier ochronnych występujące na etapie ich eksploatacji. Analizowane zmienne zależne zostały podzielone na dwie grupy z uwagi na dwa zbiory danych, które zostały zastosowane do ich analizy:

- Koszty napraw barier stalowych KNA_s ,
- Koszty napraw barier linowych KNA_l .

Poprzez koszty napraw rozumie się koszty ponoszone na etapie eksploatacji związane z wymianą pojedynczych uszkodzonych barier ochronnych w celu zapewnienia parametrów funkcjonalnych drogi.

Charakterystyki modelowanych zmiennych zależnych wraz z ich podstawowymi charakterystykami statystycznymi zostały przedstawione w tab. 7.9.

Tab. 7.9 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych zależnych kosztów napraw drogowych barier

Zmienna zależna			Liczba danych	Charakterystyki statystyczne				
Lp.	Symbol	Jednostka	N	Minimum KXmin	Maksimum KXmax	Średnia μ_{KX}	Odchylenie standardowe σ_{KX}	Współczynnik zmienności v_{KX} (%)
1	KNA_s	(tys. PLN/zd.)	3077	0,15	50,56	4,25	4,20	98,82
2	KNA_l	(tys. PLN/zd.)	188	0,18	23,65	2,95	3,51	118,88

Źródło: Opracowanie własne

Identyfikacja i wybór zmiennych niezależnych

W ramach prowadzonych prac wstępnych zidentyfikowano zmienne niezależne wpływające na koszty naprawy barier stalowych i linowych. Większość analizowanych zmiennych niezależnych miała charakter ilościowy. Wyjątek stanowiła zmienna określająca typ bariery *STR* (jednostronna, dwustronna), która miała charakter jakościowy. W celu jej standaryzacji zastosowano analogiczne podejście jak w przypadku kosztów budowy i przypisano następujące wartości liczbowe: 1,00 dla barier jednostronnych oraz 1,14 w przypadku barier dwustronnych. Podstawowe charakterystyki statystyczne analizowanych zmiennych zostały przedstawione w tab. 7.10.

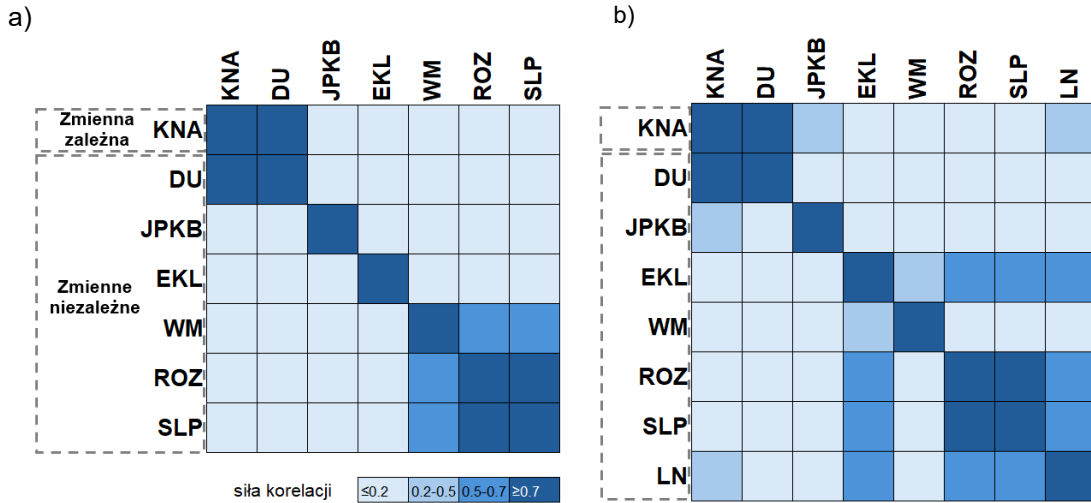
Tab. 7.10 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych kosztów naprawy barier ochronnych

Zmienna niezależna			Charakterystyki statystyczne				
Nazwa	Symbol	Jednostka	Minimum Xmin	Maksimum Xmax	Średnia μX	Odch. stand. σX	Współ. zmien. vX (%)
Barier stalowa							
Długość uszkodzenia	<i>DU</i>	(m)	1,00	192,00	17,29	12,00	90,35
Typ bariery	<i>STR</i>	(1,14 – dwustron, 1,00 – jednostron,)	1,00	1,14	1,05	1,00	6,22
PKB na mieszkańca w regionie	<i>JPKB</i>	(tys. PLN/mk)	37,76	88,78	52,76	51,56	20,36
Maksymalna poprzeczna energia kinetyczna znormalizowana	<i>EKL</i>	(kJ)	43,00	725,00	124,14	127,00	40,05
Szerokość pracująca znormalizowana	<i>WM</i>	(m)	0,80	2,50	1,65	1,70	22,51
Rozstaw słupków	<i>ROZ</i>	(m)	1,00	4,00	2,59	2,00	42,24
Liczba słupków	<i>SLP</i>	(sł./100 mb)	26,00	101,00	47,78	51,00	45,15
Bariera linowa							
Długość uszkodzenia	<i>DU</i>	(m)	1,50	120,00	22,78	19,50	87,23
PKB na mieszkańca w regionie	<i>JPKB</i>	(tys. PLN/mk)	41,86	58,42	52,15	57,93	13,73
Maksymalna poprzeczna energia kinetyczna znormalizowana	<i>EKL</i>	(kJ)	82,00	462,00	194,28	127,00	53,34
Szerokość pracująca znormalizowana	<i>WM</i>	(m)	1,00	2,50	1,54	1,70	18,96
Rozstaw słupków	<i>ROZ</i>	(m)	0,50	3,00	1,83	1,50	34,29
Liczba słupków	<i>SLP</i>	(sł./100 mb)	34,00	201,00	63,80	67,00	40,62
Liczba lin	<i>LN</i>	(szt.)	3,00	4,00	3,76	4,00	11,37

Źródło: Opracowanie własne

Wszystkie analizowane zmienne charakteryzują się współczynnikiem zmienności większym niż przyjęty graniczny ($v=5\%$). Na podstawie przeprowadzonych analiz siły współzależności między zmiennymi niezależnymi stwierdza się, że najwyższa korelacja ($|Rs| \geq 0,7$) występuje pomiędzy rozstawem słupków w barierze *ROZ*, a liczbą słupków przypadającą na 100 mb *LSP* (rys. 7.14).

Analizując siłę zależności pomiędzy zmiennymi zmiennymi zależnymi a niezależnymi można stwierdzić, że zarówno w przypadku barier stalowych jak i linowych najwyższą korelację ($|Rs| \geq 0,7$) zaobserwowano pomiędzy zmienną koszty naprawy barier *KNA* a długością jej uszkodzenia *DU* (rys. 7.14).



Rys. 7.14 Macierz siły współzależności między analizowanymi zmiennymi kosztów napraw a) barier stalowych b) barier linowych

Opracowanie własne

Na podstawie przyjętej metodyki budowy modeli składowych kosztów cyklu życia barier ochronnych oraz wstępnych analiz kosztów napraw barier drogowych do opracowania modeli zastosowano funkcję potęgowo-wykładniczą opisaną ogólnym równaniem 7.22.

$$KNA_k = \beta_0 \cdot DU_k^{\beta_i} \cdot \exp\left(\sum_{i=2}^n \beta_i \cdot X_i\right) \quad (7.22)$$

gdzie:

KNA_k – koszt pojedynczej naprawy bariery k -tego rodzaju (tys. PLN/zd.),

DU_k – długość uszkodzeń k -tego rodzaju bariery w wyniku pojedynczego najechania pojazdu na barierę ochronną, która może być wyznaczana na podstawie modelu opracowanego przez Jelińskiego w pracy [121],

β_0, β_i – współczynniki wpływu zmiennych na koszty naprawy (–),

X_i – zmienne objaśniające koszty napraw.

7.4.3.2. Modele kosztów napraw

Modele ogólne kosztów budowy zostały opracowane dla barier drogowych zlokalizowanych na drogach krajowych zarządzanych przez GDDKiA i znajdują bezpośrednie zastosowanie w metodzie szacowania kosztów cyklu życia barier. Do budowy tych modeli wykorzystano dane zebrane w bazie uszkodzeń LifeRoSE (rozdział 5.2.4.4) na temat kosztów napraw barier ochronnych na 900 odcinkach dróg krajowych. W tab. 7.11 przedstawiono 7 opracowanych modeli dla zmiennej kosztów napraw KNA , w tym 4 modele dla barier stalowych oraz 3 modele dla barier linowych. W procesie budowy tych modeli zastosowano 8 zmiennych niezależnych.

Tab. 7.11 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli KNA barier ochronnych stalowych i linowych dla pojedynczych zdarzeń

Koszty napraw		Barierę stalowe				Barierę linowe		
Zmienne	Wsp. modelu	<i>KNAs1</i>	<i>KNAs2</i>	<i>KNAs3</i>	<i>KNAs4</i>	<i>KNAI1</i>	<i>KNAI2</i>	<i>KNAI3</i>
	β_0	-6,644	-1,384	-1,894	-2,066	1,170	3,570	3,052
<i>DU</i>	β_1	0,977	1,000	1,000	1,000	0,943	0,810	0,848
<i>STR</i>	β_2			0,620	0,658			
<i>JPKB</i>	β_3		-1,248	-2,229	-2,191		-0,054	-0,055
<i>EKL</i>	β_4		0,001					0,004
<i>WM</i>	β_5		-0,078					-0,984
<i>ROZ</i>	β_6			-0,021			-0,586	
<i>SLP</i>	β_7				0,002			
<i>LN</i>	β_8						-0,327	-0,288
R^2		0,797	0,803	0,800	0,801	0,478	0,783	0,846
R^2_{sk}		0,797	0,803	0,800	0,801	0,475	0,779	0,842
<i>RMSE</i>		1,873	1,842	1,861	1,858	2,542	1,652	1,381
<i>MAD</i>		2,614	2,592	2,597	2,597	2,318	2,315	2,258
<i>AIC</i>		1680,2	1632,1	1667,2	1662,5	155,5	89,8	62,0

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowanych modeli kosztów napraw w wyniku pojedynczego zdarzenia (tab. 7.11) stwierdza się, że:

1. W zależności od przyjętej liczby zmiennych niezależnych opracowane modele charakteryzowały się skorygowanym współczynnikiem determinacji na poziomie $R^2_{sk}=0,48-0,92$.
2. Najbardziej istotnymi zmiennymi niezależnymi są w przypadku:
 - kosztów naprawy barier stalowych *KNA* zmienne: długość uszkodzenia bariery *DU*, produkt krajowy brutto na mieszkańca w regionie *JPKB*, energia kinetyczna poprzeczna bariery *EKL*, szerokość pracująca bariery *WM*,
 - kosztów naprawy barier linowych *KNA* zmienne: długość uszkodzenia bariery *DU*, produkt krajowy brutto na mieszkańca w regionie *JPKB*, energia kinetyczna poprzeczna pojazdu uderzającego w barierę *EKL*, szerokość pracująca bariery *WM* oraz liczba lin *LN*.
3. Najlepsze dopasowanie do danych rzeczywistych uzyskano w przypadku zastosowania funkcji potęgowo-wykładniczej.
4. Modele osiągające optymalną równowagę pomiędzy złożonością a jakością dopasowania do rzeczywistych danych posiadały 5–6 parametrów. Modele te charakteryzowały się najwyższym R^2_{sk} oraz najniższymi *RMSE* oraz Akaike *AIC*.

Modelami najlepiej obrazującym dane rzeczywiste dla kosztów napraw barier stalowych *KNAs* oraz linowych *KNAI* są modele opisane za pomocą równań 7.23, 7.24.

- Koszty naprawy bariery stalowej *KNAs* w wyniku pojedynczego uderzenia opisano wzorem:

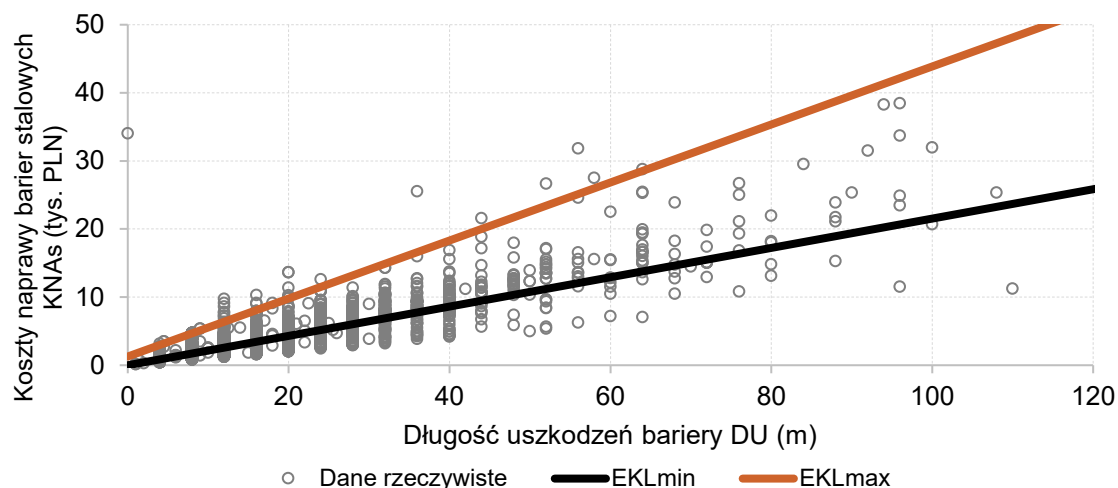
$$KNA_s = DU \cdot \exp(-1,384 - 1,248 \cdot JPKB \cdot 10^{-6} + 0,001 \cdot EKL - 0,078 \cdot WM) \quad (7.23)$$

- Koszty naprawy bariery linowej KNAI w wyniku pojedynczego uderzenia opisano wzorem:

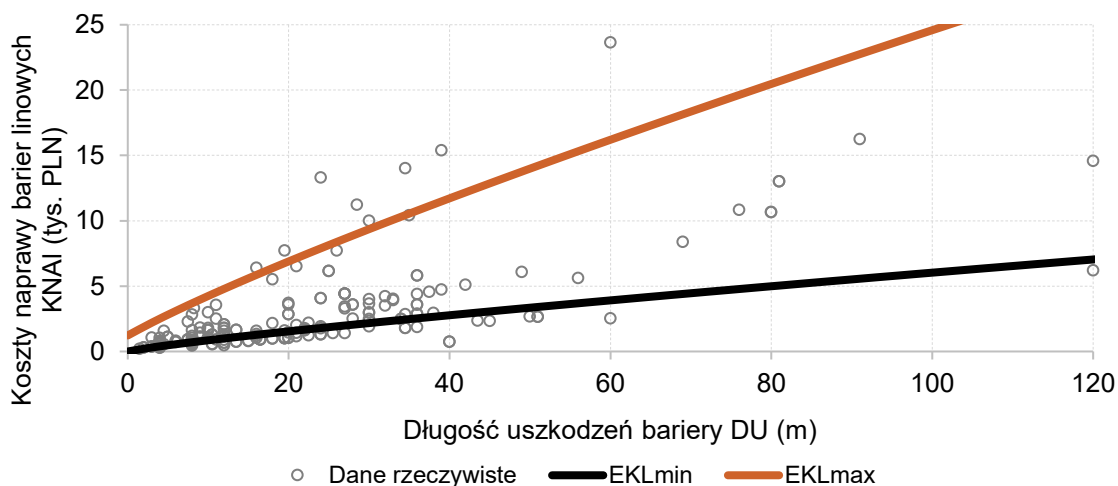
$$KNAI = DU^{0.848} \cdot \exp(3,052 - 0,055 \cdot JPKB \cdot 10^{-3} + 0,004 \cdot EKL - 0,984 \cdot WM - 0,288 \cdot LN) \quad (7.24)$$

Na podstawie analizy rekomendowanych modeli kosztów naprawy barier stalowych KNA i linowych KNAI (równania 7.23, 7.24) oraz wykresów (rys. 7.15, rys. 7.16) można stwierdzić, że wraz ze wzrostem długości uszkodzenia barier DU , maksymalnej energii poprzecznej EKL wzrasta ich koszt naprawy. Na obniżenie kosztów napraw barier wpływ ma wzrost szerokości pracującej WM oraz poziom jednostkowego produktu brutto w regionie $JPKB$.

a)

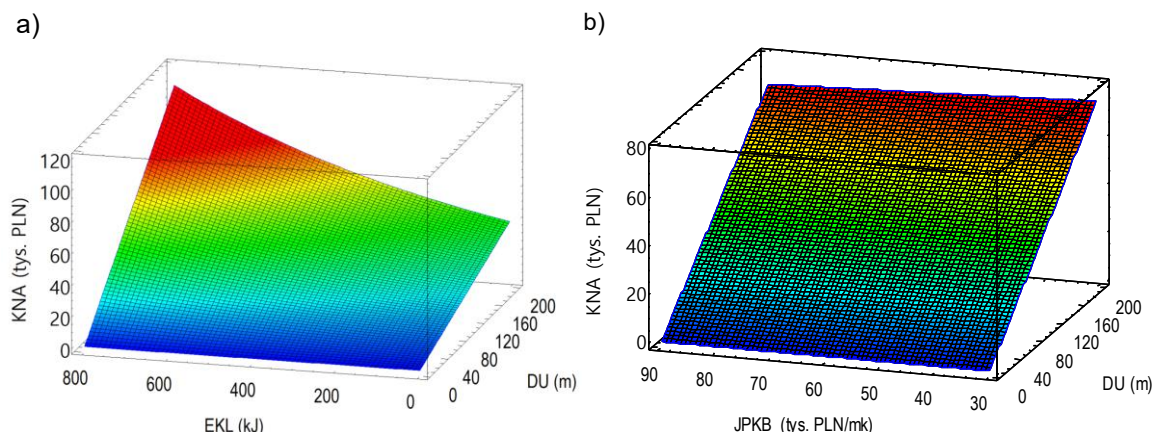


b)



Rys. 7.15 Wykres zależności kosztów naprawy KNA od długości uszkodzenia DU i maksymalnej energii poprzecznej EKL
a) bariery stalowe b) bariery linowe

Opracowanie własne



Rys. 7.16 Wykresy zależności kosztów napraw KNA (tys. PLN) bariery stalowej od długości uszkodzenia DU oraz a) normatywnej energii kinetycznej poprzecznej EKL b) produktu krajowego brutto na mieszkańca w regionie JPKB

Źródło: Opracowanie własne

7.4.4. Modelowanie kosztów użytkowników

7.4.4.1. Model ogólny kosztów użytkowników

Zgodnie z koncepcją metody szacowania kosztów cyklu życia przedstawioną w rozdziale 4, metoda powinna umożliwić szacowanie kosztów elementów infrastruktury drogowej ponoszonych nie tylko przez właściciela, zarządcę drogi, ale również użytkowników dróg. Poprzez koszty użytkowników dróg rozumie się koszty, które są ponoszone na etapie eksploatacji dróg i są związane ze stratami ponoszonymi przez pojedyncze osoby lub całe społeczeństwo. Wśród kosztów tych wyróżnić można trzy podstawowe składowe: koszty związane ze zdarzeniami drogowymi, czasem podróży i eksploatacji pojazdów związanych z wystąpieniem zdarzeń planowanych i nieplanowanych. Wówczas model ogólnych kosztów użytkowników dróg można opisać za pomocą równania 7.25.

$$KUZ = KZD + KST + KEP \quad (7.25)$$

gdzie:

KZD – koszty zdarzeń drogowych są to koszty, które ponoszą użytkownicy dróg w związku z zaistnieniem nieplanowanych zdarzeń drogowych z barierami ochronnymi (PLN),

KST – koszty czasu podróży, w przypadku barier ochronnych liczone jako straty czasu związane z wystąpieniem zdarzenia planowanego lub nieplanowanego (PLN),

KEP – koszty eksploatacji pojazdów są to koszty zużycia paliwa, materiałów eksploatacyjnych i pojazdów związane ze stratami czasu ponoszonymi w związku z wystąpieniem zdarzeń drogowych (PLN).

Znaczący udział w kosztach użytkowników dróg stanowią koszty zdarzeń drogowych, czyli związane z negatywnym wpływem barier jako przeszkód zlokalizowanych w strefie bezpieczeństwa. Zgodnie z wynikami przedstawionymi przez Karima [127] w przypadku odcinka drogi o średniodobowym natężeniu pojazdów wynoszącym 15 tys. poj./dobę, koszty te stanowią ok. 94–96% wszystkich kosztów użytkowników. W związku z tym w dalszej części pracy zbudowano modele kosztów zdarzeń z barierami ochronnymi stosując dwojakić podejście: szacując oczekiwany koszt pojedynczego zdarzenia z barierą ochronną oraz koszty zdarzeń z barierami na wybranych odcinkach dróg.

7.4.4.2. Koszty pojedynczych zdarzeń z barierami ochronnymi

7.4.4.2.1. Model ogólny kosztów

Oczekiwany koszt zdarzenia drogowego związanego z pojedynczym najechaniem pojazdu na barierę ochroną KZDB, szacuje się z uwzględnieniem prawdopodobieństwa wystąpienia różnych rodzajów ofiar wypadków oraz związanych z nimi jednostkowymi kosztami korzystając ze wzorów 7.26 – 7.28. Prawdopodobieństwo braku ofiar (kolizji drogowej) z k -tą barierą ochronną obliczane jest jako prawdopodobieństwo przeciwne do wystąpienia wypadku z barierą, czyli pojawienia się konsekwencji w postaci ofiar lekko rannych ($j=1$), ofiar ciężko rannych ($j=2$) lub ofiar śmiertelnych ($j=3$) oraz ich jednostkowych kosztów.

$$KZDB_k = P(K_k) \cdot JKK + P(LR_k) \cdot JKL R + P(CR_k) \cdot JKCR + P(Z_k) \cdot JKZ \quad (7.26)$$

$$P(K_k) = 1 - \sum_{j=1}^3 P(ofiar_k = j) \quad (7.27)$$

$$P(ofiar_k = j) = P(ofiar_k \geq j) - P(ofiar_k \geq j + 1) \quad j \in [1; 2] \quad (7.28)$$

gdzie:

$P(K_k)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji (braku ofiar) z k -tą barierą ochronną,

$P(LR_k)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia ofiary lekko rannej z k -tą barierą ochronną,

$P(CR_k)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia ofiary ciężko rannej z k -tą barierą ochronną,

$P(Z_k)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia ofiary śmiertelnej z k -tą barierą ochronną,

JKK – jednostkowy koszt strat materialnych (mln PLN),

$JKL R$ – jednostkowy koszt ofiar lekko rannej (mln PLN),

$JKCR$ – jednostkowy koszt ofiary ciężko rannej (mln PLN),

JKZ – jednostkowy koszt ofiary śmiertelnej (mln PLN),

$P(ofiar_k = j)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia j -tego rodzaju ofiary z k -tą barierą ochronną, przy czym ofiara lekko ranna $j = 1$, ofiara ciężko ranna $j = 2$, ofiara śmiertelna $j = 3$.

Zgodnie z [31] prawdopodobieństwo wystąpienia j -tego rodzaju ofiary z barierą ochronną można wyznaczyć na podstawie przedstawionego równania 7.29. Podstawową zmienną w tym równaniu jest wskaźnik intensywności przyspieszenia ASI , którego uzyskiwane wartości zależą m.in. od rodzaju zastosowanej bariery ochronnej.

$$P(ofiar_k \geq j) = \left[1 + \exp \left(\alpha_j + \frac{200}{144.58 \cdot ASI_k^{2.70}} - 1000 \cdot \beta_j \cdot (144.58 \cdot ASI_k^{2.70}) \right) \right]^{-1} \quad (7.29)$$

gdzie:

ASI_k – wskaźnik intensywności przyspieszenia k -tej bariery ochronnej,

α_j, β_j – współczynniki równania zależne od rodzaju ofiary j .

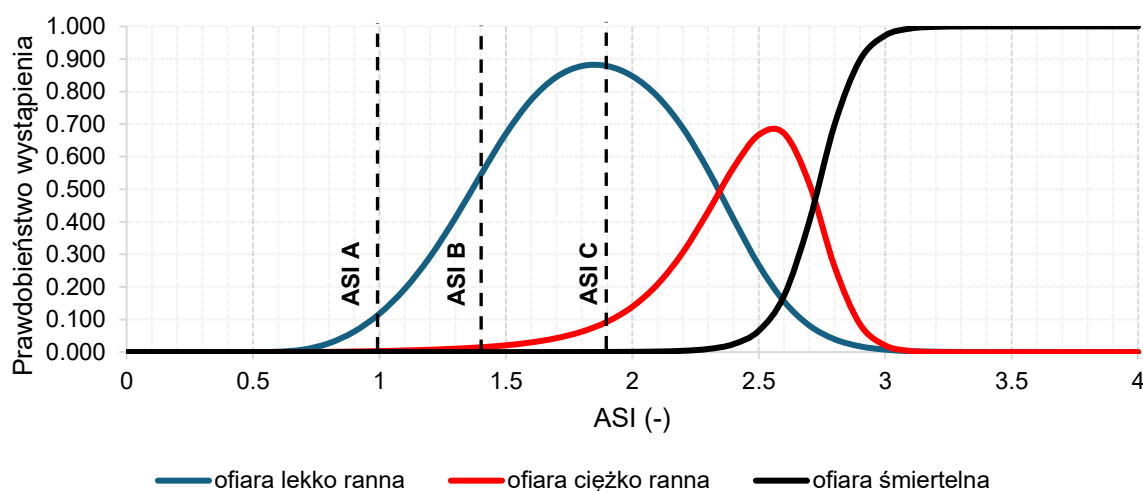
Tab. 7.12 Parametry modelowania prawdopodobieństwa ofiar

Współczynniki równania	Ofiary lekko ranne	Ofiary ciężko rannych	Ofiary śmiertelnych
	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
α_j	1,54	4,90	12,84
β_j	6,50	3,51	5,65

Opracowane własne na podstawie [31]

W celu oceny ryzyka obrażeń w zależności od wskaźnika ASI zobrazowano w postaci graficznej równanie 7.29 podstawiając do niego współczynniki równania z tab. 7.12. Analiza wyników wskazuje, że w przypadku (rys. 7.17):

- poziomu intensywności zderzenia A, prawdopodobieństwo wystąpienia ofiar wynosi ponad 12%, przy czym ofiary lekko ranne stanowią prawie większość ofiar wypadków,
- poziomu intensywności zderzenia B prawdopodobieństwo wystąpienia ofiar wynosi prawie 56%, przy czym ofiary lekko rannej stanowią ponad 54% udziału wszystkich ofiar a ofiary ciężko ranne prawie 2% ogółu ofiar,
- poziomu intensywności zderzenia C prawdopodobieństwo wystąpienia ofiar wynosi prawie 97%, przy czym ofiary lekko rannej stanowią prawie 88% udziału ogółu ofiar a ciężko ranne ponad 9% ogółu ofiar,
- prawdopodobieństwo wystąpienia ofiar śmiertelnych wynosi ponad 15% przy ASI równym 2,1 oraz ponad 90% przy ASI wynoszącym 2,9.



Rys. 7.17 Prawdopodobieństwo wystąpienia ofiar w zdarzeniu z barierą ochronną w zależności od ASI.

Opracowane własne na podstawie [31]

7.4.4.2.2. Modelowanie wskaźnika intensywności przyspieszenia

Prace wstępne

Do budowy modeli dla zmiennej zależnej wskaźnika intensywności przyspieszenia ASI i identyfikacji zmiennych niezależnych wykorzystano dane z bazy ciężkości zdarzeń z barierami ochronnymi (rozdział 6.4). Baza ta powstała na podstawie wyników ponad 300 badań symulacyjnych i zderzeniowych z barierami charakteryzującymi się różnymi parametrami technicznymi takich jak poziom powstrzymywania, szerokość pracująca barier, dla których zostały przebadane konsekwencje uderzeń pojazdów o różnej masie, kącie i prędkości. Dane z bazy ciężkości zdarzeń zostały podzielone na trzy zbiory, w których uwzględniono rodzaj analizowanych barier:

1. Zbiór danych dla barier stalowych.
2. Zbiór danych dla barier linowych.
3. Zbiór danych dla barier betonowych.

Na podstawie tych zbiorów danych wyróżniono trzy zmienne zależne *ASI* z podziałem na rodzaj barier ochronnych. Modelowane zmienne zależne wraz z ich podstawowymi charakterystykami statystycznymi, takimi jak wartość minimalna, maksymalna, średnia, odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności zostały przedstawione w tab. 7.13.

Tab. 7.13 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych zależnych kosztów zdarzeń z pojedynczą barierą ochronną

Zmienna zależna			Liczba danych	Charakterystyki statystyczne				
Lp.	Symbol	Jedn.	N	Minimum ASI _{min}	Maksimum ASI _{max}	Średnia μ ASI	Odchylenie standardowe σ ASI	Współczynnik zmienności v ASI (%)
1	ASI _s	(–)	197	0,16	2,84	0,85	0,46	53,42
2	ASI _l	(–)	85	0,24	1,11	0,55	0,20	35,41
3	ASI _b	(–)	15	0,32	2,50	1,05	0,60	53,39

Źródło: Opracowanie własne

W ramach prowadzonych prac wstępnych zidentyfikowano zmienne niezależne wpływające na wskaźnik intensywności przyspieszenia. Wszystkie analizowane zmienne niezależne miały charakter ilościowy, w związku z czym nie było potrzeby wykonywania standaryzacji danych jakościowych. Podstawowe charakterystyki statystyczne analizowanych zmiennych zostały przedstawione tab. 7.14 i zawierają informacje o wartościach minimalnych, maksymalnych, średnich, medianach oraz współczynnikach zmienności.

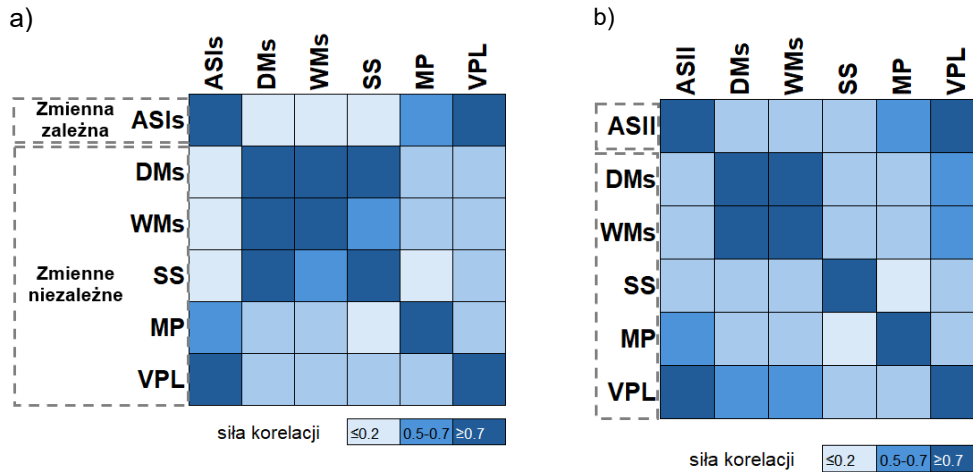
Tab. 7.14 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych kosztów zdarzeń z pojedynczą barierą ochronną

Zmienna niezależna				Charakterystyki statystyczne				
LP	Nazwa	Symbol	Jednostka	Minimum X _{min}	Maksimum X _{max}	Średnia μ X	Odch. stand. σ X	Współ. zmien. v X (%)
Wskaźnik intensywności przyspieszenia – bariera stalowa								
1	Ugięcie dynamiczne z symulacji	DMs	(m)	0,01	3,35	0,62	0,53	77,33
2	Szerokość pracująca z symulacji	WMs	(m)	0,32	3,35	0,92	0,79	56,85
3	Podatność bariery	Ss	(m ² /N)	0,001	11,84	2,19	2,10	91,58
4	Masa pojazdu	MP	(t)	0,88	12,12	4,90	1,50	103,86
5	Prędkość poprzeczna pojazdu	VPL	(km/h)	7,31	87,93	31,62	30,77	46,19
Wskaźnik intensywności przyspieszenia – bariera linowa								
1	Ugięcie dynamiczne z symulacji	DMs	(m)	0,18	4,22	1,23	1,09	62,76
2	Szerokość pracująca z symulacji	WMs	(m)	0,40	4,19	1,30	1,11	56,55
3	Podatność bariery	Ss	(m ² /N)	3,30	20,27	8,04	7,69	39,00
4	Masa pojazdu	MP	(t)	0,90	12,10	3,60	1,50	118,66
5	Prędkość poprzeczna pojazdu	VPL	(km/h)	7,30	76,90	32,14	30,80	46,42
Wskaźnik intensywności przyspieszenia – bariera betonowa								
1	Ugięcie dynamiczne z symulacji	DMs	(m)	0,01	2,14	0,74	0,40	93,10
2	Szerokość pracująca z symulacji	WMs	(m)	0,57	2,70	1,30	0,97	53,12
3	Szywność bariery	Ks	(1000 kN /m ²)	0,21	804,08	65,52	1,64	329,35
4	Masa pojazdu	MP	(t)	0,90	13,00	6,74	9,76	79,66
5	Prędkość poprzeczna pojazdu	VPL	(km / h)	8,53	59,14	30,47	34,20	45,85

Źródło: Opracowanie własne

Wszystkie analizowane zmienne charakteryzują się współczynnikiem zmienności większym niż przyjęty graniczny ($v=5\%$). Na podstawie przeprowadzonych analiz siły współzależności między zmiennymi niezależnymi stwierdza się, że silna i bardzo silna ($|Rs|\geq 0,7$) korelacja występuje dla wszystkich rodzajów barier pomiędzy ugięciem dynamicznym *DMS* a szerokością pracującą *WMS* (rys. 7.18).

Następnie określono siłę zależności pomiędzy zmiennymi zmiennymi zależnymi a zmiennymi niezależnymi. Najwyższą korelację ($|Rs|\geq 0,7$) zaobserwowano pomiędzy wskaźnika intensywności przyspieszenia *ASI* barier a prędkość poprzeczną pojazdu uderzającego w barierę ochronną *VPL* (rys. 7.18).



Rys. 7.18 Macierz siły współzależności między analizowanymi zmiennymi kosztów pojedynczych zdarzeń a) barier stalowych b) barier linowych

Opracowanie własne

Na podstawie badań własnych i przeglądu literatury [31], [119] do opracowania modeli ciężkości zdarzeń reprezentowanych przez wskaźnik intensywności przyspieszenia zastosowano funkcję potęgową opisaną równaniem 7.30.

$$ASI_k = \left(\beta_0 \cdot \prod_{i=1}^n X_i^{\beta_i} \right) \quad (7.30)$$

gdzie:

ASI_k – wskaźnik intensywności przyspieszenia k -tego rodzaju bariery drogowej (–),

β_0, β_i – współczynniki wpływu zmiennych na wskaźnik intensywności przyspieszenia (–),

X_i – zmienne objaśniające wskaźnik intensywności przyspieszenia.

Modele wskaźnika intensywności przyspieszenia

Modele wskaźnika intensywności przyspieszenia w wyniku pojedynczego zdarzenia zostały opracowane na podstawie bazy danych dotyczących ciężkości zdarzeń, która została zbudowana z danych dotyczących ponad 300 badań symulacyjnych i zderzeniowych z barierami ochronnymi. W tab. 7.15 przedstawiono 10 opracowanych modeli dla zmiennej kosztów napraw *ASI*, w tym 4 modele dla barier stalowych oraz po 3 modele dla barier linowych i betonowych.

Tab. 7.15 Zestawienie wybranych modeli ASI barier ochronnych stalowych, linowych i betonowych dla pojedynczych zdarzeń

Modele ASI		bariery stalowe				bariery linowe			bariery betonowe		
Zmienne	Wsp. modelu	ASIs1	ASIs2	ASIs3	ASIs4	ASII1	ASII2	ASII3	ASlb1	ASlb2	ASlb3
	β_0	0,012	0,057	0,016	0,013	0,112	2,058	3,389			
DMs	β_1			-0,218			-0,642	-0,459		0,147	
WMs	β_2				-0,652						0,478
Ss	β_3	-0,122	-0,106			-0,216					
Ks	β_4								-0,066		
MP	β_5		-0,127			-0,206	-0,532	-0,489	-0,244	-0,257	-0,300
VPL	β_6		0,857	1,091	1,185	0,613			0,755		0,701
EKLs	β_7						0,642	0,459			
R^2		0,763	0,806	0,805	0,799	0,829	0,821	0,810	0,824	0,879	0,886
R^2_{sk}		0,761	0,803	0,803	0,797	0,823	0,817	0,805	0,795	0,859	0,867
RMSE		0,224	0,203	0,203	0,204	0,082	0,082	0,082	0,254	0,211	0,205
MAD		0,334	0,334	0,334	0,33	0,163	0,163	0,163	0,425	0,424	0,424
AIC		-247,4	-262,2	-263,8	-264,2	-178,3	-180,3	-180,3	-13,3	-15,7	-16,1

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowanych modeli wskaźnika intensywności przyspieszenia w wyniku pojedynczego najechania pojazdu na barierę (tab. 7.15) stwierdza się, że:

1. W zależności od przyjętej liczby zmiennych opracowane modele intensywności przyspieszenia ASI charakteryzował się skorygowanym współczynnikiem determinacji na poziomie $R^2_{sk} = 0,76\text{--}0,89$.
2. Zmiennymi niezależnymi o największym wpływie (ustalonymi na podstawie skorygowanego współczynnika determinacji R^2_{sk} , błędu średniokwadratowego RMSE analizowanych modeli) są w przypadku:
 - barier stalowych zmienne: podatność bariery Ss, masa pojazdu uderzającego w barierę MP, prędkość poprzeczna pojazdu uderzającego w barierę VPL,
 - barier linowych zmienne: podatność bariery Ss, masa pojazdu uderzającego w barierę MP, prędkość poprzeczna pojazdu uderzającego w barierę VPL,
 - barier betonowych zmienne: szerokość pracująca WMs, masa pojazdu uderzającego w barierę MP, prędkość poprzeczna pojazdu uderzającego w barierę VPL.
3. Najlepsze dopasowanie danych rzeczywistych uzyskano w przypadku zastosowania funkcji potęgowej.
4. Modele osiągające optymalną równowagę pomiędzy złożonością a jakością dopasowania do danych rzeczywistych posiadały 3–4 parametry. Modele te charakteryzowały się najwyższym parametrem podstawowym R^2_{sk} oraz najniższymi kryteriami pomocniczymi RMSE oraz Akaike AIC.

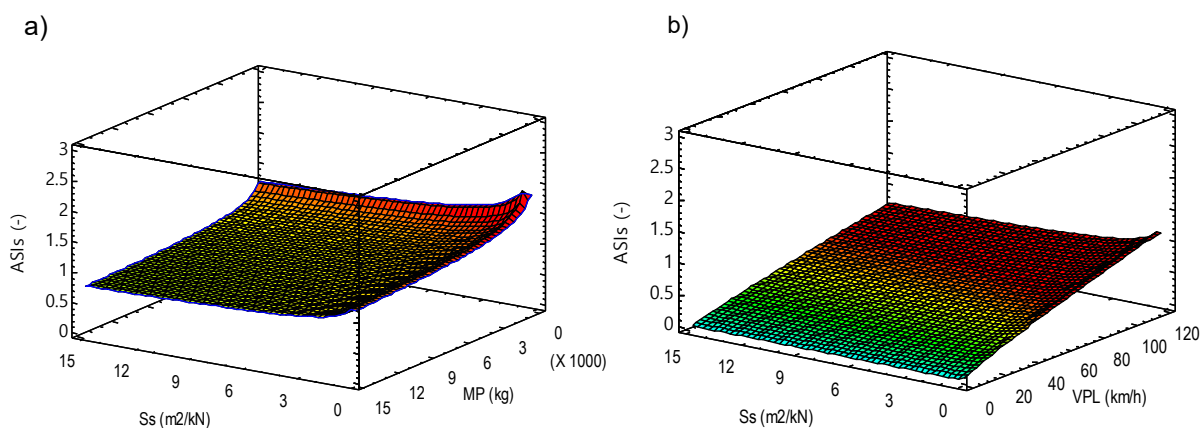
Modelami najlepiej opisującymi dane rzeczywiste dla zmiennej zależnej ASI są modele opisane równaniami 7.31 – 7.33, które są rekomendowane do zastosowania w metodzie szacowania kosztów cyklu życia barier: stalowych wzór 7.31, linowych wzór 7.32 betonowych wzór 7.33.

$$ASI_s = 0,057 \cdot Ss^{-0,106} \cdot MP^{-0,127} \cdot VPL^{0,857} \quad (7.31)$$

$$ASI_l = 0,112 \cdot Ss^{-0,216} \cdot MP^{-0,206} \cdot VPL^{0,613} \quad (7.32)$$

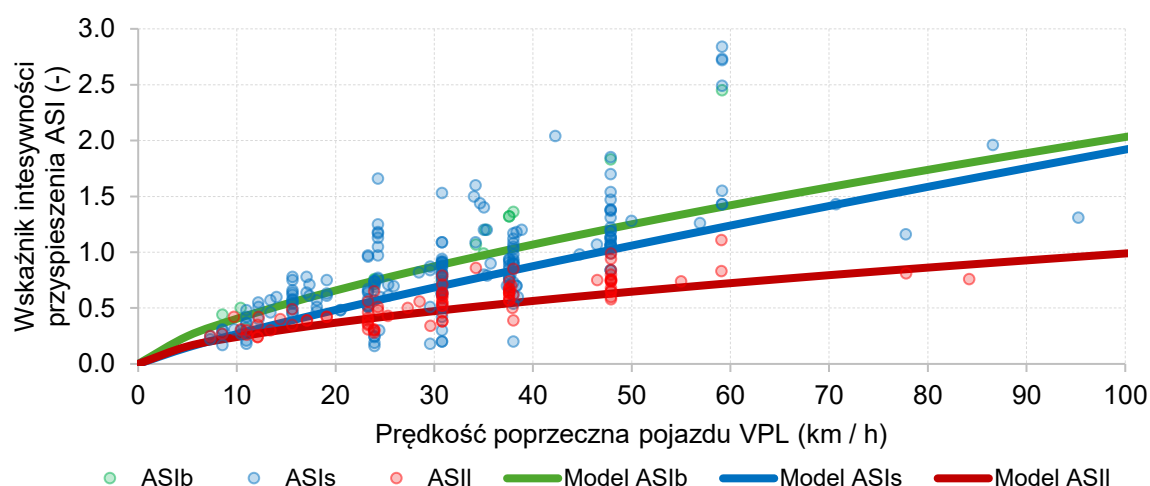
$$ASI_b = WMS^{-0,478} \cdot MP^{-0,300} \cdot VPL^{0,701} \quad (7.33)$$

Na podstawie analizy rekomendowanych modeli wskaźnik intensywności przyspieszenia barier stalowych, linowych i betonowych (równania 7.31 – 7.33) oraz wykresów (rys. 7.19, rys. 7.20) można stwierdzić, że największy wpływ na poziom intensywności zderzenia pojazdu z barierą drogową ASI ma prędkość poprzeczna pojazdu VPL . Wraz ze wzrostem tego parametru następuje wzrost wskaźnika intensywności zderzenia. Zwiększanie pozostałych zastosowanych w modelach zmiennych niezależnych wpływa na spadek wartości liczbowej ASI . Istotny wpływ zastosowanych w modelach zmiennych niezależnych potwierdzają również badania przeprowadzone m.in. przez Burbridge'a [32], Jamroza [119], Montelli [171], w których to wykazano, że zmiana poszczególnych parametrów wejściowych wiąże się ze zmianą ASI .



Rys. 7.19 Wykresy zależność wskaźnika intensywności ASI bariery stalowej od podatności bariery Ss oraz a) masy pojazdu uderzającego w barierę MP b) prędkości poprzecznej pojazdu VPL

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7.20 Wykresy zależność wskaźnika intensywności ASI od prędkości poprzecznej pojazdu VPL dla różnych rodzajów barier

Źródło: Opracowanie własne

7.4.4.3. Koszty zdarzeń z barierami na odcinkach dróg.

7.4.4.3.1. Model ogólny kosztów

Koszty zdarzeń w przypadku drugiego wariantu, czyli szacowania wielkości kosztów zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinkach dróg określa się na podstawie równania 7.34 jako sumę kosztów z k -tego rodzajem barier na j -tym odcinku drogi. W modelu tym uwzględniono materiał z jakiego zostały wykonane bariery ochronne (stalowe, linowe). Nie wyróżniono natomiast szczegółowych parametrów takich jak poziom powstrzymywania, szerokość pracująca, jak ma to miejsce w przypadku oczekiwanych kosztów zdarzeń z pojedynczą barierą ochronną.

$$KZDB_j = \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^m LZDB_{i,j,k} \cdot JKZDB_{i,k} \quad (7.34)$$

lub

$$KZDB_j = \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^m (LZDB_{i,j,k} \cdot JKK_i + LLRB_{i,j,k} \cdot JKLR_i + LCRB_{i,j,k} \cdot JKCR_i + LZB_{i,j,k} \cdot JKZ_i) \quad (7.35)$$

gdzie:

$KZDB_j$ – całkowity koszt zdarzeń na j -tym odcinku dróg (mln PLN/rok),

$LZDB_{i,j,k}$ – liczba zdarzeń drogowych z barierami k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (zd./rok),

$JKZDB_{i,k}$ – średni jednostkowy koszt zdarzeń drogowych z barierami k -tego rodzaju w i -tym roku (mln PLN/zd.),

$LLRB_{i,j,k}$ – liczba ofiar lekko rannych w wypadkach drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok),

$LCRB_{i,j,k}$ – liczba ofiar ciężko rannych w wypadkach drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok),

$LZB_{i,j,k}$ – liczba ofiar śmiertelnych w wypadkach drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok),

JKK_i – jednostkowy koszt strat materialnych w i -tym roku (mln PLN),

$JKLR_i$ – jednostkowy koszt ofiar lekko rannych w wypadku drogowym w i -tym roku (mln PLN),

$JKCR_i$ – jednostkowy koszt ofiar ciężko rannych w wypadku drogowym w i -tym roku (mln PLN),

JKZ_i – jednostkowy koszt ofiar śmiertelnych w wypadku drogowym w i -tym roku (mln PLN).

7.4.4.3.2. Modelowanie liczby zdarzeń drogowych z barierami

W celu określenia kosztów zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinkach dróg krajowych konieczne jest opracowanie modeli składowych kosztów, do których należy liczba zdarzeń na odcinku dróg oraz konsekwencje tych zdarzeń mierzone liczbą i ciężkością ofiar w tych zdarzeniach.

Liczba zdarzeń na odcinku dróg $LZDB_{i,j,k}$ jest miarą względną określającą oczekiwaną liczbę zdarzeń z barierami k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku, zarejestrowanymi w bazie SEWIK. Liczba zdarzeń na odcinku dróg $LZDB_{i,j,k}$ może być szacowana w sposób pośredni poprzez uwzględnienie narażenia na ryzyko jakim jest długość odcinka drogi DL_j oraz gęstości zdarzeń na odcinku $GZDB_{i,j,k}$ zgodnie ze wzorem 7.36.

$$LZDB_{i,j,k} = DL_j \cdot GZDB_{i,j,k} \quad (7.36)$$

przy czym:

$$GZDB_{i,j,k} = GZDB_{b,j,k} \cdot WRP_{zd,i} \quad (7.37)$$

Natomiast liczba wypadków i ofiar wypadków może być szacowana za pomocą wzorów 7.38 – 7.40.

$$LWB_{i,j,k} = LZDB_{i,j,k} \cdot UW_{zd,i} \quad (7.38)$$

$$LOF_{i,j,k,o} = LZDB_{i,j,k} \cdot WRP_{z,i} \cdot UOF_{zd,o,b} \quad (7.39)$$

lub

$$LOF_{i,j,k,o} = LWB_{i,j,k} \cdot \frac{SLOF_i}{100} \cdot WRP_{z,i} \cdot UOF_{w,o,b} \quad (7.40)$$

gdzie:

$LZDB_{i,j,k}$ – liczba zdarzeń drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (zd./rok),

$LWB_{i,j,k}$ – liczba wypadków drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (wyp./rok),

$LOF_{i,j,k,o}$ – liczba o -tego rodzaju ofiar wypadków drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok),

DL_j – długość j -tego odcinka drogi (km),

$GZDB_{i,j,k}$ – gęstość zdarzeń drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (zd./km/ rok),

$GZDB_{b,j,k}$ – bazowa gęstość zdarzeń drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg (zd./km/ rok), jako średnia wartość z lat 2017–2019, szacowana na podstawie modelu opisanego wzorem 7.44,

$WRP_{zd,i}$ – wskaźnik roku prognozy zdarzeń drogowych w i -tym roku (zd./km/rok), szacowany na podstawie modelu opisanego wzorem 7.48,

$UW_{zd,i}$ – średni udział wypadków w liczbie zdarzeń drogowych w i -tym roku (%), szacowany na podstawie modelu opisanego wzorem 7.49,

$WRP_{z,i}$ – wskaźnik roku prognozy wypadków i ofiar w i -tym roku (zd./km/rok), szacowany na podstawie modelu opisanego wzorem 7.52,

$UOF_{w,o,b}$ – średni udział ofiar o -tego rodzaju w wypadku drogowym z k -tym rodzajem bariery w roku bazowym (średnia z lat 2017–2019), oszacowany na podstawie analiz przeprowadzonych w rozdz. 6.2.3 i zestawionych w tab. 7.18,

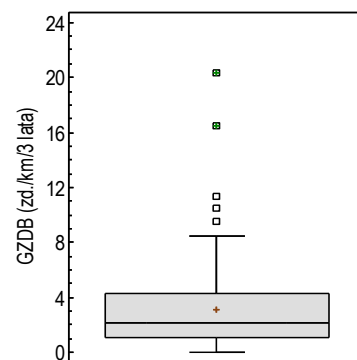
$SLOF_i$ – średnia liczba ofiar w wypadku drogowym w i -tym roku (–), szacowana na podstawie modelu opisanego wzorem 7.50.

7.4.4.3.3. Modelowanie gęstości zdarzeń drogowych z barierami

Zastosowanie gęstości zdarzeń drogowych $GZDB$ jako zmiennej modelowanej pozwala na normalizację liczby zdarzeń $LZDB$ względem długości odcinków. Zmienna $GZDB$ została przyjęta jako zmienna zależna, dla której opracowano modele predykcyjne. Do budowy modeli dla zmiennej

zależnej gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi GZDB i identyfikacji zmiennych niezależnych wykorzystano dane z bazy zdarzeń drogowych na odcinkach dróg krajowych (rozdział 5.2.4.3). Baza ta została opracowana na podstawie analizy i weryfikacji danych dotyczących zdarzeń z barierami z trzy letniego okresu (2017–2019). Wybór 3-letniego okresu analizy miał za zadanie wyeliminowanie wahań sezonowych związanych m.in. ze zmniejszoną liczbą zdarzeń w związku z restrykcjami dotyczącymi pandemii wyniku COVID–19 oraz wpływem wojny na Ukrainie.

W ramach prowadzonych prac wstępnych analizowaną zmienną zależną *GZDB* opisano za pomocą podstawowych statystyk opisowych (rys. 7.21). Zmienna ta przyjmuje wartości w zakresie od 0 do 20,36 zd./km/3 lata. Na analizowanych odcinkach dróg średnio rejestrowanych było 3,16 zd./km/3 lata, przy czym odchylenie standardowe wyniosło 3,35 zd./km/3 lata, co wskazuje na znaczną zmienność gęstości zdarzeń z barierami pomiędzy poszczególnymi odcinkami dróg. Na połowie odcinków dróg *GZDB* była nie większa niż 2,14 zd./km/3 lata (mediana).



Rys. 7.21 Wykres pudełkowy zmiennej zależnej *GZDB*

Źródło: Opracowanie własne

W ramach prowadzonych prac wstępnych zidentyfikowano zmienne niezależne wpływające na gęstość zdarzeń z barierami drogowymi. Wszystkie analizowane zmienne niezależne miały charakter ilościowy, w związku z czym nie było potrzeby wykonywania standaryzacji danych jakościowych. Podstawowe charakterystyki statystyczne analizowanych zmiennych zostały przedstawione tab. 7.16 i zawierają informacje o wartościach minimalnych, maksymalnych, średnich, medianach oraz współczynnikach zmienności.

Tab. 7.16 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych gęstość zdarzeń z barierami

Zmienna niezależna				Charakterystyki statystyczne				
LP	Nazwa	Symbol	Jednostka	Minimum Xmin	Maksimum Xmax	Średnia μX	Odch. stand. σX	Współ. zmien. vX (%)
1	Uśrednione natężenie pojazdów	<i>SDR</i>	(tys. poj./dobę/rok)	3,33	109,20	30,09	24,26	71,00
2	Udział pojazdów ciężarowych z przyczepą	<i>UCP</i>	(–)	0,04	0,58	0,22	0,20	61,88
3	Wskaźnik krętości odcinka	<i>WKO</i>	(°/km)	0,00	93,99	16,48	11,48	99,12
4	Wskaźnik falistości odcinka	<i>KIF</i>	0 – sp. podłużny <5% 1 – sp. podłużny ≥5%	0,00	1,00	0,13	0,00	265,86
5	Gęstość łuków poziomych	<i>GLU</i>	(łuków/km)	0,00	1,81	0,46	0,37	74,17
6	Prędkość dopuszczalna	<i>VDOP</i>	(km/h)	40,00	140,00	117,41	120,00	19,65
7	Udział barier w przekroju na odcinku drogi	<i>UB</i>	(–)	0,00	1,00	0,71	0,82	43,98
8	Współczynnik modelu utrzymania drogi	<i>WMU</i>	0,5 – klasyczny 0,8 – utrzymaj stan. B 1 – utrzymaj stan. A	0,50	0,50	0,82	0,80	21,44

Źródło: Opracowanie własne

Wszystkie analizowane zmienne charakteryzują się współczynnikiem zmienności większym niż przyjęty graniczny ($v=5\%$), w związku z tym wszystkie zmienne zostały przyjęte do dalszej analizy.

Na podstawie przeprowadzonych analiz siły współzależności między zmiennymi niezależnymi stwierdza się, że silna i bardzo silna ($|R_s| \geq 0,7$) korelacja występuje pomiędzy prędkością dopuszczalną na odcinkach dróg *VDOP* a współczynnikiem modelu utrzymania *WMU* (rys. 7.22). Korelację tę wyjaśnia charakter modelu utrzymania dróg, który obowiązywał na poszczególnych odcinkach dróg.

Na badanym poligonie badawczym klasyczny model utrzymania drogi występował przede wszystkim na drogach klasy G, GP, które charakteryzują się prędkością dopuszczalną do 90 km/h. Natomiast model utrzymania „utrzymaj standard” był stosowany zarówno na drogach klasy S oraz A, które charakteryzują się wyższymi dopuszczalnymi prędkościami.

Następnie określono siłę zależności pomiędzy zmienną zmienną zależną *GZDB* a wybranymi zmiennymi niezależnymi. Najwyższą korelację ($|R_s| \geq 0,5$) zaobserwowano pomiędzy gęstością zdarzeń z barierami *GZDB* a średniodobowym natężeniem ruchu pojazdów *SDR*.

Na podstawie przyjętej metodyki budowy modeli składowych kosztów cyklu życia barier ochronnych oraz wstępnych analiz gęstości zdarzeń z barierami drogowych do opracowania zastosowano funkcję potęgowo–wykładniczą opisaną wzorem 7.41:

$$GZDB_j = SDR_j^{\beta_1} \cdot \exp\left(\beta_0 + \sum_{i=2}^n \beta_i \cdot X_i\right) \quad (7.41)$$

gdzie:

GZDB_j – gęstość zdarzeń z barierami na *j*-tym odcinku drogi (zd/km/3 lata),

SDR_j – uśrednione natężenie pojazdów z trzech lat na *j*-tym odcinku drogi (tys. poj./dobę/rok),

$\beta_0, \beta_1, \beta_i$ – współczynniki wpływu zmiennych objaśnianych na koszty zdarzeń z barierami,

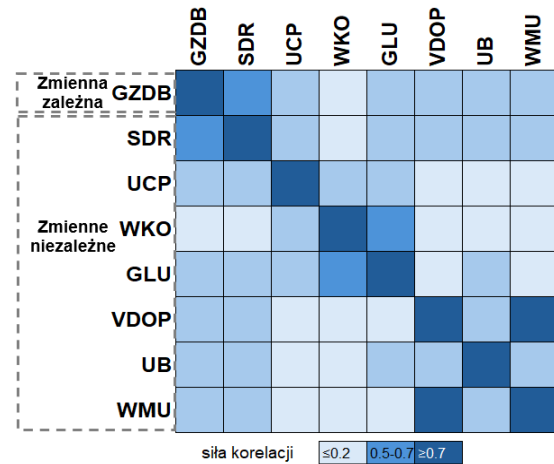
X_i – zmienne objaśniające gęstość zdarzeń z barierami.

przy czym:

$$SDR_j = \frac{SDR_{j,2017} + SDR_{j,2018} + SDR_{j,2019}}{3} \quad (7.42)$$

W tab. 7.17 przedstawiono 4 opracowane modeli dla zmiennej kosztów inwestycyjnych *GDZB*, które najlepiej dopasowują się do danych rzeczywistych. Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowanych modeli gęstości zdarzeń z barierami na odcinku drogi (tab. 7.17) stwierdza się, że:

1. W zależności od przyjętej liczby zmiennych niezależnych opracowane modele gęstości zdarzeń z barierami charakteryzują się współczynnikiem determinacji na poziomie $R_{sk}^2 = 0,80-0,83$.
2. W każdym opracowanym modelu zmienną istotnie statystyczną był parametr opisujący ryzyko narażenia na wystąpienie zdarzenia drogowego jakim jest natężenie pojazdów *SDR*.
3. Zmiennymi niezależnymi wpływającymi na wzrost współczynnikiem determinacji R_{sk}^2 oraz redukcję błędu średniokwadratowego *RMSE* są w modelu zmienne m.in: średniodobowe natężenie pojazdów



Rys. 7.22 Macierz siły współzależności między analizowanymi zmiennymi gęstości zdarzeń z barierami

Źródło: Opracowanie własne

SDR, udział pojazdów ciężarowych z przyczepą *UCP*, wskaźnik falistości odcinka *KIF*, gęstość łuków poziomych *GLU*.

4. Najlepsze dopasowanie danych do rzeczywistych uzyskano w przypadku zastosowania funkcji potęgowej.
5. Modele osiągające optymalną równowagę pomiędzy złożonością a jakością dopasowania do danych rzeczywistych posiadały 7 parametrów. Modele te charakteryzowały się najwyższym parametrem podstawowym R^2_{sk} oraz najniższymi kryteriami pomocniczymi *RMSE* oraz kryterium informacyjnym Akaike *AIC*.

Tab. 7.17 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli GZDB barier ochronnych

Modele gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi					
Zmienne	Wsp. modelu	GZDB1	GZDB2	GZDB3	GZDB4
	β_0	-1,417	-2,244	-0,981	-2,155
<i>SDR</i>	β_1	0,467	0,412	0,443	0,531
<i>WMU</i>	β_2			0,628	
<i>UCP</i>	β_3	-2,157	-2,987	-2,502	-2,469
<i>WKO</i>	β_4				0,008
<i>KIF</i>	β_5	0,970	0,791	0,892	1,006
<i>GLU</i>	β_6	0,394	0,747	0,432	
<i>VDOP</i>	β_7		1,225		0,652
<i>UB</i>	β_8	1,375	0,733	1,136	1,143
R^2		0,804	0,829	0,811	0,801
R^2_{sk}		0,793	0,82	0,801	0,791
<i>RMSE</i>		1,523	1,428	1,502	1,539
<i>MAD</i>		2,324	2,323	2,327	2,32
<i>AIC</i>		46,2	42,1	46,5	48,7

Źródło: Opracowanie własne

Analizowany zbiór danych z okresu 3 lat (2017–2019) najlepiej opisuje model GZDB2, który przedstawiono za pomocą równania 7.43.

$$GZDB_{2017-2019,j} = (SDR_j)^{0,412} \cdot \exp(-2,244 - 2,987 \cdot UCP + 0,747 \cdot GLU + 0,791 \cdot KIF + 1,225 \cdot \left(\frac{VDOP}{100}\right) + 0,733 \cdot UB) \quad (7.43)$$

Natomiast model bazowy $GZDB_{b,j}$ (uśredniony dla danych z 3 lat) przedstawiony jest równaniem 7.44.

$$GZDB_{b,j} = \frac{GZDB_{2017-2019,j}}{3} \quad (7.44)$$

gdzie:

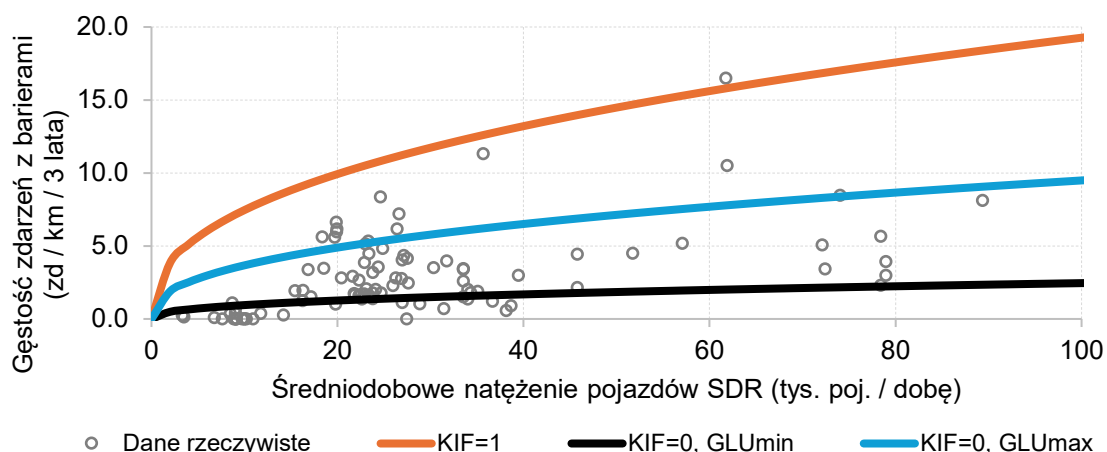
$GZDB_{2017-2019,j}$ – gęstość zdarzeń z barierami na *j*-tym odcinku drogi w latach 2017–2019 (zd/km/3 lata),

$GZDB_{b,j}$ – gęstość bazowa, zdarzeń z barierami na *j*-tym odcinku drogi (zd/km/rok),

SDR_j – uśrednione natężenie pojazdów z lat: 2017–2019 na *j*-tym odcinku drogi (tys. poj./dobę/rok).

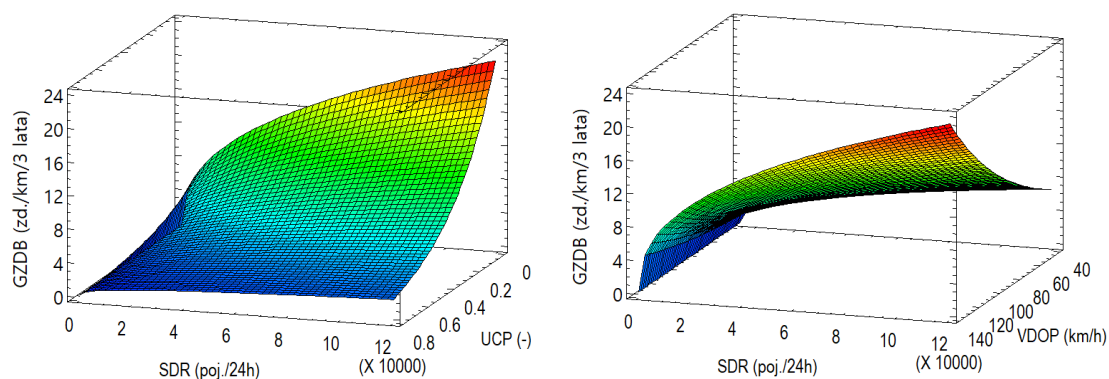
Na podstawie analizy modelu gęstości zdarzeń z barierami drogowymi $GZDB_{2017-2019,j}$ (równanie 7.43) oraz wykresów (rys. 7.23, rys. 7.24) można stwierdzić, że wraz ze wzrostem średniodobowego

natężenia pojazdów *SDR* na odcinku drogi, wzrasta gęstość zdarzeń z barierami *GZDB*_{2017-2019,j.}. Stosowanie natężenia pojazdów jako podstawowej zmiennej niezależnej w modelach predykcji zdarzeń z udziałem barier potwierdzają również wyniki badań przeprowadzonych m.in. przez Roque'a [206], Jelińskiego [121]. Kolejnymi czynnikami wpływającymi na wzrost gęstości zdarzeń z barierami drogowymi są parametry związane z geometrią drogi takie jak gęstość łuków poziomych *GLU*, występowanie łuków pionowych *KIF* oraz wyposażenie dróg – udział barier *UB*. Natomiast zmienną niezależną, której wzrost powoduje redukcję gęstości zdarzeń z barierami jest udział pojazdów ciężarowych na odcinku drogi *UCP*. Wzrost udziału pojazdów ciężarowych może wpływać na warunki ruchu na drodze, w tym zmniejszenie średniej prędkości pojazdów w potoku, tym samym niwelować ryzyko wystąpienia zdarzenia drogowego.



Rys. 7.23 Wykres zależności gęstości zdarzeń z barierami *GZDB* od natężenia pojazdów *SDR* i występowania łuków pionowych *KIF* oraz gęstości łuków poziomych *GLU*

Opracowanie własne



Rys. 7.24 Wykresy zależności gęstości zdarzeń z barierami *GZDB* od średniodobowego rocznego natężenia pojazdów *SDR* oraz a) udziału pojazdów ciężarowych *UCP* b) prędkości dopuszczalnej na odcinku *VDOP*

Źródło: Opracowanie własne

7.4.4.4. Modele zmian liczby i ofiar wypadków drogowych w Polsce

Od 1996 roku, tj. od opracowania pierwszego Krajowego Programu BRD *GAMBIT* [118] w Polsce rozpoczęto systematyczne wdrażanie działań zmierzających do zmniejszenia zagrożeń wypadkami w ruchu drogowym. W kolejnych programach brd [113], [139] przyjęto założenia *Wizji Zero* [118] i poprzez zastosowanie dużego katalogu działań uzyskiwano poprawę stanu bezpieczeństwa infrastruktury drogowej i ruchu drogowego. Prowadzone działania na rzecz brd przyczyniły się do systematycznego

zmniejszania liczby wypadków i ofiar wypadków. Na podstawie analiz matematycznych (z wykorzystaniem danych historycznych i progностycznych) opracowano modele przewidywanych zmian liczby zdarzeń drogowych oraz liczby ofiar śmiertelnych wypadków w latach 2000–2060. Dane historyczne dla liczby kolizji, liczby wypadków oraz liczby poszczególnych rodzajów ofiar uzyskano z dostępnych baz danych [136] w latach 2000–2024. Natomiast dane progностyczne przygotowano korzystając z modeli progностycznych opracowanych w ramach prac [112],[118] uzyskując przewidywane liczby kolizji, wypadków i ofiar wypadków dla wybranych scenariuszy w latach 2025 – 2060.

W ramach niniejszej pracy opracowano modele zmian wybranych miar bezpieczeństwa ruchu w latach 2000–2060, a w szczególności: liczby zdarzeń, średniej liczby ofiar w wypadkach, liczby ofiar śmiertelnych w wypadkach drogowych, co pozwoliło na opracowanie wskaźnika zmian liczby zdarzeń WRP_{zd} oraz liczby wypadków i ofiar wypadków WRP_z w roku prognozy, średniego udziału wypadków w zdarzeniach drogowych UW_{zd} oraz średniej liczby ofiar w wypadku drogowym $SLOF$ w Polsce.

Korzystając z historycznych danych o zdarzeniach drogowych dla trzech scenariuszy zmian, opracowano modele opisowe LZD_{op} (w latach 2000–2024) i progностyczne LZD_{prog} (w latach 2025 – 2060) liczby zdarzeń drogowych LZD w Polsce opisane wzorami 7.45 – 7.47. Modele te charakteryzują się następującymi współczynnikami determinacji: $R^2=0,609$ dla $LZD_{1,i}$, $R^2=0,465$ dla $LZD_{2,i}$ oraz $R^2=0,838$ dla $LZD_{3,i}$.

$$LZD_{1,i} = 385,623 \cdot (R - 1999)^{0,0523} \quad (7.45)$$

$$LZD_{2,i} = 412,005 \cdot (R - 1999)^{0,026} \cdot \exp(-0,003 \cdot (R - 1999)) \quad (7.46)$$

$$LZD_{3,i} = 374,869 \cdot (R - 1999)^{0,153} \cdot \exp(-0,018 \cdot (R - 1999)) \quad (7.47)$$

gdzie:

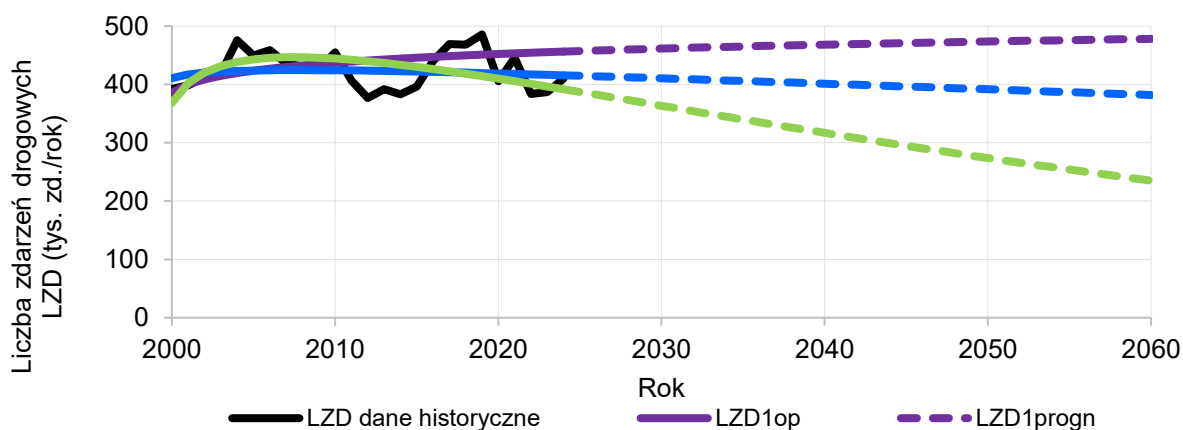
$LZD_{1,i}$ – liczba zdarzeń drogowych w Polsce (zd./rok), w i -tym roku według scenariusza 1,

$LZD_{2,i}$ – liczba zdarzeń drogowych w Polsce (zd./rok), w i -tym roku według scenariusza 2,

$LZD_{3,i}$ – liczba zdarzeń drogowych w Polsce (zd./rok), w i -tym roku według scenariusza 3,

R – nominalny rok prognozy.

Wykresy dotychczasowych i przewidywanych zmiany liczby zdarzeń drogowych w Polsce w latach 2000–2060 przedstawiono na rys. 7.25.



Rys. 7.25 Wykres istniejących i prognozowanych zmian liczby zdarzeń drogowych do roku 2060 w Polsce

Źródło: Opracowanie własne

Przyjęto trzy scenariusze zmian liczby zdarzeń drogowych LZD :

- scenariusza 1 zakładającego niewielki wzrost liczby zdarzeń drogowych w kolejnych latach
- scenariusza 2 zakładającego stagnację lub niewielki spadek liczby zdarzeń drogowych w kolejnych latach,
- scenariusza 3 zakładającego znaczny spadek liczby zdarzeń drogowych w kolejnych latach wynikający z rozwoju wyposażenia pojazdów i infrastruktury drogowej (automatyzacji pojazdów, inteligentne systemy transportu itp.).

Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych analiz własnych oraz doświadczenia zagraniczne przyjmuje się, że liczba zdarzeń drogowych będzie się zmieniać w granicach obszaru wyznaczonego przez modele przyjęte dla scenariusza 2 i 3.

Korzystając z opracowanych modeli można oszacować wskaźnik roku prognozy $WRP_{zd,i}$, prezentujący wielkość zmian liczby zdarzeń drogowych w kolejnych latach w stosunku do wartości bazowej, który oszacowano na podstawie wzoru 7.48.

$$WRP_{zd,i} = \frac{LZD_i}{LZD_b} \quad (7.48)$$

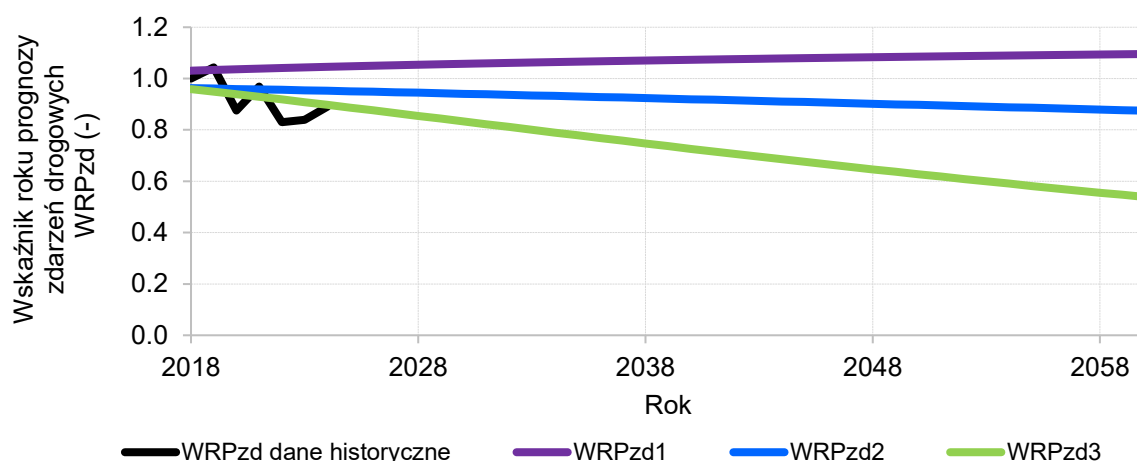
gdzie:

LZD_i – liczba zdarzeń drogowych w Polsce (zd./rok), w i -tym roku,

LZD_b – bazowa liczba zdarzeń drogowych w Polsce (zd./rok), w 2018 roku w Polsce, $LZD_b = 486062$ zdarzeń drogowych.

Wykresy wskaźnika roku prognozy dla poszczególnych scenariuszy zmian liczby zdarzeń drogowych przewidywanych w Polsce w latach 2000–2060 przedstawiono na rys. 7.26.

Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych analiz proponuje się przyjmować wartości liczbowe wskaźnika $WRP_{zd,i}$ w granicach obszaru wyznaczonego przez scenariusze 2 i 3, w zależności od pojawiających się tendencji zmian i uwarunkowań lokalnych.



Rys. 7.26 Wykres istniejących i prognozowanych zmian wskaźnika roku prognozy liczby zdarzeń drogowych do roku 2060 w Polsce

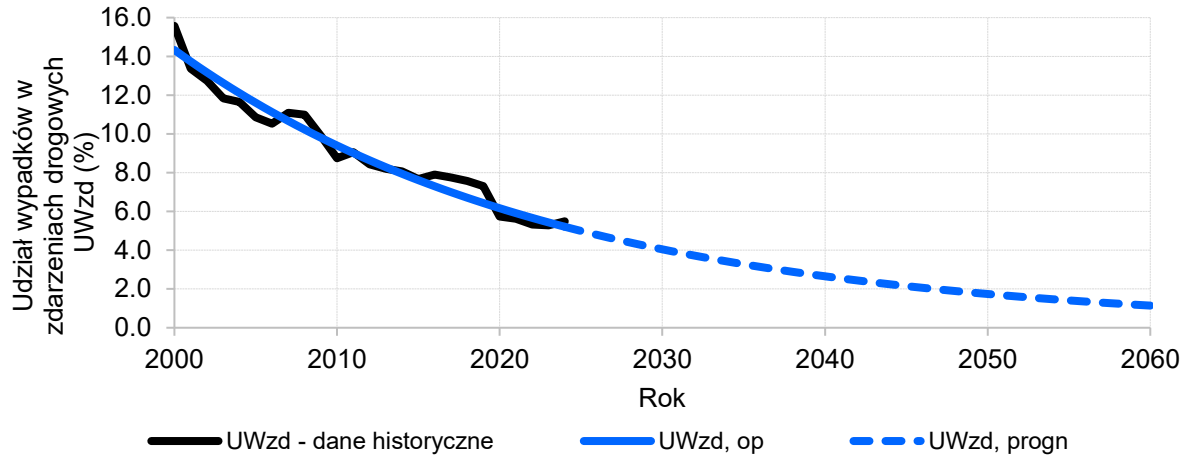
Źródło: Opracowanie własne

Korzystając z danych historycznych z lat 2000–2024 opracowano także modele: opisowe $UW_{zd,op}$ (dla okresu 2000–2024) i prognostyczne $UW_{zd,prog}$ (dla okresu 2025–2060) zmian średniego udziału liczby wypadków drogowych w liczbie zdarzeń drogowych w Polsce, które opisano wzorem 7.49.

Model ten charakteryzuje się współczynnikiem determinacji $R^2=0,960$.

$$UW_{zd,i} = 14,948 \cdot (R - 1999)^{-0,0422} \quad (7.49)$$

Wykres istniejących i przewidywanych zmian średniego udziału liczby wypadków drogowych w liczbie zdarzeń drogowych UW_{zd} w Polsce w latach 2005–2060 przedstawiono na rys. 7.27.



Rys. 7.27 Wykres istniejących i prognozowanych zmian średniego udziału liczby wypadków drogowych w liczbie zdarzeń w Polsce

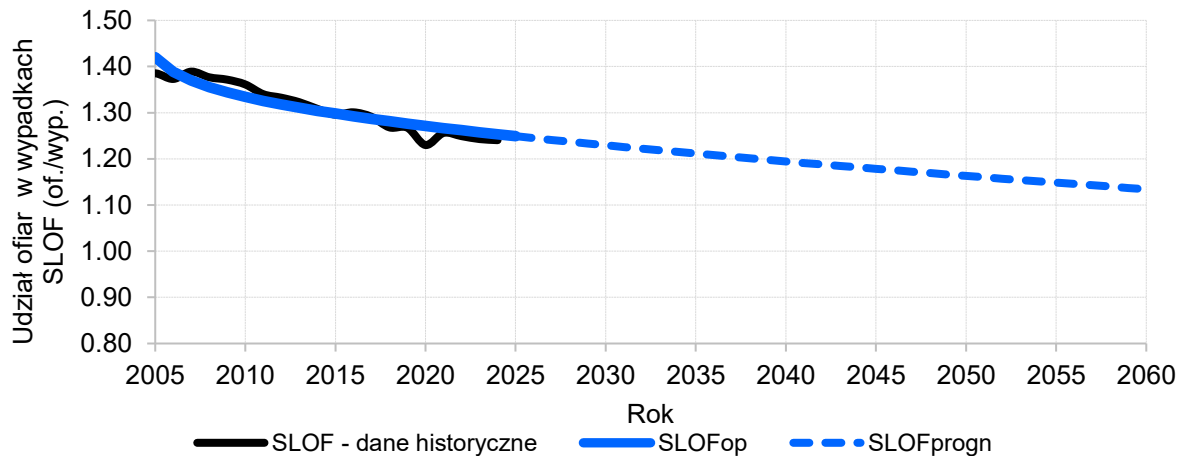
Źródło: Opracowanie własne

Zaprezentowany wykres wskazuje, że w kolejnych latach należy przyjmować zmniejszający się systematycznie udział średniej liczby wypadków w liczbie zdarzeń drogowych w Polsce.

Korzystając z danych historycznych z lat 2005–2024 opracowano także modele: opisowy $SLOF_{op}$ i prognostyczny $SLOF_{progn}$ zmian średniej liczby ofiar w wypadkach drogowych opisany wzorem 7.50. Model ten charakteryzuje się współczynnikiem determinacji $R^2=0,963$.

$$SLOF_i = 1,42288 \cdot (R - 2004)^{-0,02941} \cdot \exp(-0,001934 \cdot (R - 2004)) \quad (7.50)$$

Wykres istniejących i przewidywanych zmian średniej liczby ofiar w wypadkach drogowych $SLOF$ w Polsce w latach 2005–2060 przedstawiono na rys. 7.28. Zaprezentowany wykres wskazuje, że w kolejnych latach należy przyjmować zmniejszający się systematycznie udział średniej liczby ofiar w wypadkach drogowych.



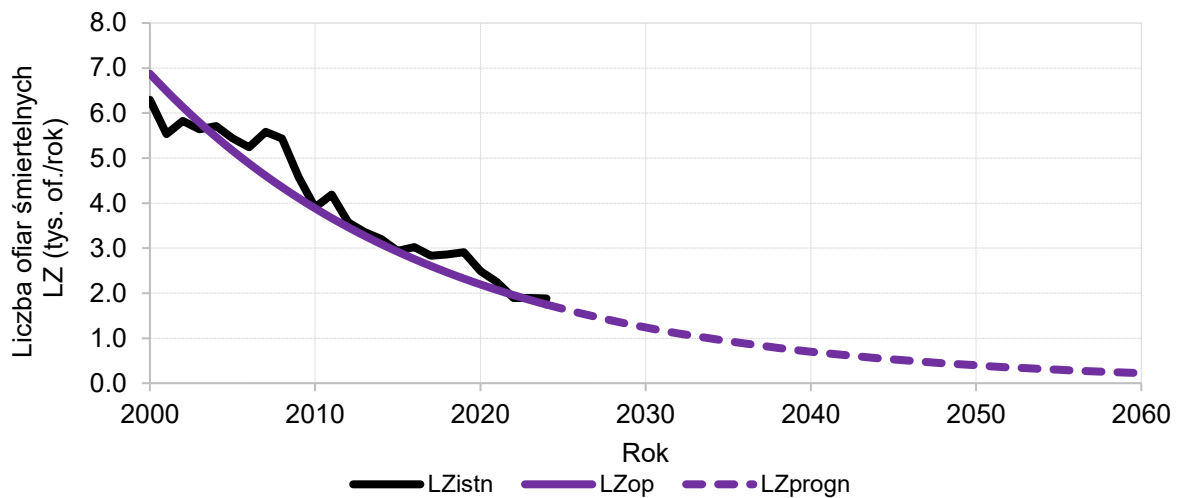
Rys. 7.28 Wykres istniejących i prognozowanych zmian średniej liczby ofiar w wypadku drogowym w Polsce

Źródło: Opracowanie własne

Korzystając z danych historycznych z lat 2000–2024 oraz wyników prognoz liczby ofiar śmiertelnych oszacowanych za pomocą modelu prognostycznego w latach 2010–2050 przygotowanego w ramach prac [112],[118] opracowano modele: opisowy LZ_{op} i prognostyczny LZ_{progn} liczby ofiar śmiertelnych w wypadkach drogowych w Polsce do roku 2060 opisany wzorem 7.51. Model ten charakteryzuje się współczynnikiem determinacji $R^2=0,988$.

$$LZ_i = 7,277 \cdot (R - 2004)^{-0,0571} \quad (7.51)$$

Wykresy liczby ofiar śmiertelnych wypadków drogowych (istniejących i prognozowanych) w Polsce w latach 2000–2060 przedstawiono na rys. rys. 7.29. Analizując otrzymane wyniki oraz doświadczenia krajowe i zagraniczne przyjmuje się, że liczba ofiar śmiertelnych w Polsce będzie systematycznie się zmniejszać dążąc do zera, co pozwoli na realizację celów Wizji Zero.



Rys. 7.29 Wykres istniejących i prognozowanych zmian liczby ofiar śmiertelnych w wypadkach drogowych w Polsce

Źródło: Opracowanie własne

Korzystając z opracowanego modelu liczby ofiar śmiertelnych można oszacować wskaźnik roku prognozy WRP_z prezentujący wielkość zmian liczby ofiar śmiertelnych oraz opisujący także przewidywane zmiany liczby wypadków i ofiar wypadków w Polsce w kolejnych latach. Wskaźnik WRP_z oszacowano jako stosunek liczby ofiar śmiertelnych w kolejnych latach w stosunku do wartości bazowej, który oszacowano na podstawie wzoru 7.52:

$$WRP_{z,i} = \frac{LZ_i}{LZ_b} \quad (7.52)$$

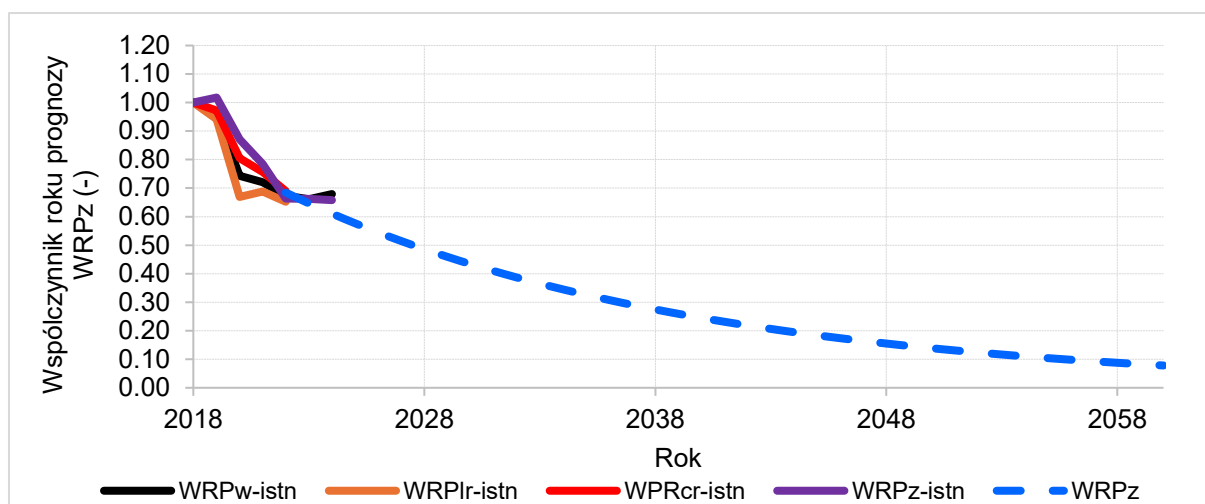
Gdzie:

LZ_i – liczba ofiar śmiertelnych (of./rok), w i -tym roku,

LZ_b – liczba ofiar śmiertelnych (of./rok), w roku bazowym (2018), $LZ_b = 2859$ ofiar śmiertelnych.

Wykresy wskaźnika roku prognozy istniejącego (w latach 2000–2024) zmian liczby: wypadków $WRP_{w,istn}$, ofiar lekko rannych $WRP_{lr,istn}$, ofiar lekko rannych WRP_{cr} , ofiar śmiertelnych $WRP_{z,istn}$, oraz prognozowanego (w latach 2025–2060) WRP_z w Polsce przedstawiono na rys. 7.30.

Zaprezentowany wykres wskazuje, że w kolejnych latach należy przyjmować zmniejszający się systematycznie udział średniej liczby wypadków i ofiar wypadków drogowych w Polsce.



Rys. 7.30 Wykres istniejących i prognozowanych zmian wskaźnika roku prognozy dla wypadków i ofiar wypadków drogowych w Polsce

Źródło: Opracowanie własne

Oszacowano także bazowe współczynniki udziału ofiar lekko rannych *ULR*, ciężko rannych *UCR* i śmiertelnych *UZ* w zdarzeniach i w wypadkach drogowych (tab. 7.18). Współczynniki te zostały opracowane na podstawie analizy danych o zdarzeniach z drogowymi barierami ochronnymi na wybranych odcinkach dróg krajowych wyposażonych jedynie w bariery stalowe i linowe. Ze względu na zbyt małą próbę odcinków wyposażonych jedynie w bariery stalowe lub linowe (37 odcinków), współczynniki te zostały obliczone jako stosunek liczby ofiar w podziale na rodzaj ofiar do całkowitej liczby zdarzeń lub liczby wypadków na analizowanych odcinkach z barierami stalowymi i linowymi.

Tab. 7.18 Zestawienie współczynników udziału rodzajów ofiar w zdarzeniach w wypadkach drogowych z barierami

Rodzaj bariery	Współczynniki udziału rodzaju ofiar w zdarzeniu z barierami			Współczynniki udziału rodzaju ofiar w wypadku z barierami		
	Lekko ranni	Ciężko ranni	Ofiary śmiertelne	Lekko ranni	Ciężko ranni	Ofiary śmiertelne
	ULRB _{zd}	UCRB _{zd}	UzB _{zd}	ULRB _w	UCRB _w	UzB _w
Stalowa	0,094	0,018	0,010	0,770	0,148	0,082
Linowa	0,004	0,019	0,007	0,133	0,633	0,233

Źródło: Opracowanie własne

7.4.5. Podsumowanie i dyskusja wyników

W rozdziale 7.4 opracowano modele matematyczne znajdujące zastosowanie w metodzie podstawowej szacowania kosztów cyklu życia barier drogowych. W ramach przeprowadzonych prac opracowano modele: kosztów budowy, napraw oraz składowe kosztów zdarzeń z drogowymi barierami ochronnymi.

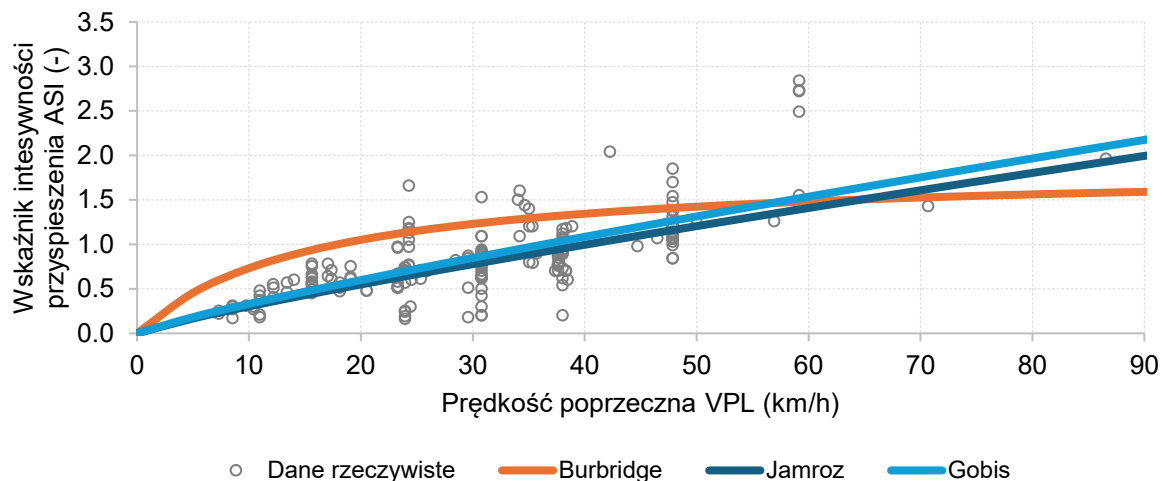
Koszty budowy barier. Do opracowania modeli kosztów budowy barier zastosowano bazę danych kosztowo-ekonomiczną składającą się ze 128 rekordów danych dotyczących budowy barier stalowych oraz linowych. Na podstawie tej bazy zidentyfikowane zmienne zależne: ogólne (koszty budowy *KBU*) oraz szczegółowe (koszty materiałów *KM*, robocizny pracy sprzętu *KRS*). Spośród analizowanych zmiennych niezależnych najistotniejsze w opracowywanych modelach barier okazały się: maksymalna normatywna energia kinetyczna barier *EKL* (reprezentująca poziom powstrzymywania barier),

szerokość pracująca WM oraz liczba lin w barierze linowej LN oraz typ bariery stalowej STR (jednostronna, dwustronna). Wszystkie analizowane zmienne są w sposób pośredni powiązane z całkowitą masą barier WAG . Opracowanych modeli kosztów budowy barier nie można wprost porównać z wcześniejszymi pracami, ponieważ jak wykazano w rozdziale 2 badania takie nie były prowadzone przez innych autorów. Jednak uzyskane zależności są zgodne z analizą wyników badań własnych opisanych w rozdziale 6.

Koszty napraw drogowych barier ochronnych ponoszone są na etapie ich eksploatacji i utrzymania. Do opracowania tych modeli zastosowano bazę danych z badań terenowych. Spośród analizowanych zmiennych niezależnych najistotniejsze okazały się: długość uszkodzenia DU , jednostkowy produkt krajowy brutto w województwie $JPKB$. Tak w przypadku kosztów budowy czynnikami wpływającymi na zmianę kosztów napraw barier drogowych były ich parametry techniczne takie jak: maksymalna normatywna energia kinetyczna barier EKL , szerokość pracująca WM , liczba lin w barierze linowej LN .

Koszty zdarzeń drogowych związanych z funkcjonowaniem barier ochronnych, mogą być szacowane dwiema metodami: jako prawdopodobieństwo pojedynczego zdarzenia drogowego związanego najechaniem na barierę lub w ujęciu zagregowanym analizując koszty zdarzeń występujące na odcinku drogi.

W przypadku pierwszego podejścia, kluczową rolę w szacowaniu kosztów zdarzeń odgrywa wskaźnik intensywności przyspieszania ASI . Na podstawie pozyskanych danych z badań symulacyjnych uderzeń pojazdów w drogowe bariery ochronne opracowano modele regresyjne zależności wskaźnik ASI od najbardziej istotnych czynników, a w szczególności od: składowej poprzecznej prędkości pojazdu uderzającego w barierę VPL , masy pojazdu MP , stopnia podatności konstrukcji bariery WM . Uzyskane zależności znajdują również potwierdzenie m.in. w badaniach Jamroza [119] i Burbridge’a [31]. Na rys. 7.31 przedstawiono porównanie modeli Jamroza [119], Burbridge’a [31] oraz modelu autorskiego opisanego wzorem 7.31 opracowanego dla barier stalowych, wraz z naniesionymi danymi rzeczywistymi.

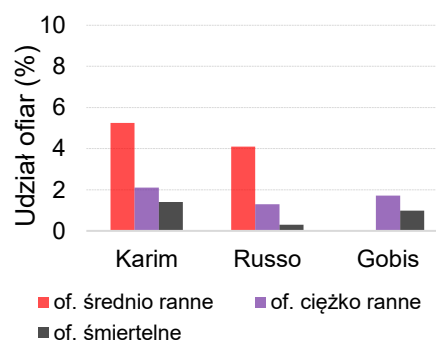


Rys. 7.31 Porównanie modelu własnego oraz dostępnych modeli do danych rzeczywistych z badań symulacyjnych

Opracowanie własne

Analiza wykazała, że wszystkie trzy modele wykazują dobre dopasowanie do danych. Krzywe na rys. 7.31 opracowano przy założeniu średnich wartości pozostałych zmiennych niezależnych. Dla takich założeń obliczono wartości $RMSE$, które wynoszą: Jamroz $RMSE = 0,326$, Burbridge $RMSE = 0,489$, model własny $RMSE=0,323$.

W przypadku drugiego podejścia, czyli szacowania kosztów zdarzeń na odcinku dróg kluczową rolę odgrywa model gęstości zdarzeń z barierami na odcinku drogi wyposażonym w bariery drogowe oraz ich konsekwencje (udział i rodzaj ofiar). Modele gęstości zdarzeń na odcinku drogi z barierami *GZDB* zostały opracowane na podstawie bazy danych dróg krajowych. Najistotniejszymi zmiennymi wpływającymi na *GZDB* okazały się następujące zmienne: średniodobowe natężenie pojazdów *SDR*, udział pojazdów ciężarowych z przyczepą *UCP*, wskaźnik falistości odcinka *KIF*, gęstość łuków poziomych *GLU*. Uzyskane wyniki znajdują potwierdzenie w badaniach przeprowadzonych m.in. przez Roque'a [206], Jelińskiego [121]. W przypadku gęstości ofiar zdarzeń na odcinku dróg ze względu na ograniczoną liczebność próby wartości zostały oszacowane wskaźnikowo na podstawie wyników przedstawionych w rozdziale 6.2.3. W celu porównania uzyskanych wyników z badań terenowych z innymi przedstawiono udział i rodzaj ofiar w odniesieniu do całkowitej liczby ofiar i kolizji (rys. 7.32) z barierami stalowymi. Na podstawie rys. 7.32 można stwierdzić, że uzyskany udział ofiar ciężko rannych (1,7%) jest zbliżony do wyników uzyskanych przez Karima 2,1%, Russo 1,3%. W przypadku ofiar śmiertelnych uzyskany wynik (1,0%) jest na podobnym poziomie jak wynik z badań Karima (1,4%).



Rys. 7.32 Porównanie udziału ofiar z barierami stalowymi w badaniach własnych i innych autorów

Opracowanie własne

7.5. Modelowanie kosztów infrastruktury niechronionych użytkowników dróg

7.5.1. Wprowadzenie

Zgodnie z koncepcją metody szacowania kosztów cyklu elementów infrastruktury drogowej przedstawionej w rozdziale 4 w przypadku infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu dróg wojewódzkich metoda ta znajduje zastosowanie na jej planowania i projektowania, utrzymania oraz użytkownika.

7.5.2. Modelowanie kosztów budowy i naprawy

Na podstawie przeprowadzonych analiz dokumentacji przetargowej stwierdzono, że inwestycje związane z budową lub remontem dróg dla pieszych i rowerzystów na drogach wojewódzkich nie były realizowane jako samodzielne zadania. We wszystkich przeanalizowanych postępowaniach przetargowych prace związane z drogami dla pieszych oraz drogami rowerowymi były częścią większych przedsięwzięć taki jak np. przebudowa drogi wojewódzkiej, remont nawierzchni jezdni, budowa zatok autobusowych. W związku brakiem kosztorysów obejmujących wyłącznie infrastrukturę pieszo-rowerową modele kosztów budowy, naprawy dróg pieszych i rowerowych nie zostały wykonane.

Dlatego też w metodzie szacowania kosztów cyklu życia infrastruktury niechronionych użytkowników dróg zaleca się przyjmować wartości oszacowanie na podstawie kalkulacji indywidualnej, dostępnych baz cenowych oraz danych historycznych. W przypadku braku dostępu do baz cenowych lub danych historycznych w celu oszacowania jednostkowych kosztów budowy infrastruktury dla pieszych i rowerzystów można przyjąć wartości przedstawione w tab. 6.16 opracowane dla lat 2014–2024.

Analiza wskaźnika *WOK* (rozdział 6.5.3) wykazała, że rzeczywiste koszty budowy dróg dla pieszych przekraczają koszty planowane w 45% inwestycji, natomiast w przypadku remontów w 25%. W związku z tym celu ryzyka niedoszacowania kosztów (*WOK*>1) w zakresie budowy oraz remontu dróg dla pieszych i rowerowych zaleca się zwiększenie oszacowanych kosztów budowy o 10–30%, natomiast kosztów remontów o 5–15%.

7.5.3. Modelowanie kosztów użytkowników dróg

7.5.3.1. Modele ogólne kosztów użytkowników dróg

Zgodnie z przyjętą w rozdziale 4 koncepcją metody szacowania kosztów cyklu życia (LCC), opracowywana metoda powinna uwzględniać koszty ponoszone nie tylko przez właściciela lub zarządcę drogi, lecz również przez jej użytkowników. W klasycznym modelu ogólnych kosztów użytkowników zgodnie z równaniem 7.25 wyróżnia się trzy główne składowe: koszty związane ze zdarzeniami drogowymi, koszty strat czasu oraz koszty eksploatacji pojazdów.

W przypadku infrastruktury przeznaczonej dla niechronionych uczestników ruchu drogowego koszty eksploatacji pojazdów i strat czasu mogą występować w dwóch sytuacjach: gdy niechronieni uczestnicy ruchu poruszają się jezdnią i tym samym wpływają na zmianę charakterystyki ruchowej pojazdów oraz w przypadku czasowego zajęcia pasa ruchu związanego z remontami lub przebudową infrastruktury dla pieszych i rowerów. Z uwagi na brak danych empirycznych dotyczących wpływu obecności pieszych i rowerzystów na średnie prędkości pojazdów na analizowanych odcinkach, modele strat czasu i kosztów eksploatacji pojazdów nie zostały opracowane w ramach niniejszego rozdziału.

Dalsze prace zostały poświęcone budowie modeli i składowych kosztów zdarzeń drogowych, które stanowią dominujący udział w kosztach ponoszonych przez użytkowników dróg.

7.5.3.2. Modele ogólne kosztów zdarzeń z pieszymi i rowerami

Modele opisujące ogólne koszty zdarzeń drogowych dla infrastruktury przeznaczonej dla niechronionych uczestników ruchu drogowego opracowano w sposób analogiczny jak w przypadku kosztów zdarzeń z barierami drogowymi na odcinkach dróg (rozdział 7.4.4). Przyjmuje się, że całkowite koszty zdarzeń drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu stanowią sumę iloczynów liczby zdarzeń drogowych oraz liczb ofiar wypadków i odpowiadającym im jednostkowym kosztem zgodnie z równaniem 7.53.

$$KZN_j = LZDN_j \cdot JKK + LRN_j \cdot JKL R + LCRZ_n \cdot JKCRZ \quad (7.53)$$

gdzie:

KZN_j – koszt zdarzeń z niechronionymi uczestnikami ruchu (pieszymi i rowerzystami) na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej (mln PLN/3 lata),

$LZDN_j$ – liczba zdarzeń z niechronionymi uczestnikami ruchu (pieszymi i rowerzystami) na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej (zd./3 lata lub of./3 lata),

$LLRN_j$ – liczba ofiar lekko rannych w wypadkach z niechronionymi uczestnikami ruchu (pieszymi i rowerzystami) na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej (of./3 lata),

$LCRZN_j$ – liczba ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z niechronionymi uczestnikami ruchu (pieszymi i rowerzystami) na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej (of./3 lata),

JKK – jednostkowy koszt z strat materialnych (mln PLN),

$JKLR$ – jednostkowy koszt ofiary lekko rannej w wypadku drogowym (mln PLN),

$JKCRZ$ – jednostkowy koszt ofiary ciężko rannej lub śmiertelnej w wypadku drogowym (mln PLN).

Przed rozpoczęciem budowy modeli składowych kosztów zdarzeń wykonano prace wstępne polegające na analizie bazy danych, identyfikacji zmiennych zależnych oraz niezależnych.

7.5.3.3. Modelowanie liczby zdarzeń niechronionymi uczestnikami ruchu

7.5.3.3.1. Modele ogólne liczby wypadków i ofiar wypadków

W celu określenia kosztów zdarzeń z niechronionymi uczestnikami ruchu (pieszymi i rowerami) na odcinkach dróg wojewódzkich konieczne jest opracowanie modeli składowych kosztów, do których należy liczba zdarzeń na odcinku dróg oraz konsekwencje tych zdarzeń mierzone liczbą i ciężkością ofiar w tych zdarzeniach.

Na analizowanej sieci dróg wojewódzkich w przyjętym okresie trzech lat (2017–2019) zarejestrowano tylko wypadki z niechronionymi uczestnikami ruchu, dlatego w dalszych analizach pomija się kolizje drogowe. Liczba wypadków z pieszymi i rowerami na j -tym odcinku dróg wojewódzkich $LWN_{i,j,k}$ może być szacowana w sposób pośredni poprzez uwzględnienie narażenia na ryzyko jakim jest długość odcinka drogi DL_j oraz gęstości zdarzeń z pieszymi i rowerami na odcinku j -tym odcinku drogi $GN_{i,j,k}$ zgodnie ze wzorem 7.54.

$$LZDN_{i,j,k} = LWN_{i,j,k} = DL_j \cdot GN_{i,j,k} \quad (7.54)$$

przy czym:

$$GN_{i,j,k} = GN_{b,j,k} \cdot WRP_{zd,i} \quad (7.55)$$

$$GN_{b,j,k} = \frac{1}{3} \cdot GN_{2017-2019,j,k} \quad (7.56)$$

$$GN_{2017-2019,j,k} = f(GZDW_{2017-2019,j}, X_i) \quad (7.57)$$

Natomiast liczbę ofiar wypadków z niechronionymi uczestnikami ruchu może być szacowana za pomocą wzorów 7.58 – 7.60.

$$LOFN_{i,j,k} = DL_j \cdot GOFN_{i,j,k} \quad (7.58)$$

$$LCRZN_{i,j,k} = DL_j \cdot GCRZN_{i,j,k} \quad (7.59)$$

$$LLRN_{i,j,k} = LOFN_{i,j,k} - LCRZN_{i,j,k} \quad (7.60)$$

przy czym:

$$GOFN_{i,j,k} = GOFN_{b,j,k} \cdot WRP_{zd,i} \quad (7.61)$$

$$GOFN_{b,j,k} = \frac{1}{3} \cdot GOFN_{2017-2019,j,k} \quad (7.62)$$

$$GOFN_{2017-2019,j,k} = f(GZDW_{2017-2019,j}, X_i) \quad (7.63)$$

$$GCRZN_{i,j,k} = GCRZN \cdot WRP_{zd,i} \quad (7.64)$$

$$GCRZN_{b,j,k} = \frac{1}{3} \cdot GCRZN_{2017-2019,j,k} \quad (7.65)$$

$$GCRZN_{2017-2019,j,k} = f(GZDW_{2017-2019,j}, X_i) \quad (7.66)$$

gdzie:

$LZDN_k$ – liczba zdarzeń drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (zd./rok),

$LWN_{i,j,k}$ – liczba wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (wyp./rok),

$LOFN_{i,j,k,o}$ – liczba ofiar wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok),

$LLRN_{i,j,k,o}$ – liczba ofiar wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok),

$LCRZN_{i,j,k,o}$ – liczba ofiar wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok),

DL_j – długość j -tego odcinka drogi (km),

$GWN_{i,j,k}$ – gęstość zdarzeń drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (zd./km/ rok),

$GZDW_{2017-2019,j}$ – gęstość zdarzeń drogowych na drogach wojewódzkich na j -tym odcinku dróg w latach 2017 - 2019 (zd./km/ 3 lata), opisana modelem według wzoru 7.69,

$GWN_{2017-2019,j}$ – gęstość zdarzeń drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg wojewódzkich w latach 2017–2019 (zd./km/ 3 lata), opisana modelem według wzoru 7.71 lub 7.72,

$GWN_{b,j,k}$ – bazowa gęstość wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg (zd./km/ rok), jako średnia wartość z lat 2017–2019, szacowana na podstawie modelu opisanego wzorem 7.56,

$GCRZN_{i,j,k}$ – gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./km/ rok),

$GCRZN_{2017-2019,j}$ – gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju, na j -tym odcinku dróg wojewódzkich w latach 2017–2019 (of./km/ 3 lata), opisana modelem według wzoru 7.76 lub 7.78,

$GCRZN_{b,j,k}$ – bazowa gęstość ofiar z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg (zd./km/ rok), jako średnia wartość z lat 2017–2019, szacowana na podstawie modelu opisanego wzorem 7.65,

$GOFN$ – gęstość ofiar z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./km/ rok),

$GOFN_{2017-2019,j}$ – gęstość ofiar z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju, na j -tym odcinku dróg wojewódzkich w latach 2017–2019 (of./km/ 3 lata), opisana modelem według wzoru 7.75 lub 7.77.

$GOFN_{b,j,k}$ – bazowa gęstość ofiar z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg (of./km/ rok), jako średnia wartość z lat 2017–2019, szacowana na podstawie modelu opisanego wzorem 7.65

$WRP_{zd,i}$ – wskaźnik roku prognozy wypadków i ofiar wypadków drogowych zdarzeń drogowych w i -tym roku (zd./km/ rok), szacowany na podstawie modelu opisanego wzorem 7.48.

7.5.3.3.2. Baza danych

Baza danych dróg wojewódzkich została opracowana na podstawie badań terenowych, w których to scharakteryzowano poszczególne odcinki dróg pod względem geometrii, natężenia ruchu pojazdów, zabudowy mieszkalnej oraz gęstości infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu drogowego. Każdemu odcinkowi dróg przypisano dane dotyczące zdarzeń drogowych z 3-letniego okresu (2017 – 2019). Wybór okresu analizy podyktowany był koniecznością wyeliminowania wpływu zdarzeń nadzwyczajnych, takich jak ograniczenia pandemiczne związane z COVID-19 oraz zakłóceń ruchowych wynikających m.in. z wojny na Ukrainie. W efekcie końcowym do dalszych prac przyjęto ponad 1800 km odcinków dróg wojewódzkich z województwa warmińsko-mazurskiego, które zostały podzielone na dwa zbiory danych:

1. Zbiór odcinków z infrastrukturą pieszą,
2. Zbiór odcinków z drogami pieszo-rowerowymi.

Pierwszy zbiór danych stanowił całą sieć dróg wojewódzkich składającą się ze 180 odcinków dróg. Natomiast drugi zbiór danych został ograniczony do odcinków dróg wojewódzkich przechodzących przez małe miejscowości o zaludnieniu nie większym niż 10 tys. osób oraz obszarów niezabudowanych w województwie warmińsko- mazurskim, podzbiór ten składał się z ponad 130 odcinków dróg.

7.5.3.3.3. Identyfikacja zmienny zależnych

W równaniu 7.53 dotyczącym kosztów zdarzeń do oszacowania ich wielkości wykorzystuje się takie zmienne jak liczba zdarzeń oraz towarzysząca im liczba ofiar. Pomimo występowania tych danych w analizowanych zbiorach nie zostały one bezpośrednio wykorzystane w procesie modelowania. Zmienne te przyjmują wartości naturalne, co powoduje, że wiele odcinków dróg charakteryzuje się wartością zerową w 3-letnim okresie analizy. Aby uwzględnić ryzyko w dłuższej perspektywie, w analizach zastosowano zmienne ciągłe w postaci miar gęstości. Podejście to umożliwia uwzględnienie względnego ryzyka na jednostkę długości drogi i stanowi bardziej wiarygodną podstawę do modelowania kosztów cyklu życia infrastruktury pieszej oraz pieszo-rowerowej.

Ostatecznie na podstawie opracowanych zbiorów danych wyodrębniono siedem zmiennych zależnych opisujących częstość występowania zdarzeń drogowych oraz ich skutków z udziałem niechronionych uczestników ruchu. Zmienne te, wyrażone jako liczba przypadków przypadających na 1 km drogi w okresie trzech lat, obejmują: gęstość zdarzeń na drogach wojewódzkich $GZDW$, gęstość wypadków z pieszymi GWP , gęstość ofiar wśród pieszych GOP , gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych $GCRZP$, gęstość wypadków z pieszymi i rowerzystami $GWPR$, gęstość ofiar wśród pieszych i rowerzystów $GOPR$, gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych i rowerzystów $GCRZPR$. Modelowane zmienne zależne wraz z ich podstawowymi charakterystykami

statystycznymi, takimi jak wartość minimalna, maksymalna, średnia, odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności zostały przedstawione w tab. 7.19.

Tab. 7.19 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych zależnych składowych kosztów zdarzeń na drogach wojewódzkich

Zmienna zależna			Liczba danych	Charakterystyki statystyczne				
LP	Symbol	Jednostka	N	Minimum GXmin	Maksimum GXmax	Średnia μ_{GX}	Odchylenie standardowe σ_{GX}	Współczynnik zmienności v_{GX} (%)
1	GZDW	(zd./km/3 lata)	180	0,00	57,38	7,47	8,72	116,75
2	GWP	(wyp./km/3 lata)	180	0,00	2,52	0,15	0,41	266,97
3	GOP	(of. /km/3 lata)	180	0,00	3,01	0,16	0,44	273,11
4	GCRZP	(of. /km/3 lata)	180	0,00	1,55	0,06	0,19	308,11
5	GWPR	(wyp./km/3 lata)	135	0,00	1,51	0,06	0,16	265,17
6	GOPR	(of. /km/3 lata)	135	0,00	1,51	0,06	0,16	260,98
7	GCRZPR	(of. /km/3 lata)	135	0,00	0,50	0,03	0,08	243,91

Źródło: Opracowanie własne

7.5.3.3.4. Dobór zmiennych niezależnych

W ramach prowadzonych prac wstępnych zidentyfikowano zmienne niezależne wpływające na składowe koszty zdarzeń na drogach wojewódzkich. Wszystkie analizowane zmienne niezależne miały charakter ilościowy, w związku z czym nie było potrzeby wykonywania standaryzacji danych jakościowych. Podstawowe charakterystyki statystyczne analizowanych zmiennych niezależnych zostały przedstawione tab. 7.20 i zawierają informacje o wartościach minimalnych, maksymalnych, średnich, medianach oraz współczynnikach zmienności.

Tab. 7.20 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych składowych kosztów zdarzeń na drogach wojewódzkich

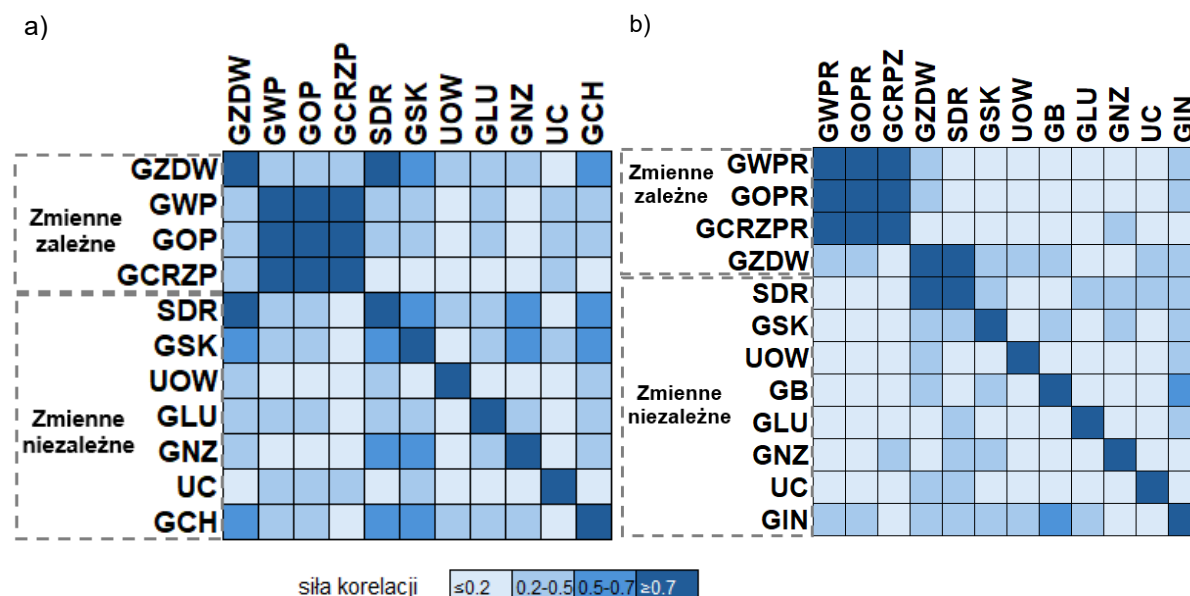
Zmienna niezależna				Charakterystyki statystyczne				
LP	Nazwa	Symbol	Jednostka	Minimum Xmin	Maksimum Xmax	Średnia μ_X	Odch. stand. σ_X	Współ. zmien. v_X (%)
Odcinki z infrastrukturą pieszą								
1	Uśrednione natężenie pojazdów	SDR	(tys. poj./dobę)	0,29	17,76	3,49	2,61	84,88
2	Gęstość skrzyżowań	GSK	(skrzyż./km)	0,00	7,86	1,76	0,97	102,96
3	Udział odcinków o ograniczonej widoczności	UOW	(–)	0,00	0,73	0,23	0,20	91,98
4	Gęstość łuków poziomych	GLU	(łuków/km)	0,00	4,74	1,32	1,19	86,54
5	Udział obszaru niezabudowanego	GNZ	(–)	0,00	0,98	0,50	0,63	67,09
6	Gęstość zabudowy mieszkalnej	GB	(budynków/ha)	0,00	8,70	0,97	0,46	138,39
7	Udział pojazdów ciężarowych	UC	(–)	0,56	29,45	7,24	6,34	62,24
8	Gęstość dróg dla pieszych	GCH	(–)	0,00	1,00	0,28	0,16	108,00

Zmienna niezależna				Charakterystyki statystyczne				
LP	Nazwa	Symbol	Jednostka	Minimum Xmin	Maksimum Xmax	Średnia μ_X	Odch. stand. σ_X	Współ. zmien. v_X (%)
Odcinki z infrastrukturą pieszo-rowerową								
1	Udział obszaru niezabudowanego	GNZ	(–)	0,00	0,98	0,62	0,71	45,65
2	Gęstość zabudowy mieszkalnej	GB	(budynków/ha)	0,00	5,03	0,55	0,38	130,80
3	Gęstość skrzyżowań	GSK	(skrzyż./km)	0,00	6,09	0,96	0,85	83,86
3	Udział pojazdów ciężarowych	UC	(–)	0,56	29,45	7,59	6,71	60,60
4	Gęstość dróg dla pieszych i rowerów	GIN	(–)	0,00	0,97	0,18	0,12	114,32

Źródło: Opracowanie własne

Wszystkie analizowane zmienne charakteryzują się współczynnikiem zmienności większym niż przyjęty graniczny ($v=5\%$), w związku z tym wszystkie zmienne zostały przyjęte do dalszej analizy. Na podstawie przeprowadzonych analiz siły współzależności między zmiennymi niezależnymi (rys. 7.33) stwierdza się, że nie występuje między nimi silna i bardzo silna ($|R_s| \geq 0,7$) korelacja, w związku z tym wszystkie zmienne mogą być zastosowane w składowych modelach kosztów zdarzeń na drogach wojewódzkich.

Następnie określono siłę zależności pomiędzy zmiennymi zmiennymi zależnymi a zmiennymi niezależnymi. Najwyższą korelację ($|R_s| \geq 0,7$) zaobserwowano pomiędzy gęstością zdarzeń na drogach wojewódzkich *GZDW* oraz średniodobowym natężeniem pojazdów *SDR*, gęstością wypadków z pieszymi *GWP* oraz gęstością ofiar *GOP* i ofiar ciężko rannych i śmiertelnych *GCRZP* (rys. 7.33a). W przypadku zdarzeń z pieszymi i rowerzystami pomiędzy: gęstością wypadków *GWPR* oraz gęstością ofiar *GOPR* i ofiar ciężko rannych i śmiertelnych *GCRZPR* (rys. 7.33b).



Rys. 7.33 Macierz siły współzależności między analizowanymi składowymi kosztów zdarzeń a) drogi dla pieszych b) drogi pieszo-rowerowe

Opracowanie własne

7.5.3.4. Modele liczby i gęstości zdarzeń na drogach wojewódzkich

W niniejszym podrozdziale przedstawiono modele liczby oraz gęstości zdarzeń drogowych z udziałem niechronionych uczestników ruchu na drogach wojewódzkich. Modele te opracowano na podstawie danych empirycznych i znajdują one pośrednie zastosowanie w metodzie ogólnej szacowania kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej. Liczba zdarzeń zarejestrowanych na analizowanych odcinkach stanowi bezpośrednio zmienną zależną w modelach kosztów. Jednak z uwagi na zróżnicowaną długość analizowanych odcinków dróg, dla potrzeb standaryzacji do dalszych analiz przyjęto miarę gęstości zdarzeń. Gęstość zdarzeń na odcinkach dróg wojewódzkich jest miarą względną określającą liczbę zdarzeń na odcinku dróg o długości 1km w przedziale czasowym wynoszącym 3 lata. Miara ta umożliwia oszacowanie liczby zdarzeń na j -tym odcinku drogi poprzez uwzględnienie narażenia na ryzyko jakim jest długość odcinka drogi DL_j zgodnie ze wzorem 7.67.

$$LZDW_j = DL_j \cdot GZDW_j \quad (7.67)$$

Bazując na przeglądzie literatury i wstępnych analizach oraz przyjmując założenie o rozkładzie wykładniczym gęstości zdarzeń, do opracowania modeli wykorzystano uogólnione modele regresji liniowej i potęgowo–wykładniczą postać modelu opisanego ogólnym równaniem 7.68.

$$GZDW_j = SDR_j^{\beta_1} \cdot \exp\left(\beta_0 + \sum_{i=2}^J \beta_i \cdot X_{j,k}\right) \quad (7.68)$$

gdzie:

$GZDW_j$ – gęstość zdarzeń na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej (zd/km/3 lata),

SDR_j – uśrednione natężenie pojazdów na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej (tys. poj./dobę)

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_i$ – współczynniki wpływu zmiennych objaśnianych na koszty zdarzeń z pieszymi i rowerami,

X_i – zmienne objaśniające gęstość zdarzeń z pieszymi i rowerami.

Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowanych modeli gęstości zdarzeń na odcinkach dróg wojewódzkich (tab. 7.21) stwierdza się, że:

1. W zależności od przyjętej liczby zmiennych niezależnych zbudowane modele gęstości zdarzeń z pieszymi i rowerami na drogach wojewódzkich charakteryzują się współczynnikiem determinacji na poziomie $R_{sk}^2=0,66-0,77$.
2. W każdym opracowanym modelu zmienną istotnie statystyczną był parametr opisujący ryzyko narażenia na wystąpienie zdarzenia drogowego jakim jest średniodobowe natężenie pojazdów SDR . Jednak zastosowanie jedynie zmiennej SDR w modelu sprawia, że charakteryzuje się on współczynnikiem determinacji równym $R_{sk}^2=0,33$
3. Zmiennymi niezależnymi wpływającymi na wzrost współczynnikiem determinacji R_{sk}^2 oraz redukcję błędu średniokwadratowego $RMSE$ są w modelu zmienne: gęstość skrzyżowań GSK , udział odcinków o ograniczonej widoczności UOW .
4. Najlepsze dopasowanie danych do rzeczywistych uzyskano w przypadku zastosowania funkcji potęgowo–wykładniczej

5. Modele osiągające optymalną równowagę pomiędzy złożonością a jakością dopasowania do danych rzeczywistych posiadały 4 parametry. Modele te charakteryzowały się najwyższym parametrem podstawowym R^2_{sk} oraz najniższymi kryteriami pomocniczymi $RMSE$ oraz kryterium informacyjnym Akaike AIC .

Tab. 7.21 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli GZDW dróg wojewódzkich

Modele gęstości zdarzeń na drogach wojewódzkich					
Zmienne	Wsp. modelu	GZDW1	GZDW2	GZDW3	GZDW4
	β_0	-8,105	-5,341	-5,484	-5,338
<i>SDR</i>	β_1	1,231	0,862	0,872	0,862
<i>GSK</i>	β_2		0,130	0,130	0,130
<i>UOW</i>	β_3			0,219	
<i>GLU</i>	β_4				-0,003
R^2		0,655	0,769	0,772	0,769
R^2_{sk}		0,655	0,768	0,769	0,766
$RMSE$		2,905	2,493	2,357	2,502
MAD		1,807	1,851	1,845	1,85
AIC		168,0	145,9	138,8	148,0

Źródło: Opracowanie własne

Modelem najlepiej opisującymi dane rzeczywiste dla zmiennej zależnej *GZDW* jest model opisany równaniem 7.69. Model ten jest rekomendowany do określania ogólnej liczby gęstości zdarzeń na drogach wojewódzkich.

Rekomendowany ogólny model gęstości zdarzeń dla odcinków dróg wojewódzkich, opisano wzorem:

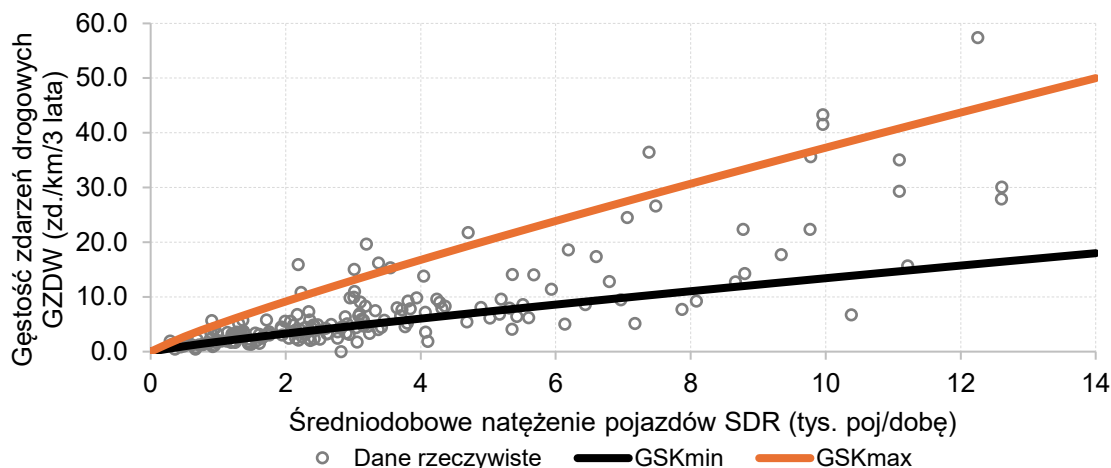
$$GZDW_{2017-2019} = \left(\frac{SDR_{2017-2019}}{3} \right)^{0,872} \cdot \exp(-5,484 + 0,130 \cdot GSK + 0,214 \cdot UOW) \quad (7.69)$$

gdzie:

$GZDW_{2017-2019,j}$ – gęstość zdarzeń drogowych na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w latach 2017–2019 (zd/km/3 lata),

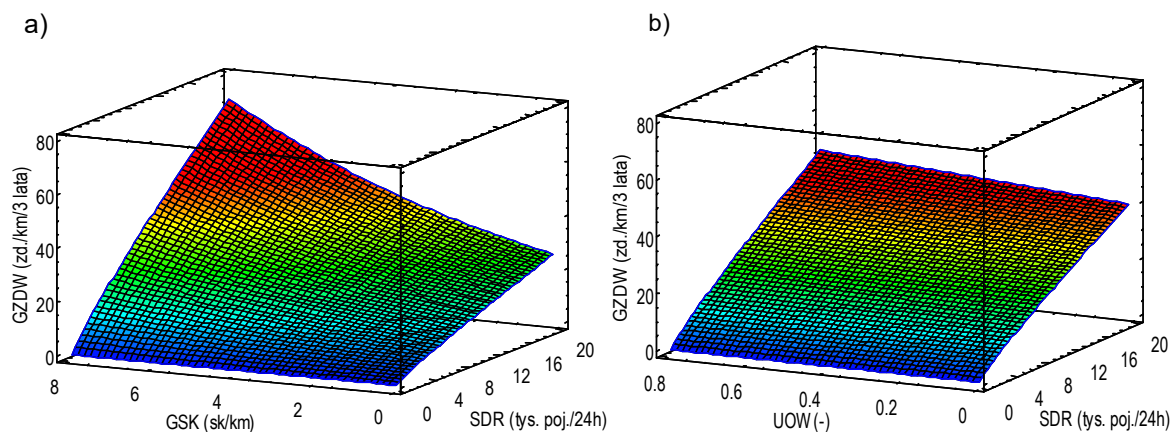
$SDR_{j,2017-2019}$ – sumaryczne natężenie pojazdów z lat 2017–2019 na j -tym odcinku drogi (tys. poj./dobę/3 lata),

Na podstawie wyników analizy modelu gęstości zdarzeń na drogach wojewódzkich *GZDW* (równanie 7.69) oraz wykresów (rys. 7.34, rys. 7.35) można stwierdzić, że wraz ze wzrostem średniodobowego natężenia pojazdów *SDR* na odcinku drogi, wzrasta gęstość zdarzeń na drogach wojewódzkich *GZDW*. Podobny charakter zależności między gęstością zdarzeń a natężeniem ruchu, które reprezentuje narażenie na ryzyko, uzyskano w badaniach przeprowadzonych m.in. przez Arona [7], Kustrę [144] i Retallacka [202]. Kolejnymi czynnikami wpływającymi na wzrost gęstości zdarzeń na drogach wojewódzkich są zmienne charakteryzujące geometrię drogi takie jak gęstość skrzyżowań *GSK*, udział odcinków o ograniczonej widoczności *UOW*. Wraz ze wzrostem gęstości skrzyżowań na odcinku drogi zwiększa się liczba potencjalnych punktów kolizyjnych, co prowadzi do wzrostu ryzyka wystąpienia zdarzeń drogowych.



Rys. 7.34 Wykres zależności gęstości zdarzeń na drogach wojewódzkich GZDW od natężenia pojazdów SDR i gęstości skrzyżowań GSK

Opracowanie własne



Rys. 7.35 Wykresy zależności gęstości zdarzeń GZDW oraz średniodobowego natężenia ruchu SDR od a) gęstości skrzyżowań GSK b) udziału odcinków o ograniczonej widoczności UOW

Źródło: Opracowanie własne

7.5.3.5. Modele liczby i gęstości wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu

Modele gęstości wypadków z niechronionymi uczestnikami ruchu *GWN* zostały opracowane dla sieci dróg wojewódzkich z podziałem na dwie grupy: gęstość wypadków z pieszymi *GWP* oraz gęstość wypadków z pieszymi i rowerami *GWPR*. Modele gęstości wypadków z pieszymi *GWP* znajdują pośrednie zastosowanie w metodzie ogólnej szacowania kosztów cyklu życia infrastruktury dla pieszych. Natomiast modele gęstości wypadków z pieszymi i rowerami *GWPR* znajdują zastosowanie w metodzie szacowania kosztów wypadków związanych z infrastrukturą dla niechronionych użytkowników dróg na odcinkach przechodzących przez miejscowości o ludności mniejszej niż 10 tys. osób. Gęstość wypadków z niechronionymi uczestnikami ruchu *GWN* na odcinkach dróg wojewódzkich jest miarą względną określającą liczbę wypadków z pieszymi lub z pieszymi i rowerami na odcinku dróg o długości 1km w przedziale czasowym wynoszącym 3 lata. Miara ta umożliwia oszacowanie liczby wypadków na j -tym odcinku drogi poprzez uwzględnienie narażenia na ryzyko jakim jest długość odcinka drogi DL_j zgodnie ze wzorem 7.54.

Bazując na wynikach przeglądu literatury i wstępnych analizach własnych oraz przyjmując założenie o rozkładzie wykładniczym gęstości zdarzeń, do opracowania modeli wykorzystano uogólnione modele regresji liniowej i potęgowo–wykładniczą postać modelu opisanego ogólnym równaniem 7.70.

$$GWN_{2017-2019,j,k} = GZDW_{2017-2019,j}^{\beta_1} \cdot \exp\left(\beta_0 + \sum_{i=2}^J \beta_i \cdot X_i\right) \quad (7.70)$$

gdzie:

$GWN_{2017-2019,j,k}$ – gęstość wypadków z k -tego rodzaju uczestnikami ruchu na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w latach 2017–2019 (zd/km/3 lata),

$GZDW_{2017-2019,j}$ – gęstość zdarzeń na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w latach 2017–2019 (zd/km/3 lata),

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_i$ – współczynniki wpływu zmiennych objaśnianych na koszty zdarzeń z pieszymi i rowerami,

X_i – zmienne objaśniające gęstość zdarzeń z pieszymi i rowerami.

Zestawienie modeli gęstości wypadków z pieszymi GWP oraz pieszymi i rowerami GWPR zostały przedstawione w tab. 7.22.

Tab. 7.22 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli GWP, GWPR dla dróg wojewódzkich

Gęstość wypadków		Piesi			Piesi i rowery		
Zmienne	Wsp. modelu	GWP1	GWP2	GWP3	GWPR1	GWPR2	GWPR3
	β_0	–5,923	–6,584	–6,839	–12,875	–8,698	–5,637
GZDW	β_1	1,665	1,825	1,606	5,021	2,95	1,575
GSK	β_2			0,162		0,212	
GNZ	β_3		0,776	1,489			
GB	β_4						0,378
R^2		0,662	0,673	0,694	0,579	0,617	0,648
R^2_{sk}		0,662	0,672	0,690	0,576	0,611	0,643
RMSE		0,197	0,194	0,189	0,115	0,110	0,105
MAD		0,189	0,188	0,187	0,08	0,082	0,087
AIC		–248,1	–248,6	–251,6	–250,5	–254,0	–259,1

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowanych modeli gęstości wypadków z pieszymi na odcinkach dróg wojewódzkich (tab. 7.22) stwierdza się, że:

1. W zależności od przyjętej liczby zmiennych niezależnych zbudowane modele gęstości wypadków z niechronionymi uczestnikami ruchu na drogach wojewódzkich charakteryzują się współczynnikiem determinacji na poziomie $R^2_{sk}=0,66$ – $0,69$ dla zmiennej GWP oraz $R^2_{sk}=0,58$ – $0,65$ dla zmiennej GWPR.
2. W każdym opracowanych modelach zmienną istotnie statystyczną była gęstość zdarzeń na drogach wojewódzkich GZDW. Jednak zastosowanie tylko zmiennej GZDW wraz z wartością stałą w modelach sprawia, że charakteryzuje się on najniższym współczynnikiem determinacji równym $R^2_{sk}=0,58$ – $0,66$.

3. Dodatkowymi zmiennymi niezależnymi wpływającymi na wzrost współczynnikiem determinacji R_{sk}^2 oraz redukcję błędu średniokwadratowego $RMSE$ są w modelu na gęstość wypadków z pieszymi zmienne: gęstość skrzyżowań GSK , udział obszaru niezabudowanego GNZ .
4. W modelu na gęstość wypadków z pieszymi i rowerami dodatkową zmienną niezależną wpływającą na wzrost współczynnikiem determinacji R_{sk}^2 oraz redukcję błędu średniokwadratowego $RMSE$ jest gęstość zabudowy mieszkalnej GB .
5. Najlepsze dopasowanie danych rzeczywistych do obserwowanych uzyskano w przypadku zastosowania funkcji potęgowo–wykładniczej.
6. Modele osiągające optymalną równowagę pomiędzy złożonością a jakością dopasowania do danych rzeczywistych posiadały 3–4 parametry. Modele te charakteryzowały się najwyższym parametrem podstawowym R_{sk}^2 oraz najniższymi kryteriami pomocniczymi $RMSE$ oraz kryterium informacyjnym Akaike AIC .

Modelami najlepiej opisującymi dane rzeczywiste dla zmiennych zależnych GWP , $GWPRN$, są modele opisane równaniami 7.71, 7.72, które są rekomendowane do zastosowania w metodzie ogólnej szacowania kosztów cyklu życia dróg dla pieszych, dróg dla pieszych i rowerów w etapie szacowania kosztów użytkowników.

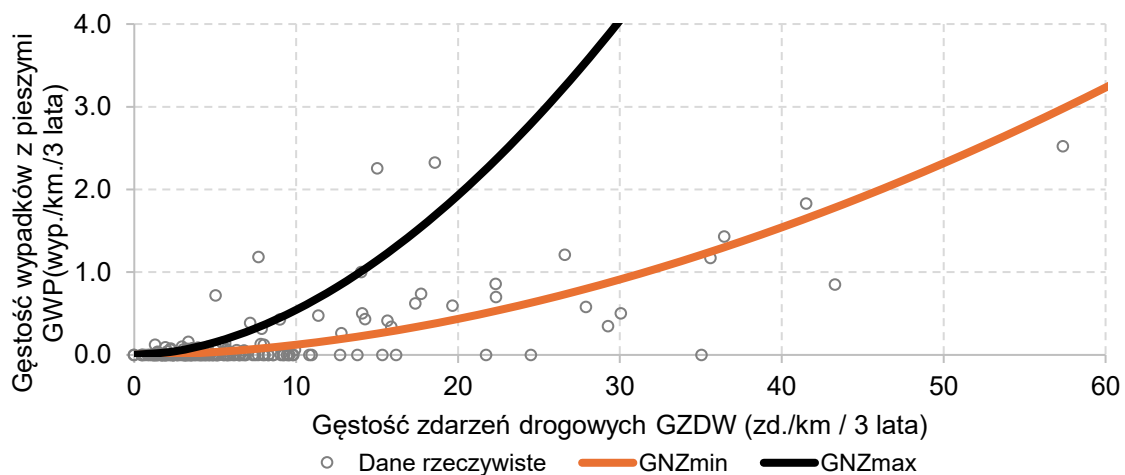
- Rekomendowany model gęstości wypadków z pieszymi na odcinkach dróg wojewódzkich, opisany wzorem:

$$GWP_{2017-2019,j} = (GZDW_{2017-2019,j})^{1,606} \cdot \exp(-6,839 + 1,489 \cdot GNZ + 0,162 \cdot GSK) \quad (7.71)$$

- Rekomendowany model gęstości wypadków z pieszymi i rowerami na odcinkach dróg wojewódzkich opisany wzorem:

$$GWPR_{2017-2019,j} = (GZDW_{2017-2019,j})^{1,575} \cdot \exp(-5,637 + 0,378 \cdot GB) \quad (7.72)$$

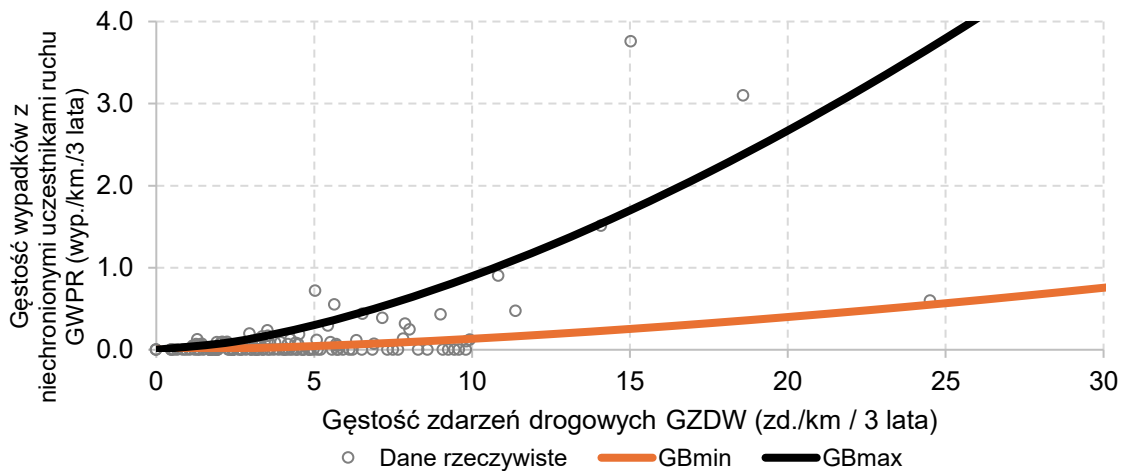
Na podstawie analizy rekomendowanego modelu gęstości wypadków na drogach wojewódzkich GWP (równanie 7.71) oraz wykresów (rys. 7.36, rys. 7.38) można stwierdzić, że wzrost GWP następuje wraz ze zwiększeniem narażenia na ryzyko reprezentowanego przez gęstość zdarzeń na drogach wojewódzkich $GZDW$.



Rys. 7.36 Wykres zależności gęstości wypadków GWP od gęstości zdarzeń $GZDW$ i gęstości obszaru niezabudowanego GNZ
Opracowanie własne

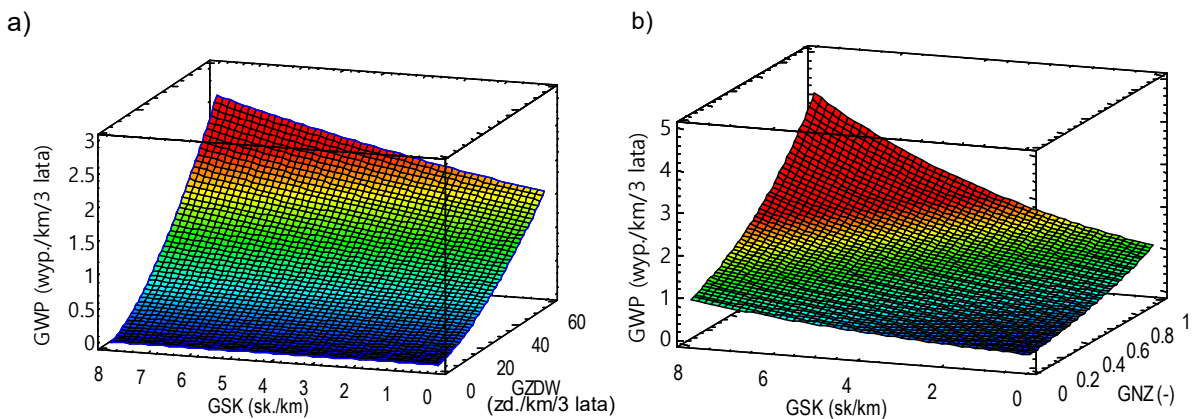
Kolejnymi czynnikami zwiększającymi gęstość wypadków z pieszymi GWP na drogach wojewódzkich są: gęstość skrzyżowań GSK oraz gęstość obszaru niezabudowanego GNZ (rys. 7.36). Wzrost gęstości obszaru niezabudowanego może mieć wpływ na zwiększenie średniej prędkości na odcinku drogi, a tym sama na wzrost ryzyka.

Analogicznie jak w przypadku zmiennej GWP na zmienna gęstość wypadków z udziałem pieszych i rowerów GWPR ma zmienna reprezentująca narażenie na ryzyko, czyli gęstość zdarzeń na drogach wojewódzkich GZDW (równanie 7.72). Kolejną zmienną, której wzrost wpływa na zwiększenie GWPR jest gęstość zabudowy (rys. 7.37). Wzrost gęstości zabudowy w obszarach niezabudowanych oraz małych miejscowości może w sposób pośredni wpływać na zwiększenie ruchu pieszego i rowerowego a tym samym zwiększać ryzyko wypadków w tych grupach użytkowników.



Rys. 7.37 Wykres zależności gęstości wypadków GWPR od gęstości zdarzeń GZDW i gęstości zabudowy GB

Opracowanie własne



Rys. 7.38 Wykresy zależności gęstości wypadków z pieszymi GWP od gęstości skrzyżowań GSK oraz a) gęstości zdarzeń GZDW b) udziału obszaru niezabudowanego GNZ

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku obszarów niezabudowanych i małych miejscowości istotny wpływ na gęstość wypadków z niechronionymi uczestnikami ruchu GWPR ma zmienna gęstość budynków GB.

7.5.3.6. Modele liczby i gęstości ofiar wśród niechronionych uczestników ruchu

Modele gęstości ofiar wypadków zostały opracowane dla sieci dróg wojewódzkich z podziałem na dwie grupy: gęstość ofiar wśród pieszych *GOP* oraz gęstość ofiar wśród pieszych i rowerzystów *GOPR*. Modele gęstości ofiar wśród pieszych znajdują pośrednie zastosowanie w metodzie ogólnej szacowania kosztów cyklu życia dróg dla pieszych. Natomiast modele gęstości ofiar wśród niechronionych użytkowników dróg znajdują zastosowanie w metodzie szacowania kosztów wypadków związanych z infrastrukturą dla niechronionych użytkowników dróg (dróg dla pieszych i rowerów) na odcinkach przechodzących przez miejscowości o ludności mniejszej niż 10 tys. osób. Gęstość ofiar z pieszymi *GOP* na odcinkach dróg wojewódzkich jest miarą względną określającą liczbę ofiar na odcinku dróg o długości 1km w przedziale czasowym wynoszącym 3 lata. Miara ta umożliwia oszacowanie liczby ofiar *j*-tym odcinku drogi zgodnie ze wzorami 7.58 i 7.59.

Bazując na wynikach przeglądu literatury i wstępnych analizach własnych oraz przyjmując założenie o rozkładzie wykładniczym gęstości zdarzeń, do opracowania modeli wykorzystano uogólnione modele regresji liniowej i potęgowo-wykładniczą postać modelu opisanego ogólnym równaniem 7.73 i 7.74

$$GON_{2017-2019,j,k} = \beta_0 \cdot GWN_{2017-2019,j}^{\beta_1} \quad (7.73)$$

$$GCRZN_{2017-2019,j,k} = GON_{2017-2019,j}^{\beta_1} \cdot \exp\left(\beta_0 + \sum_{i=2}^l \beta_i \cdot X_i\right) \quad (7.74)$$

gdzie:

$GWN_{2017-2019,j,k}$ – gęstość wypadków z *k*-tego rodzaju uczestnikami ruchu na *j*-tym odcinku drogi wojewódzkiej w latach 2017–2019 (of./km/3 lata),

$GON_{2017-2019,j,k}$ – gęstość ofiar wypadków z *k*-tego rodzaju uczestnikami ruchu na *j*-tym odcinku drogi wojewódzkiej w latach 2017–2019 (of./km/3 lata),

$GCRZN_{2017-2019,j,k}$ – gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wypadków z *k*-tego rodzaju uczestnikami ruchu na *j*-tym odcinku drogi wojewódzkiej w latach 2017–2019 (of./km/3 lata),

$\beta_0, \beta_1, \beta_i$ – współczynniki wpływu zmiennych objaśnianych na zmienne zależne,

X_i – zmienne objaśniające gęstość zdarzeń z pieszymi i rowerami.

W tab. 7.23 przedstawiono zestawienie modeli gęstości ofiar z pieszymi oraz pieszymi i rowerzystami na odcinkach dróg wojewódzkich. Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowanych modeli gęstości ofiar i ofiar ciężko rannych i śmiertelnych na odcinkach dróg wojewódzkich (tab. 7.23) stwierdza się, że:

1. W zależności od przyjętej liczby zmiennych niezależnych zbudowane modele gęstości ofiar na drogach wojewódzkich charakteryzują się współczynnikiem determinacji na poziomie $R_{sk}^2=0,66 - 0,69$ dla zmiennej *GCRZP* oraz $R_{sk}^2=0,58-0,65$ dla zmiennej *GCRZPR*.
2. Dodatkowymi zmiennymi niezależnymi wpływającymi na wzrost współczynnikiem determinacji R_{sk}^2 oraz redukcję błędu średniokwadratowego *RMSE* są w modelu na gęstość wypadków z pieszymi zmienne: gęstość skrzyżowań *GSK*, udział obszaru niezabudowanego *GNZ*.

3. W modelu na gęstość wypadków z pieszymi i rowerzystami dodatkową zmienną niezależną wpływającą na wzrost współczynnikiem determinacji R_{sk}^2 oraz redukcję błędu średniokwadratowego $RMSE$ jest gęstość zabudowy mieszkalnej GB .
4. Najlepsze dopasowanie do danych rzeczywistych uzyskano w przypadku zastosowania funkcji potęgowo-wykładniczej.
5. Modele osiągające optymalną równowagę pomiędzy złożonością a jakością dopasowania danych obserwowanych do rzeczywistych posiadały 3–4 parametry. Modele te charakteryzowały się najwyższym parametrem podstawowym R_{sk}^2 oraz najniższymi kryteriami pomocniczymi $RMSE$ oraz kryterium informacyjnym Akaike AIC .

Tab. 7.23 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli GOP, GCRZP, Gopr, GCRZPR dla dróg wojewódzkich

Gęstość ofiar		Piesi				Piesi i rowerzyści		
Zmienne	Wsp. modelu	GOP	GOP	GCRZP	GCRZP	Gopr	GCRZPR	GCRZPR
	β_0		1,057	−0,571				0,060
GWP	β_1	1,330	1,019					
GWPR	β_2					1,128		
GOP	β_3			1,132	1,045			
Gopr	β_4						1,246	1,128
UC	β_5				−0,089			
GCH	β_6			−1,594	−1,360			
GIN	β_7						−1,787	−1,886
R^2		0,892	0,973	0,752	0,764	0,972	0,843	0,908
R_{sk}^2		0,892	0,973	0,749	0,761	0,972	0,842	0,907
$RMSE$		0,187	0,151	0,096	0,093	0,074	0,059	0,060
MAD		0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238	0,238
AIC		−260,2	−292,1	−362,1	−366,0	−405,6	−459,9	−456,5

Źródło: Opracowanie własne

Modelami najlepiej opisującymi dane rzeczywiste dla zmiennych zależnych GOP , $GCRZP$, $Gopr$, $GCRPR$ są modele opisane równaniami 7.75 – 7.78. Modele te są rekomendowane do zastosowania w metodzie ogólnej szacowania kosztów cyklu życia dróg dla pieszych, dróg dla pieszych i rowerów na etapie szacowania kosztów użytkowników.

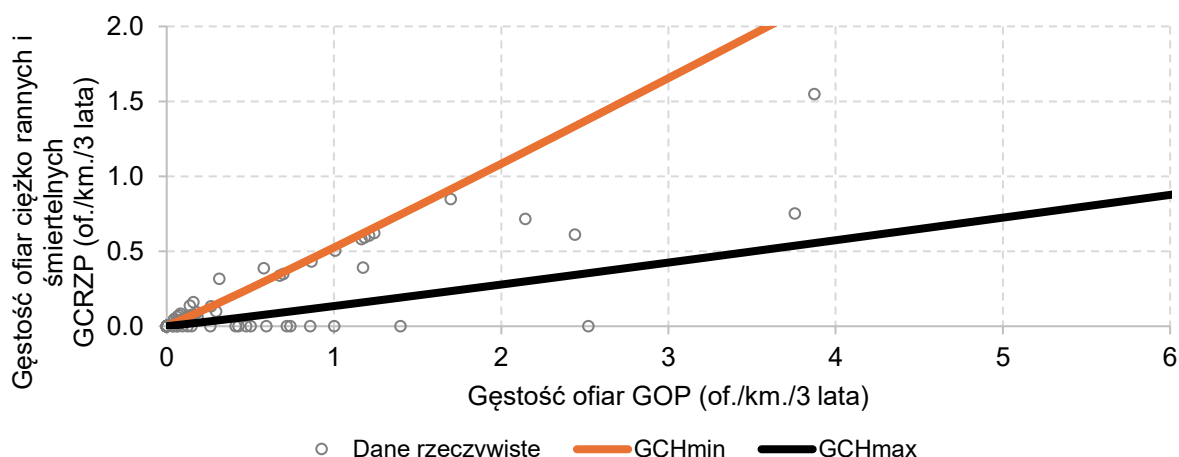
Rekomendowany model gęstości ofiar wypadków wśród pieszych na odcinkach dróg wojewódzkich:

$$GOP_{2017-2019,j} = 1,057 \cdot GWP^{1,019} \quad (7.75)$$

Rekomendowany model gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych na odcinkach dróg wojewódzkich:

$$GCRZP_{2017-2019,j} = GOP^{1,045} \cdot \exp(-0,089 \cdot UC - 1,360 \cdot GCH) \quad (7.76)$$

Na podstawie analizy modeli gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z pieszymi na drogach wojewódzkich $GCRZP$ (równanie 7.76) oraz wykresu rys. 7.39 można stwierdzić, że wartości tej zmiennej zależnej rosną wraz ze wzrostem ogólnej gęstości ofiar GOP na danym odcinku.



Rys. 7.39 Wykres zależności gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych GCRZP od gęstości ofiar GOP i gęstości dróg dla pieszych GCH

Opracowanie własne

Zmiennymi niezależnymi, których wzrost powoduje redukcję gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych są: udział pojazdów ciężarowych *UC* oraz gęstość chodników *GCH*. Zwiększony udział pojazdów ciężarowych może wpływać na charakterystykę ruchu drogowego, w tym na obniżenie średniej prędkości w potoku pojazdów, co może się przyczyniać do ograniczenia ryzyka wystąpienia poważnych zdarzeń z udziałem pieszych. Z kolei wzrost gęstości chodników w przekroju drogi może prowadzić do ograniczenia ruchu pieszego na jezdni, redukując tym samym ryzyko wystąpienia ofiar ciężko rannych i śmiertelnych.

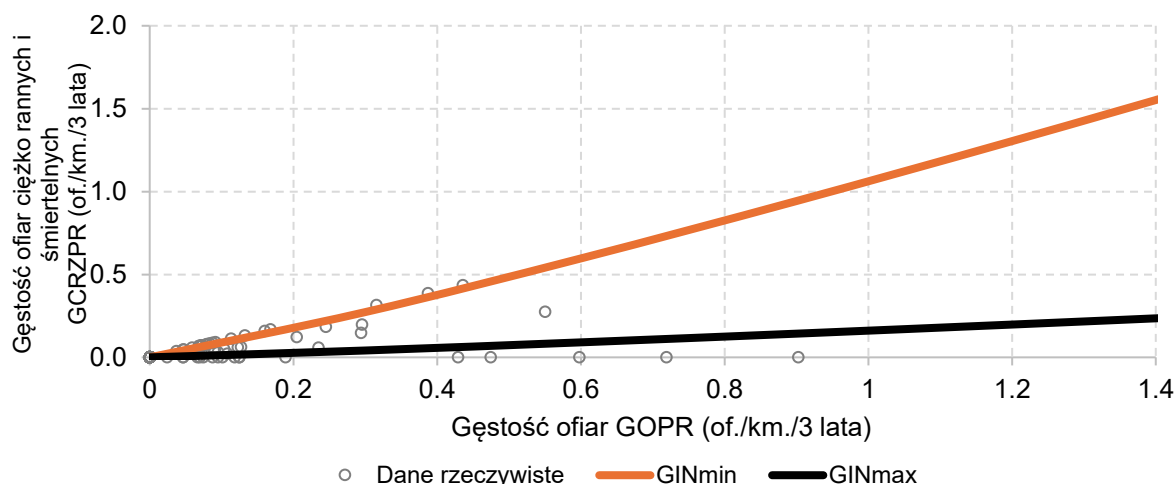
Rekomendowany model gęstości ofiar wypadków wśród pieszych i rowerzystów na odcinkach dróg wojewódzkich:

$$GOPR_{2017-2019,j} = GWPR_{2017-2019,j}^{1,128} \quad (7.77)$$

Rekomendowany model gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród niechronionych użytkowników dróg na odcinkach dróg wojewódzkich:

$$GCRZPR_{2017-2019,j} = GOPR_{2017-2019,j}^{1,128} \cdot \exp(0,060 - 1,886 \cdot GIN) \quad (7.78)$$

Na podstawie analizy modeli gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z niechronionymi uczestnikami ruchu na drogach wojewódzkich *GCRZPRN*, (równania 7.78) oraz wykresu rys. 7.40 można stwierdzić, że wartości tej zmiennej zależnej rosną wraz ze wzrostem ogólnej gęstości ofiar *GOPRN* na danym odcinku. Zmienną niezależną, której wzrost wiąże się ze spadkiem gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych jest gęstość infrastruktury dla pieszych i rowerzystów *GIN*. Podobnie jak w przypadku modeli dotyczących pieszych, obecność wydzielonych dróg pieszo-rowerowych w obszarach niezabudowanych i mniejszych miejscowościach może wpłynąć na redukcję liczby pieszych i rowerzystów poruszających się bezpośrednio po jezdni, zmniejszając tym samym ryzyko i skutki wypadków drogowych.



Rys. 7.40 Wykres zależności gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych GCRZPR od gęstości ofiar GOPR i gęstości infrastruktury dla pieszych i rowerzystów GIN

Opracowanie własne

7.5.4. Podsumowanie i dyskusja wniosków

W rozdziale 7.5 opracowano modele matematyczne umożliwiające szacowanie kosztów infrastruktury dla niechronionych uczestników na drogach wojewódzkich. Do budowy modeli wykorzystano bazę danych dróg wojewódzkich w województwie warmińsko mazurskim z lat 2017–2019, która została podzielona na dwa zbiory danych.

Pierwszy zbiór danych składał się ze 180 odcinków dróg, na podstawie których zidentyfikowano zmienne zależne niezbędne do oszacowania kosztów zdarzeń z pieszymi: gęstość zdarzeń na drogach wojewódzkich *GZDW*, gęstość wypadków z pieszymi *GWP*, gęstość ofiar *GOP* i ofiar ciężko rannych i śmiertelnych *GCRZP*. Spośród analizowanych zmiennych niezależnych najistotniejsze w modelach okazały się: średniodobowe natężenie pojazdów *SDR* na drogach wojewódzkich, gęstość skrzyżowań *GSK*, udział obszaru niezabudowanego *GNZ*, udział odcinków o ograniczonej widoczności *UOW*, udział pojazdów ciężarowych *UC*, gęstość dróg dla pieszych *GCH*.

Uzyskane wyniki znajdują również potwierdzenie w literaturze. W predykcji liczby oraz konsekwencji wypadków z pieszymi i rowerzystami na podstawie uogólnionych modeli regresji stosuje się natężenie ruchu, które reprezentuje narażenie na ryzyko [57], [173]. Badania dotyczące wpływu geometrii na wypadki z pieszymi były przeprowadzone m.in. w [1], [157]. W pracy Macioszek [157] dotyczącej analizy wypadków z pieszymi w województwie śląskiego z lat 2016–2021 wykazano, że zwiększa się prawdopodobieństwo śmierci pieszego o ponad 42% gdy zdarzenia ma miejsca poza obszarem niezabudowanym.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wraz ze wzrostem gęstości dróg dla pieszych *GCH* oraz udziałem pojazdów ciężarowych *UC* zmniejsza się gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych *GCRZP*, czyli zmienna charakteryzująca się najwyższym jednostkowym kosztem. Wynika z tego, że obecność chodnika wpływa na poprawę bezpieczeństwa z uwagi na możliwość segregacji ruchu pieszego od kołowego. Pozytywny wpływ infrastruktury dla pieszych na poprawę ich

bezpieczeństwa potwierdzają również wyniki dotychczas prowadzonych prac [114]. Jednocześnie wzrost udziału pojazdów ciężarowych na odcinkach dróg wojewódzkich charakteryzujących się przekrojem 1x2 może wpływać na zmniejszenie średniej prędkości pojazdów w ruchu.

W przypadku drugiego zbioru danych wyodrębniono ponad 130 odcinków dróg wojewódzkich przechodzących przez małe miejscowości (do 10 tys. mk) lub/i obszar niezabudowany. Na podstawie tego zbioru danych wyodrębniono zmienne niezbędne do oszacowania kosztów z niechronionymi uczestnikami ruchu (pieszymi oraz rowerzystami) w tym: gęstość wypadków *GWN*, gęstość ofiar *GON*, gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych *GCRZN*. W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że zmiennymi niezależnymi mającymi wpływ na zmianę modelowanych zmiennych są: średniodobowe natężenie pojazdów *SDR* na drogach wojewódzkich, gęstość skrzyżowań *GSK*, udział odcinków o ograniczonej widoczności *UOW*, gęstość zabudowy *GB*, gęstość dróg pieszorowerowych *GIN*. Jedyną zmienną, której wzrost wpływa na obniżenie kosztów zdarzeń jest gęstość dróg pieszorowerowych. Analogicznie jak w przypadku dróg dla pieszych zmienna ta wpływa na przeniesienie ruchu pieszego i rowerowego z jezdni, pobocza na wydzieloną infrastrukturę zmniejszając tym samym ryzyko bycia ofiarą ciężko ranną i śmiertelną, co potwierdzają również badania [173]. Uzyskane zależności pomiędzy parametrami geometrycznymi a liczbą wypadków znajdują potwierdzenie m.in. w pracach [134], [57].

7.6. Podsumowanie

Przeprowadzone w niniejszym rozdziale badania umożliwiły opracowanie modeli składowych kosztów cyklu życia dla różnych elementów infrastruktury drogowej z uwzględnieniem specyfiki dróg krajowych oraz wojewódzkich.

6. W przypadku wariantowania tras drogowych na drogach krajowych wykazano, że już na etapie koncepcji inwestycji możliwe jest wstępne szacowanie kosztów na podstawie prostych modeli oraz statystycznie istotnych zmiennych, takich jak długość odcinka, natężenie ruchu czy obecność tuneli. Opracowane modele mogą być stosowane jako narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji na wstępnym etapie jej planowania i projektowania. Stosowanie opracowanych modeli kosztów może przyczynić się do przyspieszenia proces inwestycyjny związanego z wyborem lokalizacyjnym tras dróg krajowych.
7. Bariery ochronne na drogach krajowych, dla tej grupy urządzeń drogowych opracowano zbiór modeli obejmujących koszty budowy, napraw oraz skutki zdarzeń drogowych. W analizach uwzględniono takie czynniki jak m.in. masa bariery, szerokość pracująca poziom powstrzymywania oraz jednostkowy produkt krajowy brutto w danym województwie. Modele te znajdują zastosowanie w dwóch metodach szacowania kosztów cyklu życia barier ochronnych – metodzie uproszczonej i podstawowej. W przypadku oceny kosztów pojedynczej bariery istotną rolę pełnią modele kosztów budowy i modele związane z konsekwencjami najechania na pojedynczą barierę ochronną (koszty napraw, koszty zdarzeń drogowych), które są stosowane w celu wyboru typu i rodzaju bariery ochronnej. Natomiast w przypadku szacowania kosztów funkcjonowania barier na odcinku drogi istotną rolę odgrywają modele kosztów zdarzeń barier na odcinku dróg, które umożliwiają ocenę barier na etapie ich użytkowania.

8. Szacowanie kosztów funkcjonowania infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu drogowego na drogach wojewódzkich umożliwiają modele kosztów zdarzeń z niechronionymi uczestnikami ruchu drogowego z podziałem na dwie grupy: (1) modele kosztów zdarzeń z udziałem pieszych na całej sieci dróg wojewódzkich, (2) modele kosztów zdarzeń z pieszymi i rowerzystami w małych miejscowościach i obszarze niezabudowanym.
9. W przypadku pierwszej grupy czynnikami uwzględnionymi w kosztach zdarzeń były m.in. natężenie ruchu, gęstość skrzyżowań, gęstość obszaru niezabudowanego, udział pojazdów ciężarowych, gęstość dróg dla pieszych. Wykazano, że wzrost gęstości odcinków o ograniczonej widoczności i gęstości skrzyżowań istotnie zwiększa ryzyko wypadków z udziałem pieszych, co przekłada się na wzrost kosztów cyklu życia takiej infrastruktury. Natomiast zwiększenie gęstości dróg dla pieszych oraz udziału pojazdów ciężarowych wpływa na redukcję gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych na tych odcinkach dróg. Opracowane składowe modele kosztów zdarzeń z pieszymi znajdują zastosowanie w modelach szacowania kosztów cyklu życia, które mogą ułatwić proces podejmowania decyzji na etapie planowania inwestycji związanej z budową dróg dla pieszych wzdłuż dróg wojewódzkich.
10. Dla drugiej grupy głównymi czynnikami wpływającymi na koszty zdarzeń są: natężenie ruchu drogowego, gęstość skrzyżowań, gęstość dróg dla pieszych i rowerów, gęstość zabudowy. Modele wykazały, że wzrost gęstości dróg dla pieszych i rowerowych wpływa na redukcję gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych i rowerzystów. Opracowane składowe modele kosztów zdarzeń z pieszymi oraz rowerzystami znajdują zastosowanie w modelach kosztów cyklu życia na etapie planowania dróg dla pieszych i rowerzystów wzdłuż dróg wojewódzkich zlokalizowanych w obszarach niezabudowanych i małych miejscowościach oraz na etapie ich eksploatacji poprzez uwzględnienie kosztów ponoszonym przez użytkowników dróg.

Przedstawione modele stanowią fundament do opracowania metod szacowania kosztów cyklu życia infrastruktury drogowej w Polsce, uwzględniając lokalne uwarunkowania techniczne, ekonomiczne i społeczne.

8. BADANIA WPŁYWU WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA ZMIANY KOSZTÓW

8.1. Metodyka badań wpływu czynników

W rozdziale tym zaprezentowano metodykę badania wpływu wybranych czynników na zmiany kosztów wybranych elementów infrastruktury drogowej. Celem przeprowadzonych badań jest określenie dynamiki oddziaływania poszczególnych czynników na wybrane składowe koszty cyklu życia elementów infrastruktury drogowej. Przyjęte podejście pozwala na pogłębione zrozumienie mechanizmów wpływających na kształtowanie się kosztów budowy i funkcjonowania infrastruktury drogowej i jej elementów, a tym samym umożliwia identyfikację obszarów, w których możliwa jest optymalizacja wydatków na etapie planowania, projektowania oraz utrzymania i użytkowania obiektów drogowych co pozwoli na lepsze zrozumienie mechanizmów kształtujących te wydatki. Przedstawione wyniki mają dostarczyć informacji nie tylko o skali zmian kosztów, ale także o ich przyczynach, co może wspomóc proces podejmowania decyzji oraz optymalizacji kosztów w przyszłości.

Na podstawie wybranych z wielu opracowanych składowych modeli kosztów cyklu życia elementów drogowych (opisanych w rozdziale 7) przeanalizowano wpływ wybranych zmiennych niezależnych na poszczególne składowe koszty związanych z infrastrukturą drogową. W celu określenia siły i kierunku wpływu poszczególnych zmiennych wykorzystano wskaźnik elastyczności łukowej EA (arc elasticity), który jest często wykorzystywany w ekonomii do oceny zależności między ceną, a popytem oraz umożliwia uwzględnienie nieliniowego charakteru relacji pomiędzy zmiennymi objaśnianymi x a zmienną objaśnianą Y . Elastyczność łukowa jest prostym narzędziem, które umożliwia określenie jednoprocentowej zmiany procentowej wartości zmiennej zależnej Y przy jednoprocentowej zmianie zmiennych niezależnych x^i w ich przedziale początkowym t_1 oraz końcowym t_2 . Elastyczność łukowa została obliczona na podstawie wzoru 8.1 [153].

$$EA = \frac{\Delta Y}{\Delta x^i} \cdot \frac{\bar{x}^i}{\bar{Y}} = \frac{(Y_{t_2} - Y_{t_1}) \cdot (x_{t_2}^i + x_{t_1}^i)}{(Y_{t_2} + Y_{t_1}) \cdot (x_{t_2}^i - x_{t_1}^i)} \quad (8.1)$$

gdzie:

EA – wskaźnik elastyczności łukowej,

ΔY – zmiana wartości zmiennej zależnej w granicach t_1, t_2

Δx^i – zmiana wartości zmiennej niezależnej w granicach t_1, t_2 ,

$\bar{Y}$ – średnia wartość zmiennej zależnej,

$\bar{x}_i$ – średnia wartość i -tej zmiennej niezależnej.

W przeprowadzonych analizach przyjęto założenie, że analizowana zmienna niezależna przyjmuje za wartości graniczne wartość minimalną oraz maksymalną. Natomiast pozostałe zmienne niezależne przyjmują wartości średnie przedstawione w tablicach w rozdziale 7.

Analiza wpływu została wykonana dla wybranych, najlepiej ocenionych modeli poszczególnych składowych kosztów cyklu życia:

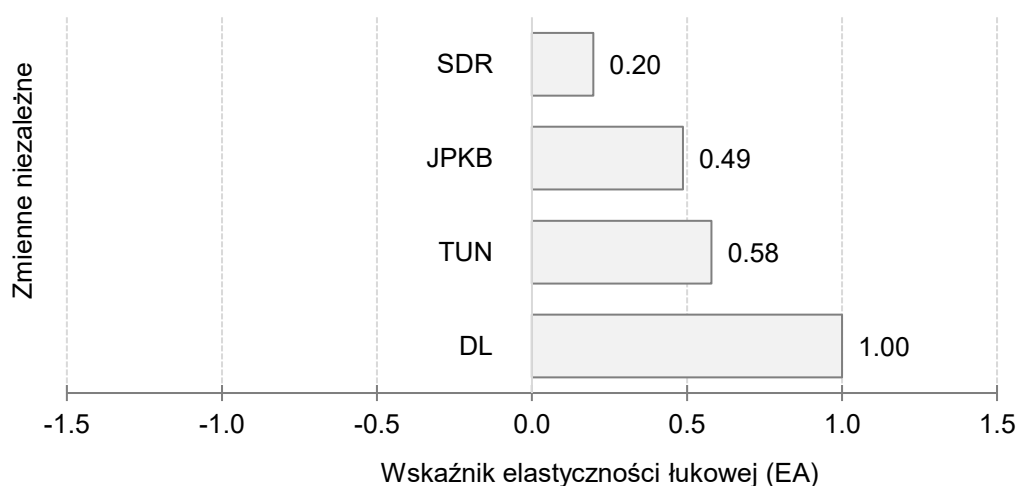
- 1) wariantów tras dróg krajowych,
- 2) drogowych barier ochronnych dla dróg krajowych,
- 3) infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu na drogach wojewódzkich.

8.2. Analiza wpływu wybranych czynników na koszty wariantowania tras dróg

Analizę wpływu wybranych zmiennych niezależnych na koszty inwestycyjne przeprowadzono przy użyciu wskaźnika elastyczności łukowej opisanego wzorem 8.1, który umożliwił ocenę siły i kierunku zależności pomiędzy badanymi zmiennymi. Wyniki obliczeń zostały przedstawione w formie graficznej (rys. 8.1).

Analizę przeprowadzono dla czterech zmiennych niezależnych uwzględnionych w rekomendowanym modelu kosztów inwestycyjnych (wzór 7.10): średniodobowe natężenie pojazdów *SDR*, długość analizowanego wariantu drogi *DL*, jednostkowy produkt krajowy brutto *JPKB*, obecność lub brak tuneli *TUN*.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdza się, że wszystkie analizowane zmienne mają dodatni wpływ na koszty inwestycyjne (rys. 8.1), co oznacza, że ich wzrost prowadzi do wzrostu całkowitych kosztów realizacji analizowanych wariantów. Największy wpływ wykazuje długość wariantu drogi *DL*, dla której wskaźnik elastyczności osiągnął wartość 1.00. Oznacza to, że wydłużenie trasy o 1% powoduje średnio 1% wzrost kosztów inwestycyjnych. Silny wpływ długości trasy na koszty inwestycyjne został również wykazany w badaniach przeprowadzonych w rozdziale 7 (rys. 7.3 – rys. 7.5) oraz badaniach wykonanych m.in. przez Simicia [211], Mahamida [158]. Na drugim miejscu pod względem siły oddziaływania znajduje się zmienna *TUN*, która reprezentuje obecność tuneli. Podobny poziom oddziaływania jak w przypadku zmiennej *TUN* ($EA = 0,58$) wykazuje zmienna *JPKB* ($EA = 0,49$), która określa wysokość jednostkowego produktu krajowego brutto w roku opracowywania kosztorysu inwestorskiego. Zmienna ta pełni rolę czynnika odzwierciedlającego zarówno czas realizacji inwestycji, jak i poziom cen rynkowych w danym okresie. Najniższą wartością elastyczności łukowej ze wszystkich przebadanych zmiennych niezależnych charakteryzuje średniodobowe natężenie pojazdów *SDR* ($EA = 0,20$).



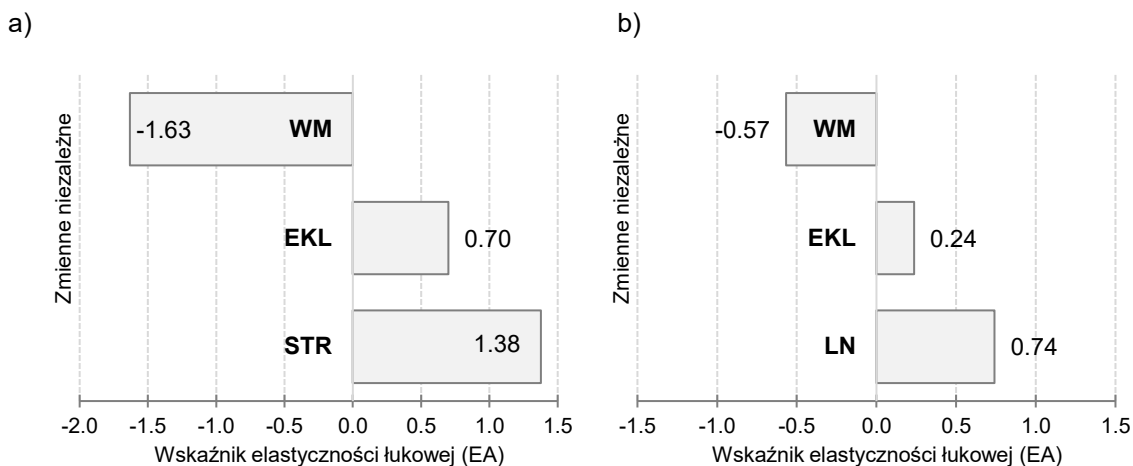
Rys. 8.1 Wpływ zmiennych niezależnych na koszty inwestycyjne wariantów tras

Źródło: Opracowanie własne

8.3. Analiza wpływu wybranych czynników na składowe koszty barier ochronnych

8.3.1. Koszty budowy barier

Analizę wpływu poszczególnych zmiennych niezależnych na zmienną zależną przeprowadzono z wykorzystaniem wskaźnika elastyczności łukowej opisanego wzorem 8.1, który umożliwił wykonanie oceny zależności pomiędzy zmienną zależną a zmiennymi niezależnymi. Badanie wpływu zmiennych zostało wykonane dla wybranych modeli kosztów budowy barier drogowych stalowych (równanie 7.14) oraz linowych (równanie 7.15). Wyniki analizy wpływu przedstawiono postaci graficznej na rys. 8.2.

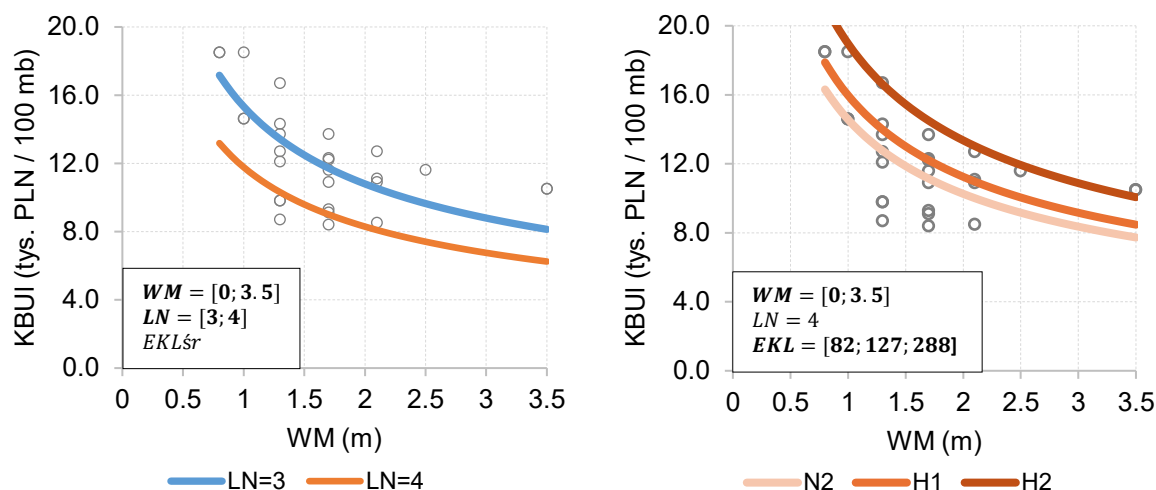


Rys. 8.2 Wpływ zmiennych niezależnych na koszty budowy barier a) stalowych b) linowych

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonej analizy wskaźnika elastyczności łukowej (rys. 8.2) stwierdzono, że zmiennymi wpływającymi na zwiększenie kosztów budowy drogowych barier ochronnych są maksymalna poprzeczna energia kinetyczna znormalizowana *EKL* pojazdu uderzającego w barierę drogową oraz w przypadku barier linowych liczba lin w prowadnicy *LN*, natomiast w przypadku barier stalowych stalowej ich typ (liczba prowadnic) *STR*. Ponadto im większa szerokość pracująca *WM* bariery drogowej tym zmniejszenie kosztów budowy bariery.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono (rys. 8.3), że wzrost kosztów budowy barier stalowych oraz linowych jest bezpośrednio związany ze wzrostem maksymalnej poprzecznej energii kinetycznej znormalizowanej *EKL*, która reprezentuje poziom powstrzymywania barier ochronnych. Bariery o niższym poziomie powstrzymywania (np. N1), a więc przeznaczone do pochłaniania mniejszej energii kinetycznej, cechują się mniejszą wytrzymałością i masą w porównaniu do barier o wyższym poziomie powstrzymywania (np. H2). Ponadto w przypadku barier stalowych dodatkowym czynnikiem wpływającym na wzrost kosztów jest typ bariery *STR*, co wynika z różnic konstrukcyjnych między barierami jedno- i dwustronnymi. Bariery dwustronne wymagają zastosowania większej ilości materiałów niż bariery jednostronne. Na ilość zastosowanego materiału, a tym samym masę barier, wpływa także liczba lin w barier linowych *LN*. Wszystkie wymienione czynniki bezpośrednio powiązane są z masą konstrukcji a tym samym ilością materiału potrzebnego do ich wykonania.



Rys. 8.3 Wpływ na zmianę kosztów budowy barier liniowych KBUI szerokości pracującej WM oraz a) liczba lin LN b) poziomu powstrzymywania barier EKL

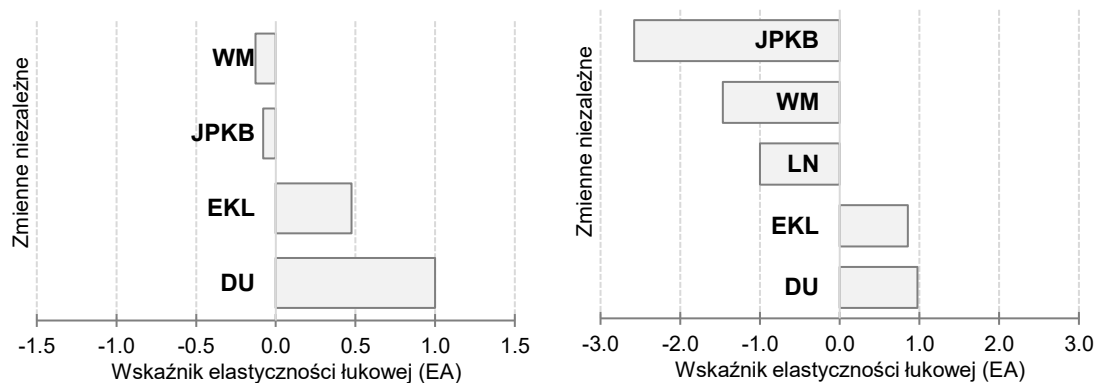
Źródło: Opracowanie własne

8.3.2. Koszty naprawy barier

Analizę wpływu wybranych czynników kosztów napraw barier ochronnych wykonano analogicznie jak w przypadku kosztów budowy za pomocą wskaźnika elastyczności łukowej opisanego wzorem 8.1. Badanie wpływu zmiennych zostało wykonane dla wybranych modeli kosztów naprawy barier drogowych stalowych opisanych równaniem 7.23 oraz bariery liniowych opisanych wzorem 7.24. Wyniki analizy wpływu przedstawiono postaci graficznej na rys. 8.4 oraz w postaci tabelarycznej (tab. 8.1).

a)

b)



Rys. 8.4 Wpływ zmiennych niezależnych na koszty naprawy barier a) stalowych b) liniowych

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonej analizy wskaźnika elastyczności łukowej (rys. 8.4, tab. 8.1) stwierdzono, że zmiennymi wpływającymi na zwiększenie kosztów napraw barier stalowych oraz liniowych jest długość uszkodzenia pojedynczej bariery *DU* oraz maksymalna poprzeczna energia kinetyczna znormalizowana *EKL*. Natomiast na zmniejszenie kosztów napraw barier stalowych oraz liniowych wpływa ma wielkość produktu krajowego brutto na mieszkańca w regionie *JPKB*, szerokość pracująca *WM* oraz liczby lin w prowadnicy bariery liniowej *LN*.

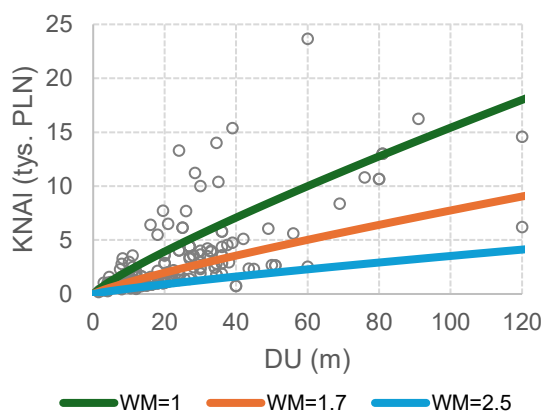
Tab. 8.1 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę kosztów napraw barier stalowych i linowych przy wzroście wartości danej zmiennej niezależnej o 1%.

Zmienne niezależne		Zmiana kosztów napraw KNA (%)			
		Bariera stalowa		Bariera linowa	
		wzrost	spadek	wzrost	spadek
DU	Długość uszkodzenia	1,00		0,98	
JPKB	PKB na mieszkańca w regionie		0,08		2,58
EKL	Maksymalna poprzeczna energia kinetyczna znormalizowana	0,48		0,86	
WM	Szerokość pracująca znormalizowana		0,13		1,46
LN	Liczba lin w prowadnicy	nie dotyczy	nie dotyczy		1,00

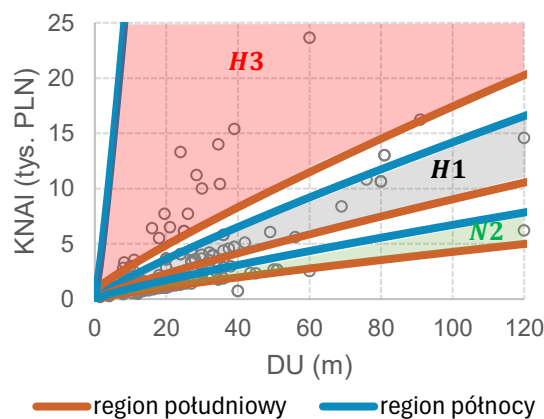
Źródło: Opracowanie własne

Analogicznie jak w przypadku kosztów budowy barier stalowych oraz linowych na zmiany kosztów napraw bezpośrednio wpływ mają zmienne wpływające na masę barier ochronnych, czyli ilość materiału, który jest konieczny do naprawy barier ochronnych. Największy wpływ na wzrost kosztów napraw barier ma ich długość uszkodzenia *DU* (rys. 8.5). Większe uszkodzenia wpływają na czas i poziom skomplikowania prac naprawczych, co zwiększa złożoność prac, zużycie materiałów oraz koszty robocizny. Zmienną wpływającą na redukcję kosztów napraw jest jednostkowy produkt krajowy w danym regionie *JPKB* (rys. 8.5b). Badania wykazały, że koszty napraw są niższe w regionie południowym (*JPKB* ok. 58 tys. PLN/mk) niż w regionie północnym (*JPKB* ok. 42 tys. PLN/mk). Zależność ta może wynikać z większej konkurencyjności firm utrzymaniowych oraz lepszej dostępności do materiałów w regionach o wyższym poziomie PKB.

a)



b)

Rys. 8.5 Wpływ na zmianę kosztów naprawy barier linowych KNAI długości uszkodzenia *DU* oraz a) szerokości pracującej *WM* b) poziomu powstrzymywania barier *EKL* oraz jednostkowego *PKB*

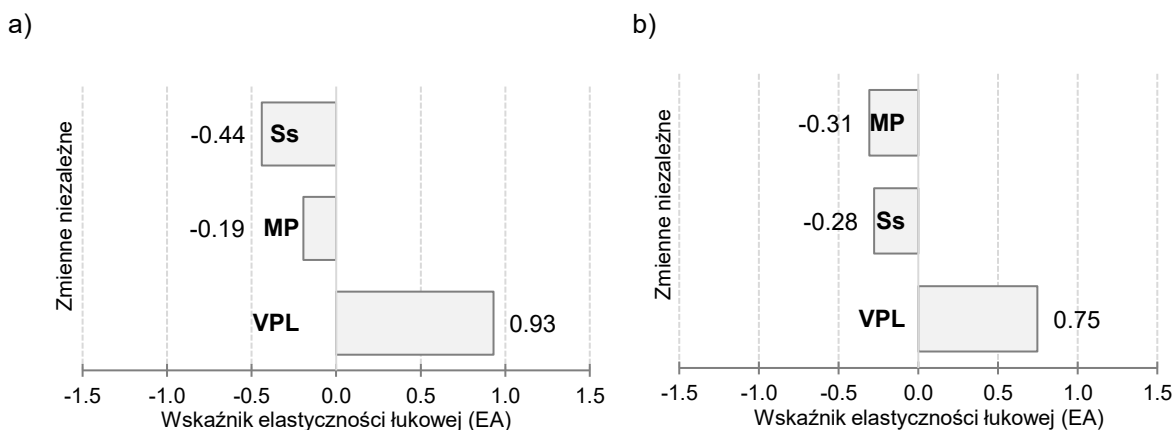
Źródło: Opracowanie własne

8.3.3. Koszty zdarzeń barier

Analizę wpływu poszczególnych zmiennych niezależnych na zmienną zależną przeprowadzono z wykorzystaniem wskaźnika elastyczności łukowej opisanego wzorem 8.1, który umożliwił wykonanie oceny zależności pomiędzy zmienną zależną a zmiennymi niezależnymi. Koszty zdarzeń barier mogą być analizowane na dwa sposoby: w wyniku pojedynczego najechania pojazdu na barierę ochronną oraz na odcinku drogi.

W przypadku pierwszego podejście badanie wpływu zostało wykonane dla wybranych modeli wskaźnik intensywności przyspieszenia *ASI* barier stalowych (równanie 7.31) oraz linowych (równanie 7.32). Wyniki analizy wpływu przedstawiono postaci graficznej na (rys. 8.6, tab. 8.2).

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdza się, że zmienną wpływającą na zwiększenie kosztów zdarzeń z pojedynczą barierą ochronną jest prędkość poprzeczna uderzającego pojazdu *VPL*. Natomiast zmiennymi wpływającymi na zmniejszenie kosztów zdarzeń z pojedynczą barierą ochronną są: podatność drogowych barier ochronnych *Ss* oraz masa pojazdów uderzających w barierą ochronną *MP*.



Rys. 8.6 Wpływ zmiennych niezależnych na współczynnik intensywności przyspieszenia z barierami a) stalowymi b) linowymi

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych badań (rys. 8.6, tab. 8.2) stwierdzono, że różne typy barier (stalowe i linowe) wykazują odmienną wrażliwość na zmiany czynników związanych ze zmianą współczynnika intensywności przyspieszenia *ASI*. Bariera stalowa charakteryzuje się wyższą elastycznością łukową w zakresie prędkości poprzecznej pojazdu oraz podatności konstrukcji, co wskazuje na jej większą wrażliwość na zmiany tych parametrów w kontekście intensywności zdarzenia *ASI*. Z kolei bariera linowa wykazuje wyższą elastyczność w odniesieniu do masy pojazdu uderzającego. Przedstawione różnice wynikają z odmiennych właściwości technicznych i fizycznych obu typów barier. Sztywniejsza konstrukcja bariery stalowej powoduje, że prędkość uderzenia ma na nią bardziej znaczący wpływ, generując wyższe wartości *ASI* przy większych prędkościach.

Tab. 8.2 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę współczynnika *ASI* barier stalowych i linowych przy wzroście wartości danej zmiennej niezależnej o 1%.

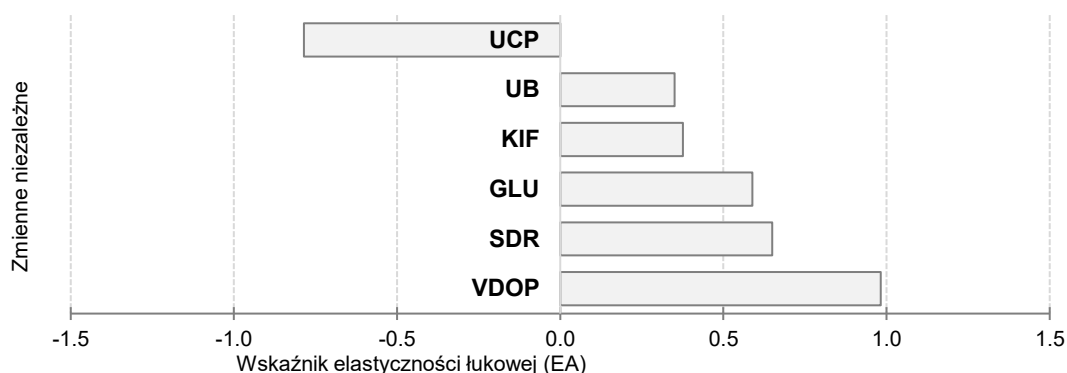
Zmienne niezależne		Zmiana współczynnika <i>ASI</i> (%)			
		Bariera stalowa		Bariera linowa	
		wzrost	spadek	wzrost	spadek
VPL	Prędkość poprzeczna pojazdu	0,93		0,75	
MP	Masa pojazdu		0,19		0,31
Ss	Podatność bariery		0,44		0,28

Źródło: Opracowanie własne

Jednocześnie podatność konstrukcji stalowej silniej determinuje jej zachowanie podczas zderzenia. Natomiast elastyczna struktura bariery linowej, oparta na systemie naprężonych lin, sprawia, że masa pojazdu staje się parametrem bardziej krytycznym dla intensywności zdarzenia.

W przypadku kosztów zdarzeń na odcinku dróg badanie wpływu zostało wykonane dla wybranego modelu gęstości zdarzeń z barierami *GZDB* (równanie 7.43). Wyniki analizy wpływu przedstawiono postaci graficznej na (rys. 8.7, tab. 8.3).

Na podstawie przeprowadzonej analizy wskaźnika elastyczności łukowej zmiennej gęstość zdarzeń z barierami stwierdzono, że zmiennymi wpływającymi na zwiększenie gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi są udział barier w przekroju na odcinku drogi *UB*, wskaźnik falistości odcinka *KIF*, gęstość łuków poziomych *GLU*, średniodobowe natężenie pojazdów *SDR* i prędkość dopuszczalna *VDOP*. Natomiast zmienną wpływającą na zmniejszenie *GZDB* jest udział pojazdów ciężarowych z przyczepą *UCP*.



Rys. 8.7 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość zdarzeń z barierami na odcinku

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że różne zmienne niezależne wykazują zróżnicowany wpływ na gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi *GZDB* na odcinkach dróg krajowych. Największy wpływ ma prędkość dopuszczalna której wzrost o 1% powoduje niemal proporcjonalny wzrost gęstości zdarzeń o 0,98%. Kolejnym znaczącym parametrem jest średniodobowe natężenie pojazdów. Zwiększenie natężenia ruchu o 1% przekłada się na wzrost *GZDB* o 0,66%. Na gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi na odcinku wpływ ma również geometria odcinków dróg i ich wyposażenie. Prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń z barierami wzrasta na odcinkach charakteryzujących się skomplikowaną geometrią (gęstość łuków poziomych, wskaźnik falistości odcinka).

Tab. 8.3 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi przy wzroście wartości danej zmiennej niezależnej o 1%.

Zmienne niezależne		Zmiana gęstości zdarzeń z barierami <i>GZDB</i> (%)	
		wzrost	spadek
VDOP	Prędkość dopuszczalna	0,98	
SDR	Średniodobowe natężenie pojazdów	0,66	
GLU	Gęstość łuków poziomych	0,58	
KIF	Wskaźnik falistości odcinka	0,38	
UB	Udział barier w przekroju na odcinku drogi	0,35	
UCP	Udział pojazdów ciężarowych z przyczepą		0,79

Źródło: Opracowanie własne

8.4. Analiza wpływu wybranych czynników na składowe koszty infrastruktury niechronionych użytkowników drogi

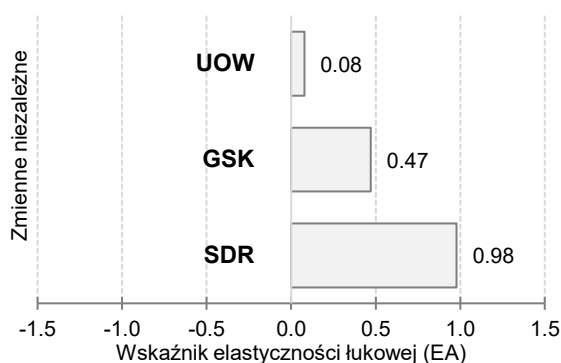
8.4.1. Koszty dróg dla pieszych

Analizę wpływu poszczególnych zmiennych niezależnych na zmienne zależne przeprowadzono z wykorzystaniem wskaźnika elastyczności łukowej opisanego wzorem 8.1, który umożliwił wykonanie oceny zależności pomiędzy zmienną zależną a zmiennymi niezależnymi. Badanie wpływu zmiennych zostało wykonane dla wybranych modeli składowych kosztów zdarzeń z pieszymi na drogach wojewódzkich przedstawionych w rozdziale 7.4.4. Zgodnie z ogólnym wzorem na koszty zdarzeń drogowych (równanie 7.53) składowymi zmiennymi wpływającymi na wysokość kosztów są zmienne:

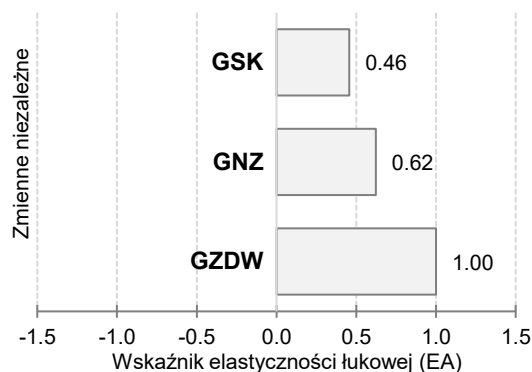
- gęstość zdarzeń na drogach wojewódzkich *GZDW*,
- gęstość wypadków z pieszymi *GWP*,
- gęstość ofiar pieszych *GOP*,
- gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych pieszych *GCRZP*,

Każda z tych zmiennych została wcześniej opisana w rozdziale 7.5.3 za pomocą równań: 7.69, 7.71, 7.75, 7.76. Wskaźniki elastyczności łukowej, obliczone dla powyższych zależności, przedstawiono w formie graficznej na rys. 8.8, rys. 8.9.

a)



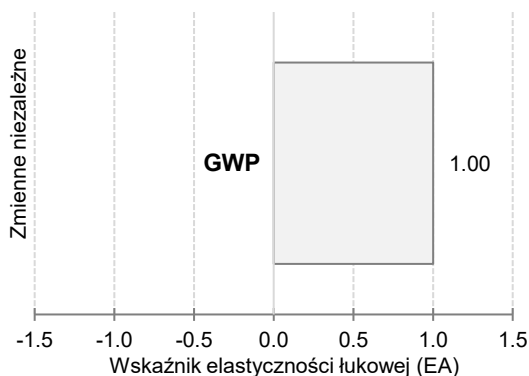
b)



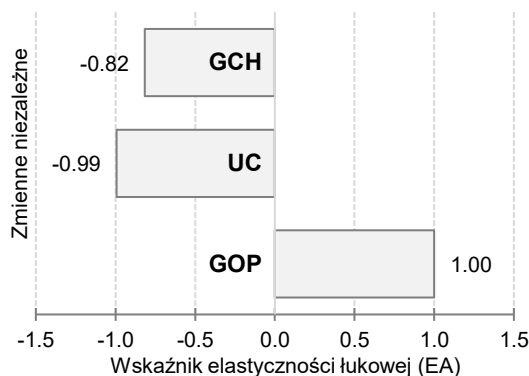
Rys. 8.8 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość a) zdarzeń na drogach wojewódzkich b) wypadków z udziałem pieszych

Źródło: Opracowanie własne

a)



b)



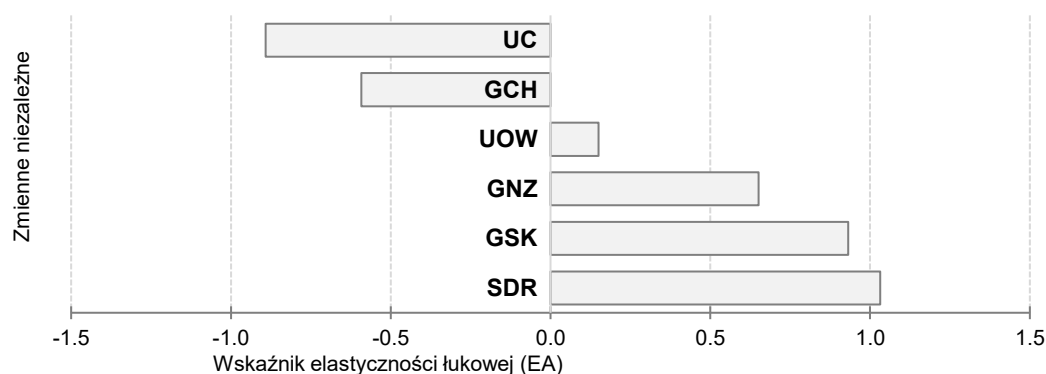
Rys. 8.9 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość ofiar a) ogólną b) ciężko rannych i śmiertelnych z udziałem pieszych

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonej analizy wskaźnika elastyczności łukowej (rys. 8.8 – rys. 8.9) stwierdza się, że:

- Gęstość zdarzeń na drogach wojewódzkich *GZDW* zwiększa się wraz ze wzrostem średniodobowego natężenia ruchu *SDR*, gęstości skrzyżowań *GSK*, udziałem odcinków o ograniczonej widoczności *UOW*. Największy wpływ na zmianę zmiennej zależnej wykazuje średniodobowe natężenie ruchu *SDR*.
- Gęstość wypadków z udziałem pieszych *GWP* zwiększa się wraz ze wzrostem gęstości zdarzeń na drogach wojewódzkich *GZDW*, gęstości obszaru niezabudowanego *GNZ*, gęstości skrzyżowań *GSK*, udziałem odcinków o ograniczonej widoczności *UOW*. Największy wpływ na zmianę zmiennej zależnej wykazuje zmienna gęstość zdarzeń na drogach wojewódzkich *GZDW*.
- Gęstość ofiar z udziałem pieszych *GOP* zwiększa się wraz ze wzrostem gęstości wypadków z udziałem pieszych *GWP*.
- Gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z udziałem pieszych *GCRZP* zwiększa się wraz ze wzrostem gęstości ofiar z udziałem pieszych *GOP*. Natomiast wraz ze wzrostem pojazdów ciężarowych na odcinku *UC*, gęstość dróg dla pieszych *GCH* zmniejsza się *GCRZP*.

Kluczową miarą w szacowaniu kosztów z udziałem pieszych jest liczba ofiar ciężko rannych i śmiertelnych, która może być szacowana w sposób pośredni z wykorzystaniem modeli na gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych *GCRZP*. Zmienna ta jest szczególnie istotna z uwagi na charakteryzujące ją najwyższe jednostkowe koszty społeczno-ekonomiczne. W związku z tym, wykonano zagregowaną analizę wskaźnika elastyczności łukowej, uwzględniającą pośrednie zależności między zmiennymi *GZDW*, *GWP*, *GOP* i *GCRZP*, występujące w strukturze opracowanych modeli. Wyniki zagregowanego wskaźników elastyczności łukowej przedstawiono w postaci graficznej (rys. 8.10) oraz w postaci tabelarycznej (tab. 8.4).



Rys. 8.10 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonej analizy wskaźnika elastyczności łukowej (rys. 8.10, tab. 8.4) stwierdza się, że zmiennymi wpływającymi na:

- zwiększenie, gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych *GCRZP*, a tym samym ich kosztów są średniodobowe natężenie pojazdów *SDR* na drogach wojewódzkich, gęstość skrzyżowań *GSK*, udział obszaru niezabudowanego *GNZ*, udział odcinków o ograniczonej widoczności *UOW*;

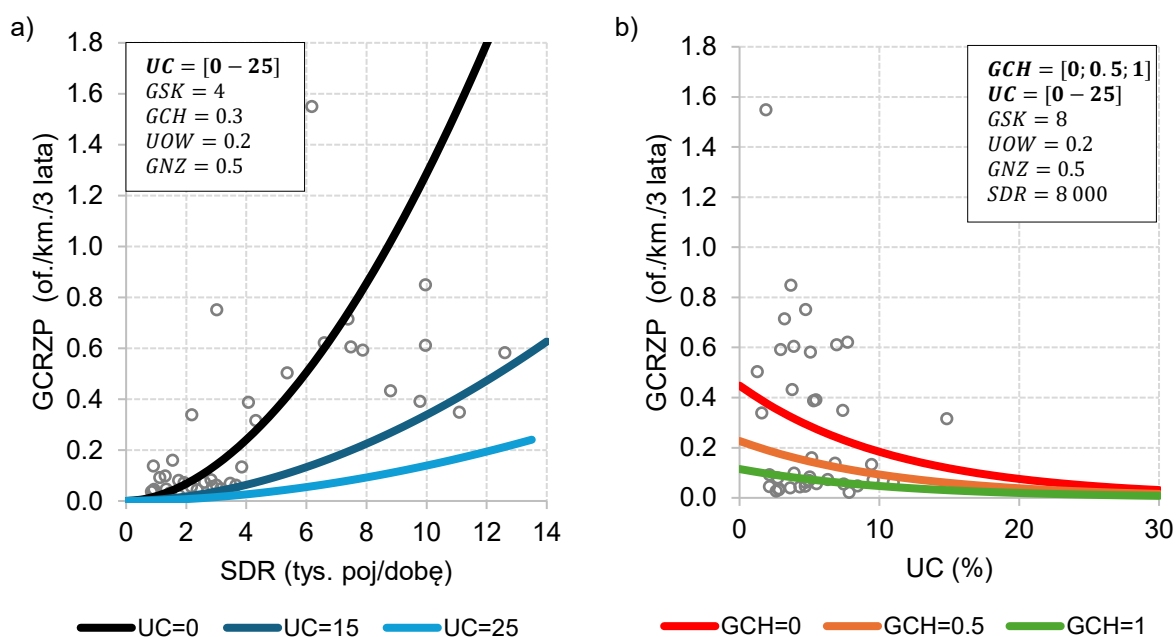
- zmniejszenie gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych *GCRZP*, a tym samym ich kosztów są: udział pojazdów ciężarowych *UC*, gęstość dróg dla pieszych *GCH*.

Tab. 8.4 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę gęstości wypadków z pieszymi oraz gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych przy wzroście wartości danej zmiennej niezależnej o 1%.

Zmienne niezależne		Gęstość of. ciężko rannych i śmiertelnych <i>GCRZP</i> (%)	
		wzrost	spadek
SDR	Średniodobowe natężenie pojazdów	1,03	
GSK	Gęstość skrzyżowań	0,93	
GNZ	Udział obszaru niezabudowanego	0,65	
UOW	Udział odcinków o ograniczonej widoczności	0,15	
UC	Udział pojazdów ciężarowych		0,89
GCH	Gęstość dróg dla pieszych		0,59

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych badań (tab. 8.4) stwierdza się, że najsilniejszy wpływ na wzrost gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych *GCRZP* ma średniodobowe natężenie pojazdów ($SDR=1,03$) – Wskazuje to, że wraz ze wzrostem natężenia ruchu pojazdów rośnie ryzyko wystąpienia ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych (rys. 8.11a). Kolejnym parametrem ruchowym mającym istotny wpływ na gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych jest udział pojazdów ciężarowych na odcinku *UC*, który wpływa na charakterystykę ruchu pojazdów na odcinku dróg oraz ich średnią prędkość (rys. 8.11). Skutkiem wzrostu udziału pojazdów ciężarowych o 1% na analizowanych odcinkach dróg jest spadek gęstości ofiar o blisko 0,9%. Kluczową rolę w redukcji kosztów zdarzeń odgrywa infrastruktura dla pieszych ($EA=0,59$). Zwiększenie gęstości dróg dla pieszych oraz udziału pojazdów ciężarowych na odcinku wpływa na redukcję kosztów zdarzeń z pieszymi.

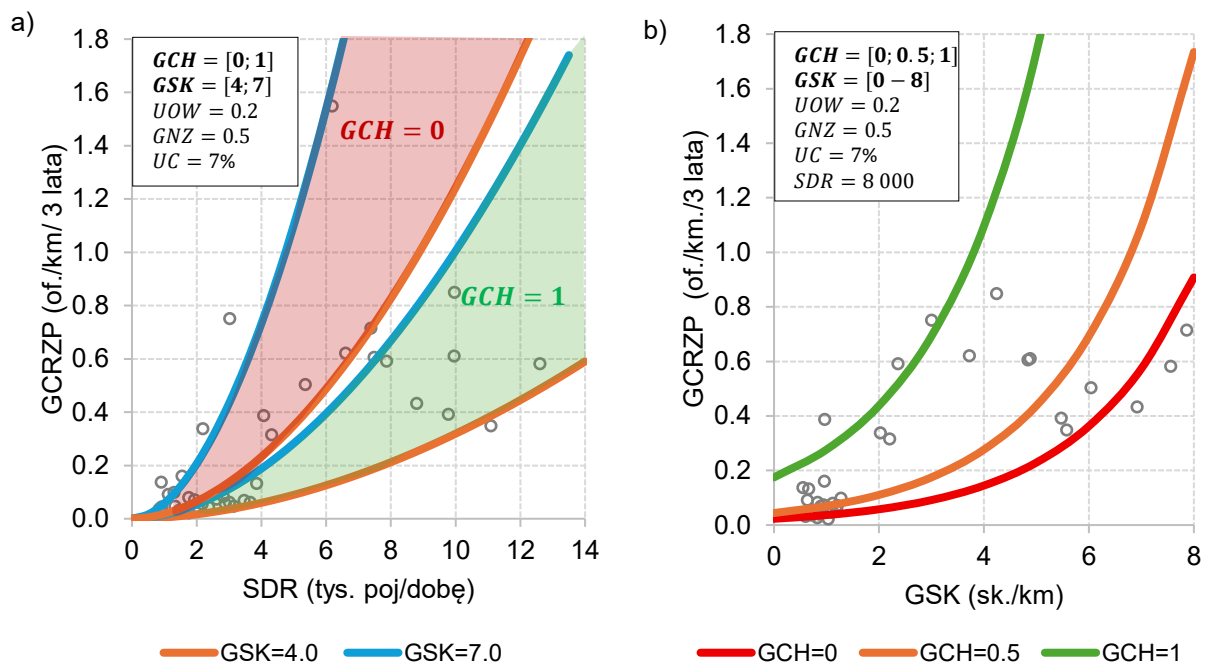


Rys. 8.11 Wpływ na zmianę gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z pieszymi *GCRZP* a) natężenia ruchu *SDR* i udziału pojazdów ciężarowych *UC* b) udziału pojazdów ciężarowych *UC* i gęstości chodników *GCH*

Źródło: Opracowanie własne

Oprócz parametrów ruchowych istotnych gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych *GCRZP* ma geometria odcinków dróg wojewódzkich. Wraz ze wzrostem parametru gęstości skrzyżowań *GSK* o 1% wzrasta liczba ofiar ciężko rannych i śmiertelnych *GCRZP* na odcinku dróg o 0,93% (tab. 8.4). Na zależność tą może wpływać to, że wraz ze zwiększoną gęstością skrzyżowań może rosnąć potencjalna liczba miejsc przekraczania jezdni przez pieszych. Szczególnie istotne jest uwzględnienie na tych odcinkach dróg dla pieszych, które mogą zredukować liczbę ofiar ciężko rannych i śmiertelnych (rys. 8.12).

W przypadku pozostałych zmiennych takich jak udział obszaru niezabudowanego *GNZ* oraz udział odcinków o ograniczonej widoczności *UOW* widoczny jest mniejszy wpływ na zmianę gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych *GCRZP* niż w przypadku gęstości skrzyżowań *GSK*. Szczególnie niska wartość wskaźnika elastyczności dla zmiennej *UOW* (tab. 8.4) wskazują, że ograniczona widoczność ma niewielki wpływ na koszty zdarzeń z pieszymi na analizowanym poligonie badawczym.

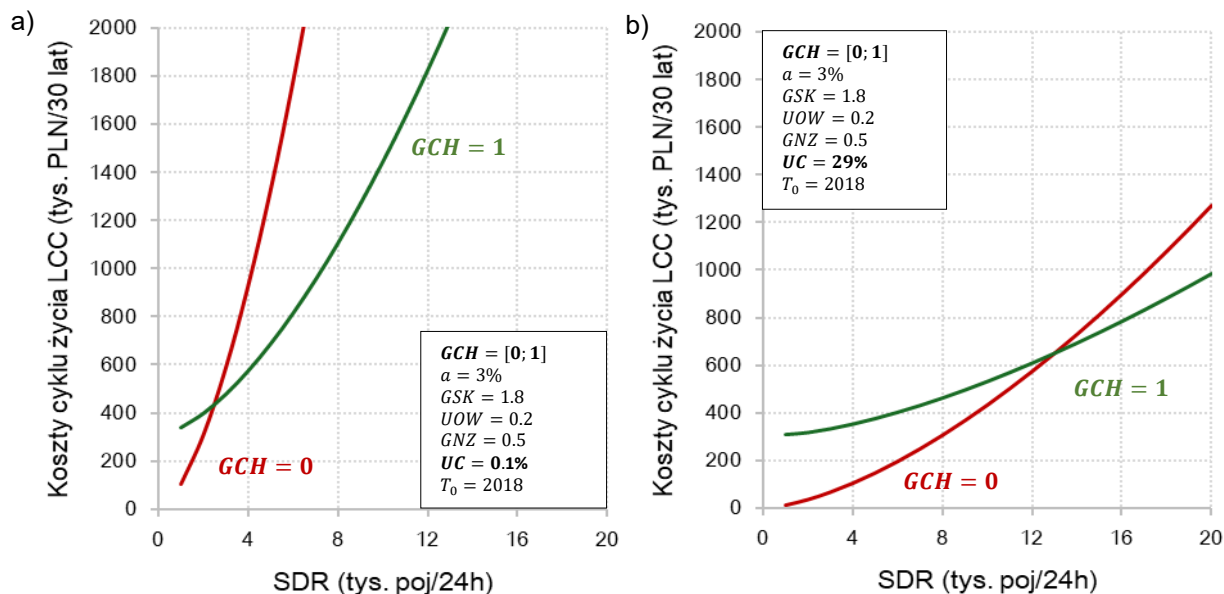


Rys. 8.12 Wpływ na zmianę gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z pieszymi *GCRZP* a) natężenia ruchu *SDR* i gęstości skrzyżowań *GSK* b) gęstości skrzyżowań *GSK* i gęstości chodników *GCH*

Źródło: Opracowanie własne

Oszacowano koszty cyklu życia infrastruktury dla pieszych ($GCH=1$) oraz jej braku ($GCH=0$). Analizę przeprowadzono przy założonej rocznej stopie dyskontowej na poziomie 3%, przyjęciu roku bazowego 2018 oraz uwzględnieniu stałych wskaźników zmiany liczby wypadków. W analizie uwzględniono dwa skrajne warianty udziału pojazdów ciężarowych: niski ($UC=0.1\%$) oraz wysoki ($UC=29\%$) (rys. 8.13). W przypadku niskiego udziału pojazdów ciężarowych widoczny jest dynamiczny wykładniczy wzrostu kosztów cyklu życia. W scenariuszu tym (rys. 8.13a) punkt przecięcia kosztów LCC dla wariantu z i bez infrastruktury występuje już przy natężeniu rzędu około 3 tys. pojazdów na dobę. W przypadku wysokiego udziału pojazdów ciężarowych i przy natężeniu powyżej 12 tys. pojazdów na dobę wariant bez infrastruktury dla pieszych generuje wyższe koszty cyklu życia niż wariant z infrastrukturą pieszą

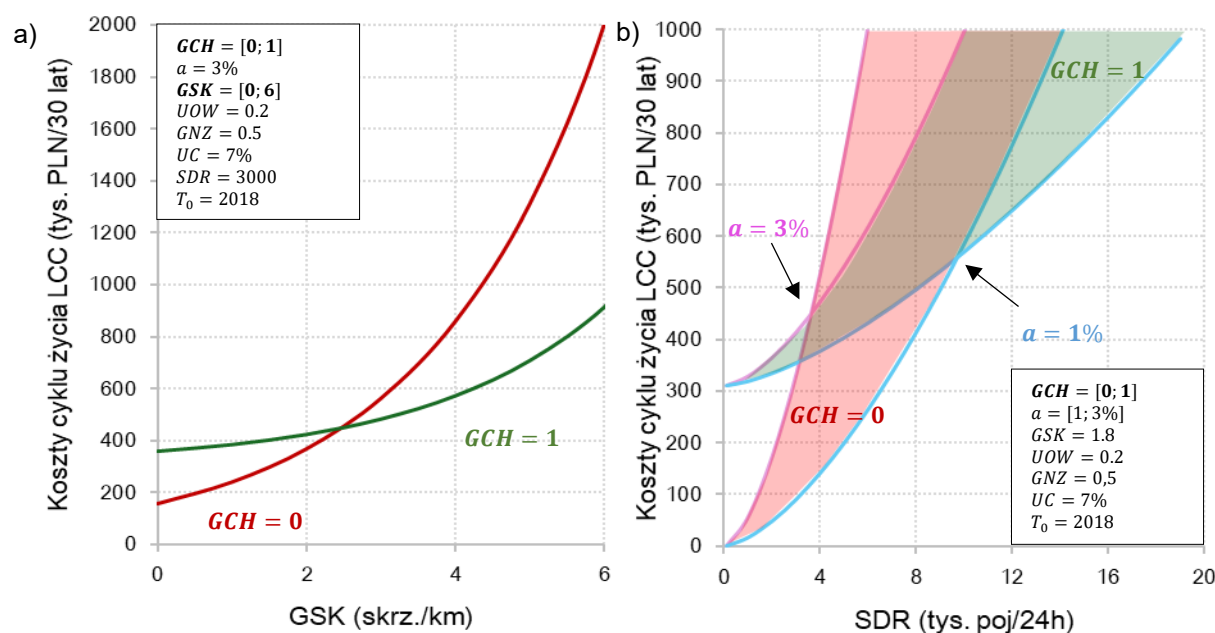
(rys. 8.13b). Różnica w kosztach cyklu życia pomiędzy scenariuszami zakładającymi różny udział pojazdów ciężarowych może wynikać ze zmiany prędkości w ruchu potoku pojazdów.



Rys. 8.13 Zmiana kosztów cyklu życia LCC w zależności od występowania lub braku dróg dla pieszych, natężenia ruchu SDR oraz a) minimalnego udziału pojazdów ciężarowych b) maksymalnego udziału pojazdów ciężarowych

Źródło: Opracowanie własne

Analizie poddano wpływ zmiany gęstości skrzyżowań GSK na koszty cyklu życia ponoszone w związku z występowaniem lub brakiem dróg dla pieszych przy założonym natężeniu w roku bazowym 3 tys. poj./dobę oraz niskim udziale pojazdów ciężarowych 7% (rys. 8.14a). W przypadku występowania małej gęstości skrzyżowań (poniżej 2.5 skrzyż./km) wariant bez infrastruktury pieszej generuje niższe koszty cyklu życia niż wariant z infrastrukturą pieszą.



Rys. 8.14 Zmiana kosztów cyklu życia LCC w zależności od występowania lub braku dróg dla pieszych oraz a) gęstości skrzyżowań GSK b) natężenia SDR oraz stopy dyskontowej a

Źródło: Opracowanie własne

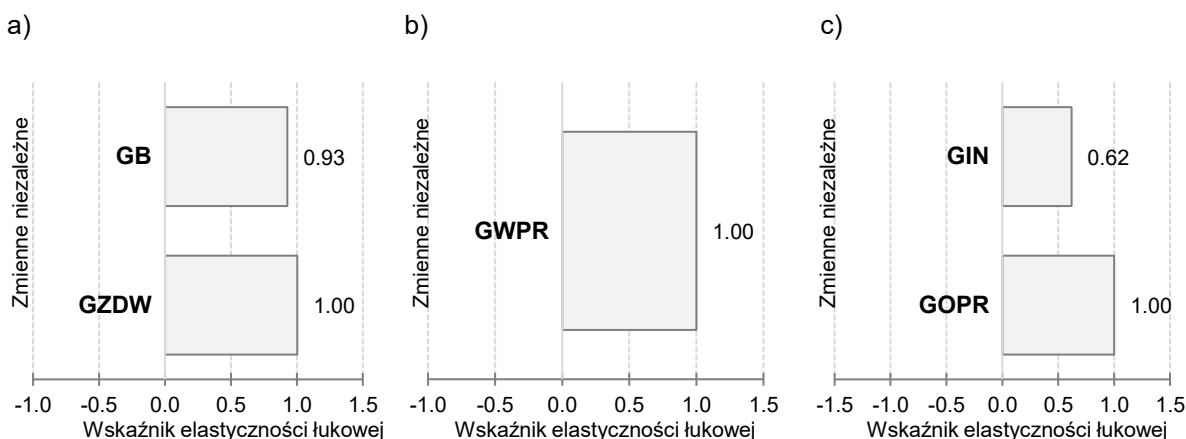
Kolejną zmienną, której wpływ przeanalizowano była stopa dyskontowa (rys 8.14b). W przypadku przyjęcia średnich wartości czynników i stopy dyskontowej wynoszącej 1% stosowanie infrastruktury dla pieszych jest opłacalne ekonomicznie przy średniodobowym natężeniu ruchu ok. 11 tys. poj./dobę. Natomiast w przypadku szacowania kosztów dla stopy dyskontowej 3% próg opłacalności przesuwają się na średniodobowe natężenie ruchu wynoszące 3 tys. poj./dobę.

8.4.2. Koszty dróg dla pieszych i rowerów

Analizę wpływu wybranych czynników kosztów zdarzeń z niechronionymi uczestnikami ruchu drogowego na drogach wojewódzkich przechodzących przez małe miejscowości lub obszar niezabudowany wykonano analogicznie jak w przypadku kosztów dróg dla pieszych za pomocą wskaźnika elastyczności łukowej opisanego wzorem 8.1. Zgodnie z ogólnym wzorem na koszty zdarzeń drogowych (równanie 7.53) składowymi zmiennymi wpływającymi na wysokość kosztów są zmienne:

- gęstość wypadków z pieszymi i rowerzystami $GWPR$,
- gęstość ofiar wśród pieszych i rowerzystów $GOPR$,
- gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych i rowerzystów $GCRZPR$,

Przedstawione zmienne zależne zostały opisane za pomocą modeli matematycznych przedstawionych w rozdziale 7.5 za pomocą równań 7.72, 7.77, 7.78. Wyniki wskaźniki elastyczności łukowej dla analizowanych zmiennych przedstawiono w formie graficznej na rys. 8.15, rys. 8.16.



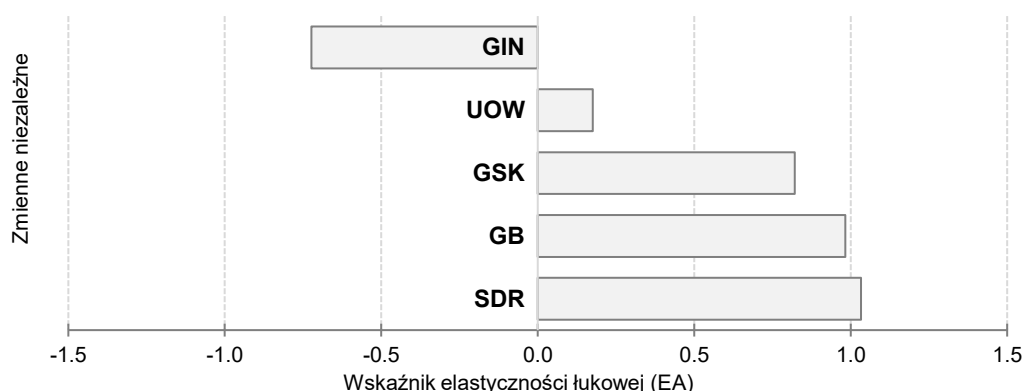
Rys. 8.15 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość a) wypadków b) ofiar c) ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych i rowerzystów

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonej analizy wskaźnika elastyczności łukowej (rys. 8.15) stwierdzono, że:

- wypadków z pieszymi i rowerzystami $GWPR$ zwiększa się wraz ze wzrostem gęstości zdarzeń na drogach wojewódzkich $GZDW$, gęstości zabudowy GB . Największy wpływ na zmianę zmiennej zależnej wykazuje zmienna gęstość zdarzeń na drogach wojewódzkich $GZDW$.
- Gęstość ofiar wśród pieszych i rowerzystów $GOPR$ zwiększa się wraz ze wzrostem gęstości wypadków z pieszymi i rowerzystami $GWPR$.
- Gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych i rowerzystów $GCRZPR$ zwiększa się wraz ze wzrostem gęstości ofiar z pieszymi i rowerzystami $GOPR$. Natomiast wraz ze wzrostem gęstości dróg dla pieszych i rowerów GIN zmniejsza się ciężkość wypadków mierzona $GCRZPR$.

Tak jak w przypadku kosztów dróg pieszych ważną miarą w szacowaniu kosztów niechronionych uczestników ruchu (pieszych i rowerzystów) w obszarach niezabudowanych i małych miejscowościach jest liczba ofiar ciężko rannych i śmiertelnych, która może być szacowana w sposób pośredni z wykorzystaniem modeli opisujących gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z pieszymi i rowerzystami *GCRZPR*. W związku z tym dla tej zmiennej, wykonano zagregowaną analizę wskaźnika elastyczności łukowej, uwzględniającą pośrednie zależności między zmiennymi *GZDW*, *GWPR*, *GOPR* i *GCRZPR*, występujące w strukturze opracowanych modeli. Wyniki zagregowanego wskaźników elastyczności łukowej przedstawiono w postaci graficznej (rys. 8.16) oraz w postaci tabelarycznej (tab. 8.5).



Rys. 8.16 Wpływ zmiennych niezależnych na a) gęstość wypadków z niechronionymi uczestnikami ruchu b) gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych i rowerzystów

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonej analizy wskaźnika elastyczności łukowej zmiennej, że zmiennymi wpływającymi na:

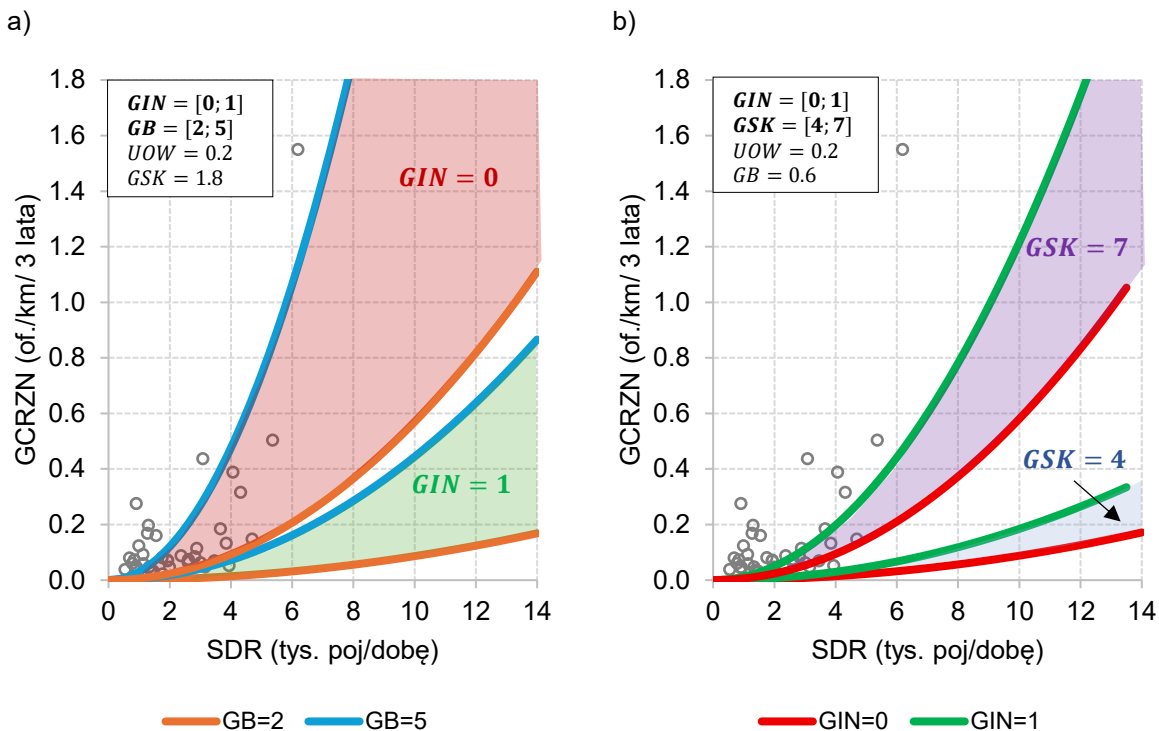
- zwiększenie gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z pieszymi i rowerzystami, a tym samym ich kosztów są średniodobowe natężenie pojazdów *SDR* na drogach wojewódzkich, gęstość zabudowy *GB*, gęstość skrzyżowań *GSK*, udział odcinków o ograniczonej widoczności *UOW*;
- zmniejszenie gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych jest gęstość dróg dla pieszych i rowerów *GIN*.

Tab. 8.5 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych i rowerzystów ruchu przy wzroście wartości danej zmiennej niezależnej o 1%.

Zmienne niezależne		Gęstość of. ciężko rannych i śmiertelnych GCRZPR (%)	
		wzrost	spadek
SDR	Średniodobowe natężenie pojazdów	1,03	
GB	Gęstość zabudowy mieszkalnej	0,98	
GSK	Gęstość skrzyżowań	0,82	
UOW	Udział odcinków o ograniczonej widoczności	0,18	
GIN	Gęstość dróg dla pieszych i rowerów		0,72

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdza się, że najsilniejszy wpływ na wzrost gęstość wypadków z niechronionymi uczestnikami ruchu ma średniodobowe natężenie pojazdów ($SDR=1,03$), co wskazuje, że zwiększony ruch drogowy bezpośrednio przekłada się na wyższą częstotliwość zdarzeń. Gęstość zabudowy mieszkalnej GB również znacząco wpływa na wzrost wypadków (0,98% wzrostu), wskazując na wyższe ryzyko w obszarach o ekstensywnej zabudowie. W przypadku modelu gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych $GCRZPR$ zmienne zależne mają podobny wpływ na wzrost zmiennej niezależnej jak w przypadku gęstości wypadków. Gęstość infrastruktury dla pieszych i rowerzystów GIN jest jedynym czynnikiem przyczyniającym się do spadku gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych. Zwiększenie udziału infrastruktury o 0,72% powoduje, spadek gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych o 1%, co podkreśla znaczenie infrastruktury w poprawie bezpieczeństwa niechronionych uczestników ruchu.



Rys. 8.17 Wpływ na zmianę gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych $GCRZN$ natężenia ruchu SDR gęstości infrastruktury GIN oraz a) gęstości zabudowy mieszkalnej GB b) gęstości skrzyżowań GSK

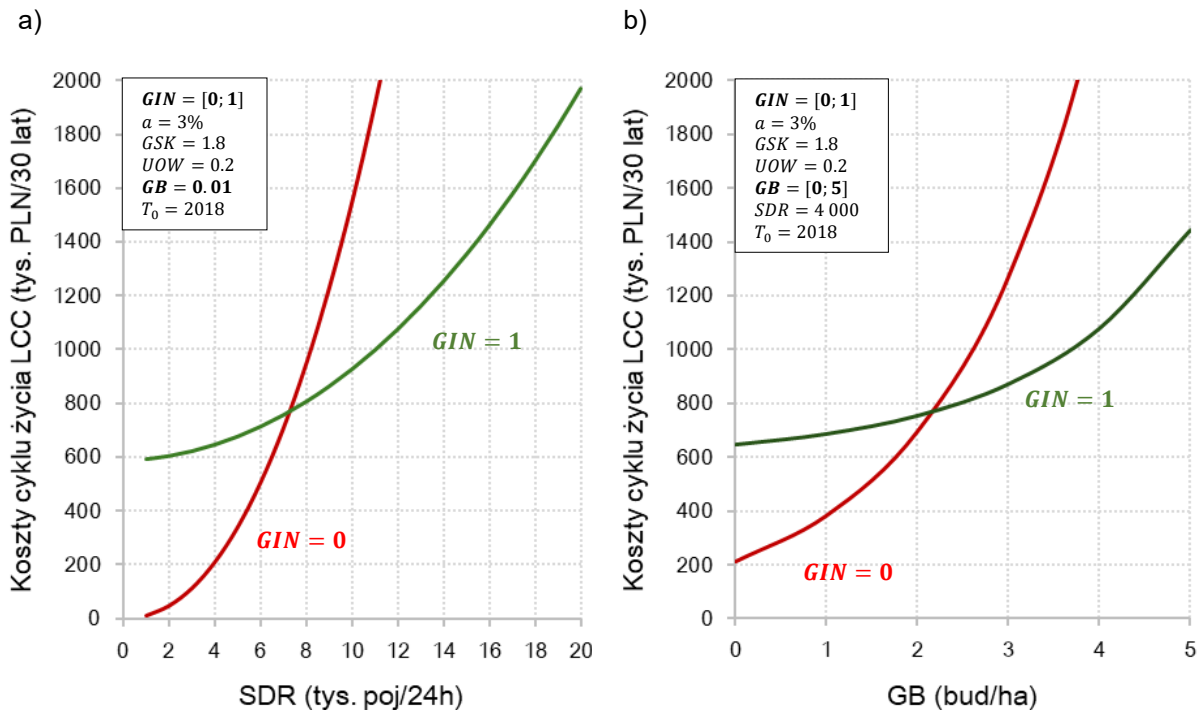
Źródło: Opracowanie własne

W celu porównania kosztów cyklu życia infrastruktury dla pieszych i rowerzystów przy zmiennym natężeniu ruchu SDR i zmiennej gęstości zabudowy mieszkalnej GB (rys. 8.18) przyjęto następujące założenia w obliczeniach: stopa dyskontowa 3%, rok bazowy 2018, średnioroczne tempo zmiany liczby wypadków i ofiar -2,6%, porównanie dwóch wariantów brak infrastruktury ($GIN = 0$) oraz infrastruktura występuje ($GIN = 1$) warianty, pozostałe czynniki przyjmowane jako średnie.

Analizując uzyskane wyniki stwierdzono, że koszty cyklu życia (LCC) rosną wykładniczo wraz ze wzrostem średniodobowego natężenia ruchu drogowego SDR . Brak infrastruktury dla pieszych i rowerzystów ($GIN = 0$) powoduje znacznie szybsze tempo wzrostu kosztów cyklu życia (LCC) niż

w przypadku jej występowania, co może świadczyć o tym, że przy wyższych poziomach natężenia ruchu inwestycje w infrastrukturę pieszko-rowerową są ekonomicznie uzasadnione.

Podobna zależność została zaobserwowana w odniesieniu do gęstości zabudowy mieszkalnej GB . Wraz ze wzrostem gęstości zabudowy, rosną również koszty cyklu życia, zarówno w wariantach z infrastrukturą, jak i bez niej. Jednak tempo wzrostu kosztów jest wyraźnie wyższe w przypadku jej braku. W obszarach o niskiej gęstości zabudowy mieszkalnej ($GB < 0,01$) i przy założeniu średnich warunków geometrycznych inwestowanie w infrastrukturę dla pieszych i rowerzystów przynosi korzyści ekonomiczne przy średniodobowym natężeniu pojazdów powyżej 7 tys. poj./dobę (rys. 8.18a). W rejonach o umiarkowanej i wysokiej gęstości zabudowy (np. $GB = 3$ budynki/ha), brak infrastruktury może prowadzić do kosztów LCC nawet o 50% wyższych w porównaniu do wariantu z infrastrukturą (rys. 8.18b). Gęstość zabudowy mieszkalnej może być traktowana jako pośrednia miara natężenia ruchu pieszego i rowerowego, dlatego wzrost gęstości zabudowy mieszkalnej zwiększa ryzyko zdarzeń z pieszymi i rowerzystami.



Rys. 8.18 Koszty cyklu życia LCC w zależności od występowania lub braku dróg dla pieszych i rowerzystów a) natężenia pojazdów SDR b) gęstości zabudowy mieszkalnej GB

Źródło: Opracowanie własne

9. METODY SZACOWANIA KOSZTÓW CYKLU ŻYCIA

9.1. Wprowadzenie

9.1.1. Wstęp

Mimo wielu zalet jakie posiada metoda LCC w Polsce wciąż brakuje kompleksowej metody umożliwiającej szacowanie kosztów cyklu życia infrastruktury drogowej, ocenę planowanej i projektowanie infrastruktury drogowej oraz wybór jej optymalnego wariantu. Biorąc to pod uwagę w niniejszym rozdziale przedstawiono propozycję metod szacowania kosztów cyklu życia dla wybranych (stanowiącą realizację celu praktycznego CP2 rozprawy doktorskiej) elementów drogowych, które mogą być zastosowane na drogach krajowych oraz wojewódzkich. Metody te zostały opracowane na podstawie przyjętej w rozdziale 4 koncepcji metody szacowania kosztów cyklu życia infrastruktury drogowej. A także z wykorzystaniem wyników przeprowadzonych badań terenowych, symulacyjnych i dokumentacyjnych, przedstawionych w rozdz. 5 i 6 oraz z wykorzystaniem własnych modeli wybranych składowych kosztów cyklu życia infrastruktury drogowej, opisanych w rozdz. 7 i 8. Wskazano także ogólne propozycje i zasady szacowania składowych kosztów cyklu życia elementów drogi nie objętych zakresem niniejszej rozprawy.

9.1.2. Metodyka prowadzenia analiz

Metodyka szacowania kosztów w cyklu życia dla potrzeb analiz, ocen i wyboru elementów drogi obejmuje zbiór metod, które można podzielić ze względu na:

- przedmiot analiz,
- poziom szczegółowości,
- zakres analiz.

Przedmiotem analiz w proponowanych metodach jest rodzaj wybranego elementu i klasa drogi. Na podstawie przeprowadzonych studiów i analiz wytypowano kilka grup elementów drogi (trasa drogowa, odcinki jednorodne, przekrój poprzeczny, skrzyżowania i węzły, obiekty inżynierskie, konstrukcja nawierzchni, wyposażenie drogi), które wymagają opracowania metod szacowania kosztów w cyklu życia [197]. Taką metodę opracowano już dla obiektów inżynierskich [215]. Ze zbioru kilkunastu elementów drogi, w ramach niniejszej pracy wybrano trzy dla których opracowano dedykowane metody szacowania kosztów w cyklu życia. Wybranymi elementami drogi są:

- trasa drogowa na drogach krajowych,
- drogowe bariery ochronne na drogach krajowych,
- urządzenia dla pieszych i rowerzystów na drogach wojewódzkich.

Poziom szczegółowości metody uwzględnia dostępność danych. Przewiduje się trzy poziomy dokładności szacowania kosztów: przybliżony, umiarkowany i dokładny. W zależności od fazy cyklu życia drogi, celu i zakresu analiz stosuje się trzy metody szczegółowości szacowania kosztów cyklu życia drogi i jej elementów.

1. Metoda uproszczona szacowania kosztów cyklu życia drogi, stosowana na etapie wstępnego wyboru wariantu typu lub rodzaju elementu drogi, charakteryzuje się dużym poziomem ogólności,

może być stosowana dla doboru elementów drogi w fazach wczesnego planowania drogi (plany ogólne, studia korytarzowe).

2. Metoda ogólna szacowania kosztów cyklu życia drogi, stosowana na pośrednich etapach wyboru wariantu typu lub rodzaju elementu drogi, charakteryzująca się średnim stopniem ogólności ze względu na ograniczony dostęp do danych. Metoda przygotowana jest do stosowania w fazie projektowania wstępnego, w fazie przygotowania dokumentacji do decyzji środowiskowych (STeŚ – I) oraz na etapie utrzymania drogi.
3. Metoda szczegółowa szacowania kosztów cyklu życia drogi, stosowana na etapie ostatecznego wyboru wariantu typu lub rodzaju elementu drogi, charakteryzująca się dużym stopniem dokładności ze względu na nieograniczony dostęp do danych. Metoda przygotowana jest do stosowania w fazie przygotowania projektu szczegółowego (projekt budowlany) do decyzji dotyczącej pozwolenia na budowę drogi oraz na etapie utrzymania drogi do przygotowania ofert przetargowych na utrzymanie drogi.

W niniejszym opracowaniu zaproponowano dwie metody:

- a) uproszczoną stosowaną na etapie wstępnego wyboru wariantu typu lub rodzaju elementu drogi,
- b) podstawową stosowaną (w zależności od zakresu dostępnych danych) w wariantach mniej lub bardziej dokładną (łącznie zakresy metody ogólnej i szczegółowej).

Zakres analiz. Poszczególne elementy drogi charakteryzują się różnym zakresem analiz w zależności od funkcji jakie pełnią, czynników wpływających na koszty i charakterystyk konstrukcyjnych.

Analiza wrażliwości. Analiza kosztów cyklu życia może być wykonana w sposób deterministyczny lub probabilistyczny. W przypadku podejścia deterministycznego zaleca się, aby analiza kosztów cyklu życia została wykonana w co najmniej trzech scenariuszach badawczych:

- obniżenie natężenia ruchu o 15% [120],
- podwyższenie nakładów inwestycyjnych o 35% [120],
- obniżenie rekomendowanej stopy dyskontowej o 2%.

Stosując podejście probabilistyczne należy przyjąć rozkłady prawdopodobieństwa dla danych kosztowych (przedstawionych w rozdziale 6) lub zmiennych wejściowych. Z uwagi na to, że analizowane zmienne m.in. koszty, natężenie nie mogą przyjmować wartości ujemnych, dlatego też w przypadku stosowania rozkładów o nieograniczonym zakresie (np. rozkład normalny) konieczne jest wprowadzenie ograniczeń brzegowych lub zastosowanie rozkładów obciętych (np. lognormalny, gamma).

9.1.3. Podstawowy model obliczeniowy kosztów cyklu życia

W proponowanych metodach koszty cyklu życia analizowanych wariantów trasy drogowej lub jej wybranych elementów LCC_j szacuje się za pomocą wzoru 9.1.

$$LCC_j = KIN_j + \sum_{i=1}^T \frac{KUT_{i,j} + KUZ_{i,j} + K\acute{S}R_{i,j} + KPO_{i,j}}{(1 + a)^i} \quad (9.1)$$

przy czym:

$$KIN_j = KPL_j + KBU_j \quad (9.2)$$

$$KUT_{i,j} = KSTR_{i,j} + KRU_{i,j} = KMO_{i,j} + KUO_{i,j} + KNA_{i,j} + KUB_{i,j} \quad (9.3)$$

$$KUZ_{i,j} = KZD_{i,j} + KST_{i,j} + KEP_{i,j} \quad (9.4)$$

$$K\acute{S}R_{i,j} = K\acute{S}T_{i,j} + K\acute{S}E_{i,j} \quad (9.5)$$

$$KPO_{i,j} = KLI_{i,j} + KNN_{i,j} \quad (9.6)$$

gdzie:

LCC_j – koszty cyklu życia j -tego wariantu planowanej drogi ponoszone przez inwestora i społeczeństwo (mln PLN),

KIN_j – koszty inwestycyjne j -tego wariantu planowanej drogi ponoszone przez inwestora (mln PLN),

KPL_j – koszty planowania i projektowania planowanej j -tego wariantu planowanej drogi ponoszone przez inwestora (mln PLN),

KBU_j – koszty budowy j -tego wariantu planowanej drogi ponoszone przez inwestora (mln PLN),

$KUT_{i,j}$ – koszty utrzymania j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KSTR_{i,j}$ – koszty strukturalne utrzymania j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KRU_{i,j}$ – koszty rutynowe utrzymania j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KMO_{i,j}$ – koszty modernizacji j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KUO_{i,j}$ – koszty utrzymania okresowego j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KNA_{i,j}$ – koszty naprawy j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KUB_{i,j}$ – koszty utrzymania bieżącego j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KUZ_{i,j}$ – koszty użytkowników drogi j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez użytkowników (mln PLN/rok),

$KZD_{i,j}$ – koszty zdarzeń drogowych j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez użytkowników (mln PLN/rok),

$KST_{i,j}$ – koszty strat czasu j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez użytkowników drogi (mln PLN/rok),

$KEP_{i,j}$ – koszty eksploatacji pojazdów j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku, ponoszone przez użytkowników (mln PLN/rok),

$K\acute{S}R_{i,j}$ – koszty zagrożeń dla środowiska j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez użytkowników i społeczeństwo (mln PLN/rok),

$K\acute{S}T_{i,j}$ – koszty emisji gazów toksycznych spalin j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez użytkowników i społeczeństwo (mln PLN/rok),

$K\dot{S}E_{i,j}$ – koszty emisji gazów cieplarnianych spalin j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez użytkowników i społeczeństwo (mln PLN/rok),

$KPO_{i,j}$ – koszty pozostałe j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez użytkowników i społeczeństwo (mln PLN/rok),

$KLI_{i,j}$ – koszty likwidacji j -tego wariantu typu przekroju poprzecznego planowanej drogi w i -tym roku są to koszty demontażu oraz utylizacji ponoszone w ostatnim etapie życia infrastruktury drogowej, ponoszone przez inwestora, użytkowników i społeczeństwo (mln PLN/rok),

$KNN_{i,j}$ – koszty inne j -tego wariantu typu przekroju poprzecznego planowanej drogi w i -tym roku, przez te koszty rozumie się dodatkowe koszty ponoszone przez zarządcę lub użytkownika drogi, które nie zostały uwzględnione we wcześniejszych analizach (mln PLN/rok).

9.2. Metoda szacowania kosztów wariantów lokalizacyjnych trasy drogowej

9.2.1. Wprowadzenie

Proces inwestycyjny w zakresie realizacji projektów drogowych wymaga podejmowania szeregu decyzji na poszczególnych etapach cyklu życia drogi (planowanie, projektowanie, budowa, utrzymanie). Kluczową decyzją jest jednak wybór optymalnego wariantu inwestycyjnego planowanej lub projektowanej trasy drogowej, ponieważ wpływa to bezpośrednio na zakres oddziaływania drogi oraz jej parametry użytkowe i eksploatacyjne. Wybór określonego wariantu inwestycyjnego planowanej trasy drogowej jest procesem wiążącym się z wymiernymi konsekwencjami (ekonomicznymi, transportowymi, środowiskowymi, oddziaływaniem na bezpieczeństwo uczestników ruchu itp.), konieczne jest więc jego wsparcie efektywnymi metodami i narzędziami.

Takim narzędziem jest wielokryterialna analiza porównawcza, która umożliwia ocenę poszczególnych wariantów inwestycji wg zdefiniowanego zbioru kryteriów, co w konsekwencji pozwala na zbudowanie rankingu wariantów inwestycyjnych i wybór wariantu optymalnego. Podstawę oceny i wyboru wariantów inwestycyjnych stanowi koncepcja i wymagania zrównoważonego rozwoju i myślenie w cyklu życia uwzględniające trzy rodzaje oddziaływań produktu (usługi, obiektu): środowiskowe, społeczne i ekonomiczne, a w istocie ich dostrzeganie i ustawiczne poszukiwanie sposobów harmonijnego połączenia tych trzech aspektów.

W celu określenia wpływu ekonomicznego oddziaływania obiektu rozwijano metody szacowania kosztów w cyklu życia obiektu. W bardziej tradycyjnym ujęciu jest to metoda obliczania całkowitego kosztu produktu (wyrobu lub usługi) generowanego podczas jego cyklu życia od pozyskania surowców po zagospodarowanie odpadów, w tym w fazach: projektowania, instalacji, eksploatacji, konserwacji oraz recyklingu lub utylizacji. Metoda LCC znajduje zastosowanie do wielu celów, najczęściej dotyczy projektowania i wyboru określonych, zoptymalizowanych wersji produktów, dostępności cenowej, wyboru dostawców usług. W metodzie analizy wielokryterialnej drogowych projektów inwestycyjnych WAP-MP [197] przyjęto cztery grupy kryteriów:

- funkcjonalno-techniczne (FT),
- ekonomiczne (EK),
- przyrodnicze (PR),

- społeczne (SP).

Każda z grup kryteriów obejmuje odpowiednie podgrupy kryteriów wraz z wchodzącymi w ich skład kryteriami szczegółowymi. W kryteriach ekonomicznych koszty cyklu życia planowanej drogi mają wysoką pozycję w ich stosowaniu [197].

9.2.2. Struktura metody

Zgodnie z przyjętą metodyką:

1. Przedmiotem analizy są warianty lokalizacyjne trasy drogowej na drogach krajowych.
2. Metoda szacowania kosztów jest metodą uproszczoną szacowania kosztów.

9.2.3. Metoda uproszczona szacowania kosztów trasy drogowej na etapie wstępnego wyboru wariantów

Na etapie wstępnego wyboru wariantów lokalizacyjnych, przy ograniczonym dostępie do danych można oszacować wstępne koszty budowy drogi korzystając z modeli opracowanych w rozdz. 7.3. Trudno uzyskać dane do oszacowania kosztów pełnego cyklu życia trasy drogowej, ale opracowany model umożliwia oszacowanie kosztów inwestycyjnych jako istotnego elementu kosztów cyklu życia.

W celu określenia wstępnych kosztów inwestycyjnych konieczne jest zebranie danych dotyczących parametrów geometryczno-ruchowych odcinków dróg wojewódzkich oraz makroekonomicznych, takich jak: długość odcinka trasy DL (km), informacja o planowaniu lub brak tuneli TUN (0 – zaplanowany tunel, 1 – brak tunelu), średniodobowe natężenie ruchu przeliczone na 2020 rok SDR (tys. poj./dobę), jednostkowy produkt krajowy brutto na mieszkańca w roku bazowym $JPKB$ (tys. PLN/mk).

Koszty inwestycyjne KIN analizowanego wariantu trasy drogowej można oszacować w sposób bezpośredni za pomocą wzoru 9.7.

$$KIN = DL_j \cdot \exp(-3.782 + 1.323 \cdot TUN_j + 4.270 \cdot SDR_j \cdot 10^{-3} + 0.009 \cdot JPKB_i) \quad (9.7)$$

gdzie:

KIN_j – koszty inwestycyjne trasy drogowej oszacowane w (mld PLN),

DL_j – długość planowanego wariantu lokalizacyjnego trasy drogowej w (km),

TUN_j – zmienna logiczna, wskazująca czy analizowany wariant wymaga zaprojektowania tunelu (1 – wymagany, 0 – niewymagany),

SDR_j – średni dobowy ruch roczny pojazdów w roku 2020 (tys. poj./dobę),

$JPKB_i$ – jednostkowy produkt krajowy brutto w i -tym roku planowanej inwestycji drogowej (tys. PLN/mk),

j – kolejny wariant, odcinek drogi.

9.3. Metoda uproszczona szacowania kosztów cyklu życia drogowych barier ochronnych na etapie wczesnego wyboru

Na etapie wstępnego wyboru wariantów lokalizacyjnych szacuje się ogólny koszt barier drogowych jako składową kosztów analizowanego wariantu trasy drogowej. Koszt wyposażenia drogi w bariery

drogowe zależy od: klasy drogi, stopnia wyposażenia drogi w bariery, rodzaju zastosowanych barier. Na etapie wstępnego wyboru trudno uzyskać dane do oszacowania kosztów pełnego cyklu życia trasy drogowej, ale opracowane modele umożliwiają oszacowanie kosztów inwestycyjnych jako istotnego elementu kosztów cyklu życia.

Koszty inwestycyjne $KINB$ analizowanego wariantu trasy drogowej można oszacować w tym przypadku za pomocą wzoru 9.8.

$$KINB_j = DL_j \cdot \sum_{k=1}^m SWB_{j,k} \cdot SKB_k \quad (9.8)$$

gdzie:

$KINB_j$ – koszty inwestycyjne wyposażenia j -tego wariantu trasy drogowej w bariery (tys. PLN),

DL_j – długość j -tego wariantu trasy drogowej (km),

$SWB_{j,k}$ – stopień wyposażenia j -tego wariantu trasy drogowej w bariery ochronne k -tego typu i rodzaju (–),

SKB_k – średni koszt k -tego rodzaju i typu bariery drogowej (tys. PLN/km).

Średni stopień wyposażenia drogi w bariery SWB ustala się na podstawie tabl. 9.1 na podstawie danych z projektów, w tym na podstawie przedmiaru robót.

Tab. 9.1 Średni stopień wyposażenia dróg w bariery ochronne

Stopień wyposażenia drogi w bariery SWB			
Rodzaj bariery	Klasa drogi		
RBA	A	S	GGP
stalowa	0,738	0,817	0,121
linowa	0,092	0,064	0,050
betonowa	0,014	0,009	0,003
Średnia	0,844	0,889	0,174

Źródło: opracowanie własne

Średni koszt k -tego rodzaju bariery SKB_k przyjmuje się na podstawie kalkulacji indywidualnej lub z tab. 9.2. W przypadku zastosowania wartości z tab. 9.2 innego roku bazowego niż 2018 konieczne jest uwzględnienie w modelach współczynnika korekcyjnego barier $WSKB$ zgodnie ze wzorem 9.20 lub 9.21.

Tab. 9.2 Średni koszt bariery w roku 2018

Rodzaj bariery	Typ bariery	Jednostkowy koszt bariery		
RBA	STR	Średni SKB	Odchylenie standardowe OSKB	Współczynnik zmienności WZKB
		(tys. PLN/ km)	(tys. PLN/km)	(–)
stalowa	jednostronna	185,0	110,0	0,59
stalowa	dwustronna	224,0	94,0	0,42
linowa	–	124,0	30,0	0,24
betonowa	–	492,0	–	–

Źródło: Opracowanie własne

9.4. Metoda podstawowa szacowania kosztów cyklu życia drogowych barier ochronnych na trasie drogowej

9.4.1. Założenia i niezbędne dane

Metoda podstawowa została opracowana w celu szacowania kosztów cyklu życia barier ochronnych na odcinku drogi. Metoda ta łączy elementy metody ogólnej i metody szczegółowej, a stopień szczegółowości wyników zależy od dostępu do danych. Jej głównym celem jest wspieranie zarówno procesów projektowych, jak i działań związanych z utrzymaniem drogowych barier ochronnych.

W ramach prac projektowych na analizowanej trasie drogowej ustala się rozmieszczenie (rodzaj i długość barier) na podstawie następujących działań:

1. Ustalenie podstawowego typu bariery na analizowanym odcinku trasy drogowej, odcinków na podstawie identyfikacji dominujących zagrożeń.
2. Ustalenie lokalnych typów bariery w wybranych segmentach trasy drogowej, w których poziom zagrożeń odbiega od dominującego typu zagrożeń (obiekty mostowe, obiekty w strefie wolnej od przeszkód).

W procedurze szacowania kosztów cyklu bariery uwzględnia się modele składowych kosztów cyklu życia, które zostały zaprezentowane w rozdziale 7 wraz z zestawieniem jednostkowych kosztów w rozdziale 6.

W metodzie tej przyjęto szereg założeń. Przede wszystkim wszystkie wejściowe dane kosztowe muszą być przeliczone i odniesione do wspólnego roku bazowego. Zakłada się, że szacowanie wybranych kosztów cyklu życia bariery w metodzie ogólnej może być prowadzone z perspektywy:

- Inwestora, zarządcy trasy drogowej (wariant 1 lub wariant 2). Wówczas koszty drogowych barier określane są mianem kosztów cyklu życia barier *KCZB*.
- Firmy przygotowującej ofertę na utrzymanie odcinka drogi (wariant 3). Koszy określane są jako koszty funkcjonowania barier drogowych na odcinku drogi.

W ramach metody ogólnej wyodrębniono zatem trzy główne warianty postępowania, które różnią się momentem rozpoczęcia analizy kosztów oraz celem:

Wariant 1, w którym szacuje się koszty cyklu życia *LCCB* barier drogowych na odcinku drogi (koszty drogi wyposażonej w bariery drogowe). Wariant ten rekomendowany jest do stosowania w fazie projektowania nowej drogi, utrzymania odcinka drogi i zakłada uwzględnienie: kosztów inwestycyjnych, kosztów utrzymania (strukturalnych, rutynowych), kosztów użytkowników, kosztów środowiska oraz kosztów związanych z likwidacją barier ochronnych. Analiza kosztów funkcjonowania bariery w całym cyklu życia ma kluczowe znaczenie. Ujęcie to odzwierciedla zarówno wymogi europejskich wytycznych dotyczących rachunku LCC (ISO 15686-5) [108] jak i praktykę zarządców dróg, którzy coraz częściej weryfikują oferty nie tylko pod kątem „ceny zakupu”, lecz łącznych nakładów w perspektywie 30 lat. Kategoria ekonomiczna, sprowadzona do miary *LCCB*, pozwala przenieść uwagę z „najniższej ceny oferty” na najmniejsze łączne koszty w okresie użytkowania. Integracja LCC z miarami bezpieczeństwa zapewnia, że wybrana bariera nie tylko chroni użytkowników dróg, ale też będzie racjonalna finansowo dla zarządcy infrastruktury drogowej.

Wariant 2, w którym szacuje się koszty cyklu życia *LCCB* poszczególnych rodzajów (lub typów) drogowych barier ochronnych o określonych parametrach technicznych i funkcjonalnych (poziom powstrzymywania, szerokość pracująca) w celu wyboru bariery optymalnej pod względem kosztów w całym cyklu życia drogi. Wariant ten znajduje zastosowanie na etapie projektowania, budowania oraz utrzymania przy wyborze rodzaju bariery w segmentach drogi o poziomie zagrożeń wyższym niż poziom zagrożeń dominujących dla całego odcinka drogi [197]. Przy wyborze barier stosuje się podejście wielokryterialne, w którym stosuje się co najmniej dwie grupy kryteriów i miar oceny:

- funkcjonalne – wyrażone poprzez kryterium bezpieczeństwa ruchu drogowego, wykonalność oraz sprawność,
- ekonomiczne – wyrażone poprzez kryterium kosztów funkcjonowania w cyklu życia drogi, szacowanie kosztu cyklu życia w tej metodzie odbywa się indywidualnie dla każdego rodzaju bariery w cyklu życia jak dla dróg wynoszącym 30 lat.

Wariant 3, w którym szacuje się koszty funkcjonowania barier drogowych w wybranym okresie *KFB*, znajduje zastosowanie w sytuacji, gdy celem jest wyłonienie podmiotu odpowiedzialnego za eksploatację istniejącej już drogi w wybranym okresie eksploatacji. W tym przypadku szacunki skupiają się na kosztach strukturalnych i rutynowych. Okres analizy nie jest z góry określony – jego długość zależy od decyzji zamawiającego, która może wynikać z wewnętrznych wytycznych lub być związana z czasem trwania umowy podpisywanej z firmą realizującą usługi utrzymaniowe. Zazwyczaj do analizy przyjmuje się przedział od 5 do 10 lat w zależności od długości kontraktu utrzymaniowego. Przeprowadzona analiza kosztów pozwala na ustalenie kosztów ryczałtowych zamówienia.

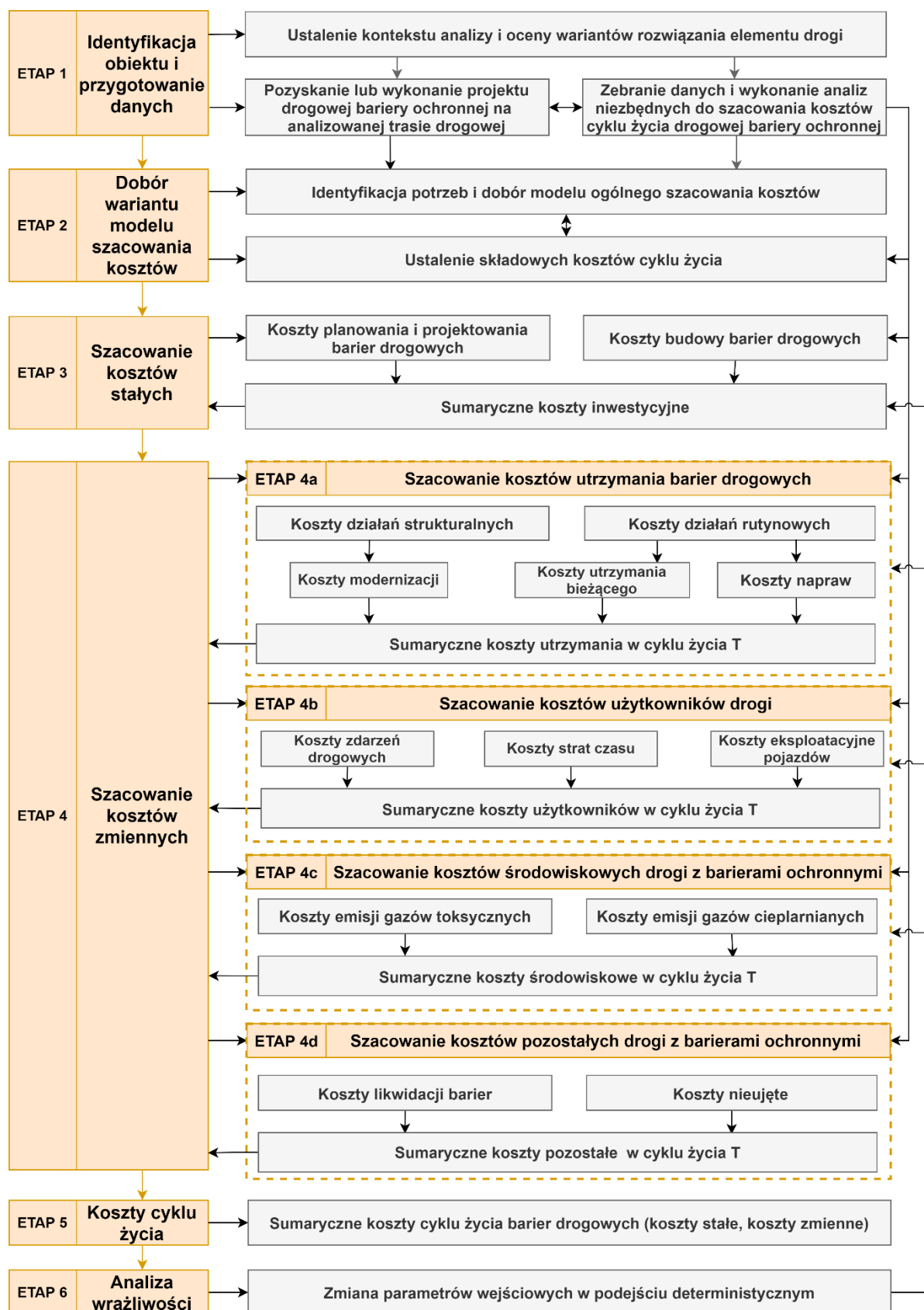
9.4.2. Procedura szacowania kosztów

Procedura szacowania kosztów cyklu życia bariery drogowej składa się z sześciu etapów:

1. Identyfikacja obiektu i przygotowanie danych.
2. Dobór wariantu modelu szacowania kosztów.
3. Szacowanie kosztów stałych.
4. Szacowanie kosztów zmiennych.
5. Zestawienie sumaryczne kosztów cyklu życia barier drogowych.
6. Analiza wrażliwości wyników.

Analiza wrażliwości wykonywana jest zgodnie z założeniami przedstawionymi w rozdz. 9.1.2.

Schemat procedury szacowania kosztów cyklu życia barier drogowych w metodzie ogólnej przedstawiono na rys. 9.1.



Rys. 9.1 Schemat procedury szacowania kosztów cyklu życia w metodzie ogólnej

9.4.3. Identyfikacja obiektu i przygotowanie danych

Identyfikacja obiektu (etap 1) polega na wyborze odcinka drogi, na którym przewiduje się zastosowanie barier drogowych, a także określeniu wariantu i zakresu prowadzonych analiz.

W celu zastosowania metody szczegółowej szacowania kosztów cyklu życia barier ochronnych konieczne jest zebranie danych wejściowych. Obejmują one dane dostępne w projekcie drogi, w projekcie bariery oraz dane dotyczące warunków ruchu na drodze.

Dane dotyczące projektowanego obiektu drogowego. Do prawidłowego doboru rodzaju i typu barier drogowych niezbędne są dane o istniejącym lub projektowanym obiekcie drogowym, a w tym: klasa drogi *KLD*, parametry przekroju poprzecznego (liczba jezdni), profilu podłużnego (rodzaje przeszkód, falistość odcinka *KIF*), parametry planu sytuacyjnego (długość odcinka drogi *DL* gęstość łuków poziomych *GLU*, krętość odcinka drogi *WKO*)

Dane dotyczące projektowanej bariery zawierające rodzaj bariery (stalowa, linowa), masa barier *WAG*, szerokość pracująca barier *WM*, poziom powstrzymywania *PP* opisywany także jako maksymalna (normatywna) energia kinetyczna poprzeczna *EKL*, liczba lin w barierze linowej *LN*, udział barier na odcinku dróg *UB*, średnia odległość barier od jezdni *SB*. Dane te należy zebrać dla każdego wariantu rodzaju lub typu bariery.

Dane dotyczące warunków ruchu na projektowanym obiekcie. Do prawidłowego doboru rodzaju i typu drogowych barier drogowych niezbędne są następujące dane o potoku pojazdów poruszających się po istniejącym lub projektowanym obiekcie drogowym, w tym: średnioroczne dobowe natężenie ruchu *SDR* (całkowite, wraz z podziałem na strukturę rodzajową pojazdów), udział pojazdów osobowych *UO*, udziału pojazdów ciężarowych z przyczepą *UCP*, dopuszczalna prędkość pojazdów na odcinku drogi *VDOP*. Dane te należy zebrać dla każdego analizowanego obiektu (odcinka) drogowego.

Dodatkowo w celu przeliczenia wartości kosztów budowy barier należy pozyskać informacje o wskaźniku inflacji CPI_{t-1} lub jednostkowym (w przeliczeniu na mieszkańca) produkcie krajowym brutto *JPKB*.

9.4.4. Dobór wariantu modelu szacowania kosztów.

W proponowanych metodach koszty cyklu życia analizowanych wariantów typów barier drogowych szacuje się za pomocą ogólnego wzoru 9.1, który jest modyfikowany w zależności od zakresu dostępnych danych. W przypadku drogowych barier ochronnych mogą wystąpić trzy warianty tego modelu.

9.4.4.1. Model szacowania kosztów – wariant 1

Celem jest oszacowanie kosztów cyklu życia barier drogowych w okresie cyklu życia drogi *LCCB*, w fazie projektowania nowej drogi i zakłada uwzględnienie kosztów inwestycyjnych, strukturalnych, rutynowych, kosztów ponoszonych przez użytkowników, kosztów środowiska oraz kosztów związanych z likwidacją barier ochronnych. W wariantcie 1 ogólny model szacowania kosztów cyklu życia analizowanych barier drogowych *LCCB* na *j*-tym wariantcie trasy drogowej lub jej wybranych odcinkach szacuje się za pomocą wzoru 9.9.

$$LCCB_{1,j} = KSB_{1,j} + \sum_{i=1}^n \frac{KZB_{1,i,j}}{(1+a)^i} \quad (9.9)$$

przy czym:

$$KSB_{1,j} = KINB_{1,j} \quad (9.10)$$

$$KZB_{1,i,j} = KUTB_{1,i,j} + KUZB_{1,i,j} + K\acute{S}RB_{1,i,j} + KPOB_{1,i,j} \quad (9.11)$$

gdzie:

$LCCB_{1,j}$ – koszty cyklu życia projektowanych barier drogowych dla j -tego wariantu projektowanej trasy drogowej ponoszone są przez inwestora i społeczeństwo (mln PLN),

$KSB_{1,j}$ – koszty stałe barier drogowych dla j -tego wariantu planowanej drogi ponoszone przez inwestora (mln PLN),

$KINB_{1,j}$ – koszty inwestycyjne j -tego wariantu planowanej drogi ponoszone przez inwestora (mln PLN),

$KZB_{1,i,j}$ – koszty zmienne projektowanych barier drogowych dla j -tego wariantu projektowanej trasy drogowej w i -tym roku, ponoszone są przez inwestora, użytkowników i społeczeństwo (mln PLN/rok),

$KUTB_{1,i,j}$ – koszty utrzymania (działania rutynowe i strukturalne) projektowanych barier drogowych dla j -tego wariantu projektowanej trasy drogowej w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KUZB_{1,i,j}$ – koszty użytkowników drogi ponoszone w przypadku funkcjonowania projektowanych barier drogowych dla j -tego wariantu projektowanej trasy drogowej, w i -tym roku ponoszone przez użytkowników (mln PLN/rok),

$K\acute{S}RB_{1,i,j}$ – koszty zagrożeń dla środowiska ponoszone w przypadku funkcjonowania projektowanych barier drogowych dla j -tego wariantu projektowanej trasy drogowej w i -tym roku ponoszone przez społeczeństwo (mln PLN/rok),

$KPOB_{1,i,j}$ – koszty pozostałe projektowanych barier drogowych dla j -tego wariantu projektowanej trasy drogowej w i -tym roku (mln PLN/rok).

9.4.4.2. Model szacowania kosztów – wariant 2

Celem analiz jest oszacowanie kosztów funkcjonowania wybranego rodzaju (lub typu) bariery drogowej na wybranym segmencie drogi w cyklu życia $LCCB$, które znajdują zastosowanie w procedurze projektowania, budowy lub utrzymania drogi. W wariantcie tym pomija się koszty planowania i projektowania, pozostałe koszty ustala się według modelu opisanego wzorem 9.12.

$$LCCB_{2,k} = KSB_{2,k} + \sum_{i=1}^n \frac{KZB_{2,i,k}}{(1+a)^i} \quad (9.12)$$

przy czym:

$$KSB_{2,k} = KINB_{2,k} + KBUB_{2,k} \quad (9.13)$$

$$KZB_{2,i,k} = KUTB_{2,i,k} + KUZB_{2,i,k} + K\acute{S}RB_{2,i,k} + KPOB_{2,i,k} \quad (9.14)$$

gdzie:

$LCCB_{2,k}$ – koszty cyklu życia projektowanego k -tego rodzaju (typu) bariery drogowej na analizowanym segmencie drogi (mln PLN),

$KSB_{2,k}$ – koszty stałe k -tego rodzaju (typu) bariery drogowej na analizowanym segmencie drogi (mln PLN),

$KINB_{2,k}$ – koszty inwestycyjne k -tego rodzaju (typu) bariery drogowej na analizowanym segmencie drogi (mln PLN),

$KBUB_{2,k}$ – koszty budowy k -tego rodzaju (typu) bariery drogowej na analizowanym segmencie drogi (mln PLN),

$KZB_{2,i,k}$ – koszty zmienne projektowanych barier drogowych k -tego rodzaju (typu) na analizowanym segmencie drogi (mln PLN/rok),

$KUTB_{2,i,k}$ – koszty utrzymania (działania rutynowe i strukturalne) k -tego rodzaju (typu) bariery drogowej na analizowanym segmencie drogi (mln PLN/rok),

$KUZB_{2,i,k}$ – koszty użytkowników drogi ponoszone w przypadku funkcjonowania k -tego rodzaju (typu) bariery drogowej na analizowanym segmencie drogi (mln PLN/rok),

$KŚRB_{2,i,k}$ – koszty zagrożeń dla środowiska ponoszone w przypadku funkcjonowania k -tego rodzaju (typu) bariery drogowej na analizowanym segmencie drogi (mln PLN/rok),

$KPOB_{2,i,k}$ – koszty pozostałe k -tego rodzaju (typu) bariery drogowej na analizowanym segmencie drogi (mln PLN/rok).

9.4.4.3. Model szacowania kosztów – wariant 3

Celem analiz jest oszacowanie kosztów funkcjonowania barier drogowych KFB , które znajdują zastosowanie w procedurze wyłaniania podmiotu odpowiedzialnego za eksploatację istniejącej już drogi w wybranym okresie eksploatacji, gdzie wymaga się ustalenia kosztów ryczałtowych. Ogólny model szacowania kosztów funkcjonowania barier drogowych $KFB_{3,j}$ (jako elementu kosztów cyklu życia) w j -tym wariantcie trasy drogowej lub jej wybranych odcinków szacuje się za pomocą wzoru 9.15.

$$KFB_{3,j} = \sum_{i=1}^n \frac{KZB_{3,i,j}}{(1+a)^i} \quad (9.15)$$

przy czym:

$$KZB_{3,i,j} = KUTB_{3,i,j} = KRUB_{3,i,j} \quad (9.16)$$

gdzie:

$KFB_{3,j}$ – koszty funkcjonowania j -tego wariantu odcinka drogi z barierami, ponoszone przez inwestora (mln PLN),

$KZB_{3,i,j}$ – koszty zmienne barier drogowych dla j -tego odcinka analizowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KUTB_{3,i,j}$ – koszty utrzymania barier dla j -tego odcinka drogi w i -tym roku (mln PLN/rok),

$KRUB_{3,i,j}$ – koszty rutynowego utrzymania bieżącego (działania rutynowe) barier dla j -tego odcinka drogi w i -tym roku (mln PLN/rok).

9.4.5. Szacowanie kosztów stałych

9.4.5.1. Koszty inwestycyjne

W proponowanej metodzie koszty stałe KSB przyjmowane są jako koszty inwestycyjne $KINB_j$. Koszty inwestycyjne jako składową kosztów cyklu życia analizowanych barier drogowych na j -tym wariantcie trasy drogowej lub jej wybranych odcinków szacuje się za pomocą wzoru 9.17.

$$KINB_j = KPLB_j + KBUB_j \quad (9.17)$$

gdzie:

$KPLB_j$ – koszty planowania i projektowania barier drogowych na dla j -tego wariantu planowanej drogi ponoszone przez inwestora (mln PLN),

$KBUB_j$ – koszty budowy barier drogowych dla j -tego wariantu planowanej drogi ponoszone przez inwestora (mln PLN).

9.4.5.2. Koszty planowania i projektowania barier drogowych

Koszty planowania i projektowania barier drogowych $KPLB_j$ są to koszty badań, planowania i opracowania projektu technicznego, które można określić na podstawie kalkulacji indywidualnej lub zgodnie z Rozporządzeniem MRiT [54]. W przypadku braku informacji o wysokości kosztów planowania i projektowania konstrukcji barier, można koszty oszacować na podstawie kosztu robót budowlanych oraz wskaźnika procentowego uzależnionego od kategorii złożoności obiektu za pomocą wzoru 9.18.

$$KPLB_j = KBUB_j \cdot WPL \quad (9.18)$$

gdzie:

WPL – wskaźnik udziału procentowego kosztów prac projektowych w kosztach robót budowlanych w zależności od klasy drogi; zaleca się przyjmować zgodnie z tab. 9.3.

Tab. 9.3 Wartości wskaźników korekcyjnych WPL

Klasa drogi KLD	Wskaźnik udziału kosztów prac projektowych WPL
Autostrady A, drogi ekspresowe S	1,030 – 1,050
Drogi klasy GP	1,025 – 1,045
Drogi klasy G i niższych klas	1,025 – 1,040

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [54]

9.4.5.3. Koszty budowy barier drogowych

Koszty budowy barier drogowych $KBUB_j$ są to koszty robocizny, materiału oraz koszty najmu sprzętu niezbędnego do wykonania i wbudowania w drogę konstrukcji barier drogowych.

Koszty budowy poszczególnych rodzajów barier drogowych $KBUB_j$ szacuje się na podstawie wzoru 9.19.

$$KBUB_j = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n DL_{j,k} \cdot JKBUB_k \cdot WSKB_i \quad (9.19)$$

przy czym:

$$WSKB_i = \exp(-0,562 + 0,012 \cdot JPKB_i) \quad (9.20)$$

lub

$$WSKB_i = \exp(-0,407 + 0,108 \cdot CPI_{i-1}) \quad (9.21)$$

gdzie:

- $KBUB_j$ – koszty budowy barier drogowych dla j -tego wariantu trasy drogowej (tys. PLN),
- $DL_{j,k}$ – długość k -tego rodzaju barier drogowych dla j -tego wariantu trasy drogowej (km),
- $JBUB_k$ – jednostkowy koszt budowy k -tego rodzaju (typu) bariery drogowej (tys. PLN/km),
- $WSKB_i$ – wskaźnik korekcyjny kosztów barier w roku i (–),
- CPI_{i-1} – wskaźnik inflacji z roku poprzedzający bazowy rok analizy $i - 1$ (–),
- i – analizowany rok (rok),
- $JPKB_i$ – jednostkowy (w przeliczeniu na mieszkańca) produkt krajowy brutto w roku i (tys. PLN/ mk).

Modele dotyczące kosztów budowy oraz naprawy barier ochronnych zostały opracowane na podstawie danych z roku 2018. W przypadku przyjmowania innego roku bazowego niż 2018 konieczne jest uwzględnienie w modelach współczynnika korekcyjnego barier $WSKB$ zgodnie ze wzorem 9.20 lub 9.21.

Jednostkowe koszty budowy barier $JBUB$ k -tego rodzaju barier na odcinku dróg krajowych można oszacować uwzględniając koszty związane z materiałem oraz robocizną i pracą sprzętu za pomocą modeli przedstawionych w rozdziale 7.4.2 Na tej podstawie w zależności od dostępnych danych można oszacować koszty budowy barier według dwóch wariantów.

Wariant 1. Jednostkowe koszty budowy barier na odcinku drogi szacuje się za pomocą wzoru 9.22.

$$JBUB_k = JKMB_k + JKRSB_k \quad (9.22)$$

gdzie:

- $JBUB_k$ – jednostkowy koszt budowy k -tego rodzaju bariery ochronnej (tys. PLN/ km),
- $JKMB_k$ – jednostkowy koszt materiału potrzebnego do wykonania k -tego rodzaju bariery ochronnej (tys. PLN/km),
- $JKRSB_k$ – jednostkowy koszt robocizny i najmu sprzętu niezbędnego do wykonania k -tego rodzaju bariery drogowej (tys. PLN/km).

Koszty jednostkowe budowy bariery drogowej $JBUB$ składające się z jednostkowych kosztów materiałów zużytych do budowy bariery $JKMB$ oraz jednostkowych kosztów robocizny i wynajmu sprzętu $JKRSB$ można w uproszczony sposób dobierać z tab. 9.4, opracowanej na podstawie wyników analizy przeprowadzonych w rozdz. 6.5.2.

Tab. 9.4 Zestawienie średnich jednostkowych kosztów barier w 2018 roku

Rodzaj kosztów	Jednostka	Koszt jednostkowy barier JKBU		
		Średni JK	Odchylenie standardowe OSK	Współczynnik zmienności WZK
		(tys. PLN/km)	(tys. PLN/km)	(–)
Bariera stalowa				
JKRSB	(tys. PLN/km)	28,9	12,7	0,44
JKMB	(tys. PLN/km)	168,0	84,3	0,50
JKBUB	(tys. PLN/km)	192,0	106,0	0,55
Bariera linowa				
JKRSB	(tys. PLN/km)	21,7	3,0	0,14
JKMB	(tys. PLN/km)	101,8	26,9	0,26
JKBUB	(tys. PLN/km)	123,5	29,9	0,24
Bariera betonowa				
JKBUB	(tys. PLN/km)	492,0	–	–

Źródło: Opracowanie własne

Wariant 2. W przypadku dostępu do danych o parametrach funkcjonalnych i technicznych barier drogowych jednostkowe koszty bariery drogowej *JKBUB*, koszty jednostkowe materiałów zużytych do budowy bariery *JKMB* oraz koszty jednostkowe robocizny i wynajmu sprzętu *JKRSB* można oszacować za pomocą wzorów 9.23 – 9.25, a współczynniki równań dobrać z tablicy tab. 9.5.

a) w przypadku barier stalowych:

$$JKBUB_s = 0,1 \cdot a \cdot WAG^b \quad (9.23)$$

lub

$$JKBUB_s = 0,1 \cdot a \cdot EKL^b \cdot WM^c \cdot STR^d \quad (9.24)$$

b) w przypadku barier linowych:

$$JKBU_l = 0,1 \cdot a \cdot EKL^b \cdot WM^c \cdot LN^d \quad (9.25)$$

Tab. 9.5 Zestawienie parametrów wzorów przyjętych do szacowania kosztów jednostkowych drogowych barier ochronnych

Rodzaj bariery	Rodzaj kosztów	Wzór nr	Współczynniki równania			
			a	b	c	d
Stalowa	JKRSB	9.23	0,024	1,494		
	JKMB		0,082	1,634		
	JKBUB		0,098	1,626		
	JKRSB	9.24	0,532	0,395	-0,409	1,309
	JKMB		0,233	0,462	-0,478	1,458
	JKBUB		1,989	0,515	-0,421	1,380
Linowa	JKRSB	9.25	0,840	0,132	-0,314	0,333
	JKMB		1,436	0,266	-0,546	0,825
	JKBUB		2,073	0,210	-0,506	0,739

Źródło: Opracowanie własne

Ten wariant może być stosowany w przypadku wyboru rodzaju bariery na segmencie drogi (wariant 2).

9.4.6. Szacowanie kosztów zmiennych

W proponowanej metodzie koszty zmienne, szacowane dla każdego roku cyklu życia bariery drogowej, obejmują koszty działań utrzymaniowych (strukturalnych i rutynowych), kosztów ponoszonych przez użytkowników, kosztów środowiska oraz kosztów związanych z likwidacją barier ochronnych.

9.4.6.1. Szacowanie kosztów utrzymania

9.4.6.1.1. Podejścia wariantowe

W proponowanej metodzie koszty utrzymania jako składową kosztów cyklu życia analizowanych barier drogowych na j -tym wariantcie trasy drogowej lub jej wybranych odcinkach w zależności od przyjętego wariantu szacuje się za pomocą wzorów 9.26 – 9.28.

Wariant 1. Celem jest oszacowanie kosztów utrzymania barier $KUTB$ w kolejnym roku ich cyklu życia, w fazie projektowania nowej drogi oraz utrzymania istniejącej drogi. W proponowanej metodzie koszty cyklu życia analizowanych barier drogowych na j -tym wariantcie trasy drogowej lub jej wybranych odcinków $KUTB_{1,i,j}$ szacuje się za pomocą wzoru 9.26.

$$KUTB_{1,i,j} = KSTRB_{1,i,j} + KRUB_{1,i,j} = KSTRB_{i,j} + KUBB_{i,j} + KNAB_{i,j} \quad (9.26)$$

Wariant 2. Celem jest oszacowanie kosztów utrzymania barier związanych z pojedynczym uszkodzeniem barier w ich kolejnym roku cyklu życia $KUTB$. W proponowanej metodzie koszty cyklu życia analizowanych barier drogowych na j -tym wariantcie trasy drogowej lub jej wybranych odcinków $KUTB_{2,i,j}$ szacuje się za pomocą wzoru 9.27.

$$KUTB_{2,i,j} = KNAB_{i,j} \quad (9.27)$$

Wariant 3. Celem jest oszacowanie kosztów utrzymania barier drogowych w wybranym okresie $KUTB$. Wariant ten znajduje zastosowanie w przypadku wyłonienie podmiotu odpowiedzialnego za eksploatację istniejącej już drogi w wybranym okresie eksploatacji, gdzie wymaga się ustalenia kosztów ryczałtowych. W proponowanej metodzie koszty utrzymania barier drogowych na j -tym wariantcie (odcinku) drogi $KUTB_{3,i,j}$ szacuje się za pomocą wzoru 9.28.

$$KUTB_{3,i,j} = KRUB_{3,i,j} = KUBB_{i,j} + KNAB_{i,j} \quad (9.28)$$

gdzie:

$KUTB_{1,i,j}$ – koszty utrzymania (działania rutynowe i strukturalne) dla j -tego wariantu trasy drogowej w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KUTB_{2,i,j}$ – koszty utrzymania projektowanych barier drogowych dla j -tego wariantu projektowanej trasy drogowej w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KUTB_{3,i,j}$ – koszty utrzymania (działania rutynowe) barier drogowych dla j -tego wariantu (odcinka) utrzymywanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KSTRB_{1,i,j}$ – koszty strukturalne utrzymania j -tego wariantu (odcinka) planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KRUB_{1,i,j}$ – koszty rutynowe utrzymania j -tego wariantu (odcinka) planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KUBB_{i,j}$ – koszty utrzymania bieżącego j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KNAB_{i,j}$ – koszty napraw j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok).

9.4.6.1.2. Koszty strukturalne utrzymania barier drogowych

Koszty strukturalne są to wydatki nieobjęte wynagrodzeniem ryczałtowym, na które składają się koszty modernizacji i koszty utrzymania okresowego. Koszty strukturalne mogą występować kilkakrotnie w całym cyklu życia elementów infrastruktury drogowej. Częstość występowania kosztów strukturalnych jest zmienna i zależy od przyjętej strategii utrzymaniowej i związanej nimi harmonogramu prac. Odpowiednio zaplanowane i regularnie prowadzone działania modernizacyjne i utrzymaniowe mogą znacząco wydłużyć żywotność infrastruktury drogowej, obniżając jednocześnie długoterminowe koszty strukturalne. Koszty strukturalne barier drogowych $KSTRB$ szacuje się na podstawie indywidualnych analiz w zależności od przyjętej strategii i scenariuszy prowadzenia działań naprawczych.

9.4.6.1.3. Koszty utrzymania bieżącego barier drogowych

Koszty utrzymania bieżącego barier drogowych $KUBB$ stanowią element kosztów rutynowych. Koszty te ponoszone są w związku z wykonywaniem prac bieżących, które mają na celu zapewnienia parametrów funkcjonalnych i użytkowych drogi. Utrzymanie bieżące barier drogowych obejmuje m.in: czyszczenie barier (w tym mycie elementów odblaskowych, czyszczenie połączeń w barierach rozbielanych), uzupełnianie ubytków gruntów przy barierach, uzupełnianie ubytków elementów (śrub, elementów odblaskowych, nakrętek), naprężanie barier linowych. Koszty utrzymania bieżącego $KUBB$ barier drogowych szacuje się na podstawie kalkulacji indywidualnej.

9.4.6.1.4. Koszty napraw barier drogowych

Wariant 2

Koszty napraw barier drogowych $KNAB$, są elementem kosztów rutynowych, które obejmują koszty bieżących napraw uszkodzonych barier w wyniku zdarzeń drogowych. Koszty naprawy drogowych barier ochronnych w wyniku pojedynczego najechania pojazdu szacuje się w sposób bezpośredni za pomocą równań 9.29 – 9.30. W celu określenia kosztów naprawy i -tej bariery stalowej należy zastosować wzór 9.29. Natomiast w przypadku szacowania kosztów naprawy bariery linowej stosuje się wzór 9.30.

$$KNAB_s = DU_s \cdot \exp(-1,384 - 1,248 \cdot JPKB \cdot 10^{-6} + 0,001 \cdot EKL_k - 0,078 \cdot WM_k) \quad (9.29)$$

$$KNAB_l = DU_l^{0,848} \cdot \exp(3,052 - 0,055 \cdot JPKB \cdot 10^{-3} + 0,004 \cdot EKL_k - 0,984 \cdot WM_k) \quad (9.30)$$

Przy czym długość uszkodzenia bariery w wyniku pojedynczego zdarzenia można oszacować za pomocą wzorów 9.31 w przypadku barier stalowych, a w przypadku barier linowych 9.32 [121].

$$DU_s = 0,129 \cdot DM_k^{0,377} \cdot VPL^{0,823} \cdot MP^{0,436} \cdot KU^{-0,451} \cdot \exp\left(-0,086 \cdot \frac{EKL_k}{100}\right) \quad (9.31)$$

$$DU_l = 4,744 \cdot DM_k^{0,856} \cdot MP^{-0,034} \cdot (KU \cdot EKL_k)^{-0,296} \cdot EKP^{0,529} \quad (9.32)$$

gdzie:

KNA_k – koszty naprawy k -tego rodzaju drogowej bariery (stalowa, linowa) (tys. PLN),

DU_k – długość uszkodzenia k -tego rodzaju drogowej bariery (m),
 $JPKB$ – produkt krajowy brutto na mieszkańca w regionie (tys. PLN/mk),
 EKL_k – (normatywna energia kinetyczna poprzeczna k -tego rodzaju drogowej bariery (kJ),
 WM_k – szerokość normatywna k -tego rodzaju drogowej bariery (m),
 DM_k – znormalizowane ugięcie k -tego rodzaju drogowej bariery (m),
 VPL – prędkość poprzeczna pojazdu uderzającego w drogową barierę (km/h),
 MP – masa pojazdu uderzającego w drogową barierę ochronną (kg),
 KU – kąt uderzenia pojazdu w drogową barierę ochronną ($^\circ$),
 EKP – energia kinetyczna podłużna pojazdu uderzającego w drogową barierę ochronną (kJ).

Wariant 1, wariant 3

W celu oszacowania całkowitych kosztów napraw barier ochronnych na odcinku drogi należy posłużyć się wzorem 9.33, który szacuje koszty napraw w sposób bezpośredni.

$$KNAB_{i,j} = \sum_{k=1}^m DUOB_{i,j} \cdot JKNAB_k \quad (9.33)$$

Przy czym wykorzystując model [121] można oszacować długość uszkodzenia bariery na j -tym odcinku drogi w i -tym roku w sposób bezpośredni za pomocą wzoru 9.34.

$$\begin{aligned}
 DUOB_{i,j} = & (WMU)^{2,041} \cdot DL_j^{1,198} \cdot SDR_{i,j}^{0,781} \cdot \exp(-0,640 - 1,459 \cdot UCP_{i,j} + 1,083 \cdot GLU_j + 0,654 \cdot KIF_j) \\
 & \cdot \exp(2,035 \cdot UBS_j + 2,768 \cdot UBL_j - 3,319 \cdot UBB_j - 0,008 \cdot \frac{SDR_j}{1000} - 0,005 \cdot WKO_j - 0,038 \cdot SB_j)
 \end{aligned} \quad (9.34)$$

gdzie:

$KNAB_{i,j}$ – koszt naprawy barier na j -tym odcinku drogi i -tym roku (tys. PLN),
 $DUOB_{i,j}$ – długość uszkodzeń barier na j -tym odcinku drogi w i -tym roku (m/km/rok),
 $JKNAB_k$ – jednostkowy koszt naprawy barier (PLN/km) przyjmowany z tab. 9.6 opracowanej na podstawie analizy wyników prac w rozdz. 6.2.4,
 WMU – współczynniki wykrywalności zdarzeń ustalany na podstawie modelu utrzymania drogi. Można przyjmować wartości zgodnie z [121]: utrzymaj standard A – 1,0; utrzymaj standard B – 0,8, klasyczny – 0,5,
 DL_k – długość j -tego odcinka drogi (km),
 $SDR_{i,j}$ – średniodobowe natężenie pojazdów na j -tym odcinku drogi w i -tym roku (tys. poj./dobę),
 $UCP_{i,j}$ – udział pojazdów ciężarowych z przyczepą j -tym odcinku drogi i -tym roku (–),
 GLU_j – gęstość łuków poziomych na j -tym odcinku drogi (łuków/km),
 KIF_j – wskaźnik falistości j -tego odcinka drogi (0, 1),
 UBk_j – udział k -tego rodzaju barier na j -tym odcinku drogi ($k = a$ dla barier stalowych, $k = l$ dla barier linowych, $k = b$ dla barier betonowych) (–),
 WKO_j – wskaźnik krętości na j -tym odcinku drogi ($^\circ$ /km),
 SB_j – średnia odległość barier od krawędzi jezdni na j -tym odcinku drogi (m).

Tab. 9.6 Zestawienie jednostkowych kosztów napraw barier z podziałem na ich rodzaj i klasę drogi

Klasa drogi	Rodzaj bariery	Jednostkowy koszt naprawy barier JKNABk		
KLD	RBD	Średni koszt SJK	Odchylenie standardowe OSK	Współczynnik zmienności kosztów WZK
		(tys. PLN/ km)	(tys. PLN/ km)	(–)
A	stalowa	233,0	106,16	0,46
	linowa	113,0	35,28	0,31
	betonowa	42,8	23,05	0,54
S	stalowa	253,4	114,19	0,45
	linowa	143,1	122,07	0,85
	betonowa	*	*	*
GGP	stalowa	209,0	70,81	0,34
	linowa	127,8	61,74	0,48
	betonowa	118,4	91,08	0,77

*brak informacji, do metody przyjmuje się koszty z klasy GGP

Źródło: Opracowanie własne

9.4.6.2. Koszty użytkowników drogi

9.4.6.2.1. Model ogólny kosztów

W proponowanej metodzie koszty użytkowników jako składową kosztów cyklu życia analizowanych barier drogowych na j -tym wariantcie trasy drogowej lub jej wybranych odcinków szacuje się za pomocą wzoru 9.35.

$$KUZB_{i,j} = KZDB_{i,j} + KSTB_{i,j} + KEPB_{i,j} \quad (9.35)$$

gdzie:

$KUZB_{i,j}$ – koszty użytkowników drogi j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku związane z funkcjonowaniem barier drogowych ponoszone przez użytkowników (mln PLN/rok),

$KZDB_{i,j}$ – koszty zdarzeń drogowych j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku związane z funkcjonowaniem barier drogowych ponoszone przez użytkowników (mln PLN/rok),

$KSTB_{i,j}$ – koszty strat czasu j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku związane z funkcjonowaniem barier drogowych ponoszone przez użytkowników drogi (mln PLN/rok),

$KEPB_{i,j}$ – koszty eksploatacji pojazdów j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku, związane z funkcjonowaniem barier drogowych ponoszone przez użytkowników (mln PLN/rok).

9.4.6.2.2. Koszty zdarzeń drogowych

Proponuje się dwa warianty metody szacowania kosztów zdarzeń drogowych. Wariant pierwszy służący do szacowania kosztów barier na projektowanej trasie drogowej lub odcinku funkcjonującej drogi oraz wariant 2 do szacowania kosztów wybranego rodzaju lub typu bariery.

Wariant 1. Koszty zdarzeń drogowych $KZDB$, stanowią sumę kosztów zdarzeń z barierami na j -tym odcinku drogi w cyklu życia. Koszty te szacuje się korzystając ze wzoru 9.36.

$$KZDB_{i,j} = \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^m (LZDB_{i,j,k} \cdot JKK_i + LLRB_{i,j,k} \cdot JKL R_i + LCRB_{i,j,k} \cdot JKCR_i + LZB_{i,j,k} \cdot JKZ_i) \quad (9.36)$$

gdzie:

$KZDB_{i,j,k}$ – koszt zdarzeń drogowych z barierami k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (mln PLN/rok),

JKK_i – jednostkowy koszt strat materialnych w i -tym roku (mln PLN),

$JKL R_i$ – jednostkowy koszt ofiary lekko rannej w i -tym roku (mln PLN),

$JKCR_i$ – jednostkowy koszt ofiary ciężko rannej w i -tym roku (mln PLN),

JKZ_i – jednostkowy koszt ofiary śmiertelnej w i -tym roku (mln PLN),

$LZDB_{i,j,k}$ – liczba zdarzeń drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (zd./rok),

$LWB_{i,j,k}$ – liczba wypadków drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (wyp./rok),

$LLR_{i,j,k}$ – liczba ofiar lekko rannych wypadków drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok),

$LCR_{i,j,k}$ – liczba ofiar ciężko rannych wypadków drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok),

$LZ_{i,j,k}$ – liczba ofiar śmiertelnych wypadków drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok).

Liczba zdarzeń na odcinku dróg $LZDB_{i,j,k}$ może być szacowana w sposób pośredni poprzez uwzględnienie narażenia na ryzyko jakim jest długość odcinka drogi DL_j oraz gęstości zdarzeń na odcinku $GZDB_{i,j,k}$ zgodnie ze wzorem 9.37.

$$LZDB_{i,j,k} = DL_j \cdot GZDB_{i,j,k} \quad (9.37)$$

przy czym:

$$GZDB_{b,j,k} = \frac{GZDB_{2017-2019,j,k}}{3} = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{SDR_{2017,j} + SDR_{2018,j} + SDR_{2019,j}}{3} \right)^{0,412} \cdot \exp \left(-2,244 - 2,987 \cdot \right. \quad (9.38)$$

$$\left. UCP_j + 0,747 \cdot GLU_j + 0,791 \cdot KIF_j + 1,225 \cdot \left(\frac{VDOP_j}{100} \right) + 0,733 \cdot UB_{j,k} \right)$$

gdzie:

DL_j – długość j -tego odcinka drogi (km),

$GZDB_{i,j,k}$ – gęstość zdarzeń drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (zd./km/rok),

$GZDB_{2017-2019,j,k}$ – sumaryczna gęstość zdarzeń drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w latach 2017–2019 (zd./km/rok), szacowana na podstawie modelu opisanego wzorem 7.44,

$GZDB_{b,j,k}$ – bazowa gęstość zdarzeń drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg (zd./km/ rok), jako średnia wartość z lat 2017–2019, szacowana na podstawie modelu opisanego wzorem 7.44,

$SDR_{2017,j}, SDR_{2018,j}, SDR_{2019,j}$ – średniodobowe natężenia ruchu na j -tym odcinku drogi w roku 2017, 2018 oraz 2019 (tys. poj./dobę),

UCP_j – udział pojazdów ciężarowych z przyczepą (–),

GLU_j – gęstość łuków poziomych na j -tym odcinku drogi (łuków/km),

KIF_j – wskaźnik falistości j -tego odcinka drogi odcinka drogi (0 dla spadku podłużnego <5%, 1 dla spadku podłużnego ≥5%) (–),

$VDOP_j$ – dopuszczalna prędkość na j -tym odcinku drogi (km/h),

$UB_{j,k}$ – udział barier w przekroju na j -tym odcinku drogi (k : s – stalowe, l – linowe) (–).

Liczba wypadków z barierami drogowymi może być szacowana za pomocą wzoru 9.39:

$$LWB_{i,j,k} = LZDB_{i,j,k} \cdot UW_{zd,i} \quad (9.39)$$

Liczba ofiar wypadków z barierami drogowymi może być szacowana za pomocą wzoru 9.40a lub 9.40b.

$$LOF_{i,j,k,o} = \begin{cases} LZDB_{i,j,k} \cdot WRP_{z,i} \cdot UOF_{zd,o,b} & (a) \\ LWB_{i,j,k} \cdot \frac{SLOF_i}{100} \cdot WRP_{z,i} \cdot UOF_{w,o,b} & (b) \end{cases} \quad (9.40)$$

Liczba poszczególnych rodzajów ofiar wypadków z barierami drogowymi może być szacowana za pomocą wzorów 9.41 – 9.43, przy czym ofiary lekko ranne według równań 9.41a lub 9.41b, ofiary ciężko ranne według 9.42a lub 9.42b, a ofiary śmiertelne na podstawie wzorów 9.43a lub 9.43b.

$$LLR_{i,j,k,o} = \begin{cases} LZDB_{i,j,k} \cdot WRP_{z,i} \cdot ULRB_{zd} & (a) \\ LWB_{i,j,k} \cdot \frac{SLOF_i}{100} \cdot WRP_{z,i} \cdot ULRB_w & (b) \end{cases} \quad (9.41)$$

$$LCR_{i,j,k,o} = \begin{cases} LZDB_{i,j,k} \cdot WRP_{z,i} \cdot UCRB_{zd} & (a) \\ LWB_{i,j,k} \cdot \frac{SLOF_i}{100} \cdot WRP_{z,i} \cdot UCRB_w & (b) \end{cases} \quad (9.42)$$

$$LZR_{i,j,k,o} = \begin{cases} LZDB_{i,j,k} \cdot WRP_{z,i} \cdot UZRB_{zd} & (a) \\ LWB_{i,j,k} \cdot \frac{SLOF_i}{100} \cdot WRP_{z,i} \cdot UZRB_w & (b) \end{cases} \quad (9.43)$$

gdzie:

$LOF_{i,j,k,o}$ – liczba o -tego rodzaju ofiar wypadków drogowych z barierami ochronnymi k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok),

$WRP_{zd,i}$ – wskaźnik roku prognozy zdarzeń drogowych w i -tym roku (zd./km/ rok), szacowany na podstawie modelu opisanego wzorem 7.52,

$SLOF_i$ – średnia liczba ofiar w wypadku drogowym w i -tym roku (–), szacowana na podstawie modelu opisanego wzorem 7.50,

$WRP_{z,i}$ – wskaźnik roku prognozy wypadków i ofiar w i -tym roku (zd./km/rok), szacowany na podstawie modelu opisanego wzorem 7.52,

$UOF_{w,o,b}$ – średni udział ofiar o -tego rodzaju w wypadku drogowym z k -tym rodzajem bariery w roku bazowym (średnia z lat 2017 – 2019), oszacowany na podstawie analiz przeprowadzonych w rozdz. 6.2.3 i zestawionych w tab. 9.7.

$UW_{zd,i}$ – średni udział wypadków w liczbie zdarzeń drogowych w i -tym roku (%), szacowany na podstawie modelu opisanego wzorem 7.49,

$ULRB_m$ – udział ofiar lekko rannych w zdarzeniu drogowym ($m = zd$) lub wypadku ($m = w$) k -tego rodzaju bariery drogowej (–), przyjmuje się z tab. 9.7,

$UCRB_m$ – udział ofiar ciężko rannych w zdarzeniu drogowym ($m = zd$) lub wypadku ($m = w$) k -tego rodzaju bariery drogowej (–), przyjmuje się z tab. 9.7,

UzB_m – udział ofiar śmiertelnych w zdarzeniu drogowym ($m = zd$) lub wypadku ($m = w$) k -tego rodzaju bariery drogowej (–), przyjmuje się z tab. 9.7.

Udziały poszczególnych rodzajów zestawione w tab. 9.7 opracowano na podstawie wyników analiz prowadzonych w rozdz. 6.3.3.

Tab. 9.7 Zestawienie współczynników udziału rodzajów ofiar w zdarzeniach i w wypadkach drogowych z barierami

Rodzaj bariery	Współczynniki udziału rodzaju ofiar w zdarzeniu z barierami			Współczynniki udziału rodzaju ofiar w wypadku z barierami		
	Lekko ranni	Ciężko ranni	Zabici	Lekko ranni	Ciężko ranni	Zabici
	$ULRB_{zd}$	$UCRB_{zd}$	UzB_{zd}	$ULRB_w$	$UCRB_w$	UzB_w
Stalowa	0,094	0,018	0,010	0,770	0,148	0,082
Linowa	0,004	0,019	0,007	0,133	0,633	0,233
Betonowa	0,095*	0,017*	0,003*	0,826*	0,148*	0,026*

* Opracowano na podstawie [207]

Źródło: Opracowanie własne oraz na podstawie [207]

Wariant 2. Szacuje się koszty zdarzeń drogowych ponoszone w wyniku pojedynczego najechania pojazdu na barierę ochronną. Koszty te szacowane są na podstawie prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia oraz prawdopodobieństwa wystąpienia ofiary lekko rannej, ciężko rannej i śmiertelnej. Kosztów pojedynczego zdarzenia z barierą stalową oraz linową $KZDB_{k,i}$ określone są na wzoru 9.44.

$$KZDB_{k,i} = P(K_k) \cdot JKK_i + P(LR_k) \cdot JKL R_i + P(CR_k) \cdot JKCR_i + P(Z_k) \cdot JKZ_i \quad (9.44)$$

Przy czym prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych konsekwencji w wyniku pojedynczego najechania na barierę ochronną, czyli kolizji, ofiar lekko rannych, ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wyznaczane jest na podstawie wzorów 9.45 – 9.48 lub graficznie na podstawie rys. 9.2.

$$P(K_k) = 1 - \left[1 + \exp \left(1.54 + \frac{200}{144.58 \cdot ASI_k^{2.70}} - 6500 \cdot (144.58 \cdot ASI_k^{2.70}) \right) \right]^{-1} \quad (9.45)$$

$$P(LR_k) = \left[1 + \exp \left(1.54 + \frac{200}{144.58 \cdot ASI_k^{2.70}} - 6500 \cdot (144.58 \cdot ASI_k^{2.70}) \right) \right]^{-1} - P(CR_k) \quad (9.46)$$

$$P(CR_k) = \left[1 + \exp \left(4.90 + \frac{200}{144.58 \cdot ASI_k^{2.70}} - 3510 \cdot (144.58 \cdot ASI_k^{2.70}) \right) \right]^{-1} - P(Z_k) \quad (9.47)$$

$$P(Z_k) = \left[1 + \exp \left(12.84 + \frac{200}{144.58 \cdot ASI_k^{2.70}} - 5650 \cdot (144.58 \cdot ASI_k^{2.70}) \right) \right]^{-1} \quad (9.48)$$

gdzie:

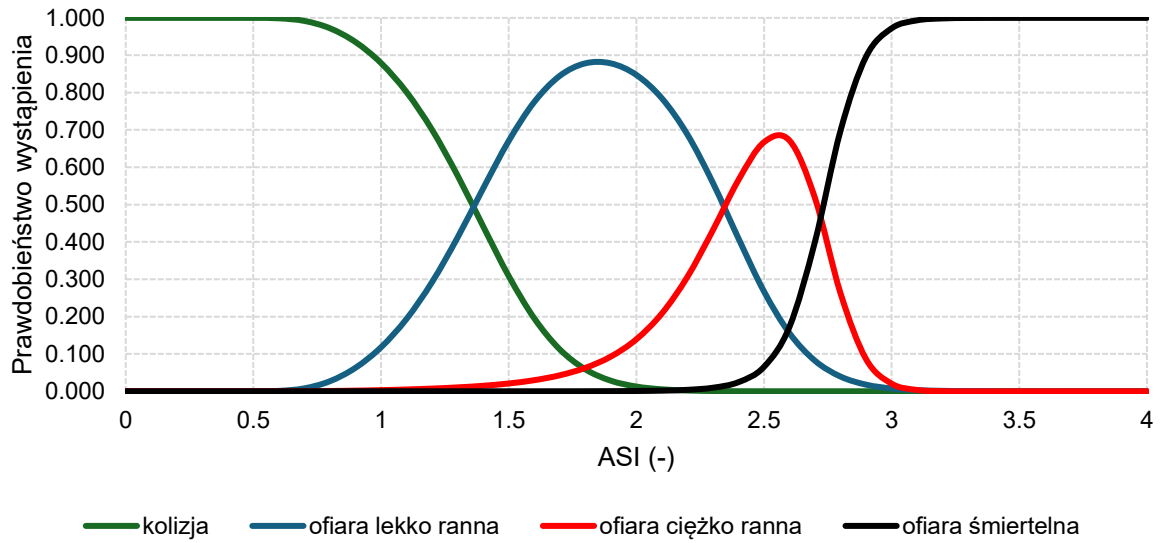
$KZDB_{k,i}$ – koszty zdarzeń z drogową barierą ochronną k -tego rodzaju (mln PLN),

$P(K_k)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji (braku ofiar) z drogową barierą k -tego rodzaju,

$P(LR_{k,i})$ – prawdopodobieństwo wystąpienia ofiary lekko rannej z drogową barierą k -tego rodzaju,

$P(CR_{k,i})$ – prawdopodobieństwo wystąpienia ofiary ciężko rannej z drogową barierą k -tego rodzaju,

$P(Z_{k,i})$ – prawdopodobieństwo wystąpienia ofiary śmiertelnej z drogową barierą k -tego rodzaju.



Rys. 9.2 Prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji, ofiar w zdarzeniu z barierą ochronną w zależności od ASI.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [31]

W celu określenia składowych modeli kosztów zdarzeń z pojedynczą barierą ochroną konieczne jest oszacowanie wskaźnika intensywności przyspieszenia ASI poszczególnych barier ochronnych. Wskaźnik ten można wyznaczyć na podstawie testów z badań symulacyjnych lub oszacować na podstawie wzorów 9.49 – 9.51.

$$ASI_s = 0.057 \cdot S_s^{-0.106} \cdot MP^{-0.127} \cdot VPL^{0.857} \quad (9.49)$$

$$ASI_l = 0.112 \cdot S_s^{-0.216} \cdot MP^{-0.206} \cdot VPL^{0.613} \quad (9.50)$$

$$ASI_b = WM^{-0.478} \cdot MP^{-0.300} \cdot VPL^{0.701} \quad (9.51)$$

gdzie:

ASI_k – wskaźnik intensywności przyspieszenia k -tego rodzaju bariery (–),

S_s – podatność drogowej bariery ochronnej (m^2/N),

MP – masa pojazdu uderzającego w drogową barierę ochronną (kg),

VPL – prędkość poprzeczna pojazdu uderzającego w drogową barierę ochronną (km/h),

WM – szerokość pracująca drogowej bariery ochronnej (m),

k – rodzaj bariery: stalowa ($k = s$), linowa ($k = l$), betonowa ($k = b$).

9.4.6.2.3. Koszty strat czasu

Koszty strat czasu $KSTB$ użytkowników drogi spowodowanego zakłóceniami spowodowanymi wypadkami drogowymi można przedstawić jako iloczyn jednostkowych kosztów strat czasu oraz strat czasu użytkowników dróg według wzoru 9.52.

$$KSTB_{i,j,k} = SSTB_{i,j,k} \cdot JKST_{o,i,j} \quad (9.52)$$

przy czym:

$$JKST_{o,i,j} = UC_{i,j} \cdot JKST_{s,i} + UO_{i,j} \cdot \sum_{l=1}^n NP_{i,j,l} \cdot UMP_{i,j,l} \cdot JKST_{l,i} \quad (9.53)$$

gdzie:

$KSTB_{i,j}$ – koszty strat czasu w i -tym roku, na j -tym odcinku drogi (PLN /rok),

$SSTB_{i,j}$ – sumaryczne straty czasu na j -tym odcinku drogi, w i -tym roku spowodowane zdarzeniami z barierami drogowymi (h /rok),

$JKST_{o,i,j}$ – jednostkowy koszt strat czasu osób w i -tym roku, na j -tym odcinku drogi (PLN/h),

$JKST_{s,i}$ – jednostkowy koszt strat czasu w podróżach służbowych w i -tym roku (PLN/h), przyjmowany na podstawie JASPERS [120],

$JKST_{l,i}$ – jednostkowy koszt strat czasu w podróżach l -tego typu (służbowe, dojazd do pracy/domu, pozostałe podróże) w i -tym roku przyjmowany na podstawie JASPERS [120] (PLN/h),

$UC_{i,j}$ – udział pojazdów ciężarowych w potoku ruchu w i -tym roku, na j -tym odcinku drogi (–),

$UO_{i,j}$ – udział samochodów osobowych w potoku ruchu w i -tym roku, na j -tym odcinku drogi (–),

$NP_{i,j,l}$ – napelnienie samochodów osobowych w i -tym roku, na j -tym odcinku drogi w zależności od l -tego typu podróży (os./poj), w przypadku braku danych, w metodzie ogólnej przyjmuje się z badań ruchu lub z tablicy nr 15 w metodzie JASPERS [120],

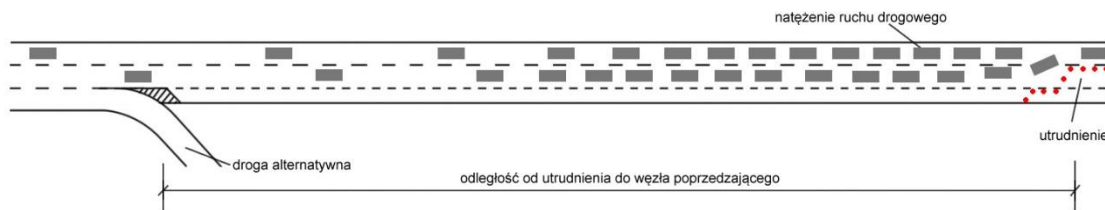
$UMP_{i,j,l}$ – udział motywacji podróży l -tego typu podróży w i -tym roku, na j -tym odcinku drogi (–), w przypadku braku danych, w metodzie ogólnej przyjmuje się z badań ruchu lub z tablicy nr 17 w metodzie JASPERS [120].

Straty czasu związane ze zdarzeniami drogowymi rozumiane są jako różnice między czasem, jaki pojazdy powinny pokonać określony odcinek lub odcinki w warunkach standardowych (nawet gdy standardem są zatory drogowe), a czasem jaki przeznaczyły na pokonanie tego odcinka w przypadku wystąpienia zdarzenia drogowego.

W przypadku strat czasu wyróżnić można cztery kombinacje zdarzeń i scenariuszy przepływu potoku pojazdów w wyniku zdarzenia [198]:

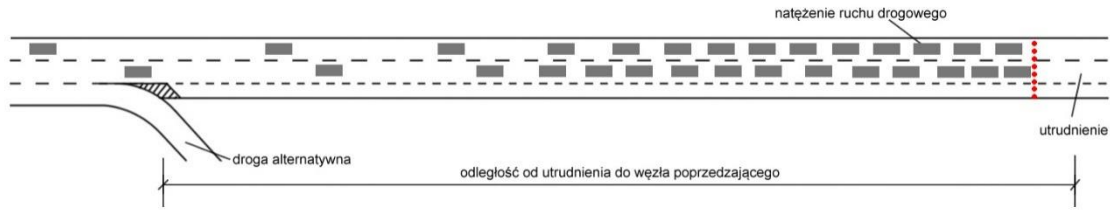
- zdarzenie planowane ZD1_A skutkujące częściowym zajęciem jezdni (scenariusz A);
- zdarzenie planowane ZD1_B skutkujące całkowitym zajęciem jezdni (scenariusz B);
- zdarzenie nieplanowane ZD2_A skutkujące częściowym zajęciem jezdni (scenariusz A);
- zdarzenie nieplanowane ZD2_B skutkujące całkowitym zajęciem jezdni (scenariusz B).

Model dla zdarzenia nieplanowanego ZD2_A i planowanego ZD1_A skutkującego częściowym zamknięciem jezdni opisuje sytuację, kiedy następuje ograniczenie przepustowości fragmentu odcinka spowodowane zdarzeniem drogowym, awarią urządzeń lub zaplanowanymi pracami utrzymaniowymi, jak np. wymianą bariery drogowej przedstawiono na rys. 9.3 [198].



Rys. 9.3 Schemat przepływu potoku pojazdów według scenariusza A [198].

Model dla zdarzenia nieplanowanego ZD2_B lub planowanego ZD1_B skutkującego całkowitym zamknięciem jezdni opisuje sytuację, gdy zostaje całkowicie zablokowany przejazd na czas trwania zdarzenia (przedstawiono na rys. 9.4) [198].



Rys. 9.4 Schemat przepływu potoku pojazdów według scenariusza B [198].

Straty czasu spowodowane zdarzeniami drogowymi związanymi z uderzeniem pojazdu w barierę oraz naprawą uszkodzeń szacuje się za pomocą wzoru 9.54.

$$SSTB_{i,j} = \sum_{k=1}^m LZDB_{i,j} \cdot (STB_{i,j,k,ZD2} + STB_{i,j,k,ZD1}) \quad (9.54)$$

gdzie:

$SSTB_{i,j}$ – sumaryczne straty czasu na j -tym odcinku drogi, w i -tym roku spowodowane zdarzeniami z barierami drogowymi (h /rok),

$LZDB_{i,j,k}$ – liczba zdarzeń drogowych z barierami, powodujących zakłócenia w ruchu drogowym w i -tym roku na j -tym odcinku drogi (zd/rok),

$STB_{i,j,k,ZD2}$ – straty czasu na j -tym odcinku drogi, w i -tym roku spowodowane nieplanowanymi zdarzeniami drogowymi z barierami drogowymi k -tego rodzaju (wypadki lub kolizje) (h),

$STB_{i,j,k,ZD1}$ – straty czasu na j -tym odcinku drogi, w i -tym roku spowodowane planowanymi zdarzeniami drogowymi z barierami drogowymi k -tego rodzaju (wymiana uszkodzonych w wyniku zdarzenia barier drogowych) (h),

Straty czasu $STB_{i,j,k,ZD}$ na j -tym odcinku drogi, w i -tym roku spowodowane nieplanowanymi i planowanymi zdarzeniami drogowymi z barierami drogowymi z uwzględnieniem scenariuszy przepływu potoku pojazdów szacuje się za pomocą wzorów 9.55 – 9.56 oraz wzorów 9.57 – 9.60 zestawionych w tab. 9.9.

$$SSTB_{i,j,k,ZD1} = (W_{ZD1,A} \cdot STB_{i,j,k,ZD1,A} + W_{ZD1,B} \cdot STB_{i,j,k,ZD1,B}) \quad (9.55)$$

$$SSTB_{i,j,k,ZD2} = (W_{ZD2,A} \cdot STB_{i,j,k,ZD2,A} + W_{ZD2,B} \cdot STB_{i,j,k,ZD2,B}) \quad (9.56)$$

gdzie:

$W_{ZD1,A}$ – udział scenariusza A przepływu potoku pojazdów na analizowanym odcinku drogi w zdarzeniu planowanym (–),

$W_{ZD1,B}$ – udział scenariusza B przepływu potoku pojazdów na analizowanym odcinku drogi w zdarzeniu planowanym (–),

$W_{ZD2,A}$ – udział scenariusza A przepływu potoku pojazdów na analizowanym odcinku drogi w zdarzeniu nieplanowanym (–),

$W_{ZD2,B}$ – udział scenariusza B przepływu potoku pojazdów na analizowanym odcinku drogi w zdarzeniu planowanym (–).

Wartości liczbowe współczynników $W_{ZD,s}$ udziału rodzaju scenariusza przepływu potoków pojazdów na analizowanym odcinku drogi ustala się indywidualnie (w przypadku istniejących dróg) lub przyjmuje z tab. 9.8 (w przypadku planowanych dróg) wartości te ustalono na podstawie studiów literatury [154].

Tab. 9.8 Zestawienie wartości liczbowych współczynników $W_{ZD,s}$ udziału rodzaju scenariusza przepływu potoków pojazdów na analizowanym odcinku drogi

Rodzaj zdarzenia	Współczynnik $W_{ZD,s}$	
	Scenariusz (s)	
	A	B
Planowane (ZD1)	0,80	0,20
Nieplanowane (ZD2)	0,60	0,40

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [154]

Tab. 9.9 Zestawienie modeli strat czasu na odcinku drogi w zależności od rodzaju zdarzenia i scenariusza przepływu potoku pojazdów

Rodzaj zdarzenia	Scenariusz	Postać matematyczna modelu	Numer wzoru
Planowane ZD1	A ($N < C_z$)	$STB_{i,j,k,ZD1,A} = 52,06 \cdot \left(\frac{NH_{i,j}}{Cz_j} \right)^{5,53} \cdot TZD_{j,k,ZD1}^{1,19}$	9.57
	B ($N > C_z$)	$STB_{i,j,k,ZD1,B} = 1021,18 \cdot \left(\frac{NH_{i,j} - Cz_j}{Cz_j} \right)^{0,954} \cdot TZD_{j,k,ZD1}^{1,128} \cdot L_{w,j}^{0,273} \cdot A_j^{0,304}$	9.58
Nieplanowane ZD2	A ($N < C_z$)	$STB_{i,j,k,ZD2,A} = 128,72 \cdot \left(\frac{NH_{i,j}}{Cz_j} \right)^{2,457} \cdot TZD_{j,k,ZD2}^{0,232}$	9.59
	B ($N > C_z$)	$STB_{i,j,k,ZD2,B} = 1138,19 \cdot \left(\frac{NH_{i,j} - Cz_j}{Cz_j} \right)^{0,838} \cdot TZD_{j,k,ZD2}^{1,094} \cdot L_{w,j}^{0,337} \cdot A_j^{0,270}$	9.60

Źródło: [198]

Oznaczenia w tab. 9.9:

$STB_{i,j,k,ZD1,A}$ – straty czasu na j -tym odcinku drogi, w i -tym roku spowodowane planowanymi zdarzeniami drogowymi z barierami drogowymi (wymiana uszkodzonych w wyniku zdarzenia barier drogowych) w scenariuszu A (poj-h),

$STB_{i,j,k,ZD2,A}$ – straty czasu na j -tym odcinku drogi, w i -tym roku spowodowane nieplanowanymi zdarzeniami drogowymi (wypadki lub kolizje) w scenariuszu A (poj-h),

$STB_{i,j,k,ZD1,B}$ – straty czasu na j -tym odcinku drogi, w i -tym roku spowodowane planowanymi zdarzeniami drogowymi (wymiana uszkodzonych w wyniku zdarzenia barier drogowych) z k -tego rodzajami barierami drogowymi w scenariuszu B (poj-h),

$STB_{i,j,k,ZD2,B}$ – straty czasu na j -tym odcinku drogi, w i -tym roku spowodowane nieplanowanymi zdarzeniami drogowymi (wypadki lub kolizje) z k -tego rodzajami barierami drogowymi w scenariuszu B (poj-h),

$NH_{i,j}$ – średnie natężenie ruchu potoku pojazdów na j -tym odcinku drogi w i -tym roku (tys. poj/h),

Cz_j – przepustowość j -tego odcinka drogi (tys. poj/h),

$TZD_{j,k,z}$ – średni czas trwania zdarzenia drogowego, w zależności od rodzaju zdarzenia z , rodzaju drogowej bariery k oraz natężenie ruchu potoku pojazdów (w godz. 6 – 18) na j -tym odcinku drogi (h/zd.), przyjmowany z tab. 9.10, ustalony na podstawie analiz przeprowadzonych w rozdz. 6.2.4,
 $L_{w,j}$ – średnia odległość miejsca zdarzenia do węzła (skrzyżowania poprzedzającego), przyjmowana jako połowa odległości pomiędzy węzłami (skrzyżowaniami) (km),

A_j – średni czas przejazdu trasą alternatywną, w przypadku całkowicie zablokowanego przejazdu pojazdów na odcinku j -tym odcinku drogi (h). Czas ten można obliczyć ze wzoru 9.61:

$$A_j = \frac{L_{a,j}}{V_{a,j}} \quad (9.61)$$

$L_{a,j}$ – długość drogi alternatywnej, w metodzie ogólnej, gdy nie ma określonej długości drogi alternatywnej należy przyjmować jako $3L_j$,

$V_{a,j}$ – średnia prędkość przejazdu po drodze alternatywnej, dla dróg krajowych przyjmuje się korzystając ze wzorów 9.65 oraz 9.66.

Tab. 9.10 Zestawienie średnich czasów trwania zdarzeń nieplanowanych i planowanych z barierami drogowymi

Rodzaj bariery	Czas trwania zdarzenia z barierami T (h/zd)			
	Zdarzenia nieplanowane ZD2		Zdarzenia planowane ZD1	
	Średni czas zdarzenia TZD2 (h/zd.)	Odchylenie standardowe OTZD2 (h/zd.)	Średni czas zdarzenia TZD1 (h/zd.)	Odchylenie standardowe OTZD1 (h/zd.)
Stalowa	2,65	2,33	2,69	2,19
Linowa	2,25	1,85	1,30	0,27
Betonowa	2,33	2,31	1,00	0,0
Średnia	2,61	2,29	2,54	1,98

Źródło: Opracowanie własne

9.4.6.2.4. Koszty eksploatacji pojazdów

Koszty eksploatacji pojazdów $KEPB$ oblicza się jako różnica między kosztami eksploatacji pojazdów w przypadku wariantu W_1 z zakłóceniami spowodowanymi zdarzeniami z barierami i wariantu bez zakłóceń W_0 w zależności od: pracy przewozowej wykonanej przez pojazdy PP (natężenia ruchu i struktury rodzajowej pojazdów i długości drogi przebytej przez pojazdy), średniej prędkości przejazdu V_{sr} . Koszty eksploatacji pojazdów $KEPB$ użytkowników drogi spowodowanego zakłóceniami spowodowanymi wypadkami drogowymi można przedstawić jako iloczyn pracy przewozowej i jednostkowych kosztów eksploatacji pojazdów [120] według wzoru 9.62.

$$KEPB_{i,j} = \sum_{k=1}^m \sum_{z=1}^2 (KEPB_{i,j,k,z,A} \cdot W_{z,A} + KEPB_{i,j,k,z,B} \cdot W_{z,B}) \quad (9.62)$$

$$KEPB_{i,j,k,z,s} = LZD_{i,j} \cdot TZD_{j,k,z} \cdot PP_{i,j,z} \cdot \sum_{p=1}^2 U_p \cdot (JKEP_{1,z,s,p} - JKEP_{0,p}) \quad (9.63)$$

$$PP_{i,j,z} = NH_{i,j,z} \cdot L_{w,j} \quad (9.64)$$

gdzie:

$KEPB_{i,j}$ – koszty eksploatacji pojazdów na j -tym odcinku drogi w i -tym roku (mln PLN /rok),

$KEPB_{i,j,k,z,s}$ – koszty eksploatacji pojazdów na j -tym odcinku drogi w i -tym roku dla z -tego rodzaju zdarzenia z k -tego rodzajami barier oraz w s -tym scenariuszu przepływu pojazdów (mln PLN /rok),
 $W_{z,s}$ – udział s -tego scenariusza przepływu potoku pojazdów na analizowanym odcinku drogi w z - tym rodzaju zdarzenia z barierami przyjmowany na podstawie tab. 9.8,
 $LZD_{i,j}$ – liczba zdarzeń drogowych z barierami na j -tym odcinku drogi w i -tym roku (zd./rok),
 $TZD_{j,k,z}$ – średni czas trwania zdarzenia drogowego, w zależności od rodzaju zdarzenia z , rodzaju drogowej bariery k oraz natężenie ruchu potoku pojazdów (w godz. 6 – 18) na j -tym odcinku drogi (h/zd.), przyjmowany z tab. 9.10,
 $PP_{i,j,z}$ – praca przewozowa na j tym odcinku drogi w i -tym roku analizy w z -tym rodzaju zdarzenia z barierami (poj-km/rok),
 U_p – udział pojazdów p -tego typu ($p = 0$ – pojazdy osobowe, $p = C$ – pojazdy ciężarowe) (–),
 $JKEP_w$ – jednostkowe koszty eksploatacji pojazdów dla wariantu w (1 – w przypadku zdarzeń z barierami, 0 – w stanie normalnym), zależne od średniej prędkości podróży i rodzaju pojazdów (mln PLN/poj-km) przyjmowany na podstawie JASPERS [120],
 $NH_{i,j,z}$ – średnie natężenie ruchu potoku pojazdów na j -tym odcinku drogi w i -tym roku w z -tym rodzaju zdarzenia (tys. poj/h),
 $L_{w,j}$ – średnia odległość miejsca zdarzenia do węzła (skrzyżowania poprzedzającego), przyjmowana jako połowa odległości pomiędzy węzłami (skrzyżowaniami) (km).

Średnią prędkość podróży potoku pojazdów w zależności od natężenia ruchu i scenariusza przepływu potoku pojazdów na analizowanym odcinku drogi można określić w sposób bezpośredni stosując wzory 9.65 oraz 9.66.

$$\text{Jeżeli } NH < Cz \quad VP_{sr} = VP_0 - \frac{VP_0}{1 + 142,86 \cdot \exp\left(-6,2 \left(\frac{NH}{Cz}\right)\right)} \quad (9.65)$$

$$\text{Jeżeli } NH > Cz \quad VP_{sr} = VP_0 - \frac{VP_0}{1 + 5,05 \cdot \exp\left(-2,5 \left(\frac{NH}{Cz}\right)\right)} + 10 \quad (9.66)$$

gdzie:

VP_{sr} – średnia prędkość podróży na analizowanym odcinku drogi (km/h) ustalona na podstawie [198],
 VP_0 – początkowa prędkość podróży na analizowanym odcinku drogi przyjmowana w zależności od klasy drogi. W przypadku braku informacji można przyjmować prędkość na podstawie pracy [205],
 $NH_{i,j}$ – średnie natężenie ruchu potoku pojazdów na j -tym odcinku drogi w i -tym roku (tys. poj/h),
 Cz_j – przepustowość j -tego odcinka drogi (tys. poj/h).

9.4.6.3. Koszty środowiskowe

Jakość życia społeczeństwa w dużym stopniu zależna jest od stężenia zanieczyszczeń powietrza w obszarze ich zamieszkania. Substancje szkodliwe takie jak: tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO), sadza i węglowodory emitowane przez silniki samochodowe mogą wywierać negatywny wpływ na ludzkie zdrowie. Oddziałują one samodzielnie lub w połączeniu z innymi gazami, z którymi tworzą wtórne zanieczyszczenia (np. ozon przygruntowy).

Jednym z kluczowych wyzwań stojących przed współczesnym społeczeństwem jest przeciwdziałanie efektom zmian klimatycznych, wywołanych przez gazy cieplarniane, stanowiące zagrożenie globalne. Znaczny udział w wytwarzaniu tych gazów mają jednostki z sektora energetycznego i z sektora transportu. Wśród zanieczyszczeń powodujących efekt cieplarniany należy wymienić: dwutlenek węgla (CO_2), metan (CH_4), podtlenek azotu (N_2O), ozon troposferyczny (O_3) i związki fluoru (CFCs), które niszczą warstwę ozonową Ziemi. Substancje te określa się mianem gazów cieplarnianych. Są one bardzo uciążliwe, ponieważ okres ich utrzymywania w atmosferze jest bardzo długi [36].

Z długiej listy związków spalin wpływających negatywnie na środowisko społeczne oraz zmiany klimatu związanych z funkcjonowaniem drogowych barier ochronnych proponuje się:

1. jako miary oceny wpływu związków spalin na środowisko społeczne (zdrowie i życie uczestników ruchu) przyjąć: tlenki azotu (NO_x), węglowodory (VOC), tlenek węgla (CO) oraz pyły ($\text{PM}_{2,5}$ i PM_{10}),
2. jako miary oceny wpływu związków spalin na zagrożenia klimatyczne przyjąć: dwutlenek węgla (CO_2) i inne.

Szacowanie wielkości zanieczyszczeń powietrza pochodzących z pojazdów samochodowych wymaga przygotowania odpowiednich narzędzi informatycznych i danych statystycznych.

Do szacowania wielkości emisji zanieczyszczeń powietrza i gazów cieplarnianych z transportu drogowego w UE wykorzystuje się między innymi bazy danych oraz oprogramowanie systemu COPERT V [66] używany i rozwijany przez Europejską Agencję Środowiska w ramach działań Europejskiego Centrum Tematycznego ds. Zanieczyszczeń Powietrza i Ograniczania Zmian Klimatycznych. Projekt COPERT został opracowany w celu przygotowania oficjalnego wykazu emisji zanieczyszczeń powietrza z transportu w krajach członkowskich EEA (European Environment Agency). Oprogramowanie COPERT może być wykorzystane do obliczania różnych wariantów dotyczących sieci dróg w podziale na obszary miejskie, zamieszkane, a także autostrady i drogi szybkiego ruchu.

Koszty środowiska związane z funkcjonowaniem barier drogowych obejmują koszty ponoszone przez osobę lub grupę osób związanych z prowadzoną działalnością transportową oraz użytkowników indywidualnych, a także koszty zewnętrzne będące skutkiem oddziaływania transportu na osoby niezwiązane bezpośrednio z tą działalnością ponoszone przez społeczeństwo. W szczególności są to:

1. koszty zanieczyszczenia powietrza zawierające wewnętrzne straty własne (w zależności od indywidualnej sytuacji) i zewnętrzne (utrata zdrowia, koszty ponoszone przez ludzi mających styczność z zanieczyszczonym powietrzem).
2. koszty zmian klimatycznych, czyli wewnętrzne straty własne (z uwzględnieniem przyszłych pokoleń) oraz koszty zewnętrzne ponoszone przez społeczeństwo i przyszłe pokolenia.

Przy szacowaniu kosztów środowiskowych stosuje się metody, w których poddawane są ocenie procesy fizyczne (emisja zanieczyszczeń, zmiany w atmosferze, wpływ na zdrowie ludzi i ekosystemy), a następnie ich wpływy przeliczane są na kwoty pieniężne [36].

W proponowanej metodzie koszty środowiska, jako składową kosztów cyklu życia analizowanych barier drogowych na j -tym wariantcie trasy drogowej lub jej wybranych odcinków szacuje się jako sumę kosztów zanieczyszczenia powietrza i kosztów zmian klimatycznych związanych z dodatkowa

eksploatacją pojazdów spowodowaną zdarzeniami nieplanowanymi i planowanymi z barierami drogowymi, za pomocą wzoru 9.67.

$$K\acute{S}RB_j = \sum_{i=1}^n (K\acute{S}RTB_{i,j} + K\acute{S}RCB_{i,j}) \quad (9.67)$$

Koszty zanieczyszczenia powietrza (emisji związków toksycznych spalin) oblicza się na podstawie zależności 9.68a lub 9.68b:

$$K\acute{S}RTB_{i,j} = \begin{cases} LZD_{j,i} \cdot \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^o (WESTB_{i,j,k,l,1} + WESTB_{i,j,k,l,2}) \cdot JKET_{i,l} & (a) \\ LZD_{j,i} \cdot \sum_{l=1}^o (PP_{i,j,l,1} \cdot JKET_{i,l} + PP_{i,j,l,2} \cdot JKET_{i,l}) & (b) \end{cases} \quad (9.68)$$

Koszty zmian klimatycznych oblicza się na podstawie zależności 9.69a lub 9.69b:

$$K\acute{S}RCB_{i,j} = \begin{cases} LZD_{j,i} \cdot \sum_{l=1}^o (WESCB_{i,j,l,1} + WESCB_{i,j,l,2}) \cdot JKEC_i & (a) \\ LZD_{j,i} \cdot \sum_{l=1}^o (PP_{i,j,l,1} \cdot JWEC_{i,l} + PP_{i,j,l,2} \cdot JWEC_{i,l}) \cdot JKEC_i & (b) \end{cases} \quad (9.69)$$

gdzie:

$K\acute{S}RB_j$ – koszty środowiskowe, emisji spalin samochodowych spowodowanych zakłóceniami wywołanymi zdarzeniami z barierami na j -tym odcinku drogi w i -tym roku (PLN/rok),

$K\acute{S}RTB_{i,j}$ – koszty emisji toksycznych związków spalin samochodowych spowodowanych zakłóceniami wywołanymi zdarzeniami z barierami na j -tym odcinku drogi w i -tym roku (PLN/rok),

$K\acute{S}RCB_{i,j}$ – koszty emisji cieplarnianych związków spalin samochodowych spowodowanych zakłóceniami wywołanymi zdarzeniami z barierami na j -tym odcinku drogi w i -tym roku (PLN/rok),

$WESTB_{i,j,k,l,z}$ – wielkość emisji k -tego rodzaju toksycznych związków spalin samochodowych (NOx i inne) spowodowanych zakłóceniami wywołanymi zdarzeniami ($z = 1$ – planowanymi; $z = 2$ – nieplanowanymi) z barierami na j -tym odcinku drogi w i -tym roku (ton/zd),

$WESCB_{i,j,k,l,z}$ – wielkość emisji cieplarnianych związków spalin samochodowych (CO₂ i inne) spowodowanych zakłóceniami wywołanymi zdarzeniami ($z = 1$ – planowanymi; $z = 2$ – nieplanowanymi) z barierami na j -tym odcinku drogi w i -tym roku (ton/zd),

$PP_{i,j,l,z}$ – praca przewozowa l -tego rodzaju pojazdów na j -tym odcinku drogi w i -tym roku przy z -tym rodzaju zdarzenia (poj-km/zd),

$JWEC_{i,l}$ – jednostkowy współczynnik emisji gazów cieplarnianych (t CO₂ /poj-km) przyjmowany z raportu JASPERS [120] w zależności od rodzaju pojazdu, średniej prędkości podróży oraz rodzaju terenu,

$JKET_{i,l}$ – jednostkowe koszty emisji toksycznych związków spalin (PLN/tonę), przyjmowane z raportu JASPERS [120] w zależności od rodzaju pojazdu i klasy drogi,

$JKEC_{i,l}$ – jednostkowe koszty emisji cieplarnianych związków spalin (PLN/tonę), przyjmowane z raportu JASPERS [120] w zależności od rodzaju pojazdu, prędkości średniej potoku pojazdów, rodzaju terenu.

Wartości wielkości emisji szacowane za pomocą metody COPERT V [66] lub innych uznanych metod obliczeniowych, szacowane jako różnica pomiędzy wielkością emisji związków toksycznych spalin dla wariantu W1 z zakłóceniami spowodowanymi zdarzeniami z barierami i wariantu bez zakłóceń W0 w zależności od: pracy przewozowej wykonanej przez pojazdy *PP* (natężenia ruchu *SDR* i struktury rodzajowej pojazdów *l* i długości drogi przebytej przez pojazdy *L*), średniej prędkości przejazdu *VP*śr.

9.4.6.4. Koszty pozostałe

W proponowanej metodzie pozostałe koszty jako składową kosztów cyklu życia analizowanych barier drogowych na *j*-tym wariantcie trasy drogowej lub jej wybranych odcinków szacuje się za pomocą wzoru 9.70.

$$KPOB_{i,j} = KLIB_{i,j} + KNNB_{i,j} \quad (9.70)$$

Koszty demontażu barier ochronnych są szacowane w sposób pośredni na podstawie oszacowanych lub przyjętych kosztów budowy bariery oraz wskaźnika korekcyjnego uwzględniającego ich rodzaj. Koszty demontażu bariery na danym odcinku drogi oblicza się zgodnie ze wzorem 9.71.

$$KLIB_j = KBUB_{k,j} \cdot UDE_k \quad (9.71)$$

gdzie:

$KLIB_j$ – koszt demontażu barier na *j*-tym odcinku drogi (PLN),

$KBUB_{k,j}$ – koszt budowy *k*-tego rodzaju bariery drogowej na *j*-tym odcinku drogi (PLN),

UDE_k – wskaźnik kosztów demontażu *k*-tego rodzaju bariery (–), przyjmowany na podstawie tab. 9.11.

Tab. 9.11 Zestawienie wskaźników kosztów demontażu dla barier ochronnych

Rodzaj bariery	Współczynnik kosztów demontażu barier UDE		
RBD	Średni UDES	Odchylenie standardowe OSUDE	Współczynnik zmienności kosztów WZUDE
	(–)	(–)	(–)
stalowa	0,200	0,130	0,650
linowa	0,160	0,180	1,125
betonowa	0,210	–	–

Źródło: Opracowanie własne

9.5. Metoda szacowania kosztów cyklu życia infrastruktury dla niechronionych użytkowników dróg wojewódzkich

9.5.1. Założenia i dane

Opracowana metoda szacowania kosztów cyklu życia infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu drogowego (pieszych i rowerzystów) znajduje zastosowanie na etapie ich planowania, projektowania, budowy, utrzymania i eksploatacji. W procedurze szacowania kosztów cyklu życia infrastruktury dla pieszych i rowerzystów uwzględnia się modele składowych, które zostały zaprezentowane w rozdziale 7.5. Dla odcinków dróg wojewódzkich zaproponowano metodę ogólną szacowania kosztów cyklu życia urządzeń infrastruktury dla pieszych i rowerzystów.

Głównym celem opracowanej metody LCC jest umożliwienie oszacowania kosztów i analizy opłacalności inwestycji dla niechronionych użytkowników dróg wojewódzkich z uwzględnieniem aspektów bezpieczeństwa. Metoda ta może być stosowana jako narzędzie wspomagające proces podejmowania decyzji w zakresie:

- budowy i utrzymania dróg dla pieszych wzdłuż dróg wojewódzkich,
- budowy i utrzymania dróg dla pieszych i rowerzystów wzdłuż dróg wojewódzkich przebiegających przez małe miejscowości lub obszary niezabudowane.

W związku z tym wyróżnia się dwa warianty metody: wariant 1 dotyczący dróg dla pieszych oraz wariant 2 stosowany dla dróg pieszko-rowerowych w małych miejscowościach lub obszarach niezabudowanych.

Z uwagi na fakt, iż infrastruktura dla pieszych i rowerzystów stanowi element wyposażenie dróg, do analizy kosztów przyjęto horyzont czasowy w cyklu życia jak dla dróg tj. 30 lat. Wszystkie dane wejściowe należy odnieść do roku bazowego.

9.5.2. Procedura szacowania kosztów

Procedura szacowania kosztów cyklu infrastruktury dla pieszych i rowerów wzdłuż dróg wojewódzkich podobnie jak w przypadku barier drogowych składa się z sześciu etapów:

1. Identyfikacja obiektu i przygotowanie danych.
2. Dobór wariantu modelu szacowania kosztów.
3. Szacowanie kosztów stałych.
4. Szacowanie kosztów zmiennych.
5. Zestawienie sumaryczne kosztów cyklu życia barier drogowych.
6. Analiza wrażliwości wyników.

Analiza wrażliwości wykonywana jest zgodnie z założeniami przedstawionymi w rozdz. 9.1.2.

9.5.3. Identyfikacja obiektu i przygotowanie danych

Identyfikacja obiektu (etap 1) polega na rozpoznaniu odcinka drogi, na którym przewiduje się zastosowanie urządzeń dla pieszych i rowerów, identyfikacji problemów i określeniu wariantu i zakresu prowadzonych analiz.

W celu zastosowania proponowanej metody szacowania kosztów cyklu życia infrastruktury dla pieszych i rowerów konieczne jest zebranie danych wejściowych. Dane te obejmują dane dostępne w projekcie drogi, w projekcie bariery oraz dane dotyczące warunków ruchu na drodze.

Dane dotyczące projektowanego obiektu drogowego. Do prawidłowego doboru rodzaju i typu urządzeń infrastruktury dla pieszych i rowerów niezbędne są dane o istniejącym lub projektowanym obiekcie drogowym, a w tym: klasa drogi, gęstość skrzyżowań *GSK*, gęstość zabudowy mieszkalnej *GB*, udział obszarów niezabudowanych *GNZ*, udział odcinków o ograniczonej widoczności *UOW*.

Dane dotyczące projektowanej infrastruktury dla pieszych i rowerów rodzaj urządzeń dla niechronionych uczestników ruchu: drogi dla pieszych, drogi dla rowerów lub drogi dla pieszych i rowerów a także długość i gęstość istniejącej lub planowanej infrastruktury na odcinku drogi (*GCH* lub *G/N*).

Dane dotyczące warunków ruchu na projektowanym obiekcie. Do prawidłowego doboru rodzaju i typu drogowych barier drogowych niezbędne są następujące dane o potoku pojazdów poruszających się po istniejącym lub projektowanym obiekcie drogowym. a w tym: średniodobowe natężenie pojazdów *SDR*, udział pojazdów ciężarowych *UC*.

Zebrane dane umożliwiają wyznaczenie odpowiednich wskaźników bezpieczeństwa, a następnie oszacowanie kosztów zdarzeń drogowych oraz całkowitych kosztów cyklu życia dróg dla pieszych i rowerów.

9.5.4. Struktura metody

W podrozdziale tym przedstawiono strukturę metody ogólnej szacowania kosztów cyklu życia infrastruktury dla niechronionych uczestników. Zgodnie z koncepcją przedstawioną w rozdziale 4 w metodzie wyróżniono podział kosztów na dwie główne grupy:

- koszty stałe, które są ponoszone na etapie projektowania oraz budowy infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu drogowego,
- koszty zmienne, które generowaną są na etapie jej utrzymania.

Struktura metody ogólnej została przedstawiona za pomocą równania 9.72.

$$LCC_j = KSTN_{j,k} + \sum_{i=1}^T \frac{KZN_{i,j,k}}{(1+a)^i} \quad (9.72)$$

gdzie:

LCC_j – koszty cyklu życia urządzeń infrastruktury dla pieszych i rowerów (mln PLN),

$KSTN_{j,k}$ – koszty stałe infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu k -tego rodzaju dla j -tego wariantu planowanej drogi wojewódzkiej (mln PLN),

$KZN_{i,j,k}$ – koszty zmienne infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku drogi w i -tym roku analizy (mln PLN),

a – stopa dyskontowa (%),

i – rok analizy (–),

j – wariant drogi, odcinka drogi,

k – rodzaju uczestnika ruchu: P – pieszy, PR – pieszy i rowerzysta.

9.5.5. Szacowanie kosztów stałych

W proponowanej metodzie koszty stałe to koszty inwestycyjne, na które składają się koszty planowania i projektowania oraz koszty budowy infrastruktury dla pieszych i rowerów. Koszty

inwestycyjne infrastruktury dla pieszych i rowerów dla j -tego wariantu trasy drogowej lub jej wybranych odcinków szacuje się za pomocą wzoru 9.73.

$$KSTN_{j,k} = KINN_{j,k} = KPLN_{j,k} + KBUN_{j,k} \quad (9.73)$$

przy czym:

$$KBUN_{j,k} = DL_{j,k} \cdot JKBUN_k \quad (9.74)$$

$$KPLN_{j,k} = KBUN_{j,k} \cdot WPL \quad (9.75)$$

gdzie:

$KINN_{j,k}$ – koszty inwestycyjne infrastruktury dla k -tego rodzaju niechronionych uczestników ruchu na j -tym wariantcie planowanej drogi wojewódzkiej ponoszone przez inwestora (mln PLN),

$KPLN_{j,k}$ – koszty planowania i projektowania infrastruktury dla k -tego rodzaju niechronionych uczestników ruchu na j -tym wariantcie planowanej drogi wojewódzkiej ponoszone przez inwestora (mln PLN),

$KBUN_j$ – koszty budowy infrastruktury dla k -tego rodzaju niechronionych uczestników ruchu, dla j - tego wariantu planowanej drogi wojewódzkiej ponoszone przez inwestora (mln PLN),

$DL_{j,k}$ – długość infrastruktury dla k -tego rodzaju niechronionych uczestników ruchu, dla j -tego wariantu planowanej drogi wojewódzkiej (km),

$JKBUN_k$ – jednostkowy koszt budowy infrastruktury dla k -tego rodzaju niechronionych uczestników ruchu (tys. PLN/km), ustalany indywidualnie w zależności od rodzaju materiału, warunków terenowych oraz uwarunkowań regionalnych i lokalnych. Pomocne w tym zakresie mogą być zestawienia kosztów budowy dróg dla pieszych oraz dróg dla pieszych i rowerów zestawione w rozdz. 6.5.3. W wariantcie 1 należy za jednostkowy koszt budowy $JKBUN_k$ przyjąć koszt budowy dróg dla pieszych. Natomiast w wariantcie 2 należy przyjąć dla dróg dla pieszych i rowerów,

WPL – wskaźnik udziału procentowego kosztów prac projektowych w kosztach robót budowlanych w zależności od klasy drogi; zaleca się przyjmować zgodnie z tab. 9.3.

9.5.6. Szacowanie kosztów zmiennych

9.5.6.1. Model kosztów zmiennych

W proponowanej metodzie koszty zmienne, szacowane dla każdego roku cyklu życia infrastruktury dla niechronionych użytkowników drogi, obejmują koszty działań utrzymaniowych (strukturalnych i rutynowych), koszty ponoszone przez użytkowników oraz koszty związane z likwidacją. Pomija się dodatkowe koszty środowiska, które w tym przypadku są niewielkie i trudne do oszacowania. Koszty zmienne szacuje się według wzoru 9.76.

$$KZN_{i,j,k} = KUTN_{i,j,k} + KUZN_{i,j,k} + KPON_{i,j,k} \quad (9.76)$$

gdzie:

$KZN_{i,j,k}$ – koszty zmienne projektowanej infrastruktury dla niechronionych użytkowników drogi k -tego rodzaju, dla j -tego wariantu projektowanej trasy drogowej, w i -tym roku analizy, ponoszone są przez inwestora, użytkowników i społeczeństwo (mln PLN),

$KUTN_{i,j,k}$ – koszty utrzymania (działania rutynowe i strukturalne) projektowanej infrastruktury dla niechronionych użytkowników drogi k -tego rodzaju, dla j -tego wariantu projektowanej trasy drogowej w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$KUZN_{i,j,k}$ – koszty użytkowników drogi ponoszone w przypadku funkcjonowania projektowanej infrastruktury dla niechronionych użytkowników drogi k -tego rodzaju, dla j -tego wariantu projektowanej trasy drogowej, w i -tym roku (mln PLN/rok),

$KPON_{i,j,k}$ – koszty pozostałe projektowanej infrastruktury dla niechronionych użytkowników drogi k -tego rodzaju dla j -tego wariantu projektowanej trasy drogowej w i -tym roku ponoszone przez użytkowników i społeczeństwo (mln PLN/rok).

9.5.6.2. Szacowanie kosztów utrzymania

W proponowanej metodzie koszty utrzymania jako składowa kosztów cyklu życia projektowanej infrastruktury dla niechronionych użytkowników drogi na j -tym wariantcie trasy drogowej lub jej wybranych odcinków szacuje się za pomocą wzoru 9.77.

$$KUTN_{i,j,k} = DL_{j,k} \cdot (JKRUN_{i,j,k} + JKSTRN_{i,j,k}) \quad (9.77)$$

gdzie:

$KUTN_{i,j,k}$ – koszty utrzymania (działania rutynowe i strukturalne) projektowanej infrastruktury dla niechronionych użytkowników drogi k -tego rodzaju, dla j -tego wariantu projektowanej trasy drogowej w i -tym roku ponoszone przez inwestora (mln PLN/rok),

$JKRUN_{i,j,k}$ – jednostkowe koszty utrzymania rutynowego (bieżących napraw) projektowanej infrastruktury dla niechronionych użytkowników drogi k -tego rodzaju, j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku (tys. PLN/km). Koszty te ustalane są indywidualnie w zależności od rodzaju wykonywanych prac oraz ustalonego harmonogramu działań,

$JKSTRN_{i,j,k}$ – jednostkowe koszty prac strukturalnych (okresowych remontów) projektowanej infrastruktury dla niechronionych użytkowników drogi k -tego rodzaju, dla j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez inwestora (tys. PLN/km). Koszty te ustalane indywidualnie w zależności od rodzaju przewidzianych prac oraz ustalonego harmonogramu prac,

$DL_{j,k}$ – długość infrastruktury dla niechronionych użytkowników drogi k -tego rodzaju, dla j -tego wariantu planowanej drogi wojewódzkiej (km). W wariantcie 1 należy za przyjąć jako zmienną długość dróg dla pieszych. Natomiast w wariantcie 2 długość dróg pieszo-rowerowych.

9.5.6.3. Szacowanie kosztów użytkowników

W proponowanej metodzie koszty użytkowników jako składową kosztów cyklu życia projektowanej infrastruktury dla niechronionych użytkowników drogi k -tego rodzaju, na j -tym wariantcie trasy drogowej lub jej wybranych odcinków szacuje się za pomocą wzoru 9.78.

$$KUZN_{i,j,k} = KZN_{i,j,k} \quad (9.78)$$

gdzie:

$KUZN_{i,j,k}$ – koszty użytkowników drogi infrastruktury dla niechronionych użytkowników drogi k -tego rodzaju, dla j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku ponoszone przez użytkowników (mln PLN/rok),

$KZDN_{i,j,k}$ – koszty zdarzeń drogowych w przypadku infrastruktury dla niechronionych użytkowników drogi k -tego rodzaju, dla j -tego wariantu planowanej drogi w i -tym roku (mln PLN/rok).

Dodatkowe koszty strat czasu i eksploatacji pojazdów, które w tym przypadku są niewielkie i trudne do oszacowania, pomija się.

9.5.6.4. Szacowanie kosztów zdarzeń drogowych

Koszty zdarzeń z niechronionymi uczestnikami ruchu na j -tym odcinku dróg wojewódzkich w okresie w analizowanych roku szacuje się na podstawie sumy iloczynów konsekwencji zdarzeń (wypadków oraz ich ofiar) oraz ich jednostkowych kosztów zgodnie ze wzorem 9.79.

$$KZN_{i,j,k} = LZDN_{i,j,k} \cdot JKK_i + LRN_{i,j,k} \cdot JKL R_i + LCRZN_{i,j,k} \cdot JKCRZ_i \quad (9.79)$$

gdzie:

$KZN_{i,j,k}$ – koszt zdarzeń z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju, na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej, w i -tym roku analizy (mln PLN /rok),

$LZDN_{i,j,k}$ – liczba zdarzeń z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju, na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej, w i -tym roku analizy (zd./rok), oszacowane według wzoru 9.80,

$LLRN_{i,j,k}$ – liczba ofiar lekko rannych w wypadkach z niechronionymi uczestnikami k -tego rodzaju, na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej, w i -tym roku analizy (of./rok), oszacowana według wzoru 9.84,

$LCRZN_{i,j,k}$ – liczba ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju, na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej, w i -tym roku analizy (of./rok), oszacowane według wzoru 9.83,

JKK_i – jednostkowy koszt strat materialnych w i -tym roku analizy (mln PLN), przyjmowany z raportu JASPERS [120],

$JKL R_i$ – jednostkowy koszt ofiary lekko rannej w wypadku drogowym w i -tym roku analizy (mln PLN), przyjmowany z raportu JASPERS [120],

$JKCRZ_i$ – jednostkowy koszt ofiary ciężko rannej lub śmiertelnej w wypadku drogowym w i -tym roku analizy (mln PLN), przyjmowany z raportu JASPERS [120].

Liczba zdarzeń lub liczba wypadków niechronionymi uczestnikami ruchu może być szacowana za pomocą wzoru 9.80.

$$LZDN_{i,j,k} = LWN_{i,j,k} = DL_j \cdot GWN_{i,j,k} \quad (9.80)$$

przy czym:

$$GWN_{i,j,k} = GWN_{b,j,k} \cdot WRP_{z,i} \quad (9.81)$$

Natomiast liczba ofiar wypadków z niechronionymi uczestnikami ruchu może być szacowana za pomocą wzorów: 9.82 – 9.84.

$$LOFN_{i,j,k} = DL_j \cdot GOFN_{i,j,k} \quad (9.82)$$

$$LCRZN_{i,j,k} = DL_j \cdot GCRZN_{i,j,k} \quad (9.83)$$

$$LLRN_{i,j,k} = LOFN_{i,j,k} - LCRZN_{i,j,k} \quad (9.84)$$

przy czym:

$$GOFN_{i,j,k} = GOFN_{b,j,k} \cdot WRP_{z,i} \quad (9.85)$$

$$GCRZN_{i,j,k} = GCRZN_{b,j,k} \cdot WRP_{z,i} \quad (9.86)$$

gdzie:

$LZDN_{i,j,k}$ – liczba zdarzeń drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (zd./rok),

$LWN_{i,j,k}$ – liczba wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (wyp./rok),

$LOFN_{i,j,k,o}$ – liczba ofiar wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok),

$LLRN_{i,j,k,o}$ – liczba ofiar lekko rannych wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok),

$LCRZN_{i,j,k,o}$ – liczba ofiar wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (of./rok),

DL_j – długość j -tego odcinka drogi (km),

$GWN_{i,j,k}$ – gęstość wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (zd./km/ rok),

$GWN_{b,j,k}$ – bazowa gęstość wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg (zd./km/ rok), jako średnia wartość z lat 2017 – 2019,

$GCRZN_{i,j,k}$ – gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (zd./km/ rok),

$GCRZN_{b,j,k}$ – bazowa gęstość ofiar z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg (zd./km/ rok), jako średnia wartość z lat 2017 – 2019,

$GOFN_{i,j,k}$ – gęstość ofiar z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg w i -tym roku (zd./km/ rok),

$GOFN_{b,j,k}$ – bazowa gęstość ofiar z niechronionymi uczestnikami ruchu k -tego rodzaju na j -tym odcinku dróg (zd./km/ rok), jako średnia wartość z lat 2017 – 2019,

$WRP_{z,i}$ – wskaźnik roku prognozy wypadków i ofiar wypadków drogowych w i -tym roku (zd./km/ rok).

9.5.6.5. Szacowanie gęstości wypadków z niechronionymi użytkownikami drogi

Gęstość wypadków z niechronionymi użytkownikami drogi $GWN_{i,j,k}$ na odcinkach dróg wojewódzkich jest miarą względną określającą liczbę wypadków na odcinku dróg o długości 1km w ciągu roku.

W wariancie 1 w celu określenia gęstości wypadków z pieszymi na odcinkach dróg wojewódzkich należy posłużyć się wzorem 9.87.

$$GWP_{i,j} = GWP_{b,j} \cdot WRP_{z,i} \quad (9.87)$$

przy czym:

$$GWP_{b,j} = \frac{GWP_{2017-2019,j}}{3} = \frac{GZDW_{2017-2019,j}^{1,825}}{3} \cdot \exp(-6,584 + 1,489 \cdot GNZ_j + 0,162 \cdot GSK_j) \quad (9.88)$$

$$GZDW_{2017-2019,j} = \left(\frac{SDR_{2017,j} + SDR_{2018,j} + SDR_{2019,j}}{3} \right)^{0,872} \cdot \exp(-5,484 + 0,130 \cdot GSK_j + 0,214 \cdot UOW_j) \quad (9.89)$$

W wariancie 2 w przypadku gęstości wypadków z pieszymi i rowerzystami na odcinkach dróg przechodzących przez małe miejscowości lub obszarze niezabudowany wzorem 9.90.

$$GWPR_{i,j} = GWPR_{b,j} \cdot WRP_{z,i} \quad (9.90)$$

$$GWPR_{b,j} = \frac{GWPR_{2017-2019,j}}{3} = \frac{1}{3} \cdot GZDW_{2017-2019,j}^{1,575} \cdot \exp(-5,637 + 0,378 \cdot GB_j) \quad (9.91)$$

gdzie:

$GWP_{i,j}$ – gęstość wypadków z pieszymi na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w i -tym roku analizy (wyp./km/rok),

$GWP_{b,j}$ – gęstość bazowa wypadków z pieszymi na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w 2018 roku (wyp./km/rok),

$GWP_{2017-2019,j}$ – gęstość wypadków z pieszymi na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w latach 2017-2019 (wyp./km/3 lata),

$GZDW_{2017-2019,j}$ – gęstość zdarzeń na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w i -tym roku analizy (wyp./km/3 lata),

$GWPR_{i,j}$ – gęstość wypadków z pieszymi i rowerzystami na j -tym odcinku drogi w i -tym roku analizy (wyp. /km/rok),

$GWPR_{2017-2019,j}$ – gęstość wypadków z pieszymi i rowerzystami na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w latach 2017-2019 (wyp./km/3 lata),

$GWPR_{b,j}$ – gęstość bazowa wypadków z pieszymi i rowerzystami na j -tym odcinku drogi w 2018 roku (wyp. /km/rok),

$SDR_{2017,j}, SDR_{2018,j}, SDR_{2019,j}$ – średnioroczne dobowe natężenie pojazdów na j -tym odcinku drogi w roku 2017, 2018 oraz 2019 (tys. poj./dobę/rok),

GNZ_j – gęstość obszaru niezabudowanego na j -tym odcinku drogi (–),

GSK_j – gęstość skrzyżowań na j -tym odcinku drogi (skrzyż./km),

UOW_j – udział odcinków o ograniczonej widoczności na j -tym odcinku drogi (–),

GB_j – gęstość zabudowy mieszkalnej na j -tym odcinku drogi (bud/ha).

9.5.6.6. Szacowanie gęstości ofiar wypadków z niechronionymi użytkownikami drogi

Gęstość ofiar wypadków z niechronionymi użytkownikami drogi ($GON_{i,j,k}, GCRZN_{i,j,k}$) na odcinkach dróg wojewódzkich jest miarą względną określającą liczbę ofiar na odcinku dróg o długości 1km w ciągu roku.

W wariancie 1 w celu określenia gęstości ofiar wypadków z pieszymi na odcinkach dróg wojewódzkich należy posłużyć się wzorem 9.92.

$$GOP_{i,j} = GOP_{b,j} \cdot WRP_{z,i} \quad (9.92)$$

$$GOP_{b,j} = \frac{GOP_{2017-2019,j}}{3} = 0,352 \cdot GWP_{2017-2019,j}^{1,019} \quad (9.93)$$

Natomiast w celu określenia gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wypadków z pieszymi na odcinkach dróg wojewódzkich należy posłużyć się wzorem 9.94.

$$GCRZP_{i,j} = GCRZP_{b,j} \cdot WRP_{z,i} \quad (9.94)$$

przy czym:

$$GCRZP_{b,j} = \frac{GCRZP_{2017-2019,j}}{3} = \frac{1}{3} \cdot GOP_{2017-2019,j}^{1,045} \cdot \exp(-0,089 \cdot UC_j - 1,360 \cdot GCH_j) \quad (9.95)$$

W wariancie 2 gęstość ofiar wypadków z pieszymi i rowerzystami na odcinkach dróg przechodzących przez małe miejscowości lub obszary niezabudowane należy szacować wzorem 9.96.

$$Gopr_{i,j} = Gopr_{b,j} \cdot WRP_{z,i} \quad (9.96)$$

przy czym

$$GOPR_{b,j} = \frac{GOPR_{2017-2019,j}}{3} = \frac{1}{3} \cdot GWPR_{2017-2019,j}^{1,128} \quad (9.97)$$

Natomiast gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wypadków z pieszymi i rowerzystami na odcinkach dróg przechodzących przez małe miejscowości lub obszary niezabudowane należy szacować wzorem 9.98.

$$GCRZPR_{i,j} = GCRZPR_{b,j} \cdot WRP_{z,i} \quad (9.98)$$

przy czym:

$$GCRZPR_{b,j} = \frac{GCZRPR_{2017-2019,j}}{3} = \frac{1}{3} \cdot GOPR_{2017-2019,j}^{1,128} \cdot \exp(0,060 - 1,886 \cdot GIN_j) \quad (9.99)$$

gdzie:

$GOP_{i,j}$ – gęstość ofiar wypadków z pieszymi na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w i -tym roku analizy (wyp./km/rok),

$GOPR_{i,j}$ – gęstość ofiar wypadków z pieszymi i rowerzystami na j -tym odcinku drogi w i -tym roku analizy (wyp. /km/rok),

$GCRZP_{i,j}$ – gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wypadków z pieszymi na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w i -tym roku analizy (wyp./km/rok),

$GCRZPR_{i,j}$ – gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wypadków z pieszymi i rowerzystami na j -tym odcinku drogi w i -tym roku analizy (wyp. /km/rok),

$GWPR_{2017-2019,j}$ – gęstość wypadków z pieszymi na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w latach 2017–2019 (wyp./km/3 lata),

$GWPR_{2017-2019,j}$ – gęstość wypadków z pieszymi i rowerzystami na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w latach 2017–2019 (wyp./km/3 lata),

$GOP_{b,j}$ – gęstość bazowa ofiar wypadków z pieszymi na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w 2018 roku (wyp./km/rok),

$GOPR_{b,j}$ – gęstość bazowa ofiar wypadków z pieszymi i rowerzystami na j -tym odcinku drogi w 2018 roku (wyp. /km/rok),

$GCRZP_{b,j}$ – gęstość bazowa ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wypadków z pieszymi na j -tym odcinku drogi wojewódzkiej w 2018 roku (wyp./km/rok),

$GCRZPR_{b,j}$ – gęstość bazowa ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wypadków z pieszymi i rowerzystami na j -tym odcinku drogi w 2018 roku (wyp. /km/rok),

UC_j – udział pojazdów ciężarowych na j -tym odcinku drogi (–),

GCH_j – gęstość chodników na j -tym odcinku drogi (km/km),

GIN_j – gęstość infrastruktury dla pieszych i rowerzystów na j -tym odcinku drogi (km/km).

9.5.6.7. Szacowanie kosztów pozostałych

Koszty pozostałe szacuje się indywidualnie w zależności od uwarunkowań lokalnych.

10. PODSUMOWANIE PRACY

10.1. Wnioski

W Polsce problematyka szacowania kosztów w cyklu życia elementów i obiektów infrastruktury drogowej jest rozwijana od kilkunastu lat. Pierwsze próby dotyczyły metod szacowania kosztów cyklu życia obiektów mostowych [215] oraz nawierzchni drogowych [64]. Nie prowadzono niestety prac badawczych dotyczących metod szacowania kosztów w cyklu życia wariantów tras drogowych i urządzeń dla pieszych i rowerów. Natomiast pierwsze prace uwzględniające metody szacowania wybranych składowych kosztów cyklu życia barier ochronnych stosowanych na drogach krajowych w Polsce podjęto dopiero w Programie Badawczym RID, przyjętym jako wspólne przedsięwzięcie NCBiR oraz GDDKiA, w ramach których uruchomiono dwa projekty badawcze RID 3B (LifeRoSE) [198] i RID 3A [199] dedykowane częściowo tym zagadnieniom. W ramach tych projektów przeprowadzono część badań terenowych i symulacyjnych umożliwiających zebranie niezbędnych danych dotyczących konstrukcji i funkcjonowania drogowych barier ochronnych. Zbiory danych poszerzono o dane dotyczące funkcjonowania urządzeń dla niechronionych uczestników ruchu, zbiory danych dotyczących wybranych kosztów budowy i funkcjonowania analizowanych elementów infrastruktury drogowej uzyskanych na podstawie prac własnych, badań dokumentacyjnych, prac zleconych oraz projektów badawczych. Uzyskane w ten sposób zbiory danych umożliwiły opracowanie modeli matematycznych, opisujących zależności składowych kosztów cyklu życia wybranych elementów infrastruktury na drogach krajowych (warianty lokalizacyjne tras drogowych i drogowe bariery ochronne) i wojewódzkich (urządzenia dla niechronionych uczestników ruchu) od najbardziej istotnych czynników drogowych, ruchowych i otoczenia (organizacyjne, ekonomiczne, przestrzenne).

Na podstawie przeprowadzonych badań terenowych, symulacyjnych, dokumentacyjnych oraz prac analitycznych i wyników modelowania matematycznego sformułowano następujące wnioski:

1. Inwestorzy, zarządcy dróg, planiści i projektanci oraz podmioty odpowiedzialne za utrzymanie dróg oczekują na rozpoznanie czynników wpływających na koszty cyklu życia poszczególnych elementów i wybranych obiektów infrastruktury drogowej oraz metod szacowania tych kosztów. Wśród wielu nierozpoznanych problemów szacowania tych kosztów są koszty wariantów lokalizacyjnych tras drogowych wybieranych na wczesnych etapach planowania drogi, koszty barier drogowych na drogach krajowych i koszty urządzeń dla niechronionych uczestników ruchu na drogach wojewódzkich. Jedną z istotnych składowych kosztów użytkowników są koszty zdarzeń drogowych, które są zmienne w czasie i wymagają szczegółowego rozpoznania naukowego. Rozpoznanie wpływu istotnych czynników na poszczególne składowe koszty i opracowanie modeli matematycznych tych zależności umożliwia opracowanie metody szacowania kosztów w cyklu życia wybranych elementów infrastruktury drogowej.
2. Zastosowanie różnych metod zbierania danych (terenowych, symulacyjnych, dokumentacyjnych) umożliwiły pozyskanie dość dużego zbioru danych niezbędnego do prowadzenia modelowania matematycznego składowych kosztów cyklu życia.
3. Przeprowadzone studia literatury poszerzyły bazę wiedzy dotyczącą wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju, a także roli kosztów cyklu życia w ocenie funkcjonowania inwestycji drogowych oraz wyborze optymalnych i racjonalnych rozwiązań infrastruktury drogowej. Uzyskane

wyniki pozwoliły na identyfikację luk badawczych oraz wstępne rozpoznanie czynników wpływających na poszczególne składowe kosztów stosowanych w modelach cyklu życia infrastruktury drogowej.

4. Wyniki przeprowadzonych badań terenowych i badań symulacyjnych posłużyły do identyfikacji czynników wpływających na składowe kosztów cyklu życia oraz do przygotowania danych do opracowania modeli zależności poszczególnych składowych kosztów cyklu życia od wybranych czynników drogowych, ruchowych i otoczenia.
5. Wyniki przeprowadzonych badań dokumentacyjnych, polegających na analizie dokumentacji projektowych, pozyskiwaniu informacji kosztowych od producentów oraz z baz cenowych dotyczących kosztów wybranych elementów lub obiektów infrastruktury drogowej posłużyły do opracowania modeli zależności wybranych składowych kosztów cyklu życia od wybranych czynników konstrukcyjnych, drogowych i ruchowych.
6. Wykorzystując zebrane dane dokumentacyjne oraz wyniki uzyskane z badań terenowych i symulacyjnych opracowano matematyczne modele składowych kosztów cyklu życia analizowanych elementów infrastruktury drogowej, a w szczególności:
 - a) model kosztów inwestycyjnych wariantów lokalizacyjnych tras drogowych na drogach krajowych,
 - b) modele składowych kosztów stałych i kosztów zmiennych drogowych barier ochronnych na drogach krajowych, ze szczególnym uwzględnieniem: ich kosztów budowy, naprawy oraz miar niezbędnych do oszacowania modeli kosztów zdarzeń drogowych w wyniku pojedynczego najechania pojazdu na barierę (modeli na wskaźnik intensywności przyspieszenia) oraz na odcinku drogi (modeli na gęstość zdarzeń z drogowymi barierami),
 - c) modele składowe kosztów zmiennych urządzeń infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu na drogach wojewódzkich, ze szczególnym uwzględnieniem: miar niezbędnych do oszacowania kosztów zdarzeń z pieszymi na drogach wojewódzkich oraz z pieszymi i rowerzystami na drogach zlokalizowanych w małych miejscowościach lub obszarach niezabudowanych. W ramach przeprowadzonych prac opracowano modele szacujące ogólną gęstość zdarzeń na drogach wojewódzkich oraz w badanym grupach gęstość wypadków, ofiar, w tym ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z pieszymi i rowerzystami.

Opracowano modele o różnym poziomie szczegółowości (ogólne i szczegółowe) w zależności od możliwości dostępu do danych. Z wielu analizowanych wybrano modele, które w procesie weryfikacji i walidacji najlepiej spełniały przyjęte kryteria oceny (miary dopasowania do danych, warunki brzegowe).

1. Przeprowadzone badania i analizy wykazały, że:
 - a) koszty inwestycyjne wariantów lokalizacyjnych tras drogowych ustalane na wczesnych etapach planowania drogi zależą głównie od: długości projektowanej trasy, konieczności realizacji tuneli oraz wielkości jednostkowego produktu krajowego brutto w roku planowanej inwestycji. Czynniki te wpływają na wielkość nakładów prac, czasochłonność procesu realizacji inwestycji drogowych oraz ogólny poziom cen.
 - b) koszty stałe (przede wszystkim koszty inwestycyjne) drogowych barier ochronnych zależą głównie od ich parametrów technicznych takich jak szerokość pracująca, poziom powstrzymywania (poprzeczna energia kinetyczna znormalizowana) oraz od rodzaju bariery

(jednostronna, dwustronna, liczba lin w prowadnicy). Czynniki te powiązane są w sposób pośredni z masą drogowych barier ochronnych. Szacuje się, że koszt materiału bariery stanowi blisko 85% całkowitych kosztów budowy;

- c) koszty zmienne drogowych barier ochronnych na drogach krajowych zależą głównie od czynników wpływających na liczbę zdarzeń drogowych oraz ich konsekwencji tj.: natężenia pojazdów na odcinkach dróg i struktury rodzajowej pojazdów, parametrów przekroju poprzecznego i podłużnego dróg takich jak falistość odcinka oraz gęstość łuków poziomych. Ponadto na koszty te wpływ ma rodzaj zainstalowanych barier na odcinku dróg i charakteryzujące je parametry techniczne takie jak szerokość, poziom powstrzymywania, podatność;
 - d) koszty zmienne urządzeń infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu na drogach wojewódzkich w przypadku pieszych zależą głównie od: średniodobowego natężenia na odcinku dróg, udziału pojazdów ciężarowych, gęstości skrzyżowań, gęstości obszaru niezabudowanego, gęstości dróg dla pieszych. Natomiast w przypadku małych miejscowości oraz obszarów niezabudowanych zależą głównie od: średniodobowego natężenia na odcinku dróg, gęstości zabudowy mieszkalnej, gęstości skrzyżowań, gęstości dróg pieszo-rowerowych oraz udziału odcinków o ograniczonej widoczności na wyprzedzanie.
2. Wyniki badań i analiz oraz opracowane modele wykorzystano do opracowania metod szacowania kosztów cyklu życia analizowanych elementów infrastruktury drogowej lub składowych tych kosztów, a w szczególności:
- a) metody szacowania kosztów inwestycyjnych wariantów lokalizacyjnych trasy drogowej na drogach krajowych ustalane na wczesnych etapach planowania drogi,
 - b) metody szacowania kosztów cyklu życia drogowych barier ochronnych na drogach krajowych oraz wybranych składowych tych kosztów,
 - c) metody szacowania kosztów cyklu życia urządzeń drogowych infrastruktury niechronionych uczestników ruchu na drogach wojewódzkich.
3. Przedstawiona rozprawa zawiera elementy oryginalności:
- a) w skali międzynarodowej w zakresie:
Rozwinięcia oraz opracowania metod szacowania kosztów cyklu życia dla elementów infrastruktury drogowej, które dotychczas były prowadzone w ograniczonym zakresie tj. drogowych barier ochronnych oraz urządzeń infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu, w tym w szczególności:
 - opracowanie modeli kosztów budowy drogowych barier ochronnych uwzględniających ich parametry techniczne,
 - uwzględnienie w metodzie LCC oraz opracowanie kosztów ponoszonych przez użytkowników dróg w urządzeniach infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu drogowego
 - b) w skali kraju w zakresie:

- przeprowadzenia oraz zastosowania badań terenowych, symulacyjnych i dokumentacyjnych dotyczących kosztów budowy i funkcjonowania tras drogowych, drogowych barier ochronnych i urządzeń infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu,
- opracowanie modeli kosztów wariantów lokalizacyjnych tras drogowych, które mogą być stosowane na etapie wstępnego wyboru tras,
- opracowanie modeli kosztów budowy, naprawy drogowych barier na odcinkach dróg krajowych uwzględniających ich parametry techniczne,
- opracowanie modeli gęstości zdarzeń z barierami drogowymi na odcinkach dróg wojewódzkich, które umożliwiają oszacowanie kosztów ponoszonych przez użytkowników dróg w związku z funkcjonowaniem barier ochronnych,
- opracowanie modeli niezbędnych do oszacowania kosztów użytkowników dróg ponoszonych w związku z wypadkami z pieszymi na drogach wojewódzkich oraz pieszymi i rowerzystami na drogach wojewódzkich przechodzących przez małe miejscowości oraz obszary niezabudowane uwzględniające gęstość urządzeń infrastruktury dla pieszych i rowerzystów,
- opracowania koncepcji i procedury metod szacowania kosztów cyklu życia lub składowych tych kosztów dla analizowanych elementów: trasy drogowej, drogowych barier ochronnych i urządzeń infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu.

10.2. Propozycje wykorzystania wyników badań

Zaproponowane metody i modele szacowania kosztów cyklu życia i wybranych elementów składowych tych kosztów analizowanych elementów infrastruktury drogowej stosowanych na drogach krajowych i wojewódzkich rekomenduje się do:

1. Zastosowania w procesie planowania i projektowania drogi, przy wyborze wariantu lokalizacyjnego trasy drogowej na wczesnych etapach planowania dróg krajowych.
2. Zastosowania w procesie wyboru rodzaju (rodzaj materiału, wymagań funkcjonalnych i konstrukcyjnych) podstawowej bariery drogowej na projektowanych odcinkach dróg krajowych w ramach metody analizy wielokryterialnej projektów drogowych opracowanej w ramach projektu badawczego INROAD-WAP realizowanego w ramach programu RID II [197].
3. Zastosowania w procesie przygotowania ofert przetargowych na utrzymanie odcinków dróg do oszacowania kosztów utrzymania i kosztów potencjalnych napraw lub wymiany drogowych barier ochronnych (poszczególnych rodzajów) w przyjętym okresie kontraktu utrzymaniowego.
4. Weryfikacji i uzupełnienia metody szacowania kosztów budowy i funkcjonowania drogowych barier ochronnych w cyklu ich życia w Wytocznych zarządzania drogowymi środkami bezpieczeństwa ruchu drogowego w zakresie trwałości i funkcjonalności (załącznik M1) opracowanych w ramach projektu LifeRoSE (RID 3B) [198].
5. Zastosowania w procesie ustalania konieczności stosowania urządzeń infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu na drogach wojewódzkich.

10.3. Kierunki dalszych prac

Przedstawione w pracy wyniki badań terenowych, symulacyjnych i dokumentacyjnych, a także opracowane na podstawie wyników tych badań modele i metody szacowania kosztów cyklu życia analizowanych elementów infrastruktury drogowej oraz części składowych tych kosztów nie wyczerpują zagadnień związanych z tą problematyką. Biorąc pod uwagę rozpoznane problemy szacowania niektórych składowych kosztów analizowanych elementów infrastruktury drogowej oraz potrzeby ujawnione w ramach projektu INROAD-WAP [197], proponuję prowadzenie dalszych prac badawczych i rozwojowych w zakresie:

1. Opracowania metodyki zbierania danych niezbędnych do wykonywania analiz kosztów cyklu życia w tym opracowanie koncepcji krajowej bazy danych dotyczącej kosztów budowy, utrzymania, eksploatacji, utrzymania i likwidacji elementów infrastruktury drogowej, która umożliwi integrację z istniejącymi bazami danych takimi jak: bank danych drogowych, baza policyjna SEWiK, Baza danych obiektów topograficznych BDOT500 oraz wewnętrzne bazy zarządców dróg.
2. Wykonania poszerzonej serii badań terenowych, symulacyjnych i dokumentacyjnych związanych z występowaniem prac tymczasowych oraz generowanych w związku z nimi stratami czasu, a w przypadku urządzeń infrastruktury dla niechronionych uczestników ruchu rozszerzenie badań o potencjalne korzyści (dodatnie przepływy pieniężne) związane z ich budową wpływającą na zmianę struktury ruchowej (modal split), wpływającej na zwiększenie aktywności ruchowej społeczeństwa oraz zmianę kosztów środowiskowych.
3. Uzupełnienie metody szacowania kosztów w cyklu życia o inne elementy infrastruktury drogowej, w szczególności skrzyżowania, przejścia dla pieszych z podziałem na obszar zabudowany oraz niezabudowany,
4. W Polsce w ramach generalnego pomiaru ruchu nie są prowadzone pomiary natężenia ruchu pieszego w związku z tym proponuje się opracowanie modeli umożliwiających wstępne szacowanie natężenia ruchu pieszych na odcinkach dróg wojewódzkich na podstawie informacji o zróżnicowanej gęstości zabudowy mieszkalnej.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abou-Senna, H., Radwan, E., Mohamed, A., “Investigating the correlation between sidewalks and pedestrian safety,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 166, p. 106548, Mar. 2022,
- [2] Affuso, L., Masson, J., Newbery, D., “Comparing investments in new transport infrastructure: Roads versus railways?,” *Fisc. Stud.*, vol. 24, no. 3, pp. 275–315, 2003,
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *Highway Safety Manual*. Washington, DC: The National Academies Press, 2010.
- [4] Ammar, M., Zayed, T., Moselhi, O., “Fuzzy-Based Life-Cycle Cost Model for Decision Making under Subjectivity,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 139, no. 5, pp. 556–563, 2013,
- [5] Applied Research Associates Inc, “Sidewalk Pavement Life-Cycle Cost Comparison Tools,” 2020.
- [6] Archutowska, J., Kiwił, A., Giziński, D., Witaszek, W., Lorczyk, M., “Analiza kosztów i korzyści projektów transportowych współfinansowanych ze środków Unii Europejskiej. Vademecum beneficjenta,” 2016, *Warszawa*.
- [7] Aron, M., Billot, R., Bhouri, N., El Faouzi, N.-E., Seidowsky, R., “Power and Exponential Functions Relating Accidents to Traffic and Rain. Calibration on a French Network,” 2018, pp. 309–333.
- [8] Arshad, H., Thaheem, M. J., Bakhtawar, B., Shrestha, A., “Evaluation of road infrastructure projects: A life cycle sustainability-based decision-making approach,” *Sustainability*, vol. 13, no. 7, pp. 1–26, 2021,
- [9] Atkinson, V., Baldachin, L., Bird, S., “Whole life value of footways and cycle tracks,” *Publ. Proj. Rep.* 105, 2006.
- [10] Azmi, D. I., Karim, H. A., Amin, M. Z. M., “Comparing the Walking Behaviour between Urban and Rural Residents,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 68, pp. 406–416, 2012,
- [11] Babashamsi, P., Md Yusoff, N. I., Ceylan, H., Md Nor, N. G., Salarzadeh Jenatabadi, H., “Evaluation of pavement life cycle cost analysis: Review and analysis,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 241–254, 2016,
- [12] Bahke, E., *Systemy transportowe dziś i jutro*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1978.
- [13] Baran, J., Janik, A., “Zastosowanie wybranych metod analizy i oceny wpływu cyklu życia na środowisko w procesie ekoprojektowania,” in *Knosala R. (red.): Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, Opole: Oficyna Wydaw. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2013, pp. 22–33.
- [14] Bennett, C. R., Greenwood, I. D., *HDM-4 Highway Development & Management*. World Bank Group, 2001.
- [15] Bertalanffy, L. von, *Ogólna teoria systemów. Podstawy, rozwój, zastosowanie*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 1984.
- [16] Bichajło, L., Kołodziej, K., Siwowski, T., “Effects of Aging on the Physical and Rheological Properties of Trinidad Lake Asphalt Modified Bitumen,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 10, p. 2532, May 2021,
- [17] Birr, K., Budzyński, M., Gobis, A., Jamroz, K., *et al.*, “WR-D-41-1 Wytyczne projektowania infrastruktury dla pieszych Część 1: Planowanie tras dla pieszych Wzorce i standardy rekomendowane przez Ministra właściwego ds. transportu,” 2023.

- [18] Blanchard, B. S., Joseph, F. W., *Life-Cycle Cost and Economic Analysis*. New York: Pearson, 1991.
- [19] Blaug, M., “The Fundamental Theorems of Modern Welfare Economics, Historically Contemplated,” *Hist. Polit. Econ.*, vol. 39, no. 2, pp. 185–207, Jun. 2007,
- [20] Bogusz, A., “Repozytorium Koszty cyklu życia LCC,” *Urząd Zamówień Publicznych*, 2022.
- [21] Boussabaine, H., Kirkham, R., *Whole Life-cycle Costing Risk and Risk Responses*. Oxford: Blackwell Publishing, 2004.
- [22] Broniewicz, E., Godlewska, J., Lulewicz-Sas, A., Miłaszewski, R., *Ekonomia i zarządzanie w inżynierii środowiska*. Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2019.
- [23] Broniewicz, E., Ogrodnik, K., “A Comparative Evaluation of Multi-Criteria Analysis Methods,” *Energies*, vol. 14, 5100, pp. 1–23, 2021.
- [24] Broniewicz, E., Ogrodnik, K., “Multi-criteria analysis of transport infrastructure projects,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 83, p. 102351, Jun. 2020,
- [25] Buczacki, A., “Określenie wymagań – kluczowym elementem inżynierii systemów,” in R. Knosala (red.), *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji, t. 2*, Warszawa: Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, 2015, pp. 655–665.
- [26] Budzyński, M., Gobis, A., Jamroz, K., Jelinski, L., Ostrowski, K., “Road Restraint Systems as a Basis for Roadside Safety Improvement,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 471, p. 062029, Feb. 2019,
- [27] Budzyński, M., Jamroz, K., Jeliński, Ł., Gobis, A., “The Effects of Roadside Hazards on Road Accident Severity,” *J. KONBiN*, vol. 49, no. 2, pp. 319–339, Jun. 2019,
- [28] Budzynski, M., Jamroz, K., Wilde, K., Witkowski, W., Jelinski, L., Bruski, D., “The role of numerical tests in assessing road restraint system functionality,” *Eur. Transp. Res. Rev.*, vol. 12, no. 1, p. 30, Dec. 2020,
- [29] Bundesamt für Strassen (ASTRA), “Handbuch NISTRA 2022: Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte [Podręcznik NISTRA 2022: Wskaźniki zrównoważonego rozwoju dla projektów infrastruktury drogowej],” 2023.
- [30] Bundesministerium für Umwelt Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), “Leitfaden Nachhaltiges Bauen [Wytyczne dotyczące zrównoważonego budownictwa],” Berlin, 2013.
- [31] Burbridge, A., “An explanatory model for quantification of road safety barrier impact risk. Rozprawa doktorska,” 2020.
- [32] Burbridge, A., Troutbeck, R., “A model for predicting Acceleration Severity Index in impacts with road safety barriers,” *Int. J. Crashworthiness*, vol. 24, no. 4, pp. 442–452, Jul. 2019,
- [33] Celińska-Mysław, M., Wiatr, T., “Budownictwo zrównoważone z przykładem analizy kosztów w ujęciu LCC,” *Przegląd Bud.*, vol. 89, no. 11, pp. 45–50, 2018.
- [34] Cempel, C., *Teoria i inżynieria systemów*. Radom: ITE, 2008.
- [35] Center for Systems Management, *Glossary of Project Management Terms*. 1999.
- [36] Centrum Badań i Edukacji Statystycznej GUS, *Opracowanie metodyki i oszacowanie kosztów zewnętrznych emisji zanieczyszczeń do powietrza atmosferycznego ze środków transportu drogowego na poziomie kraju*. Praca powstała na podstawie umowy nr

- 20/BR/POPT/CBiES/2017 zawartej dnia 18 lipca 2017 r. pomiędzy GUS a CBiES w ramach Projektu Programu Operacyjnego Pomoc Techniczna 2014–2020, 2018.
- [37] Chartered Institute of Public Finance and Accountancy (CIPFA), “Code of Practice on Transport Infrastructure Assets,” 2013.
- [38] Chatterjee, S., Simonoff, J. S., *Handbook of Regression Analysis*. 2013.
- [39] Chen, C., Zhang, J., “Comparisons of IRI-Based Pavement Deterioration Prediction Models Using New Mexico Pavement Data,” *Geo-Frontiers 2011 Adv. Geotech. Eng.*, pp. 4594–4603, 2011,
- [40] Chimba, D., Emaasit, D., Allen, S., Hurst, B., Nelson, M., “Factors Affecting Median Cable Barrier Crash Frequency: New Insights,” *J. Transp. Saf. Secur.*, vol. 6, no. 1, pp. 62–77, 2014,
- [41] Chou, E., Haricharan, P., Debargha, D., “FHWA/OH-2008/3, Pavement Forecasting Models,” 2008.
- [42] Chrostowska, H., *Efektywność nakładów na drogi*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1987.
- [43] Chrostowska, H., *Ekonomika inwestycji drogowych*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1970.
- [44] Cirilovic, J., Vajdic, N., Mladenovic, G., Queiroz, C., “Developing Cost Estimation Models for Road Rehabilitation and Reconstruction: Case Study of Projects in Europe and Central Asia,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 140, no. 3, Mar. 2014,
- [45] Cooner, S. A., Rathod, Y. K., Alberson, D. C., Bligh, R. P., Stephen, E., “Performance Evaluation of Cable Median Barrier Systems in Texas,” Texas, 2009.
- [46] Cooper, P., *Analysis of Roadside Encroachments-Single Vehicle Run-Off-Road Accident Data Analysis for Five Provinces*. Vancouver, British Columbia, Canada: Interim Report, B.C. Research Council, 1980.
- [47] Czabak-Górska, I., “Metoda statystycznego sterowania jakością w produkcji wieloasortymentowej. Rozprawa doktorska,” Politechnika Opolska, 2019.
- [48] Dannenberg, A. L., Frumkin, H., J., J. R., *Making Healthy Places Designing and Building for Health, Well-being, and Sustainability*. Island Press, 2011.
- [49] Datka, S., Suchorzewski, W., Tracz, M., *Inżynieria ruchu*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1997.
- [50] Dean, M., “Chapter six - multi-criteria analysis,” in *Advances in Transport Policy and Planning, Standard Transport Appraisal Methods*, Academic Press, 2020, pp. 165–224.
- [51] Department of Defense United States of America, *Military Handbook. Life Cycle Cost in Navy Acquisitions*. 1983.
- [52] Donnell, Eric T.;Porter, Richard J.;Li, Lingyu;Hamilton, Ian;Himes, Scott;Wood, J., “FHWA-SA-19-005. Reducing roadway departure crashes at horizontal curve sections on two-lane rural highways,” 2019.
- [53] Donnell, E. T., Mason, J. M., “Predicting the frequency of median barrier crashes on Pennsylvania interstate highways,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 38, no. 3, pp. 590–599, 2006,
- [54] Dz. U. 2004 Nr 130 poz. 1389, “Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 18 maja 2004 r. w sprawie określenia metod i podstaw sporządzania kosztorysu inwestorskiego, obliczania

planowanych kosztów prac projektowych oraz planowanych kosztów robót budowlanych określonych w programie.”

- [55] Dziaduch, I., “Analiza kosztów okresu istnienia (LCC) obiektu technicznego w aspekcie jego niezawodności,” *Logistyka*, vol. 2011, no. 2, pp. 139–148, 2011.
- [56] Dziaduch, I., “Modele szacowania kosztu cyklu życia: przegląd literatury,” *Logistyka*, vol. 2016, no. 6, pp. 109–116, 2016.
- [57] Elvik, *Factors Contributing to Road Accidents*. Bingley: Emerald Group Publishing, 2016.
- [58] Elyamany, A., Kareem, A., “Developing Parametric Model for Conceptual Cost Estimate of Highway Projects,” *Int. J. Eng. Sci. Comput.*, 2016.
- [59] Emblemståg, J., *Life-cycle costing: using activity-based costing and Monte Carlo methods to manage future costs and risk*. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [60] Environmental Protection Agency (EPA), “Development of Emission Rates for Light-Duty Vehicles in the Motor Vehicle Emissions Simulator (MOVES2010),” 2011, *Washington, D.C., USA*.
- [61] Environmental Systems Research Institute (ESRI), “ArcGIS Pro 3.1.1,” 2023.
- [62] European Commission, *EU transport in figures Statistical pocketbook 2020*. 2020.
- [63] European Commission, *Guide to Cost-benefit Analysis of Investment Projects: Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020*, no. December. 2014.
- [64] European Concrete Paving Association (EUPAVE), “Przewodnik po podstawowych zasadach analizy kosztu cyklu,” 2020.
- [65] European Concrete Paving Association (EUPAVE), “Concrete safety barriers: a lifetime of safety,” 2017.
- [66] European Environment Agency (EEA), “COPERT 4: Computer programme to calculate emissions from road transport,” 2007.
- [67] European Parliament and Council, “Directive 2010/40/EU of 7 July 2010 on the framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport,” 2010, *Brussels*.
- [68] European Union, “Road Transport A change of gear,” Luksemburg, 2012. Accessed: Jul. 08, 2021. [Online]. Available: <http://europa.eu>
- [69] European Union Road Federation (ERF), “Road asset Management. An ERF position paper for maintaining and improving a sustainable and efficient road network,” 2013.
- [70] Eurostat, “Expenditure on road transport vehicles and road infrastructure,” 2024. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/road_ec_invest
- [71] Fałdowski, M., “Współczesny wymiar bezpieczeństwa,” *Zesz. Nauk. SGSP 2018*, vol. 2, no. 66, 2018.
- [72] Federal Acquisition Institute (FAI), “A Glossary of Acquisition Terms,” Washington, 1998.
- [73] Federal Highway Administration (FHWA), “Transportation Asset Management Plans Case Study 3-Life Cycle Planning Practices,” 2020.
- [74] Federal Highway Administration (FHWA), *AASHTO Transportation Asset Management Guide*. 2020.
- [75] Federal Highway Administration (FHWA), “Using INVEST to Accomplish Your Goals,” FHWA,

- 2015.
- [76] Federal Highway Administration (FHWA), *Life-Cycle Cost Analysis Primer*. 2002.
- [77] Feldman, A. M., Serrano, R., *Welfare Economics and Social Choice Theory. Second edition*. Springer New York, 2006.
- [78] Forum of European National Highway Research Laboratories (FEHRL), “New Road Construction Concepts (NR2C). Towards reliable, green, safe&smart and human infrastructure in Europe,” 2008.
- [79] Furch, J., “A model for predicting motor vehicle life cycle cost and its verification,” pp. 15–26, 2016.
- [80] Gackowiec, P., “General overview of maintenance strategies – concepts and approaches,” *Multidiscip. Asp. Prod. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 126–139, 2019,
- [81] Gardziejczyk, W., *Hałaśliwość nawierzchni drogowych*. Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2018.
- [82] Gardziejczyk, W., Zabicki, P., “The influence of the scenario and assessment method on the choice of road alignment variants,” *Transp. Policy*, vol. 36, pp. 294–305, Nov. 2014,
- [83] Gardziejczyk, W., Zabicki, P., “Normalization and variant assessment methods in selection of road alignment variants–case study,” *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 23, no. 4, pp. 510–523, 2017,
- [84] Garemo, N., Hjerpe, M., Hallema, B., “A better road to the future. Improving the delivery of road infrastructure across the world,” 2018.
- [85] GDDKiA, “Oświadczenie o stanie kontroli zarządczej Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad za rok 2024,” 2025.
- [86] GDDKiA, “Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych,” 2013.
- [87] Gładysz, B., Mercik, J. W., *Modelowanie ekonometryczne : studium przypadku*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2007.
- [88] Główny Urząd Statystyczny, “Bank danych lokalnych,” 2025.
- [89] Gmina Miejska Legionowo, “Analiza kosztów cyklu życia: Budowa infrastruktury sportowo-rekreacyjnej na terenie działek nr 40/4, 264, 265 przy ul. ppłk. E. Dietricha w Legionowie. Biuletyn Informacji Publicznej.”
- [90] Gobis, A., Jamroz, K., “Road Safety as a Component of Social and Economic Costs in Road Network Functional Assessment,” in *Road Traffic Research, Analysis, and Modeling*, E. Macioszek, A. Grana, and G. Sierpiński, Eds., 2025, pp. 76–87.
- [91] Gobis, A., Jamroz, K., Jeliński, Ł., “Application of the life cycle cost estimation method in transport infrastructure managing,” *WUT J. Transp. Eng.*, vol. 126, pp. 5–14, Sep. 2019,
- [92] Gompf, K., Traverso, M., Hetterich, J., “Applying social life cycle assessment to evaluate the use phase of mobility services: a case study in Berlin,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 27, no. 4, pp. 603–622, Apr. 2022,
- [93] Greenroads International, “Project rating program,” Redmond, WA, USA, 2019.
- [94] Griffin, R. W., *Podstawy zarządzania organizacjami*. 2021.
- [95] Grzyl, B., Kristowski, A., Jamroz, K., Gobis, A., “Methods of estimating the cost of traffic safety equipment’s life cycle,” *MATEC Web Conf.*, vol. 122, p. 02003, Aug. 2017,

- [96] GUS, “Przewozy ładunków i pasażerów w 2019 r. Informacja sygnalna,” 2020.
- [97] Haas, R., Tighe, S. L., Cowe Falls, L., “Determining return on long-life pavement investments,” *Transp. Res. Rec.*, no. 1974, pp. 10–17, 2006,
- [98] Heggie, I. G., “Management and financing of roads: an agenda for reform,” *World Bank Tech. Pap.*, vol. 275, no. 275, 1995.
- [99] Hess, R., Lohmeier, M., Mielecke, T., Kunz, K., “Nachhaltigkeitsbewertung von Streckenzügen der Straßeninfrastruktur [Ocena zrównoważonego rozwoju odcinków infrastruktury drogowej] (BASt-Bericht V 361),” 2022.
- [100] Hutchinson, J., *The Significance and Nature of Vehicle Encroachments on Medians of Divided Highways*. University of Illinois, Urbana-Champaign: Engineering Experiment Station Bulletin 487, 1962.
- [101] Ignatowicz, G., “Realizacja zasady zrównoważonego rozwoju w polityce ekologicznej Polski po konferencjach w Rio de Janeiro w 1992 oraz 2012 roku,” *Białostockie Stud. Prawnicze*, vol. 18, pp. 223–236, 2015,
- [102] Ilg, P., Scope, C., Muench, S., Guenther, E., “Uncertainty in life cycle costing for long-range infrastructure. Part I: leveling the playing field to address uncertainties,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 2, pp. 277–292, Feb. 2016,
- [103] Inada, H., Li, Q., Bachani, A., Hyder, A. A., “Forecasting global road traffic injury mortality for 2030,” *Inj. Prev.*, vol. 26, no. 4, pp. 339–343, Aug. 2020,
- [104] Indicators, M., “Caltrans Asset Management Performance Report,” 2016.
- [105] Infrastructure Australia, *Guide to economic appraisal: Technical guide of the Assessment Framework*, no. July. 2021.
- [106] Innes, J. E., Booher, D. E., “Reframing public participation: strategies for the 21st century,” *Plan. Theory Pract.*, vol. 5, no. 4, pp. 419–436, Dec. 2004,
- [107] Institute for Sustainable Infrastructure, “Envision Sustainable Infrastructure Framework Guidance Manual,” Washington DC, USA, 2018.
- [108] ISO 15686-5:2017, “Buildings and constructed assets — Service life planning — Life-cycle costing,” 2017, *International Organization for Standardization, Genewa*.
- [109] Jacyna, M., *Wybrane zagadnienia modelowania systemów transportowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009.
- [110] Jamroz, K., “Problemy szacowania strat w wypadkach drogowych w Polsce,” *Transp. Miej. i Reg.*, vol. 12, 2011.
- [111] Jamroz, K., “Review of Road Safety Theories And Models,” *J. Konbin*, vol. 4, no. 1, pp. 89–108, 2008,
- [112] Jamroz, K., *Metoda zarządzania ryzykiem w inżynierii drogowej*. Politechnika Gdańska, 2011.
- [113] Jamroz, K., Gaca, S., Dąbrowska-Loranc, M., et al., *GAMBIT 2005. Krajowy Program BRD 2005-2013*. Poland: Krajowa Rada BRD Warszawa, 2005.
- [114] Jamroz, K., Gaca, S., Michalski, L., Kieć, M., Budzyński, M., Gumińska, L., “Ochrona pieszych. Podręcznik dla organizatorów ruchu pieszego,” 2014.
- [115] Jamroz, K., Gobis, A., Kristowski, A., Grzyl, B., “Proposed method for estimating the costs of

- safety barrier life cycle,” *MATEC Web Conf.*, vol. 231, pp. 1–8, 2018,
- [116] Jamroz, K., Kustra, W., Kempa, J., Grzelec, K., “Wytyczne poszerzania jezdni o dodatkowe pasy ruchu w zależności od przewidywanego natężenia ruchu drogowego. Część I – Raport z analiz,” Ministerstwo Infrastruktury i Budownictwa, 2016.
- [117] Jamroz, K., Michalski, L., “Systematyka narzędzi do zarządzania bezpieczeństwem infrastruktury drogowej,” *Drogownictwo*, vol. 4, pp. 144–152, 2012.
- [118] Jamroz, K., Romanowska, A., “Vision Zero in Poland,” in *The vision zero handbook: Theory, technology and management for a zero casualty policy*, Springer, 2022.
- [119] Jamroz, K., Wilde, K., Budzyński, M., Jeliński, Ł., *et al.*, “Innovative Research into Road Restraint Systems,” *J. Konbin*, vol. 49, no. 3, pp. 271–292, 2019,
- [120] JASPERS, *Niebieska Księga. Infrastruktura drogowa*. 2023.
- [121] Jeliński, Ł., “Modelowanie liczby i wielkości uszkodzeń drogowych barier ochronnych na odcinkach dróg. Rozprawa doktorska,” Politechnika Gdańska, 2024.
- [122] Jiang, W., Marggraf, R., “The origin of cost–benefit analysis: a comparative view of France and the United States,” *Cost Eff. Resour. Alloc.*, vol. 19, no. 1, p. 74, Dec. 2021,
- [123] Jun, H. K., Kim, J. H., “Life cycle cost modeling for railway vehicle,” *2007 Int. Conf. Electr. Mach. Syst.*, pp. 1989–1994, 2007.
- [124] Kałowski, A., Wysocki, J., *Przygotowanie i ocena projektów inwestycyjnych. Wybrane zagadnienia*. Szkoła Główna Handlowa w Warszawie – Oficyna Wydawnicza, 2013.
- [125] Karbowski, H., *Podstawy infrastruktury transportu*. Łódź: Wydawnictwo Wyższej Szkoły Humanistyczno-Ekonomicznej w Łodzi, 2009.
- [126] Karim, H., Magnusson, R., Natanaelsson, K., “Life-cycle cost analyses for road barriers,” *J. Transp. Eng.*, vol. 138, no. 7, pp. 830–851, 2012,
- [127] Karim, H., “Road Designing for Future Maintenance - Life-cycle Cost Analyses for Road Barriers. Rozprawa doktorska,” Royal Institute of Technology, 2011.
- [128] Karim, H., “Improved Road Design for Future Maintenance – Analysis of Road Barrier Repair Costs HAWZHEEN KARIM Licentiate Thesis in Highway Engineering Royal Institute of Technology , Stockholm , Sweden 2008,” Royal Institute of Technology, Stockholm, 2008.
- [129] Karim, H., Alam, M., Magnusson, R., “Road Barrier Repair Costs and Influencing Factors,” *J. Transp. Eng.*, vol. 139, no. 5, pp. 467–475, 2011,
- [130] Karimzadeh, A., Shoghli, O., “Predictive analytics for roadway maintenance: A review of current models, challenges, and opportunities,” *Civ. Eng. J.*, vol. 6, no. 3, pp. 602–625, 2020,
- [131] Kasprzyk, B., “Problem pomiaru w ekonomii dobrobytu – poglądy historyczne i współczesne,” *Nierówności Społeczne a Wzrost Gospod.*, vol. 41, no. 1, pp. 287–295, 2015.
- [132] Kawauchi, Y., Rausand, M., “Life Cycle Cost (LCC) Analysis in Oil and Chemical Process Industries,” 1999.
- [133] Kedarisetty, S., Kim, C., Harvey, J. T., “Regression Models of Road User Cost Prediction for Highway Maintenance and Rehabilitation for Life Cycle Planning in California,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2676, no. 1, pp. 18–29, 2022,
- [134] Kieć, M., “Wpływ dostępności do dróg na warunki i bezpieczeństwo ruchu - praca doktorska,”

Politechnika Krakowska, Kraków, 2009.

- [135] Kolanek, C., Zając, M., Zając, Paweł, “Analiza cyklu życia nawierzchni autostradowych w Polsce,” *Logistyka*, 2013.
- [136] Komenda Główna Policji, “Baza SEWIK - System Ewidencji Wypadków i Kolizji.”
- [137] Komisja Europejska Dyrekcja Generalna ds. Środowiska, “Narzędzie do obliczania kosztów cyklu życia dla zielonych zamówień publicznych na oświetlenie drogowe i sygnalizację świetlną,” 2019.
- [138] Kot, S. M., Jakubowski, J., Sokołowski, A., *Statystyka. Podręcznik dla studiów ekonomicznych*. Centrum Doradztwa i Informacji Difin, 2007.
- [139] Krajowa Rada Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego, *Narodowy Program Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego 2021-2030*. Ministerstwo Infrastruktury, Sekretariat Krajowej Rady Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego, 2021.
- [140] KRBRD, *Badania zachowań pieszych i relacji*. 2018.
- [141] Kristowski, A., Grzyl, B., Gobis, A., Jeliński, Ł., “Effects of safety barrier life cycle cost factors - identification and analysis,” *MATEC Web Conf.*, vol. 231, p. 01013, Nov. 2018,
- [142] Kruszyna, M., *Metoda oceny elementów infrastruktury drogowej z uwzględnieniem potrzeb i specyfiki różnych grup użytkowników*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2013.
- [143] Kulczycka, J., Pietrzyk-Sokulska, E., Góralczyk, M., Koneczna, R., Spielmann, M., Merl, A., “Opracowanie metodyki LCA dla oceny projektów infrastrukturalnych,” pp. 1–204, 2008.
- [144] Kustra, W., “Modelowanie wybranych miar bezpieczeństwa ruchu na długich odcinkach dróg. Rozprawa doktorska,” 2016.
- [145] Laird, J., Page, M., Shen, S., “The value of dedicated cyclist and pedestrian infrastructure on rural roads,” *Transp. Policy*, vol. 29, pp. 86–96, Sep. 2013,
- [146] Lee, J., Edil, T. B., Benson, C. H., Tinjum, J. M., “Building Environmentally and Economically Sustainable Transportation Infrastructure: Green Highway Rating System,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 139, no. 12, Dec. 2013,
- [147] Leiva-Maldonado, S., Bowman, M. D., Gomez, D., “Life-cycle cost profiles selection for different superstructure bridge types,” *Structures*, vol. 54, pp. 1–13, Aug. 2023,
- [148] Lesniak, A., Zima, K., “Zarządzanie wartością przedsięwzięć budowlanych w warunkach polskich,” no. January, 2019.
- [149] Li, Y., Li, X., Zhang, C., Liang, Y., “Practical Application of Safety Management in the Reconstruction and Expansion Project of Expressway,” *E3S Web Conf.*, vol. 565, p. 01006, Sep. 2024,
- [150] Li, Z., *Transportation Asset Management Methodology and Applications*. CRC Press, 2019.
- [151] Liang, Y., Ashuri, B., Li, M., “Forecasting the Construction Expenditure Cash Flow for Transportation Design-Build Projects with a Case-Based Reasoning Model,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 147, no. 6, Jun. 2021,
- [152] Lindholm, A., Suomala, P., “Learning by costing: Sharpening cost image through life cycle costing?,” *Int. J. Product. Perform. Manag.*, vol. 56, no. 8, pp. 651–672, 2007,
- [153] Litman, T. A., “Understanding transport demands and elasticities: how prices and other factors

- affect travel behavior,” *Victoria Transp. Policy Inst.*, 2024.
- [154] Liu, Y., Horowitz, A., Justin, E., “Development of a traffic diversio estimation model for freeway construction work zones,” 2011.
- [155] Logintrade, “Plaforma przetargowa ZDW Olsztyn,” 2025, <https://zdw-olsztyn.logintrade.net/rejestracja/przetargi.html>.
- [156] Macha, E., *Niezawodność maszyn*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2001.
- [157] Macioszek, E., Granà, A., Krawiec, S., “Identification of factors increasing the risk of pedestrian death in road accidents involving a pedestrian with a motor vehicle,” *Arch. Transp.*, vol. 65, no. 1, pp. 7–25, Mar. 2023,
- [158] Mahamid, I., “Early cost estimating for road construction projects using multiple regression techniques,” *Australas. J. Constr. Econ. Build.*, vol. 11, no. 4, pp. 87–101, 2011,
- [159] Maher, M., Kazmierowski, T., Navarra, M., “Integration of sustainability rating tools in contemporary pavement management systems,” in *9th International Conference on Managing Pavement Assets*, Alexandria, VA, 2015.
- [160] Mallela, J., Sadasivam, S., “FHWA-HOP-12-005: Work Zone Road User Costs: Concepts and Applications,” 2011.
- [161] Malyuta, D. A., “Analysis of factors affecting pavement markings and pavement marking retroreflectivity in Tennessee Highways,” 2015, *The University of Tennessee at Chattanooga*.
- [162] Marcinek, K., Foltyn-Zarychta, M., Tomecki, M., “Megaprojekty. Dylematy oceny i podejmowania decyzji,” 2023, *Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice*.
- [163] Marx, W. J., Mavris, D. N., Schrage, D. P., “A Hierarchical Aircraft Life Cycle Cost Analysis Model,” *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut.*, pp. 1–18, 1995.
- [164] Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., Behrens, W., *The limit to growth. A Report for the Club of Rome’s Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books New York, 1972.
- [165] Mendoza, G., Macoun, P., *Guidelines for Applying Multi-Criteria Analysis to the Assessment of Criteria and Indicators*. Jakarta: Center for International Forestry Research (CIFOR), 1999.
- [166] Miaou, S. P., Lum, H., “Modeling vehicle accidents and highway geometric design relationships,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 25, no. 6, pp. 689–709, 1993,
- [167] Miłaszewicz, D., Ostapowicz, B., “Warunki zrównoważonego rozwoju transportu w świetle dokumentów UE,” *Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania nr 24*, no. 24, Szczecin, 2011.
- [168] Moins, B., France, C., Van den bergh, W., Audenaert, A., “Implementing life cycle cost analysis in road engineering: A critical review on methodological framework choices,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 133, p. 110284, Nov. 2020,
- [169] Monfette, M., “Impact of snow removal operations on thermoplastic pavement markings,” 2011, *Department of The Air Force Institute of Technology*.
- [170] Montella, A., “Selection of roadside safety barrier containment level according to European Union Standards,” *Transp. Res. Rec.*, no. 1743, pp. 104–110, 2001,
- [171] Montella, A., Perneti, M., “Vehicle Occupant Impact Severity in Relation to Real World Impact Conditions,” *Proc. 2nd Int. Congr. New Technol. Model. Tools Roads*, 2004.

- [172] National Cooperative Highway Research Program, “Final Report Roadside Safety Analysis Program (Rsap) Update,” 2012.
- [173] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) 1064, “Pedestrian and Bicycle Safety Performance Functions,” 2023.
- [174] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) 111, “Running costs of motor vehicles as affected by road design and traffic,” 1971.
- [175] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Synthesis 371, “Managing Selected Transportation Assets: Signals, Lighting, Signs, Pavement Markings, Culverts, and Sidewalks,” Washington, DC, 2007.
- [176] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Synthesis 494, “Life-Cycle Cost Analysis for Management of Highway Assets,” The National Academies Press, Washington, D.C., May 2016.
- [177] Nemati, A., Haas, M., Torick, D., Nazari, S., “Lifetime cost analysis of concrete barriers and steel guardrails,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–13, 2024,
- [178] Nurzyński, J., “Zrównoważony rozwój a ocena akustyczna terenów inwestycyjnych,” *Pr. Inst. Tech. Bud.*, vol. 2, no. 130, pp. 27–42, 2004.
- [179] Odeck, J., Kjerkreit, A., “The accuracy of benefit-cost analyses (BCAs) in transportation: An ex-post evaluation of road projects,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 120, no. December 2018, pp. 277–294, 2019,
- [180] OECD, “Indicators,” 2024. [Online]. Available: <https://www.oecd.org/en/data/indicators>
- [181] Okte, E., Al-Qadi, I. L., Ozer, H., “Effects of Pavement Condition on LCCA User Costs,” *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2673, no. 5, pp. 339–350, May 2019,
- [182] Olszewski, M., “Analiza LCC w odniesieniu do kładki przez Wisłę w Warszawie,” 2018.
- [183] Ośrodek Wdrożeń Ekonomiczno-Organizacyjnych “Promocja,” “System cenowy Sekocenbud,” 2010 - 2024.
- [184] Oxford Economics, “Global infrastructure outlook. Infrastructure investment needs 50 counties, 7 sectors to 2040,” *Glob. Infrastructure Hub Sydney, Aust.*, p. 64, 2017.
- [185] Ozbay, K., Parker, N. A., Jawad, D., “Guidelines for Life Cycle Cost Analysis,” no. Report No. FHWA-NJ-2003-012, 2003.
- [186] Pawlak, M., *Zarządzanie projektami*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2016.
- [187] Pike, A. M., Bommanayakanahalli, B., “Development of a Pavement Marking Life Cycle Cost Tool,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2672, no. 12, pp. 148–157, 2018,
- [188] Plebankiewicz, E., Zima, K., Wieczorek, D., “Original Model for Estimating the Whole Life Costs of Buildings and its Verification,” *Arch. Civ. Eng.*, vol. 65, no. 2, pp. 163–179, Jun. 2019,
- [189] Plebankiewicz, E., *Planowanie i szacowanie kosztów cyklu życia budynków biurowych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2019.
- [190] Plebankiewicz, E., “Kierunki działań zmierzających do obniżenia kosztów w cyklu życia budynków miejskich,” in *Budownictwo na obszarach zurbanizowanych*, Politechnika Lubelska, 2014, pp. 271–282.
- [191] PN-EN 1317-2, *Norma PN-EN1317 Część 2: Klasy działania, kryteria przyjęcia badań*

- zderzeniowych i metody badań barier ochronnych*. 2010.
- [192] PN-EN 60300-3-3, “Zarządzanie niezawodnością część 3-3: Przewodnik zastosowań Szacowanie kosztu cyklu życia,” 2017, *PKN, Warszawa*.
- [193] PN-EN ISO 14040, “Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura,” 2009, *PKN, Warszawa*.
- [194] PN-EN ISO 14044, “Zarządzanie środowiskowe — Ocena cyklu życia — Wymagania i wytyczne,” 2006, *PKN, Warszawa*.
- [195] PN-EN ISO 55000, “Zarządzanie aktywami. Informacje ogólne, zasady i terminologia,” 2017, *Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa*.
- [196] Project Management Institute, *A guide to the Project Management Body of Knowledge*, 5th Editio. 2013.
- [197] Projekt INROAD-WAP RIDII 2C, “Wzorcowa metoda oceny inwestycji drogowej na etapie STEŚ uwzględniająca zasady zrównoważonego rozwoju w całym cyklu życia drogi,” 2025.
- [198] Projekt LifeRoSE RID 3B, “Wpływ czasu i warunków eksploatacyjnych na trwałość i funkcjonalność elementów bezpieczeństwa ruchu drogowego, Projekt zrealizowany w ramach wspólnego przedsięwzięcia NCBiR oraz GDDKiA,” 2019.
- [199] Projekt RoSE RID 3A, “Urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego, Projekt zrealizowany w ramach wspólnego przedsięwzięcia NCBiR oraz GDDKiA,” 2019.
- [200] Pzp, Dz. U. 2016 r., P. 102., *Ustawa z dnia 22 czerwca 2016 r. o zmianie ustawy – Prawo zamówień publicznych oraz niektórych innych ustaw*. 2016.
- [201] Qin, X., Cutler, C. E., “Review of Road User Costs and Methods,” 2013.
- [202] Retallack, A. E., Ostendorf, B., “Relationship Between Traffic Volume and Accident Frequency at Intersections,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 4, p. 1393, Feb. 2020,
- [203] Roads Liaison Group, “Guidance Document for Highway Infrastructure Asset Valuation,” 2010.
- [204] Robinson, R., Danielson, U., Snaith, M., *Road Maintenance Management*. London: Macmillan Education UK, 1998.
- [205] Romanowska, A., “Makroskopowe modele ruchu potoku pojazdów na odcinkach międzywęzłowych autostrad i dróg ekspresowych. Rozprawa doktorska,” 2019.
- [206] Roque, C., Cardoso, J. L., “Investigating the relationship between run-off-the-road crash frequency and traffic flow through different functional forms,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 63, pp. 121–132, 2014,
- [207] Russo, B. J., “Guidance on the application of cable median barrier: Tradeoffs between crash frequency, crash severity, and agency costs,” Iowa State University, 2015.
- [208] Safi, M., “Bridge Life Cycle Cost Optimization : Analysis, Evaluation and Implementation,” Royal Institute of Technology, 2009.
- [209] Sambrekar, A. ., Vishnu, C. R., Sridharan, R., *Maintenance strategies for realizing Industry 4.0: An overview. Emerging Trends in Engineering, Science and Technology for Society, Energy and Environment*. CRC Press, 2018.
- [210] Sayeh, W. A. W., “Optimization of pavement rehabilitation scheduling and budget. Rozprawa doktorska,” 2023.

- [211] Simić, N., Ivanišević, N., Nedeljković, Đ., Senić, A., Stojadinović, Z., Ivanović, M., “Early Highway Construction Cost Estimation: Selection of Key Cost Drivers,” *Sustainability*, vol. 15, no. 6, p. 5584, Mar. 2023,
- [212] Singh, A., Varveri, A., “Quantification of lifecycle costs for porous asphalt life-extension maintenance methods under managerial uncertainties,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 25, no. 1, Dec. 2024,
- [213] Sitzabee, W. E., White, E. D., Dowling, A. W., “Degradation Modeling of Polyurea Pavement Markings,” *Public Work. Manag. Policy*, vol. 18, no. 2, pp. 185–199, Apr. 2013,
- [214] Siwowski, T., “Zintegrowana analiza cyklu życia w utrzymaniu mostów,” *Awarie Bud.*, vol. XXVI Konfe, 2013.
- [215] Siwowski, T., Kaleta, D., “Katalog typowych konstrukcji drogowych obiektów mostowych i przepustów. Część I Kształtowanie konstrukcji,” 2019.
- [216] SMW Legal, “Raport z ekspertyzy w zakresie regulacji dotyczących kalkulacji kosztów cyklu życia budynków funkcjonujących w państwach UE wraz z ich szczegółową analizą,” 2017.
- [217] Stantec Consulting Ltd, “LCCA standard practice guideline - final report,” 2017.
- [218] Sundquist, H., Karoumi, R., “ETSI PROJECT (Stage 3) Bridge Life cycle Optimatisation,” 2007.
- [219] Światała, M., Regulska, K., “Life Cycle Cost Analysis As a Tool for Road Infrastructure Management – Selected Issues,” *Roads Bridg. - Drog. i Most.*, vol. 22, no. 4, pp. 347–362, 2023,
- [220] Szeremeta, M., Siwowski, T., “Zastosowanie analizy typu lcca do oceny wariantów modernizacji mostu,” *Arch. Inst. Inżynierii Lądowej*, vol. 18, pp. 203–214, 2014.
- [221] Szudy, M., “Efektywność ekonomiczna w ujęciu dynamicznym a sprawność systemu gospodarczego,” *Uniw. Ekon. w Katowicach*, 2013.
- [222] Szydło, A., Mackiewicz, P., “Badania i analizy kosztów budowy i utrzymania nawierzchni betonowych i asfaltowych,” *Przegląd Komun.*, vol. 73, no. 11, pp. 14–19, 2018.
- [223] Tkaczyk, S., Kuzincow, J., “Zarządzanie cyklem życia jako narzędzie zrównoważonego rozwoju,” *Pr. Nauk. Uniw. Ekon. we Wrocławiu*, vol. nr 377, no. 423, p. 7695, 2015.
- [224] TP3/2010, “Staviteľstve, Technické Podmienky. Metodika stanovenia finančných kritérií na výber hornej stavby vozoviek v cestnom,” 2010.
- [225] Transportation Department of California, “Life-Cycle Cost Analysis Procedure Manual,” 2013.
- [226] Tu, X. S., “Application of RISC for Road Safety Program Development,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 25, pp. 1920–1930, 2017,
- [227] Tumminello, M. L., Macioszek, E., Granà, A., Giuffrè, T., “A Methodological Framework to Assess Road Infrastructure Safety and Performance Efficiency in the Transition toward Cooperative Driving,” *Sustainability*, vol. 15, no. 12, p. 9345, Jun. 2023,
- [228] Tveter, E., Tomasgard, T., “How long do transport infrastructure last: evidences from Norwegian roads and rail network,” *Eur. Transp. Res. Rev.*, vol. 16, no. 1, 2024,
- [229] U.S. Green Building Council, “LEED v4. Reference Guide for Neighborhood Development,” 2018.
- [230] United Nations (UN), “Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future,” 1987.
- [231] United Nations General Assembly (UNGA), “Transforming our world: The 2030 Agenda for

- Sustainable Development (A/RES/70/1),” 2015.
- [232] Vogt, P., Thewes, M., “The calculation of life-cycle costs for road tunnels under the influence of uncertainties,” *Life-Cycle Sustain. Civ. Infrastruct. Syst. - Proc. 3rd Int. Symp. Life-Cycle Civ. Eng. IALCCE 2012*, no. December 2010, pp. 1036–1044, 2012.
- [233] Waka Kotahi NZ Transport Agency, *State highway geometric design manual*. 2002.
- [234] Wang, C., Wang, Z., Tsai, Y. C., “Piecewise multiple linear models for pavement marking retroreflectivity prediction under effect of winter weather events,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2551, pp. 52–61, 2016,
- [235] Wieczorek, D., “Modelowanie kosztów cyklu życia budynków z uwzględnieniem czynników ryzyka. Rozprawa doktorska,” 2018.
- [236] Wieczorek, D., Zima, K., Plebankiewicz, E., “Expert studies on the impact of risk on the life cycle costs of buildings,” *Arch. Civ. Eng.*, vol. LXIX, no. 4, pp. 105–123, Dec. 2023,
- [237] Wiktorowska, E., “Stosowanie kryterium kosztu opartego na LCC z zastosowaniem metody kalkulacji kosztów cyklu życia dla budynków w oparciu o przepisy Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 23 listopada 2021 r.,” 2022.
- [238] Williams, G. L., “Whole Life Cost-Benefit Analysis for Median Safety Barriers,” UK, 2007.
- [239] Wojewódzka-Król, K., Rolbiecki, R., *Infrastruktura transportu*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, 2009.
- [240] Wolters Kluwer Polska, “Katalogi wskaźników cen BISTYP,” 2010 -2024.
- [241] World Economic, World Economic Forum (WEF), *The Global Competitiveness Report*. Ge: Word Economic Forum, 2018.
- [242] Wübbenhorst, K. L., “Life cycle costing for construction projects,” *Long Range Plann.*, vol. 19, no. 4, pp. 87–97, Aug. 1986,
- [243] Xia, C. Y., “Construction and Application of Multivariate Linear Regression Model on Road Cost,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 556–562, pp. 807–811, May 2014,
- [244] Żabicki, P., Gardziejczyk, W., “Multicriteria analysis in planning roads - Part 1. Criteria in determining the alignment of regional roads,” *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.*, vol. 68, no. 2, pp. 345–350, 2020,
- [245] Załoga, E., Szaruga, E., “Analiza i prognozowanie jednostkowych kosztów wypadków drogowych na obszarze zabudowanym w Polsce,” *Zesz. Nauk. Uniw. Szczecińskiego*, vol. 813, no. 813, 2014.
- [246] ZDW Olsztyn, “Geo Ewid Master - Smart GEM,” 2023.
- [247] Zhang, Y., Wu, D., “Methodologies to Predict Service Lives of Pavement Marking Materials,” *J. Transp. Res. Forum*, vol. 45, no. 3, pp. 3–18, 2010,
- [248] Zofka, A., *Proaktywna strategia zarządzania elementami infrastruktury drogowej*, Studia i m. IBDIM, 2009.
- [249] Zou, Y., Tarko, A. P., “Barrier-relevant crash modification factors and average costs of crashes on arterial roads in Indiana,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 111, no. October 2017, pp. 71–85, 2018,
- [250] “Baza BDOT500 - baza danych obiektów topograficznych o szczegółowości zapewniającej tworzenie standardowych opracowań kartograficznych w skalach 1:500–1:5000.”

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 2.1 Wydatki inwestycyjne i utrzymaniowe na infrastrukturę drogową (udział PKB) w wybranych państwach UE w 2018 r.	6
Rys. 2.2 Cykl życia infrastruktury drogowej	8
Rys. 2.3 Koszty poniesione i prognozowane w kolejnych fazach cyklu obiektu	9
Rys. 2.4 Zrównoważony rozwój a) elementy koncepcji myślenia w cyklu życia b) polityka „3P”	15
Rys. 2.5 Strategie utrzymania infrastruktury drogowej	17
Rys. 2.6 Stopa dyskontowa a) stosowana w analizach NPV inwestycji drogowych b) wpływ zmian na wartość pieniądza	22
Rys. 2.7 Zmiany wartości stopy dyskontowej w Polsce w latach 2008–2024	23
Rys. 2.8 Elementy infrastruktury drogowej, w których uwzględniono długość życia w [176]	25
Rys. 2.9 Metody szacowania kosztów cyklu życia	31
Rys. 2.10 Powiązania pomiędzy czynnikami, modelami a składowymi kosztów LCC dróg	35
Rys. 2.11 Zestawienie modeli na gęstość zdarzeń z barierami ochronnymi a) drogi jednojezdniowe b) drogi dwujezdniowe	40
Rys. 2.12 Rozkład prawdopodobieństwa wystąpień obrażeń w skali KABCO oraz kosztów zdarzeń KZD w zależności od wskaźnika ciężkości SI	42
Rys. 2.13 Wpływ rodzaju bariery i natężenia ruchu drogowego na koszty cyklu życia	47
Rys. 3.1 Proces realizacji pracy doktorskiej	53
Rys. 4.1 Czas, etapy i składowe kosztów w cyklu życia	55
Rys. 4.2 Koncepcja metody szacowania kosztów cyklu życia elementów infrastruktury w metodzie wielokryterialnej	56
Rys. 4.3 Wybrane elementy infrastruktury drogowej oraz ich etapy cyklu życia uwzględnione w metodzie	57
Rys. 4.4 Ogólna klasyfikacja kosztów w metodzie szacowania kosztów cyklu życia elementów infrastruktury drogowej	62
Rys. 5.1 Schemat metodyki prowadzenia badań dla realizacji celów pracy doktorskiej	66
Rys. 5.2 Wybrane poligony badawcze na drogach a) krajowych b) wojewódzkich	68
Rys. 5.3 Schemat budowy baz danych a) dróg krajowych b) dróg wojewódzkich	70
Rys. 5.4 Przykład procedury agregacji odcinków referencyjnych do odcinków bazowych	71
Rys. 5.5 Fragment zinwentaryzowanej bazy danych	71
Rys. 5.6 Inwentaryzacja bazy SEWiK na podstawie współrzędnych GPS	74
Rys. 5.7 Widok fragmentu danych wejściowych do bazy uszkodzeń LifeRoSE	75
Rys. 5.8 Wizualizacja fragmentu bazy danych o odcinkach dróg wojewódzkich	76
Rys. 5.9 Przypisywanie budynków mieszkalnych do bazowych odcinków dróg wojewódzkich	77
Rys. 6.1 Wpływ falistości FA na koszty zdarzeń z barierami KZDB	83
Rys. 6.2 Charakterystyki ruchowe badanych odcinków dróg krajowych a) średniodobowe natężenie ruchu pojazdów SDR b) udział pojazdów ciężarowych z przyczepą UCP	84
Rys. 6.3 Udział ofiar w zdarzeniach z barierami	86
Rys. 6.4 Średni czas trwania zdarzeń z barierami	87
Rys. 6.5 Rozkład kosztów napraw barier z podziałem na ich rodzaj a) histogram z dopasowanymi rozkładami prawdopodobieństwa b) dystrybuenta empiryczna i teoretyczna	89
Rys. 6.6 Rozkład kosztów napraw KNA i liczby zdarzeń z barierami LZDB w miesiącach na wybranych odcinkach a) drogi S6 b) drogi S7	90
Rys. 6.7 Średni jednostkowy koszt napraw drogowych barier stalowych z podziałem na a) województwa b) PKB w regionie	91
Rys. 6.8 Gęstość obszarów zabudowanych na drogach wojewódzkich a) rozkład danych na odcinkach b) wykres pudełkowy	91
Rys. 6.9 Wykres zależności pomiędzy zmienną gęstość zdarzeń GZD a gęstością skrzyżowań GSK	93
Rys. 6.10 Średniodobowe natężenie ruchu pojazdów SDR a) rozkład danych na poligonie b) wpływ na gęstość zdarzeń GZD	94
Rys. 6.11 Koszty zdarzeń z pieszymi KZDP w zależności od występowania dróg dla pieszych – średnie oraz 95% przedziały ufności	96
Rys. 6.12 Dystrybenty rozkładów wskaźnika ASI dla różnych rodzajów barier	98
Rys. 6.13 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności wskaźnika intensywności zderzenia ASI od: a) ugięcia dynamicznego bariery DM, b) szerokości pracującej bariery WM	98
Rys. 6.14 Rozkłady wyników badań symulacyjnych zależności wskaźnika intensywności zderzenia ASI od: a) podatności bariery SS, b) prędkości poprzecznej pojazdów VPL	99
Rys. 6.15 Rozkład kosztów inwestycyjnych dla dróg krajowych a) histogram z dopasowanymi rozkładami prawdopodobieństwa b) dystrybuenta empiryczna i teoretyczna	100
Rys. 6.16 Wykres pudełkowy jednostkowych kosztów inwestycyjnych dróg krajowych z podziałem na występowanie lub brak tuneli	101
Rys. 6.17 Wykresy pudełkowe kosztów budowy barier stalowych z podziałem na typ i masę bariery w latach 2010–2024	102
Rys. 6.18 Rozkład jednostkowy kosztów budowy barier stalowych i linowych a) histogram empiryczny z dopasowanymi rozkładami prawdopodobieństwa b) dystrybuenta empiryczna	104

Rys. 6.19 Zmiany jednostkowych kosztów budowy barier drogowych stalowych w zależności od a) poziomu powstrzymywania (PP) dla poziomu powstrzymywania W2, b) szerokości pracującej (W)	105
Rys. 6.20 Zmiany jednostkowych kosztów budowy w zależności od rozstawu barier	105
Rys. 6.21 Wskaźnik kosztów demontażu a) histogram b) skumulowany rozkład	106
Rys. 6.22 Zmiana jednostkowych kosztów budowy barier stalowych w latach 2010–2024	107
Na rys. 6.23 przedstawiono porównanie wykresów pudełkowych oraz dystrybuant empirycznych wskaźnika odchyłeń kosztów budowy i kosztów remontu dróg dla pieszych WOK dla prawie 60 inwestycji.	109
Rys. 6.24 Porównanie wskaźnika odchyłeń kosztów budowy i remontu dróg dla pieszych WOK a) wykres pudełkowy b) dystrybuenta empiryczna	109
Rys. 7.1 Schemat czynników wpływających na składowe koszty w metodach LCC	110
Rys. 7.2 Macierz siły współzależności między analizowanymi zmiennymi wariantów lokalizacyjnych dróg krajowych	116
Rys. 7.3 Wykres zależności kosztów inwestycyjnych KIN trasy drogowej od długości trasy DL, występowania tunelu TUN i natężenia ruchu SDR	118
Rys. 7.4 Wykres zależności kosztów inwestycyjnych KIN trasy drogowej od długości trasy DL, jednostkowego PKB i natężenia ruchu SDR	119
Rys. 7.5 Wykresy zależności kosztów inwestycyjnych KIN trasy drogowej od długości wariantu DL oraz a) średniodobowego natężenia pojazdów SDR b) produktu krajowego brutto na mieszkańca JPKB	119
Rys. 7.6 Macierz siły współzależności między analizowanymi zmiennymi kosztów budowy a) barier stalowych b) barier linowych	124
Rys. 7.7 Wykres zależności kosztów budowy barier stalowych od a) ich masy WAG b) szerokości pracującej WM i typu barier	127
Rys. 7.8 Wykres zależności kosztów budowy barier linowych od szerokości pracującej WM i liczby lin LN	127
Rys. 7.9 Wykresy zależności kosztów budowy KBU barier od ich maksymalnej energii kinetycznej poprzecznej EKL oraz szerokości pracującej WM a) bariery stalowe b) bariery linowe	128
Rys. 7.10 Wykresy zależności kosztów szczegółowych budowy barier stalowych od ich masy a) koszty materiału KMs b) koszty robocizny i pracy sprzętu KRSs	130
Rys. 7.11 Wykres zależności kosztów szczegółowych budowy barier stalowych od szerokości pracującej WM oraz rodzaju bariery STR (jednostronna, dwustronna) a) koszty materiału KMs b) koszty robocizny i sprzętu KRSs	130
Rys. 7.12 Wykres zależności kosztów szczegółowych budowy barier stalowych od szerokości pracującej WM oraz liczby lin LN a) koszty materiału KMs b) koszty robocizny i sprzętu KRSs	131
Rys. 7.13 Wykresy zależności kosztów szczegółowych budowy barier linowych od ich maksymalnej energii kinetycznej poprzecznej EKL oraz szerokości pracującej WM a) kosztów materiałów KMI b) kosztów robocizny i pracy sprzętu KRSI	131
Rys. 7.14 Macierz siły współzależności między analizowanymi zmiennymi kosztów napraw a) barier stalowych b) barier linowych	134
Rys. 7.15 Wykres zależności kosztów naprawy KNA od długości uszkodzenia DU i maksymalnej energii poprzecznej EKL a) bariery stalowe b) bariery linowe	136
Rys. 7.16 Wykresy zależności kosztów napraw KNA (tys. PLN) bariery stalowej od długości uszkodzenia DU oraz a) normatywnej energii kinetycznej poprzecznej EKL b) produktu krajowego brutto na mieszkańca w regionie JPKB	137
Rys. 7.17 Prawdopodobieństwo wystąpienia ofiar w zdarzeniu z barierą ochronną w zależności od ASI	139
Rys. 7.18 Macierz siły współzależności między analizowanymi zmiennymi kosztów pojedynczych zdarzeń a) barier stalowych b) barier linowych	141
Rys. 7.19 Wykresy zależności wskaźnika intensywności ASIs bariery stalowej od podatności bariery Ss oraz a) masy pojazdu uderzającego w barierę MP b) prędkości poprzecznej pojazdu VPL	143
Rys. 7.20 Wykresy zależności wskaźnika intensywności ASI od prędkości poprzecznej pojazdu VPL dla różnych rodzajów barier	143
Rys. 7.21 Wykres pudełkowy zmiennej zależnej GZDB	146
Rys. 7.22 Macierz siły współzależności między analizowanymi zmiennymi gęstości zdarzeń z barierami	147
Rys. 7.23 Wykres zależności gęstości zdarzeń z barierami GZDB od natężenia pojazdów SDR i występowania łuków pionowych KIF oraz gęstości łuków poziomych GLU	149
Rys. 7.24 Wykresy zależności gęstości zdarzeń z barierami GZDB od średniodobowego rocznego natężenia pojazdów SDR oraz a) udziału pojazdów ciężarowych UCP b) prędkości dopuszczalnej na odcinku VDOP	149
Rys. 7.25 Wykres istniejących i prognozowanych zmian liczby zdarzeń drogowych do roku 2060 w Polsce	150
Rys. 7.26 Wykres istniejących i prognozowanych zmian wskaźnika roku prognozy liczby zdarzeń drogowych do roku 2060 w Polsce	151
Rys. 7.27 Wykres istniejących i prognozowanych zmian średniego udziału liczby wypadków drogowych w liczbie zdarzeń w Polsce	152
Rys. 7.28 Wykres istniejących i prognozowanych zmian średniej liczby ofiar w wypadku drogowym w Polsce	152
Rys. 7.29 Wykres istniejących i prognozowanych zmian liczby ofiar śmiertelnych w wypadkach drogowych w Polsce	153
Rys. 7.30 Wykres istniejących i prognozowanych zmian wskaźnika roku prognozy dla wypadków i ofiar wypadków drogowych w Polsce	154
Rys. 7.31 Porównanie modelu własnego oraz dostępnych modeli do danych rzeczywistych z badań symulacyjnych	155

Rys. 7.32 Porównanie udziału ofiar z barierami stalowymi w badaniach własnych i innych autorów	156
Rys. 7.33 Macierz siły współzależności między analizowanymi składowymi kosztów zdarzeń a) drogi dla pieszych b) drogi pieszo-rowerowe	162
Rys. 7.34 Wykres zależności gęstości zdarzeń na drogach wojewódzkich GZDW od natężenia pojazdów SDR i gęstości skrzyżowań GSK	165
Rys. 7.35 Wykresy zależności gęstości zdarzeń GZDW oraz średniodobowego natężenia ruchu SDR od a) gęstości skrzyżowań GSK b) udziału odcinków o ograniczonej widoczności UOW	165
Rys. 7.36 Wykres zależności gęstości wypadków GWP od gęstości zdarzeń GZDW i gęstości obszaru niezabudowanego GNZ	167
Rys. 7.37 Wykres zależności gęstości wypadków GWPR od gęstości zdarzeń GZDW i gęstości zabudowy GB	168
Rys. 7.38 Wykresy zależności gęstości wypadków z pieszymi GWP od gęstości skrzyżowań GSK oraz a) gęstości zdarzeń GZDW b) udziału obszaru niezabudowanego GNZ	168
Rys. 7.39 Wykres zależności gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych GCRZP od gęstości ofiar GOP i gęstości dróg dla pieszych GCH	171
Rys. 7.40 Wykres zależności gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych GCRZN od gęstości ofiar GON i gęstości infrastruktury dla pieszych i rowerzystów GIN	172
Rys. 8.1 Wpływ zmiennych niezależnych na koszty inwestycyjne wariantów tras	176
Rys. 8.2 Wpływ zmiennych niezależnych na koszty budowy barier a) stalowych b) linowych	177
Rys. 8.3 Wpływ na zmianę kosztów budowy barier linowych KBUI szerokości pracującej WM oraz a) liczba lin LN b) poziomu powstrzymywania barier EKL	178
Rys. 8.4 Wpływ zmiennych niezależnych na koszty napraw barier a) stalowych b) linowych	178
Rys. 8.5 Wpływ na zmianę kosztów naprawy barier linowych KNAI długości uszkodzenia DU oraz a) szerokości pracującej WM b) poziomu powstrzymywania barier EKL oraz jednostkowego PKB	179
Rys. 8.6 Wpływ zmiennych niezależnych na współczynnik intensywności przyspieszenia z barierami a) stalowymi b) linowymi	180
Rys. 8.7 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość zdarzeń z barierami na odcinku	181
Rys. 8.8 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość a) zdarzeń na drogach wojewódzkich b) wypadków z udziałem pieszych	182
Rys. 8.9 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość ofiar a) ogólną b) ciężko rannych i śmiertelnych z udziałem pieszych	182
Rys. 8.10 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych	183
Rys. 8.11 Wpływ na zmianę gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z pieszymi GCRZP a) natężenia ruchu SDR i udziału pojazdów ciężarowych UC b) udziału pojazdów ciężarowych UC i gęstości chodników GCH	184
Rys. 8.12 Wpływ na zmianę gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych z pieszymi GCRZP a) natężenia ruchu SDR i gęstości skrzyżowań GSK b) gęstości skrzyżowań GSK i gęstości chodników GCH	185
Rys. 8.13 Zmiana kosztów cyklu życia LCC w zależności od występowania lub braku dróg dla pieszych, natężenia ruchu SDR oraz a) minimalnego udziału pojazdów ciężarowych b) maksymalnego udziału pojazdów ciężarowych	186
Rys. 8.14 Zmiana kosztów cyklu życia LCC w zależności od występowania lub braku dróg dla pieszych oraz a) gęstości skrzyżowań GSK b) natężenia SDR oraz stopy dyskontowej a	186
Rys. 8.15 Wpływ zmiennych niezależnych na gęstość a) wypadków b) ofiar c) ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych i rowerzystów	187
Rys. 8.16 Wpływ zmiennych niezależnych na a) gęstość wypadków z niechronionymi uczestnikami ruchu b) gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych i rowerzystów	188
Rys. 8.17 Wpływ na zmianę gęstości ofiar ciężko rannych i śmiertelnych GCRZN natężenia ruchu SDR gęstości infrastruktury GIN oraz a) gęstości zabudowy mieszkalnej GB b) gęstości skrzyżowań GSK	189
Rys. 8.18 Koszty cyklu życia LCC w zależności od występowania lub braku dróg dla pieszych i rowerzystów a) natężenia pojazdów SDR b) gęstości zabudowy mieszkalnej GB	190
Rys. 9.1 Schemat procedury szacowania kosztów cyklu życia w metodzie ogólnej	199
Rys. 9.3 Prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji, ofiar w zdarzeniu z barierą ochronną w zależności od ASI	213
Rys. 9.4 Schemat przepływu potoku pojazdów według scenariusza A [198]	214
Rys. 9.5 Schemat przepływu potoku pojazdów według scenariusza B [198]	215

SPIS TABEL

Tab. 2.1 Zestawienie zagranicznych prac dotyczących analiz kosztów cyklu życia barier ochronnych	26
Tab. 2.2 Przykład dekompozycji składowych kosztów	30
Tab. 2.3 Zestawienie składowych kosztów cyklu życia i sposobu ich szacowania	33
Tab. 2.4 Zestawienie skali KABCO i AIS	42
Tab. 5.1 Zestawienie zmiennych z bazy danych o natężeniu ruchu pojazdów na drogach krajowych	73
Tab. 5.2 Zestawienie fragmentu bazy danych o ruchu pojazdów i pieszych	77
Tab. 5.3 Zestawienie zmiennych z bazy danych o natężeniu ruchu pojazdów na drogach krajowych	79
Tab. 5.4 Fragment bazy ekonomiczno-kosztowej dla wariantów tras dróg krajowych	80
Tab. 6.1 Gęstość łuków poziomych z podziałem na klasy dróg	82
Tab. 6.2 Wskaźnik krętości dróg z podziałem na klasy dróg	82
Tab. 6.3 Zestawienie zbiorcze danych o zdarzeniach z barierami drogowymi na przyjętym do badań poligonie w latach 2017–2019 z podziałem na klasy dróg	85
Tab. 6.4 Zestawienie zbiorcze danych o gęstościach zdarzeń z barierami drogowymi na przyjętym do badań poligonie w latach 2017–2019 z podziałem na klasy dróg	85
Tab. 6.5 Zestawienie zbiorcze danych o zdarzeniach z barierami w latach 2017–2019 z podziałem na rodzaj bariery	86
Tab. 6.6 Udział barier ochronnych na analizowanych odcinkach z podziałem na klasy dróg	87
Tab. 6.7 Jednostkowe koszty napraw w zależności od klasy dróg i rodzaju bariery	88
Tab. 6.8 Zestawienie zdarzeń z pieszymi i ich konsekwencje w zależności od rodzaju obszaru	92
Tab. 6.9 Podstawowe statystyki dotyczące gęstości zakrętów oraz udziału odcinków o ograniczonej widoczności na sieci dróg wojewódzkich	92
Tab. 6.10 Gęstość budynków z podziałem na klasy zabudowy	95
Tab. 6.11 Zestawienie zbiorcze danych o zdarzeniach z barierami drogowymi na przyjętym do badań poligonie w latach 2017–2019 z podziałem na klasy drogi	95
Tab. 6.12 Zestawienie zdarzeń z niechronionymi uczestnikami ruchu i ich konsekwencje	97
Tab. 6.13 Jednostkowe koszty inwestycyjne dróg krajowych z podziałem na klasy drogi	99
Tab. 6.14 Informacje kosztowe uzyskane od producentów barier i firm utrzymaniowych	102
Tab. 6.15 Zestawienie wybranych modeli wskaźnika zmian kosztów budowy barier ochronnych WSKB	108
Tab. 6.16 Zestawienie jednostkowych kosztów budowy infrastruktury dla pieszych i rowerzystów z lat 2014-2024 z IV kwartału	108
Tab. 7.1 Przyjęte warunki brzegowe modeli	115
Tab. 7.2 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych kosztów wariantowania tras dróg krajowych	116
Tab. 7.3 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli KIN dróg krajowych	117
Tab. 7.4 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych zależnych kosztów budowy drogowych barier	123
Tab. 7.5 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych kosztów budowy barier ochronnych	124
Tab. 7.6 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli KBU barier ochronnych stalowych i linowych	125
Tab. 7.7 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli KM oraz KRS barier ochronnych stalowych	128
Tab. 7.8 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli KM oraz KRS barier ochronnych linowych	129
Tab. 7.9 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych zależnych kosztów napraw drogowych barier	132
Tab. 7.10 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych kosztów naprawy barier ochronnych	133
Tab. 7.11 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli KNA barier ochronnych stalowych i linowych dla pojedynczych zdarzeń	135
Tab. 7.12 Parametry modelowania prawdopodobieństwa ofiar	138
Tab. 7.13 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych zależnych kosztów zdarzeń z pojedynczą barierą ochronną	140
Tab. 7.14 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych kosztów zdarzeń z pojedynczą barierą ochronną	140
Tab. 7.15 Zestawienie wybranych modeli ASI barier ochronnych stalowych, linowych i betonowych dla pojedynczych zdarzeń	142
Tab. 7.16 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych gęstość zdarzeń z barierami	146
Tab. 7.17 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli GZDB barier ochronnych	148
Tab. 7.18 Zestawienie współczynników udziału rodzajów ofiar w zdarzeniach w wypadkach drogowych z barierami	154
Tab. 7.19 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych zależnych składowych kosztów zdarzeń na drogach wojewódzkich	161
Tab. 7.20 Zestawienie podstawowych charakterystyk zmiennych niezależnych składowych kosztów zdarzeń na drogach wojewódzkich	161
Tab. 7.21 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli GZDW dróg wojewódzkich	164
Tab. 7.22 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli GWP, GWPR dla dróg wojewódzkich	166
Tab. 7.23 Zestawienie współczynników dla wybranych modeli GOP, GCRZP, GOPR, GCRZPR dla dróg wojewódzkich	170

Tab. 8.1 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę kosztów napraw barier stalowych i linowych przy wzroście wartości danej zmiennej niezależnej o 1%.....	179
Tab. 8.2 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę współczynnika ASI barier stalowych i linowych przy wzroście wartości danej zmiennej niezależnej o 1%.....	180
Tab. 8.3 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę gęstości zdarzeń z barierami ochronnymi przy wzroście wartości danej zmiennej niezależnej o 1%.....	181
Tab. 8.4 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę gęstości wypadków z pieszymi oraz gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych przy wzroście wartości danej zmiennej niezależnej o 1%....	184
Tab. 8.5 Zestawienie wpływu zmiennych niezależnych na zmianę gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych wśród pieszych i rowerzystów ruchu przy wzroście wartości danej zmiennej niezależnej o 1%.....	188
Tab. 9.1 Średni stopień wyposażenia dróg w bariery ochronne	196
Tab. 9.2 Średni koszt bariery w roku 2018	196
Tab. 9.3 Wartości wskaźników korekcyjnych WPL	203
Tab. 9.4 Zestawienie średnich jednostkowych kosztów barier w 2018 roku	205
Tab. 9.5 Zestawienie parametrów wzorów przyjętych do szacowania kosztów jednostkowych drogowych barier ochronnych	205
Tab. 9.6 Zestawienie jednostkowych kosztów napraw barier z podziałem na ich rodzaj i klasę drogi	209
Tab. 9.7 Zestawienie współczynników udziału rodzajów ofiar w zdarzeniach i w wypadkach drogowych z barierami.....	212
Tab. 9.8 Zestawienie wartości liczbowych współczynników $W_{ZD,s}$ udziału rodzaju scenariusza przepływu potoków pojazdów na analizowanym odcinku drogi	216
Tab. 9.9 Zestawienie modeli strat czasu na odcinku drogi w zależności od rodzaju zdarzenia i scenariusza przepływu potoku pojazdów.....	216
Tab. 9.10 Zestawienie średnich czasów trwania zdarzeń nieplanowanych i planowanych z barierami drogowymi	217
Tab. 9.11 Zestawienie wskaźników kosztów demontażu dla barier ochronnych	221

WYKAZ PODSTAWOWYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

Skrót	Oznaczenie
1, 2, 3	– numer wariantu, scenariusza
<i>a</i>	– stopa dyskonta
<i>ASI</i>	– wskaźnik intensywności przyspieszenia bariery
<i>B</i>	– bariery drogowe
<i>b</i>	– bazowa miara np. <i>GWNb</i> bazowa gęstość wypadków drogowych z niechronionymi uczestnikami ruchu k-tego rodzaju na j-tym odcinku dróg
<i>CPI</i>	– wskaźnik inflacji
<i>Cz</i>	– przepustowość bazowa odcinka drogi
<i>DL</i>	– długość odcinka
<i>DM</i>	– ugięcie dynamiczne bariery
<i>DU</i>	– długość uszkodzenia pojedynczej bariery
<i>EA</i>	– wskaźnik elastyczności łukowej (arc elasticity)
<i>EKL</i>	– maksymalna poprzeczna energia kinetyczna znormalizowana
<i>EKP</i>	– energia kinetyczna podłużna pojazdu uderzającego w drogową barierę ochronną
<i>FA</i>	– falistość odcinka drogi
<i>GB</i>	– gęstość zabudowy mieszkalnej na odcinku drogi
<i>GCH</i>	– gęstość dróg dla pieszych
<i>GCRZ</i>	– gęstość ofiar ciężko rannych i śmiertelnych na odcinku drogi
<i>GIN</i>	– gęstość dróg dla pieszych i rowerów
<i>GLU</i>	– gęstość łuków poziomych na odcinku drogi
<i>GNZ</i>	– udział (gęstość) obszaru niezabudowanego
<i>GOF</i>	– gęstość ofiar na odcinku drogi
<i>GSK</i>	– gęstość skrzyżowań na odcinku drogi
<i>GW</i>	– gęstość wypadków drogowych na odcinku drogi
<i>GZD</i>	– gęstość zdarzeń na odcinku drogi
<i>GZDW</i>	– gęstość zdarzeń na drogach wojewódzkich
<i>i</i>	– rok analizy
<i>j</i>	– kolejny odcinek drogi
<i>JKBU</i>	– jednostkowy koszt budowy
<i>JKCR</i>	– jednostkowy koszt ofiary ciężko rannej
<i>JKCRZ</i>	– jednostkowy koszt ofiary ciężko rannej i śmiertelnej
<i>JKEC</i>	– jednostkowe koszty emisji toksycznych związków spalin (np. NO _x , PM ₁₀)
<i>JKET</i>	– jednostkowe koszty emisji cieplarnianych związków spalin (np. CO ₂)
<i>JKK</i>	– jednostkowy koszt strat materialnych
<i>JKLR</i>	– jednostkowy koszt ofiary lekko rannej
<i>JKMB</i>	– jednostkowy koszt materiału potrzebnego do wykonania barier
<i>JKRSB</i>	– jednostkowy koszt robocizny i pracy sprzętu niezbędnego do wykonania barier
<i>JKRU</i>	– jednostkowe koszty utrzymania rutynowego (bieżących napraw) projektowanej infrastruktury
<i>JKST</i>	– jednostkowe koszty czasu podróży, strat czasu ponoszone przez użytkownika drogi
<i>JKSTR</i>	– jednostkowe koszty prac strukturalnych (okresowych remontów) projektowanej infrastruktury
<i>JKZ</i>	– jednostkowy koszt ofiary śmiertelnej
<i>JPKB</i>	– jednostkowy produkt krajowy brutto (na mieszkańca)
<i>JWEC</i>	– jednostkowy współczynnik emisji gazów cieplarnianych

k	– kolejny rodzaj elementu infrastruktury drogowej np. bariery drogowej
KBU	– koszty budowy infrastruktury drogowej
KEP	– koszty eksploatacji pojazdów związane z wystąpieniem zdarzenia z infrastrukturą drogową
KIF	– wskaźnik falistości odcinka
KIN	– koszty inwestycyjne ponoszone przez inwestora
KLI	– koszty likwidacji, demontażu oraz utylizacji infrastruktury drogowej
KM	– koszty materiałowe infrastruktury drogowej
KMO	– koszty modernizacji infrastruktury drogowej
KNA	– koszty naprawy infrastruktury drogowej
KNN	– koszty inne, czyli dodatkowe koszty ponoszone przez zarządcę drogi lub użytkownika dróg, które nie zostały uwzględnione w analizach kosztowych
KPL	– koszty planowania i projektowania infrastruktury
KPO	– koszty pozostałe infrastruktury drogowej
KRS	– koszt robocizny i pracy sprzętu niezbędnego do montażu infrastruktury drogowej
KRU	– koszty rutynowe infrastruktury drogowej
KS	– koszty stałe w cyklu życia infrastruktury drogowej
KST	– koszty czasu podróży, strat czasu związanych ze zdarzeniem drogowym
$KSTR$	– koszty strukturalne infrastruktury drogowej
$KŚR$	– koszty środowiskowe, emisji spalin samochodowych spowodowanych zakłóceniami wywołanymi zdarzeniami
$KŚRC$	– koszty emisji cieplarnianych związków spalin samochodowych spowodowanych zakłóceniami wywołanymi zdarzeniami
$KŚRT$	– koszty emisji toksycznych związków spalin samochodowych spowodowanych zakłóceniami wywołanymi zdarzeniami
KU	– kąt uderzenia pojazdu w barierę ochronną
KUB	– koszty utrzymania bieżącego infrastruktury drogowej
KUO	– koszty utrzymania okresowego infrastruktury drogowej
KUT	– koszty utrzymania (działania rutynowe i strukturalne) infrastruktury drogowej
KUZ	– koszty użytkowników dróg ponoszone w związku z funkcjonowaniem infrastruktury drogowej
KZ	– koszty zmienne w cyklu życia infrastruktury drogowej
KZD	– koszty zdarzeń drogowych
La	– długość drogi alternatywnej przejazdu pojazdów związana z wystąpieniem zdarzenia z infrastrukturą drogową
LCC	– szacowanie kosztów cyklu życia (life cycle costing)
LCR	– liczba ofiar ciężko rannych
$LCRZ$	– liczba ofiar ciężko rannych i śmiertelnych
LLR	– liczba ofiar lekko rannych
LOF	– ogólna liczba ofiar
LW	– liczba wypadków drogowych
LZ	– liczba ofiar śmiertelnych
LZD	– liczba zdarzeń
MP	– masa pojazdu uderzającego w drogową barierę ochronną
N	– niechronieni uczestnicy ruchu drogowego
NH	– średnie (godzinowe) natężenie ruchu potoku pojazdów
P	– piesi
$P(K_k)$	– prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji (braku ofiar) z k -tą barierą ochronną
$P(LR_k)$	– prawdopodobieństwo wystąpienia ofiary lekko rannej z k -tą barierą ochronną
$P(ofiar_k=j)$	– prawdopodobieństwo wystąpienia j -tego rodzaju ofiary z k -tą barierą ochronną

$P(Z_k)$	– prawdopodobieństwo wystąpienia ofiary śmiertelnej z k-tą barierą ochronną
PP	– praca przewozowa na odcinku drogi
PR	– piesi i rowerzyści
ROZ	– rozstaw słupków
SDR	– średniodobowe natężenie pojazdów
SKB	– średni koszt budowy bariery drogowej
$SLOF_i$	– średnia liczba ofiar w wypadku drogowym w i-tym roku
Ss	– podatność drogowej bariery ochronnej
STR	– typ bariery drogowej (jednostronna, dwustronna)
SWB	– stopień wyposażenia odcinka w bariery ochronne
T	– długość cyklu życia
TUN	– zmienna binarna reprezentująca występowanie lub brak tunelu
TZD	– czas trwania zdarzenia drogowego
UB	– udział barier w przekroju na odcinku drogi
UC	– udział pojazdów ciężarowych
UCP	– udział pojazdów ciężarowych z przyczepą
UCR	– udział ofiar ciężko rannych
UDE	– wskaźnik kosztów demontażu
ULR	– udział ofiar lekko rannych
$UOF_{w,o,b}$	– średni udział ofiar o-tego rodzaju w wypadku drogowym z k-tym rodzajem bariery w roku bazowym
UOW	– udział odcinków o ograniczonej widoczności
UW	– udział wypadków drogowych
UZ	– udział ofiar śmiertelnych
UZD	– udział zdarzeń drogowych
Va	– średnia prędkość przejazdu po drodze alternatywnej
$VDOP$	– prędkość dopuszczalna na odcinku drogi
VPL	– prędkość poprzeczna pojazdu uderzającego w drogową barierę ochronną
Vpo	– prędkość początkowa pojazdu
$VP\acute{s}r$	– średnia prędkość podróży na analizowanym odcinku drogi
WAG	– masa bariery
$WESC$	– wielkość emisji cieplarnianych związków spalin samochodowych
$WEST$	– wielkość emisji toksycznych związków spalin samochodowych
WKO	– wskaźnik krętości odcinka drogi
WM	– szerokość pracująca drogowej bariery ochronnej
WMU	– współczynnik modelu utrzymania drogi
WOK	– wskaźnik odchyień kosztów rzeczywistych do planowanych
WPL	– wskaźnik udziału kosztów prac projektowych
$WRPz$	– wskaźnik roku prognozy wypadków i ofiar wypadków drogowych
$WRPzd$	– wskaźnik roku prognozy zdarzeń
$WSKB$	– wskaźnik korekcyjny kosztów budowy barier
$W_{zd,s}$	– współczynnik udziału rodzaju scenariusza przepływu potoku pojazdów na analizowanym odcinku drogi
$ZD1$	– zdarzenia planowane
$ZD2$	– zdarzenia nieplanowane